



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROENERGIA

VANESSA FERREIRA ALVES

**CULTURA AGROENERGÉTICA EM AMBIENTES CASCALHENTOS: RELAÇÕES
ENTRE TEOR DE CASCALHO, ATRIBUTOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE EM
PLINTOSSOLOS PÉTRICOS ORIGINADOS DE ROCHAS METAMÓRFICAS DA
FORMAÇÃO COUTO MAGALHÃES**

Palmas, TO

2026

VANESSA FERREIRA ALVES

CULTURA AGROENERGÉTICA EM AMBIENTES CASCALHENTOS: RELAÇÕES ENTRE TEOR DE CASCALHO, ATRIBUTOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE EM PLINTOSSOLOS PÉTRICOS ORIGINADOS DE ROCHAS METAMÓRFICAS DA FORMAÇÃO COUTO MAGALHÃES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agroenergia Digital (PPGAD) da Universidade Federal do Tocantins (UFT), como requisito à obtenção do grau de Mestre em Agroenergia Digital.

Orientadora: Dra. Michele Ribeiro Ramos

Co-Orientadora: Me. Marta Eichemberger Ummus

Palmas, TO

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

A474c Alves, Vanessa Ferreira.
 CULTURA AGROENERGÉTICA EM AMBIENTES
 CASCALHENTOS: RELAÇÕES ENTRE TEOR DE CASCALHO,
 ATRIBUTOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE EM PLINTOSSOLÓS
 PÉTRICOS ORIGINADOS DE ROCHAS METAMÓRFICAS DA
 FORMAÇÃO COUTO MAGALHÃES. / Vanessa Ferreira Alves. –
 Palmas, TO, 2026.
 103 f.

 Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do
 Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-
 Graduação (Mestrado) em Agroenergia, 2026.

 Orientadora : Michele Ribeiro Ramos

 Coorientadora : Marta Eichemberger Ummus

 1. Plintossolos Pétricos. 2. Petroplintita. 3. Atributos químicos. 4.
 Glycine max L. I. Título

CDD 333.7

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de
qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que
citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime
estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha
catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

VANESSA FERREIRA ALVES

CULTURA AGROENERGÉTICA EM AMBIENTES CASCALHENTOS: RELAÇÕES ENTRE TEOR DE CASCALHO, ATRIBUTOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE EM PLINTOSSOLOS PÉTRICOS ORIGINADOS DE ROCHAS METAMÓRFICAS DA FORMAÇÃO COUTO MAGALHÃES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agroenergia Digital (PPGAD) da Universidade Federal do Tocantins (UFT), como requisito à obtenção do grau de Mestre em Agroenergia Digital.

Data de aprovação: ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof.^a. Dr.^a. Michele Ribeiro Ramos
Orientadora

Prof. Dr. Joênes Mucci Peluzio
Examinador interno

Dr. Leonardo José Motta Campos
Examinador externo

Dr. Alexandre Uhlmann
Examinador externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por sempre acreditar em mim e por todo o apoio, vocês foram essenciais ao longo dessa caminhada.

À minha orientadora, Professora Michele, agradeço o cuidado, dedicação e pelos valiosos ensinamentos, bem como por ter aceitado me guiar nesta trajetória.

Agradeço ao Alexandre, pela paciência ao ensinar e por toda a contribuição na execução desta pesquisa.

Agradeço aos alunos de iniciação científica, Gabriely, Ruan, Ana Clara, Sthael e Vitória, por todo o trabalho que executaram. Vocês também foram fundamentais nessa construção.

À CAPES agradeço pela concessão da bolsa, que possibilitou a realização desse sonho.

Agradeço a todos aqueles que encontrei ao longo dessa trajetória e que contribuíram, de alguma forma, para esta realização.

Por fim, e não menos importante, agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Agroenergia pela oportunidade de fazer parte do mestrado e aos professores por toda troca de conhecimento.

Em especial, *in memoriam*, à Professora Yolanda, por todo o carinho, dedicação ao ensinar seus alunos e pelos tantos conselhos.

À Geane, por toda dedicação ao programa e em ajudar os alunos.

Meu muito obrigada!

Vanessa Ferreira Alves

“Ninguém caminha sem aprender a caminhar, sem aprender a fazer o caminho
caminhando, refazendo e retocando o sonho pelo qual se pôs a caminhar.”

Paulo Freire

RESUMO

A expansão da cultura da soja para novas fronteiras agrícolas tem promovido a ocupação de áreas com Plintossolos Pétricos no estado do Tocantins, apesar das limitações associadas à elevada presença de petroplintita. Esses materiais conferem alta heterogeneidade ao solo e podem influenciar sua fertilidade, a disponibilidade de água, o desenvolvimento radicular, a nutrição das plantas e a produtividade das culturas. Nesse contexto, esta dissertação teve como objetivo compreender as relações entre o teor de cascalho, os atributos químicos e granulométricos do solo, o estado nutricional e os caracteres agronômicos da soja cultivada em Plintossolos Pétricos originados de rochas metamórficas da Formação Couto Magalhães, no município de Pium, Tocantins. O estudo integrou a caracterização dos atributos do solo, a avaliação do estado nutricional das plantas e a análise dos caracteres agronômicos da cultura, buscando compreender as respostas da soja à heterogeneidade desses ambientes. Os resultados contribuem para ampliar o conhecimento sobre as relações solo-planta em ambientes cascalhentos e fornecer subsídios para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis para o cultivo da soja em Plintossolos Pétricos.

Palavras-chave: Plintossolos Pétricos. Petroplintita. Atributos químicos. *Glycine max* L.

ABSTRACT

The expansion of soybean cultivation into new agricultural frontiers has promoted the occupation of areas with Petric Plinthosols in the state of Tocantins, Brazil, despite the limitations associated with the high occurrence of petroplinthite and gravel. These materials confer high soil heterogeneity and may influence soil fertility, water availability, root development, plant nutrition, and crop productivity. In this context, this dissertation aimed to understand the relationships among gravel content, soil chemical and particle-size attributes, plant nutritional status, and agronomic traits of soybean grown in Petric Plinthosols developed from metamorphic rocks of the Couto Magalhães Formation, in the municipality of Pium, Tocantins, Brazil. The study integrated the characterization of soil attributes, assessment of plant nutritional status, and analysis of crop agronomic traits to understand soybean responses to the heterogeneity of these environments. The results contribute to advancing knowledge of soil–plant relationships in gravelly environments and provide information to support the development of more efficient and sustainable management strategies for soybean cultivation in Petric Plinthosols.

Keywords: Petric Plinthosols. Petroplinthite. Chemical attributes. Glycine max L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização geográfica da área de estudo, correspondente à Fazenda Gaivota (Talhão 1), no município de Pium, estado do Tocantins, com indicação de sua posição em escala estadual e nacional.	43
Figura 2 – Localização da área de estudo e distribuição dos 102 pontos de amostragem georreferenciados na Fazenda Gaivota no município de Pium.	44
Figura 3 – Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) dos atributos químicos e granulométricos do solo, mostrando a distribuição das unidades amostrais em função dos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2). Símbolos e cores representam os intervalos de classes (IC) de teor de cascalho (%).	50
Figura 4 – Diagrama de dispersão entre os escores do primeiro componente principal (PCA 1) e o percentual de cascalho das amostras.	52
Figura 5 – Diagramas de dispersão entre os escores do primeiro componente principal (PCA 1) e os atributos químicos e granulométricos do solo (cálcio (Ca^{2+}), manganês (Mn^{2+}), fósforo (P – Mehlich), capacidade de troca catiônica (CTC), matéria orgânica (MO), saturação por bases (V%), soma de bases (SB) e Argila).	53
Figura 6 – Mapas de Cascalho, MO, CTC, SB e V% de um talhão da Fazenda Gaivota, Pium-TO.	55
Figura 7 – Mapas de Cascalho, P - Mehlich, Mn^{2+} , Ca^{2+} e Argila de um talhão da Fazenda Gaivota, Pium-TO.	56
Figura 8 – Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA), representando a distribuição das amostras em função dos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2), responsáveis por 49,17% e 22,33% da variância total. Os símbolos e cores representam as classes de teor de cascalho no solo, respectivamente.	58
Figura 9 – Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA), representando a distribuição das amostras em função do primeiro (PC1) e do terceiro componente principal (PC3), responsáveis por 49,17% e 16,89% da variância total, respectivamente. Os vetores indicam a contribuição e a direção de associação dos nutrientes foliares, enquanto os símbolos e cores representam as classes de teor de cascalho no solo, respectivamente.	59
Figura 10 – Diagramas de dispersão entre os escores do primeiro componente principal (PCA 1) e as concentrações foliares de Zn, P e Cu.	60

Figura 11 – Mapas de distribuição espacial de nutrientes foliares em soja de um talhão da Fazenda Gaivota, Pium-TO.....	62
Figura 12 – Localização das unidades amostrais e dos pontos de coleta das amostras de soja no Talhão 1 da fazenda Gaivota, no município de Pium.	84
Figura 13 – Biplot da Análise de Componentes Principais (ACP) dos caracteres agronômicos da soja, representando a distribuição das unidades amostrais em função dos dois primeiros componentes principais (PC1 = 42,5% e PC2 = 28,67%).	88
Figura 14 – Biplot da Análise de Componentes Principais (ACP) representando a distribuição das unidades amostrais nos eixos PC1 (42,5% da variância explicada) e PC3 (14,36%).....	90
Figura 15 – Dispersão entre o teor de cascalho (%) e os escores dos três primeiros componentes principais: (a) PC1, (b) PC2 e (c) PC3. Observou-se correlação negativa com o PC1 e positiva com o PC3, enquanto o cascalho não apresentou correlação significativa com o PC2. As linhas vermelhas indicam os ajustes lineares.	92
Figura 16 – Relação entre o número de grãos por planta (NGP) e massa média de grãos (MMG13), ambas transformadas em escala logarítmica.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Autovalores, percentuais de variância explicada e variância acumulada dos componentes principais obtidos por meio da PCA, aplicada à matriz de correlação das variáveis descritoras do solo nas unidades amostrais, considerando apenas os eixos que atenderam o critério de Kaiser ($\lambda_k \geq 1$).	49
Tabela 2 – Correlações entre as variáveis avaliadas e os três primeiros componentes principais, obtidos a partir das 102 unidades amostrais. Em negrito estão destacados os maiores valores de correlação para cada variável, indicando o eixo ao qual apresentam maior associação.....	51
Tabela 3 – Modelos de semivariograma ajustados aos atributos químicos e granulométricos do solo, com os respectivos parâmetros geoestatísticos efeito pepita (C_0); contribuição (C_1); patamar ($C_0 + C_1$); alcance (a) e índice de dependência espacial (IDE), bem como os valores da raiz do desvio quadrático médio (RMSD) e da correlação de Pearson (r), obtidos por validação cruzada da krigagem ordinária.....	54
Tabela 4 – Autovalores e percentual da variância explicada resultantes da Análise de Componentes Principais (PCA), aplicada à matriz de correlações das variáveis nutricionais foliares da soja nas unidades amostrais, considerando apenas aqueles componentes que atenderam ao critério de Kaiser ($\lambda_k \geq 1$).	57
Tabela 5 – Correlação das variáveis analisadas com os três primeiros componentes principais, considerando 101 unidades amostrais. Os coeficientes destacados em negrito representam a maior associação de cada variável com os respectivos eixos.	59
Tabela 6 – Modelos de semivariograma ajustados aos atributos nutricionais foliares da soja (P, S, Cu, Mn e Zn), com os respectivos parâmetros geoestatísticos (efeito pepita (C_0); contribuição (C_1); patamar ($C_0 + C_1$); alcance (A) e índice de dependência espacial (IDE) e os valores da raiz do desvio quadrático médio (RMSD) e da correlação de Pearson (r), obtidos por validação cruzada da krigagem ordinária.....	61
Tabela 7 – Autovalores e variância acumulada dos três componentes principais obtidos por meio da ACP, aplicada à matriz de correlação das variáveis descritoras da soja nas unidades amostrais, considerando apenas os eixos que atenderam o critério de Kaiser ($\lambda_k \geq 1$).	87

Tabela 8 – Correlações entre os escores dos componentes principais e os caracteres agronômicos. Valores em negrito indicam os coeficientes de maior associação com seus respectivos eixos.90

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	14
REFERÊNCIAS	16
1. INTRODUÇÃO	20
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
1.1.1 Plintossolos	22
1.1.1.1 Gênese dos Plintossolos.....	22
1.1.1.2 Morfologia e classificação dos Plintossolos.....	23
1.1.2 Aptidão e manejo dos Plintossolos Pétricos	25
1.1.3 Soja	28
1.2 CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS	33
2. INTRODUÇÃO	40
2.1 MATERIAL E MÉTODOS	42
2.1.1 Caracterização da área de estudo.....	42
2.1.2 Amostragem de solo e georreferenciamento.....	44
2.1.3 Análises laboratoriais	45
2.1.4 Análise estatística e processamento espacial	45
2.2 RESULTADOS	48
2.2.1 Atributos do solo	48
2.2.1 Nutrição foliar da soja	56
2.3 DISCUSSÃO	63
2.4 CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS	70
3. INTRODUÇÃO	78
3.1 MATERIAL E MÉTODOS	81
3.1.1 Caracterização da área de estudo.....	81
3.1.2 Avaliação dos caracteres agronômicos da soja.....	83
3.1.3 Análise estatística.....	85
3.2 RESULTADOS	87
3.3 DISCUSSÃO	93
3.4 CONCLUSÃO	98
REFERÊNCIAS	100

INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento da demanda mundial por alimentos, fibras e bioenergia tem impulsionado a expansão das áreas agrícolas em regiões tropicais, especialmente no Cerrado brasileiro, consolidando o país como um dos principais produtores agrícolas do mundo. Nesse contexto, a cultura da soja (*Glycine max* L.) destaca-se como uma das commodities de maior relevância econômica, constituindo importante fonte de proteína e óleo vegetal, além de matéria-prima para a produção de biocombustíveis. O avanço tecnológico associado ao melhoramento genético, à correção da fertilidade dos solos e ao desenvolvimento de sistemas de produção adaptados às condições tropicais permitiu significativa expansão da cultura para áreas anteriormente consideradas marginais à agricultura (Dall'Agnol; Hirakuri, 2008; Campos, 2011; CONAB, 2024).

Nas últimas décadas, a expansão da soja alcançou áreas da região MATOPIBA, especialmente no estado do Tocantins, considerado uma das últimas fronteiras agrícolas do país. Nessa região, extensas áreas ocupadas por Plintossolos Pétricos passaram a ser incorporadas ao sistema produtivo devido ao relevo favorável à mecanização agrícola, à disponibilidade de terras e ao regime pluviométrico compatível com a produção de grãos (Coelho et al., 2012; Lumbreras et al., 2015; Almeida et al., 2023). Entretanto, apesar da crescente utilização agrícola desses ambientes, ainda existem lacunas significativas quanto ao conhecimento dos fatores que condicionam o desempenho das culturas nesses solos.

Os Plintossolos constituem uma classe de solos caracterizada pela presença de horizontes enriquecidos em ferro, com ocorrência de plintita e/ou petroplintita, resultantes de processos pedogenéticos associados à segregação e ao endurecimento de compostos ferruginosos (Driessen; Deckers, 2001; Oliveira; Jacomine; Couto, 2017; Santos et al., 2025). No Brasil, essa classe ocupa aproximadamente 5% do território nacional, concentrando-se principalmente nas regiões Norte e Centro-Oeste, com destaque para o estado do Tocantins, onde os Plintossolos Pétricos representam uma das classes mais expressivas da paisagem (IBGE, 2019; Santos et al., 2025).

A elevada presença de petroplintita e cascalho confere aos Plintossolos Pétricos características físicas peculiares que influenciam diretamente o crescimento

das plantas. Entre as principais limitações destacam-se a redução do volume efetivo de solo explorável pelas raízes, a menor capacidade de retenção de água, o aumento da temperatura superficial do solo e as restrições ao desenvolvimento radicular, fatores que podem comprometer a produtividade agrícola, especialmente em períodos de deficiência hídrica (Lumbreras et al., 2015; Almeida et al., 2023; Almeida et al., 2025). Por outro lado, avanços recentes em práticas conservacionistas, sistemas de plantio direto, uso de plantas de cobertura e manejo da fertilidade têm demonstrado potencial para viabilizar a exploração sustentável desses ambientes (Ramos, 2022; Almeida et al., 2023).

Embora diversos estudos tenham descrito as limitações físicas dos Plintossolos Pétricos, ainda são escassas as informações sobre como a variabilidade espacial do teor de cascalho influencia os atributos químicos e granulométricos do solo, o estado nutricional das plantas e a produtividade da soja. Essa lacuna torna-se particularmente relevante diante da expansão agrícola sobre essas áreas, uma vez que o conhecimento das relações solo-planta constitui ferramenta essencial para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis.

Dessa forma, a presente dissertação teve como objetivo geral compreender as relações entre o teor de cascalho, os atributos químicos e granulométricos do solo, o estado nutricional e os caracteres agrônômicos da cultura da soja em Plintossolos Pétricos originados de rochas metamórficas da Formação Couto Magalhães, localizados no município de Pium, estado do Tocantins.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. E. M.; BUENO, J. A. R.; RAMOS, M. R.; UMMUS, M. E.; ALVES, V. F.; ROCHA, B. R.; COSTA, R. V. da; UHLMANN, A. de Os desafios da produção agrícola em plintossolos pétricos. *In*: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Tópicos em ciência do solo: volume 13, cap. 15. Viçosa, MG: SBCS, 2025.

ALMEIDA, R. E. M.; DIAS, T. S. dos S.; UHLMANN, A.; RAMOS, M. R.; EVANGELISTA, B. A.; COSTA, R. V. da; SIMON, J.; VIDAL-TORRADO, P. Uso agrícola dos Plintossolos Pétricos do oeste do estado de Tocantins. *In*. SANTOS, G. G. *et al.* (org.). **Guia de campo da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Goiás e Tocantins**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1155338>. Acesso em: 6 jun. 2025.

CAMPOS, M. C. Modernização da agricultura, expansão da soja no Brasil e as transformações socioespaciais no Paraná. **Revista Geografar**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 161–191, jun. 2011. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/geografar/article/view/23030>. Acesso em: 27 maio 2025.

COELHO, M. R.; FONTANA, A.; AVANZI, J. C.; UMMUS, M. E.; MARTINS, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P.; COSTA, T. V.; CIRQUEIRA, A. L. O.; DART, R. O.; SOUZA, J. S.; ÁGLIO, M. L. D. **Solos do campo experimental de Buritirana da Embrapa Pesca e Aquicultura, Município de Palmas - TO**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2012. (Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 214).

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO [CONAB]. Boletim da safra de grãos. **Conab**. Brasília, 6 set. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos?start=10>. Acesso em: 17 maio 2024.

DALL'AGNOL, A.; HIRAKURI, M. H. **Realidade e perspectivas do Brasil na produção de alimentos e agroenergia, com ênfase na soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2008.

DRIESSEN, P. M.; DECKERS, J. A. **Lecture notes on the major soils of the world**. [S. l.]: FAO, 2001. Disponível em: <https://www.fao.org/4/y1899e/y1899e00.htm>. Acesso em: 24 maio 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA [IBGE]. Banco de Dados e Informações Ambientais: um instrumento para organização e preservação. **BDiA**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>. Acesso em: 24 maio 2024.

LUMBRERAS, J. F.; CARVALHO FILHO, A. de; MOTTA, P. E. F. da; BARROS, A. H. C.; ÁGLIO, M. L. D.; DART, R. de O.; SILVEIRA, H. L. F. da; QUARTAROLI, C. F.; ALMEIDA, R. E. M.; FREITAS, P. L. de. **Aptidão agrícola das terras do Matopiba**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2015. (Embrapa Solos. Documentos, 179). Disponível

em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1025303>. Acesso em: 18 dez. 2024.

OLIVEIRA, V. A.; JACOMINE, P. K. T.; COUTO, E. G. Solos do Bioma Cerrados. *In*: CURI, N.; KER, J. C.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. (ed.). **Pedologia: solos dos biomas brasileiros**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2017. p. 177–226.

RAMOS, M. R. A. Review of Soybean Cultivation On Stony Soils in Tocantins, Brazil. **International Journal of Science and Research (IJSR)**, [S. l.], v. 11, p. 367-371, 2022. Disponível em: <https://www.ijsr.net/getabstract.php?paperid=SR22305001852>. Acesso em: 15 mar. 2024.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2025.

CAPÍTULO 1: PLINTOSSOLOS PÉTRICOS E A CULTURA DA SOJA: GÊNESE, CLASSIFICAÇÃO E DESAFIOS DE MANEJO NO CERRADO DO TOCANTINS

CHAPTER 1: PETRIC PLINTHOSOLS AND SOYBEAN CULTIVATION: GENESIS, CLASSIFICATION, AND MANAGEMENT CHALLENGES IN THE CERRADO OF TOCANTINS

RESUMO

Este capítulo apresentou uma análise abrangente sobre a dinâmica dos solos, partindo de suas definições fundamentais até a especificidade dos Plintossolos, com foco no cenário agrícola do estado do Tocantins. A fundamentação teórica permitiu compreender que a formação desses solos é marcada pelos processos de segregação e endurecimento de óxidos de ferro e alumínio resultando em horizontes diagnósticos complexos, onde a presença de plintita e petroplintita define tanto a morfologia quanto as limitações físicas do perfil. A revisão destacou que, historicamente, a alta pedregosidade e a baixa capacidade de retenção hídrica posicionavam os Plintossolos Pétricos como terras de aptidão restrita. No entanto, a análise dos dados recentes da CONAB e do IBGE revela uma mudança de paradigma com a ocupação desses solos pela cultura da soja (*Glycine max*) tem se intensificado na última fronteira agrícola do país. Isso se deve não apenas ao relevo favorável à mecanização e ao regime pluviométrico estratégico da região, mas principalmente aos avanços em biotecnologia e engenharia de solo. Concluiu-se que o manejo sustentável nessas áreas exige a superação de desafios como a acidez elevada e o aquecimento superficial do solo causado pela exposição de cascalhos. Estratégias como o plantio direto, a manutenção da palhada e a adubação de sistemas emergem como pilares para viabilizar a produção de grãos, garantindo que a exploração econômica não comprometa a integridade física desse recurso natural dinâmico e tridimensional.

Palavras-chave: Petroplintita; Aptidão agrícola; *Glycine max* L.

ABSTRACT

This chapter presented a comprehensive analysis of soil dynamics, ranging from fundamental definitions to the specificity of Plinthosols, with a focus on the agricultural scenario of the state of Tocantins. The theoretical framework allowed for an understanding that the formation of these soils is marked by the processes of segregation and hardening of iron and aluminum oxides, resulting in complex diagnostic horizons, where the presence of plinthite and petroplinthite defines both the morphology and the physical limitations of the profile. The review highlighted that, historically, the high stoniness and low water retention capacity positioned Petric Plinthosols as soils of restricted agricultural suitability. However, the analysis of recent data from CONAB and IBGE reveals a paradigm shift, as the occupation of these soils by soybean cultivation (*Glycine max*) has intensified in the country's last agricultural frontier. This is due not only to the favorable relief for mechanization and the strategic rainfall regime of the region, but primarily to advances in biotechnology and soil engineering. It was concluded that sustainable management in these areas requires overcoming challenges such as high acidity and surface soil warming caused by gravel exposure. Strategies such as no-till farming, crop residue maintenance, and systems fertilization emerge as key pillars to enable grain production, ensuring that economic exploitation does not compromise the physical integrity of this dynamic and three-dimensional natural resource.

Keywords: Petroplinthite. Agricultural suitability. *Glycine max* L.

1. INTRODUÇÃO

O solo representa um dos principais elementos constituintes de um ecossistema. É notável a ampla diversidade nas propriedades do solo, abrangendo aspectos físicos, químicos e biológicos. No entanto, suas características passam por transformações ao longo do tempo, resultado tanto de influências naturais quanto da intervenção humana (Gonçalves, 2019).

Conforme a definição da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (2025), o solo pode ser compreendido como um corpo natural tridimensional e dinâmico, composto por fases sólida, líquida e gasosa, formado por materiais minerais e orgânicos, ocupando a maior parte do manto superficial do planeta, contendo matéria viva, podendo sustentar vegetação natural e, em muitos casos, apresentar modificações resultantes da ação humana.

Para Gonçalves (2019), compreender o solo como um recurso natural é crucial, pois ele desempenha um papel direto ou indireto na sustentação dos campos agrícolas e pastagens, além de ser uma parte ativa do ciclo hidrológico e sustentar a biodiversidade.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), é responsável por agrupar em categorias os solos do Brasil, sendo classificados de acordo com as propriedades resultantes dos processos de gênese do solo, esses decorrentes da atuação dos fatores clima, relevo, material de origem, organismos vivos e ao tempo (Santos *et al.*, 2025).

A extensão global dos Plintossolos é estimada em cerca de 60 milhões de hectares. A plintita é mais comum nos trópicos úmidos, principalmente na bacia da Amazônia Oriental, na bacia do Congo Central e em partes do Sudeste Asiático. Extensas áreas com pisolitos e petroplintita ocorrem na zona Sudano-Saheliana, onde a petroplintita forma capas duras no topo de elementos paisagísticos elevados/expostos. Solos semelhantes ocorrem na savana da África, no subcontinente indiano e em partes mais secas do Sudeste Asiático e do Norte da Austrália (Organização para Alimentação e Agricultura [FAO], 2006). Áreas com presença de petroplintitas também são encontradas frequentemente na América do Sul, nas regiões da Guiana Francesa, Bacia do Rio Amazonas e na Região Central do Brasil.

No Brasil, os Plintossolos representam 5% do território nacional, ocorrendo em maiores extensões nas regiões Norte e Centro-Oeste, as quais concentram, respectiva e aproximadamente, 50% e 28% das áreas de Plintossolos do País (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2019). As principais áreas com ocorrência desses solos, são as regiões da Amazônia (Alto Amazonas), Amapá, Ilha de Marajó, Pantanal Mato-grossense, Ilha do Bananal, Baixada Maranhense, Piauí Setentrional, Sudoeste do Tocantins e Norte do estado de Goiás (Santos *et al.*, 2025).

Os Plintossolos são encontrados em grande extensão territorial no estado do Tocantins, sendo que, de acordo com o IBGE (2019), o nível de subordem dessa classe mais recorrente no estado é a dos Plintossolos Pétricos, seguido pelos Plintossolos Argilúvicos e Plintossolos Háplicos.

Atualmente, a expansão agrícola vem ocorrendo fortemente nessas áreas, sendo que muitos produtores estão cultivando cada vez mais esses solos cascalhentos, apesar de serem considerados de difícil manejo e com baixa fertilidade (Lumbreras *et al.*, 2015). Segundo Coelho *et al.* (2012), a ocupação dessas áreas para a produção agrícola se dá principalmente por fazerem parte de uma das últimas fronteiras agrícolas do Brasil, aliado ao menor preço que essas terras apresentam e ao relevo (plano e suave ondulado) em que estão presentes, favorecendo a utilização de máquinas agrícolas. Além disso, o estado do Tocantins se destaca na produção agrícola de grãos, principalmente para o cultivo de soja e milho, que de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), obteve na safra 24/25 produções de, 5,86 milhões de toneladas de soja e 2,53 milhões de toneladas de milho.

No entanto, a disponibilidade limitada de informações técnicas e científicas sobre o manejo adequado dos Plintossolos Pétricos gera problemas quanto à conservação e utilização desse recurso natural, que de acordo com Coelho *et al.*, (2012), é comum encontrar relatos de técnicos e agricultores que destacam as diferenças observadas em áreas de Plintossolos Pétricos. Enquanto algumas regiões apresentam rendimentos elevados e sustentáveis de soja ao longo do tempo, outras são abandonadas após quedas drásticas na produtividade, principalmente após o primeiro cultivo ou em anos com menor desempenho.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1.1 Plintossolos

1.1.1.1 Gênese dos Plintossolos

Segundo Gidigasú (1976) e Tardy (1993), os Plintossolos começaram a serem estudados em 1807, na Índia pelo geógrafo inglês Buchanan. Inicialmente recebeu o nome de laterita (do latim 'later', que significa 'tijolo'), sendo definido como uma mistura rica em ferro, pobre em húmus, de argila caulínica e quartzo, constituído de material macio de fácil corte na ausência de ar, no entanto quando na presença de ar, apresentava endurecimento irreversível, o que o tornava excelente material para construção.

Ainda de acordo com Gidigasú (1976), apenas no final do século XIX, a laterita foi reconhecida como produtos de intemperismo tropical e subtropical de várias rochas ígneas cristalinas, sedimentares, metamórficas, depósitos detríticos e cinzas vulcânicas. Segundo a classificação de materiais lateríticos apresentado por Aleva (1986), o processo de formação desses materiais envolve o ambiente de formação, mecanismo de acumulação e composições mineralógicas e químicas. Para o autor, todo depósito de ferro, conhecido como ferricrete, é resultado de um transporte lateral variável de materiais, fisicamente ou em solução, sobre os quais o intemperismo local pode ser sobreposto.

Para Tardy (1993), a formação dessas couraças ferruginosas ocorre após longo processo de intemperismo, resultando nesses materiais com teores médios de Fe_2O_3 em torno de 40-60%, podendo atingir grandes espessuras.

No entanto, o que Buchanan descreveu como laterita, referia-se não a um perfil completo de solo, mas a um horizonte, hoje reconhecido como horizonte plíntico. Esse horizonte é caracterizado por apresentar segregações de ferro em padrões mosqueados, que, sob ciclos repetidos de saturação hídrica e secagem, podem evoluir para materiais endurecidos originando as petroplintitas (Driessen; Deckers, 2001; Oliveira; Jacomine; Couto, 2017).

Segundo Driessen e Deckers (2001), a plintita se forma em camadas de solo (sub)úmidas ao longo do tempo, envolvendo dois processos principais: a) o acúmulo de sesquióxidos devido à remoção de sílica e bases por hidrólise avançada, além da descarga de produtos de intemperismo dissolvidos. Isso resulta no acúmulo relativo

de sesquióxidos, quartzo e caulinita, que são mais resistentes ao intemperismo; ou b) o acúmulo de sesquióxidos por meio de enriquecimento externo ou absoluto, acompanhado pela segregação de ferro, que ocorre devido à alternância entre processos de redução e oxidação.

Ainda de acordo com os autores, em condições de saturação de água, o ferro está na forma ferrosa e “móvel”. Este ferro precipita como óxido férrico quando/onde as condições se tornam mais secas e não se dissolve ou se dissolve apenas parcialmente quando as condições se tornam mais úmidas novamente. Isso explica por que a plintita mostra um padrão típico de redistribuição com mosqueados vermelhos em uma configuração laminar, poligonal ou reticulada.

A plintita apresenta material macio, com baixo teor de carbono orgânico e alta concentração de ferro ou ferro e alumínio, composta por minerais argilosos, quartzo e outros minerais. Geralmente são solos ácidos, com baixo teor de nutrientes disponíveis e atividade da fração argila baixa. O Fe existente pode ser proveniente do material de origem, como translocado de outros horizontes ou proveniente de áreas adjacentes de maior elevação (Lepsch, 2011).

A petroplintita é formada a partir da plintita pela oxidação e endurecimento irreversível desses materiais ricos em ferro, após serem expostos a repetidos ciclos de umedecimento e secagem do solo (Embrapa, 2025).

De acordo com Driessen e Deckers (2001), o endurecimento da plintita envolve processos como, a cristalização de compostos amorfos de ferro em agregados contínuos de minerais de óxidos de ferro, especialmente a goethita (FeOOH), e pela desidratação da goethita (FeOOH) para hematita (Fe_2O_3) e, se presente da gibbsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) para boemita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Segundo Garcia *et al.*, (2013) os óxidos de ferro, como a goethita e a hematita, são os principais constituintes dos materiais ferruginosos, por exemplo, a petroplintita, e o material plíntico.

1.1.1.2 Morfologia e classificação dos Plintossolos

A morfologia dos Plintossolos é marcada pela presença de horizontes diagnósticos associados à concentração de ferro, principalmente sob a forma de plintita e petroplintita (Garcia *et al.*, 2013; Oliveira; Jacomine; Couto, 2017). Esses

horizontes apresentam características específicas, fundamentais para a identificação e classificação desses solos (Embrapa, 2025).

A plintita e a petroplintita definem o horizonte plíntico dos Plintossolos (Pétricos, Háplicos e Argilúvicos), sendo utilizado o termo concrecionário quando há grande quantidade de petroplintita no solo (Spera *et al.*, 2021). Essa plintita pode ser firme quando úmida ou dura a muito dura quando seca. Seu material apresenta diâmetro > 2mm e pode ser separada da fração solo (Oliveira; Jacomine; Couto, 2017). A diferenciação de plintita e petroplintita é de fácil realização, uma vez que apenas a plintita pode ser cortada com faca, pois apresenta consistência úmida firme a muito firme, por outro lado a petroplintita é muito firme a extremamente firme quando úmida, não sendo possível a realização de corte (Spera *et al.*, 2021).

A presença de cascalho na fração granulométrica dos Plintossolos é uma característica morfológica marcante, podendo variar significativamente em volume, desde pouco cascalhento (8 a 15% de cascalho), cascalhento (15 a 50%) até muito cascalhento (mais de 50%) (Souza, 1995). De acordo com Spera *et al.* (2021), a alta concentração de plintita presente nos centímetros iniciais da camada arável são responsáveis pelo rápido ressecamento do solo.

De acordo com Severiano *et al.* (2023), os Plintossolos Pétricos apresentam densidade variando entre 1,34 e 1,73 kg dm⁻³, e porosidade total entre 0,30 e 0,45 dm³ dm⁻³. Segundo os autores, esse comportamento é atribuído ao elevado conteúdo de material grosseiro, como cascalho e calhaus, presentes nos horizontes desses solos. Essas frações grosseiras, compostas por material maciço ou de baixa porosidade, resultam em menor desenvolvimento de agregados, o que, por sua vez, leva a uma menor macroporosidade e capacidade de retenção de água.

No que diz respeito à classificação, de acordo com Oliveira, Jacomine e Couto (2017) os Plintossolos são compostos por material mineral caracterizados pela presença de horizontes diagnósticos plínticos, concrecionários ou litoplínticos. A presença de materiais ferruginosos, como plintita ou petroplintita, é utilizada como propriedade diagnóstica para a caracterização desses solos.

Ainda de acordo com os autores, os Plintossolos são classificados em Plintossolos Pétricos, Plintossolos Háplicos e Plintossolos Argilúvicos. Os grandes grupos pétricos concrecionários, definidos pela presença do horizonte concrecionário ou litoplíntico, são bastante expressivos no Brasil Central, com composição caracterizada pela presença de petroplintita contínua ou fragmentada. Por outro lado,

os Plintossolos Argilúvicos e Háplicos apresentam horizonte plíntico não endurecido, possuem restrições de drenagem e são frequentemente utilizados no cultivo de arroz por inundação (Lumbreras *et al.*, 2015). A diferenciação entre essas classes de Plintossolos reflete tanto processos pedogenéticos distintos quanto potenciais de uso agrícola diferenciados.

Para que o horizonte plíntico seja considerado diagnóstico dos Plintossolos (com limitação física ao crescimento radicular), é necessário que ele ocorra nos primeiros 40 cm de profundidade e atenda a duas exigências: a quantidade de plintita e a espessura, respectivamente, maior ou igual a 15% em volume e maior ou igual a 15 cm. Já o horizonte petroplíntico, para ser considerado diagnóstico, também deve atender a exigências quanto à quantidade de petroplintita (maior ou igual a 50% do volume) e à espessura (no mínimo de 30 cm) (Oliveira; Jacomine; Couto, 2017).

De acordo com Dantas *et al.* (2019), os Plintossolos Pétricos localizam-se ao longo dos interflúvios dos terrenos intensamente dissecados das depressões do Araguaia-Tocantins, além dos planaltos elevados de Tocantins.

1.1.2 Aptidão e manejo dos Plintossolos Pétricos

Os Plintossolos Pétricos Concrecionários são considerados solos com alta capacidade de percolação de água. Em um estudo realizado por Cordeiro *et al.* (2021), para avaliar a velocidade de infiltração da água em um Plintossolo Pétrico concrecionário, os valores obtidos variaram entre 3,0 e 5,8 cm.h⁻¹, indicando que o solo apresenta uma capacidade de infiltração classificada como alta a muito alta.

Para Lumbreras *et al.* (2015), a alta concentração de petroplintita em diversos tamanhos dificulta a capacidade de retenção de água nos Plintossolos Pétricos e provoca severas limitações para o uso de maquinário agrícola, dificultando assim seu manejo. De acordo com Almeida *et al.* (2023), a maior limitação dos Plintossolos Pétricos, se dá pela baixa capacidade de armazenamento de água, comprometendo o desenvolvimento das plantas e consequentemente a produtividade de grãos. Ramos, Curcio, Dedeczek e Silva (2016), apontaram que a presença de petroplintita nos Plintossolos Pétricos, pode ser considerado limitante ao uso agrícola, pois de acordo com Lumbreras *et al.* (2015), a grande presença de cascalhos ou calhaus nesses solos, prejudicam o desenvolvimento de culturas, como a soja.

Carvalho Filho *et al.* (2023), ressaltam a importância de que solos que apresentam textura cascalhentas (mais de 15% da massa do solo ou da superfície do terreno estejam ocupadas por calhaus e matacões), não são considerados aptos para cultivo, sendo excluídos da avaliação do ZARC (Zoneamento Agrícola de Risco Climático).

A presença da petroplintita em alta concentração nos Plintossolos Pétricos, reduz o volume de solo disponível para exploração pelas raízes das plantas. Além disso, as petroplintitas presentes em horizontes superficiais absorvem a radiação solar, provocando aquecimento do solo, levando a queima de raízes e caules das plantas (Almeida *et al.*, 2023; Oliveira; Jacomine; Couto, 2017).

Apesar dessas limitações físicas, o estabelecimento inicial da cultura pode não ser necessariamente comprometido em ambientes com Plintossolos Pétricos. Campos *et al.* (2025), ao avaliarem diferentes populações de plantas de soja cultivadas em Plintossolos Pétricos e Latossolos no estado do Tocantins, observaram que o tipo de solo não influenciou a formação dos estandes planejados para as cultivares avaliadas. Os autores verificaram que parcelas com populações planejadas foram estabelecidas de forma uniforme em ambos os tipos de solo, indicando que, sob condições adequadas de manejo e disponibilidade hídrica no momento da semeadura, a emergência e o estabelecimento inicial da cultura podem ocorrer de forma satisfatória nesses ambientes.

Conforme Oliveira, Jacomine e Couto (2017), os Plintossolos Pétricos litoplínticos apresentam sérias restrições para o aprofundamento das raízes das plantas, pois a presença do horizonte petroplíntico nos 40 cm da superfície ou abaixo do horizonte E, impede o desenvolvimento do sistema radicular, prejudicando todo seu ciclo. Já no caso dos Plintossolos Pétricos litoplínticos arênicos, a principal limitação está associada à textura arenosa, que se estende desde a superfície até profundidades entre 0,5 m e 1,0 m, restringindo o armazenamento de água e o desenvolvimento radicular.

Segundo a Embrapa (2025), a deficiência na capacidade de armazenamento de água limita o manejo agrícola dos Plintossolos Pétricos. Além disso, esses solos são comumente caracterizados como pouco férteis, ácidos, com elevada quantidade de alumínio trocável e baixa capacidade de troca catiônica (CTC).

Silva *et al.* (2022), ao estudar o desenvolvimento do milho cultivado em vasos sob diferentes doses de fósforo em Plintossolos Pétricos Concrecionários, verificaram

que áreas com maior porcentagem de cascalho no solo influenciaram significativamente o desenvolvimento da espiga e a produção de grãos, obtendo resultados inferiores a áreas com menor teor de cascalho.

Durante sua pesquisa de revisão sobre a produtividade da soja em solos pedregosos, Ramos (2022) constatou que, ao adotar práticas de manejo conservacionista, como sucessão de culturas e adubação verde, é possível obter bons rendimentos nesses solos, pois a presença de cobertura viva ou morta nessas áreas é fundamental para melhorar a estrutura desses solos, diminuir a temperatura da superfície, aumentar o teor de matéria orgânica, além de melhorar o armazenamento de água.

Em um Plintossolo cultivado com cana-de-açúcar e com deposição de diferentes proporções de palhada, Cunha *et al.* (2012) evidenciaram que a utilização da biomassa, resultante da colheita da cana, na cobertura do solo, contribuiu para o aumento do teor de carbono orgânico no solo.

Para Almeida *et al.* (2023), práticas de manejo, como correção da acidez do solo, são capazes de promover o crescimento do sistema radicular em maior profundidade, aumentando a área explorada pelas raízes das plantas e diminuindo o impacto da menor retenção de água dos Plintossolos Pétricos sobre o desenvolvimento das culturas. Os autores ainda destacam a importância da adoção de estratégias de manejo a fim de propiciar maior proteção do solo, como utilização de plantas de cobertura e aumento da matéria orgânica, reduzindo perdas de água por evaporação.

Marquardt *et al.* (2023), avaliando a produtividade da soja em diferentes manejos (grade e sucessão com milheto, sorgo, milho e crotalária) em Plintossolo Pétrico, observaram que o manejo com o milho obteve melhores resultados de produtividade, decorrentes da adubação residual aplicada nessa cultura. Os autores também constataram que o uso da grade no preparo do Plintossolo Pétrico proporcionou um melhor revolvimento do solo, melhorando as condições na região próxima às raízes.

Os Plintossolos Pétricos Concrecionários, de acordo com Oliveira (2008), apresentam alta concentração (> 50%) de concreções que podem ser encontrados desde 0,4 m da superfície até 2,0 m de profundidade. O autor relata que a presença dessas concreções na superfície ou em pouca profundidade, dificultam a preparação

do terreno para a semeadura, causam o desgaste dos implementos agrícolas e diminuem significativamente a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas.

Como descrito por Lumbreras *et al.* (2015), o uso antrópico dos Plintossolos Pétricos é, em sua maioria, voltado para pastagens extensivas. No entanto, segundo Almeida *et al.* (2023), o regime de chuvas tem possibilitado o cultivo de soja, que vem se expandindo nessas regiões de fronteira agrícola. Isso ocorre porque o regime hídrico durante a safra contorna a principal limitação desses solos, que é a menor capacidade de retenção de água.

Em sua maioria os Plintossolos são considerados como solos de aptidão regular ou inapta a agricultura. Entretanto, com os avanços nos sistemas de produção e a acessibilidade dos produtores a corretivos e fertilizantes, a maquinários e sistemas de plantio direto, segundo Almeida *et al.* (2019), tornou-se possível o cultivo em solos com característica cascalhenta.

Segundo Almeida *et al.* (2025), os Plintossolos Pétricos que apresentam maior potencial agrícola, são os concrecionários, pois não apresentam horizonte litoplântico, formando camada de impedimento, prejudicando o desenvolvimento da cultura. Os autores ainda ressaltam que a utilização de sistemas que promovem o acúmulo de biomassa, por meio da produção de palhada, contribui significativamente para a conservação da umidade, redução da temperatura da superfície do solo e estimulam a atividade de microrganismos, sendo estratégias fundamentais para o uso sustentável de áreas com Plintossolos Pétricos Concrecionários.

O uso agrícola dos Plintossolos Pétricos requer atenção quanto às práticas adotadas, pois intervenções inadequadas podem intensificar suas limitações naturais. A utilização frequente de máquinas pesadas favorece a compactação do solo, o que compromete a drenagem e restringe o crescimento das raízes. A adoção de estratégias de manejo compatíveis com as características desses solos, aliada a políticas públicas voltadas ao incentivo de tecnologias apropriadas e ao monitoramento das áreas cultivadas, pode melhorar significativamente a eficiência produtiva e a conservação desses ambientes (Oliveira, Jacomine e Couto, 2017).

1.1.3 Soja

A soja (*Glycine max*) é uma das culturas mais importantes do mundo, sendo amplamente utilizada na alimentação humana e animal, na produção de óleo e

biocombustíveis, possuindo grande importância agrícola e econômica no Brasil. Ela é originária da China, onde foi domesticada há cerca de 5.000 anos, sendo citada e descrita pelo imperador chinês Sheng – Nung (A soja [...], 2024).

De acordo com a Embrapa (História [...], 2019), a evolução da soja se deu a partir do cruzamento natural de plantas de duas espécies de soja selvagem, que foram domesticadas e melhoradas por cientistas da antiga China. Apesar da civilização oriental já consumir e produzir a soja por milhares de anos, somente no final do século XV e início do século XVI, com as grandes navegações, é que o grão surge no ocidente. Entretanto apenas no século XVIII foi que pesquisadores europeus iniciam pesquisas com a soja para produção de óleo e nutriente animal.

De acordo com Miysakas e Medina (1981), foi apenas por volta do século XIX que a soja começou a ganhar espaço no continente americano, impulsionada pelo interesse da comunidade científica pelo produto, quando foram desenvolvidas pesquisas com objetivo de obter conhecimento sobre suas propriedades nutricionais e condições adequadas para o seu cultivo. Entretanto apenas no século XX os Estados Unidos iniciam o cultivo comercial da leguminosa, quando seu elevado teor de óleo e proteína atraiu o interesse da indústria global. A partir de 1919, com o fim da Primeira Guerra Mundial, a soja passou a assumir um papel de destaque no comércio internacional (A soja [...], 2024).

No Brasil, a cultura da soja foi introduzida de maneira definitiva, em 1914 no estado do Rio Grande do Sul, como alternativa para o sistema de rotação com o trigo (Câmara; Heiffig, 2006). No entanto, foi somente na década de 1960 que a soja ganhou importância comercial.

O crescimento das áreas cultivadas com soja no Brasil, nas décadas de 1970 e 1980, se deu principalmente pelas políticas de incentivos criadas pelo governo, incluindo financiamento agrícola e infraestrutura (Warnken, 2000). Segundo Cuiabano (2019), a década de 1970 pode ser considerada como o ano de consolidação da soja como principal lavoura do Brasil. De acordo com Campos (2011), a soja passou a ganhar espaço na região Centro-Oeste a partir da década de 1980, por meio da expansão da fronteira agrícola. Segundo Dall'Agnol e Hirakuri (2008), esse processo foi favorecido por diversos fatores, como a construção da rodovia Belém – Brasília, incentivos fiscais para aberturas de novas áreas, baixo valor das terras, boas condições pedológicas e topografia favorável à mecanização, entre outros.

A expansão da soja nas regiões Norte e Nordeste teve início a partir da última década do século XX, ocorrendo principalmente nos estados do Tocantins, Bahia, Maranhão e Piauí, por meio da conversão de áreas do Cerrado em porções produtivas, processo semelhante ao que já havia ocorrido na região Centro-Oeste (Dall'agnol; Hirakuri, 2008). Além disso, os autores destacam o avanço da cultura na porção sul dos estados de Rondônia e Amazonas, onde áreas antes cobertas por vegetação nativa da Floresta Amazônica foram convertidas em áreas de cultivo.

Nos últimos anos, a expansão da soja alcançou áreas do estado do Tocantins caracterizadas pelo predomínio de Plintossolos Pétricos. Apesar das limitações naturais desses solos, como alta pedregosidade, baixa capacidade de retenção hídrica e elevada acidez, sua ocupação tem sido impulsionada pela disponibilidade de extensas áreas com relevo plano, favorável à mecanização agrícola, e por um regime de chuvas adequado ao cultivo. Além disso, essas regiões integram a última fronteira agrícola do país, o que reforça seu potencial estratégico para a expansão da produção (Almeida *et al.*, 2023; Lumbreras *et al.*, 2015).

O desenvolvimento da soja é altamente dependente de fatores climáticos, principalmente a temperatura, a disponibilidade hídrica e o fotoperíodo. Farias, Nepomuceno e Neumaier (2007) apontam que as melhores temperaturas para a produção da soja oscilam entre 20 °C e 30° C, e regiões que apresentem temperatura igual ou menor que 10 °C são consideradas impróprias para seu cultivo, pois nessas condições o crescimento vegetativo da soja é pequeno ou nulo. Por outro lado, temperaturas superiores a 40 °C, afetam negativamente a floração e reduzem a capacidade de retenção de vagens. Os autores ainda destacam que a cultura apresenta sensibilidade ao fotoperíodo, sendo uma característica variável entre as cultivares, considerada assim uma planta de dia curto.

Quanto a necessidade de água na cultura da soja, varia entre 450 e 800 mm/ciclo, sendo de grande importância em dois momentos de desenvolvimento da planta, germinação-emergência e floração-enchimento de grãos (Embrapa Soja, 2013). Conforme descrito por Taiz (2017), a escassez de água na planta gera reações como o fechamento estomático até a queda das folhas e abortamento de estruturas reprodutivas, causando queda na produtividade da planta. A soja tem preferência por solos bem drenados, com textura média, boa fertilidade, pH entre 6,0 e 7,0 e alta disponibilidade de nutrientes.

O avanço da soja em regiões tropicais do Brasil só foi possível graças a importantes conquistas no campo do melhoramento genético, liderada pela Embrapa e instituições parceiras, que desenvolveram cultivares adaptadas ao Bioma Cerrado. A introdução dessas cultivares, aliada às pesquisas voltadas à correção da fertilidade do solo, até então considerados impróprios para o cultivo da soja, provocou uma revolução no cultivo da leguminosa em áreas tropicais, elevando significativamente sua produção no Cerrado (Campos, 2011; Dall'agnol; Hirakuri, 2008).

Roessing, Sanches e Michellon (2005) destacam que o desenvolvimento tecnológico foi fundamental para o crescimento da produção de soja no Brasil, contribuindo para que o país se consolidasse entre os principais produtores da cultura.

As áreas cultivadas com soja no Brasil estão distribuídas nas regiões Centro-Oeste, Sul, Sudeste, Nordeste e Norte do país. O estado do Mato Grosso lidera a produção nacional, seguido pelo Paraná, Rio Grande do Sul e Goiás (IBGE, 2024). Na safra de 2023/24, o Brasil plantou uma área de 46 milhões de hectares de soja, alcançando uma produção de 147,4 milhões de toneladas (Companhia Nacional de Abastecimento [CONAB], 2024).

De acordo com o Cepea (Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada), o PIB total da cadeia da soja e do biodiesel cresceu 21% em 2023 em relação ao ano anterior, resultando em uma contribuição estimada de R\$ 635,9 bilhões para a economia brasileira.

1.2 CONCLUSÃO

A análise detalhada dos aspectos pedológicos e agrônômicos apresentada neste capítulo permite concluir que os solos, embora dinâmicos e resilientes, exigem uma compreensão profunda de suas limitações intrínsecas para que sua exploração seja viável a longo prazo. No caso específico dos Plintossolos Pétricos, a transição do material plíntico para horizontes endurecidos por petroplintitas impõe desafios únicos que transcendem a fertilidade química convencional, incidindo diretamente na física do solo e na dinâmica hídrica das culturas.

Observou-se que a expansão da soja sobre essas áreas no estado do Tocantins é um fenômeno condicionado pela topografia favorável e pelo valor da terra, mas o seu sucesso produtivo está estritamente vinculado à capacidade do produtor em mitigar o "efeito cascalho". A conclusão central é que esses solos não são "inaptos"

por natureza, mas sim "dependentes de tecnologia". O impedimento físico ao crescimento radicular e a reduzida microporosidade, que limita a reserva de água em períodos de veranico, exigem que o manejo ultrapasse a simples correção de pH e adubação, focando na construção de perfis de solo com alto teor de matéria orgânica e cobertura vegetal permanente. Por fim, a consolidação desta fronteira agrícola depende de um monitoramento técnico rigoroso. Portanto, este referencial teórico serve como base para justificar a necessidade de pesquisas aplicadas que busquem otimizar o uso sustentável desse recurso, garantindo que o Tocantins continue a elevar sua produtividade de grãos sem comprometer a integridade de seus ecossistemas.

REFERÊNCIAS

- ALEVA, G. J. J. Classification of laterites and their textures. **Geological Survey of India, Memoir**, [S. l.], v. 120, p. 8-28, 1986.
- ALMEIDA, K. N. S. de; SILVA, J. L. da; NÓBREGA, J. C. A.; RATKE, R. F.; SOUZA, K. B. de. Aptidão agrícola dos solos do estado do Piauí. **Nativa**, Sinop, v. 7, n. 3, p. 233-238, maio/jun. 2019.
- ALMEIDA, R. E. M.; BUENO, J. A. R.; RAMOS, M. R.; UMMUS, M. E.; ALVES, V. F.; ROCHA, B. R.; COSTA, R. V. da; UHLMANN, A. de Os desafios da produção agrícola em plintossolos pétricos. *In*: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Tópicos em ciência do solo: volume 13, cap. 15. Viçosa, MG: SBCS, 2025.
- ALMEIDA, R. E. M.; DIAS, T. S. dos S.; UHLMANN, A.; RAMOS, M. R.; EVANGELISTA, B. A.; COSTA, R. V. da; SIMON, J.; VIDAL-TORRADO, P. Uso agrícola dos Plintossolos Pétricos do oeste do estado de Tocantins. *In*. SANTOS, G. G. *et al.* (org.). **Guia de campo da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos**: RCC de Goiás e Tocantins. Brasília, DF: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1155338>. Acesso em: 6 jun. 2025.
- A SOJA – a origem do grão. **Aprosoja**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://aprosojabrasil.com.br/a-soja/>. Acesso em: 06 maio 2025.
- CÂMARA, G. M. de S.; HEIFFIG, L. S. **Agronegócio de plantas oleaginosas: matérias-primas para biodiesel**. Piracicaba: ESALQ/LPV, 2006.
- CAMPOS, L. J. M. ALMEIDA, R. E. M.; EVARISTO, A. B.; HIROSE, E.; COSTA, R. V.; SILVA FILHO, J. L. Can an increase in plant population benefit or impede soybean crop productivity in Petric Plinthosols? **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 46, n. 3, p. 711–728, maio/jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2025v46n3p711>.
- CAMPOS, M. C. Modernização da agricultura, expansão da soja no Brasil e as transformações socioespaciais no Paraná. **Revista Geografar**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 161–191, jun. 2011. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/geografar/article/view/23030>. Acesso em: 27 maio 2025.
- CARVALHO FILHO, A. de; LUMBRERAS, J. F.; OLIVEIRA, A. P. de; COELHO, M. R.; OLIVEIRA, V. A. de; SILVA, E. F. da; UHLMANN, A.; EVANGELISTA, B. A.; ALMEIDA, R. E. M. Avaliação da aptidão agrícola das áreas de ocorrência dos solos da XIV RCC – estados de Goiás e Tocantins. *In*: SANTOS, G. S. **Guia de Campo da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos**: RCC de Goiás e Tocantins. Brasília, DF: Embrapa, 2023.
- COELHO, M. R.; FONTANA, A.; AVANZI, J. C.; UMMUS, M. E.; MARTINS, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P.; COSTA, T. V.; CIRQUEIRA, A. L. O.; DART, R. O.; SOUZA, J. S.; ÁGLIO, M. L. D. **Solos do campo experimental de Buritirana da Embrapa Pesca e Aquicultura, Município de Palmas - TO**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2012. (Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 214).

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO [CONAB]. Boletim da safra de grãos. **Conab**. Brasília, 6 set. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos?start=10>. Acesso em: 17 maio 2024.

CORDEIRO, D. G.; RAMOS, M. R.; UHLMANN, A.; CUSTODIO, D. P.; FREIRE, T. M.; SILVA, L. S. da. Análise do desempenho do modelo de Kostiaikov na determinação da velocidade básica de infiltração em Plintossolo Pétrico concrecionário. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, Viçosa, v. 11, n. 1, p. 135-142, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/rbas/article/view/11835/6688>. Acesso em: 18 nov. 2024.

CUIABANO, S. M. Principais fatores responsáveis pela expansão da soja no Brasil: Main Factors for Soy Expansion in Brazil. **Brazilian Journal of International Relations**, Marília, SP, v. 8, n. 3, p. 460–487, 2020. DOI: 10.36311/2237-7743.2019.v8n3.03.p460. Disponível em: <https://revistas.marilia.unesp.br/index.php/bjir/article/view/8803>. Acesso em: 27 maio 2025.

CUNHA, J. R. da; LEITE, L. F. C.; SANTIAGO, A. D.; BRASIL, E. L.; PIRES, V. P.; FILHO, J. V. da S.; ABREU, J. A. L. de. Indicadores biológicos da qualidade de um plintossolo cultivado com cana-de-açúcar e com deposição de diferentes proporções de palha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011, Uberlândia. **Anais [...]**. [Uberlândia]: SBCS: UFU, ICIAG, 2011.

DANTAS, M. E.; SHINZATO, E.; CARVALHO FILHO, A. de; LUMBRERAS, J. F.; TEIXEIRA, W. G.; ROCHA, M. G.; MACHADO, M. F. (org.). Origem das paisagens do estado do Tocantins. In: ROCHA, M. G. (org.). **Geodiversidade do Estado do Tocantins**. Goiânia: CPRM, 2019. cap. 4, p. 47-84. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1118037/origem-das-paisagens-do-estado-do-tocantins>. Acesso em: 24 maio 2024.

DALL'AGNOL, A.; HIRAKURI, M. H. **Realidade e perspectivas do Brasil na produção de alimentos e agroenergia, com ênfase na soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2008.

DRIESSEN, P. M.; DECKERS, J. A. **Lecture notes on the major soils of the world**. [S. l.]: FAO, 2001. Disponível em: <https://www.fao.org/4/y1899e/y1899e00.htm>. Acesso em: 24 maio 2024.

HISTÓRIA da Soja Embrapa. **Embrapa Soja**. [S. l., 202-]. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/historia#main-content>. Acesso em: 06 maio 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA [EMBRAPA]. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6.ed. Brasília, DF: Embrapa, 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA [EMBRAPA]. Soja em números (safra 2023/24). Embrapa Soja. Brasília, DF, 2024. Disponível de:

<https://www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 7 jul. 2024.

EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de produção de soja**: região Central do Brasil 2014. Londrina: Embrapa Soja, 2013.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007.

GARCIA, C. H. P.; LIMA, H. N.; SILVA, F. W. R.; JUNIOR, A. F. N.; TEIXEIRA, W. G.; MACEDO, R. S.; TAVARES, S. G. Chemical properties and mineralogy of soils with plinthite and petroplinthite in iranduba (AM), Brazil. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa. v. 37, n. 4. ago. 2013.

GIDIGASU, M. D. **Laterite Soil Engineering**: pedogenesis and engineering principles. Amsterdam: Elsevier, 1976.

GONÇALVES, A. K. **Sensoriamento Remoto para estimativa dos parâmetros físicos e químicos para fertilidade do solo da fazenda experimental Lageado**. 2019. 65 f. Orientador: Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual de São Paulo. Botucatu, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/9c488a60-d4e7-49f6-a519-b49f2979858e>. Acesso em: 6 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA [IBGE]. **Levantamento sistemático da produção agrícola**: estatística da produção agrícola. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA [IBGE]. Banco de Dados e Informações Ambientais: um instrumento para organização e preservação. **BDiA**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>. Acesso em: 24 maio 2024.

LEPSCH, I. F. **19 Lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LUMBRERAS, J. F.; CARVALHO FILHO, A. de; MOTTA, P. E. F. da; BARROS, A. H. C.; AGLIO, M. L. D.; DART, R. de O.; SILVEIRA, H. L. F. da; QUARTAROLI, C. F.; ALMEIDA, R. E. M.; FREITAS, P. L. de. **Aptidão agrícola das terras do Matopiba**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2015. (Embrapa Solos. Documentos, 179). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1025303>. Acesso em: 18 dez. 2024.

MARQUARDT, L.; RAMOS, M. R.; SANTOS, D. M. A. dos; MARQUARDT, G. Produtividade de cultivares de soja sob diferentes manejos em plintossolo pétrico. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 199-217, 2023.

MIYSAKAS, S., MEDINA, J.C (ed.). A soja no Brasil. Campinas: Ital, 1981.

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. 3. ed. Piracicaba: FEALQ, 2008.

OLIVEIRA, V. A.; JACOMINE, P. K. T.; COUTO, E. G. Solos do Bioma Cerrados. *In*: CURI, N.; KER, J. C.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. (ed.). **Pedologia: solos dos biomas brasileiros**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2017. p. 177–226.

ORGANIZAÇÃO PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. Grupo de Trabalho IUSS. **WRB - Base de referência mundial para recursos do solo: uma estrutura para classificação, correlação e comunicação internacional**. 2. ed. Roma: FAO, 2006. Relatórios Mundiais de Recursos do Solo, n.103.

RAMOS, M. R.; CURCIO, G. R.; DEDECEK, R. A.; SILVA, A. R. Potencial de uso dos solos: um estudo de caso de São Domingos do Araguaia–PA. **Revista Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, Belém, v. 13, n. 23, p. 79–95, 2016.

RAMOS, M. R. A. Review of Soybean Cultivation On Stony Soils in Tocantins, Brazil. **International Journal of Science and Research (IJSR)**, [S. l.], v. 11, p. 367-371, 2022. Disponível em: <https://www.ijsr.net/getabstract.php?paperid=SR22305001852>. Acesso em: 15 mar. 2024.

ROESSING, A. C.; SANCHES, A. C.; MICHELLON, E. As perspectivas de expansão da soja. CONGRESSO DA SOBER EM RIBEIRÃO PRETO, 43., 2005. São Paulo, 2005. **Anais [...]**. São Paulo: [S. n.], 2005.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2025.

SEVERIANO, E. da C.; SOUZA, I. R. M. de; SOUZA, L. G.; SANTOS, G. G.; COLLIER, L. S. Caracterização físico-hídrica de amostras de solos da XIV RCC, estados de Goiás e Tocantins. *In*: SANTOS, G. G. *et al.* (org.). **Guia de campo da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Goiás e Tocantins**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1155338>. Acesso em: 6 jun. 2025.

SILVA, A. L. D.; RAMOS, M. R.; SANTOS, D. M. A. dos; SOARES, M. M.; LOPES, M. C. da S.; SILVA, E. C. Cultivo do milho sob doses de fósforo em Plintossolos Pétricos Concrecionários. **Revista Agri-Environmental Sciences**, Palmas, TO, v. 8, ed. especial, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.36725/agries.v8i2.7749>. Acesso em: 26 abr. 2025.

SILVA, R. M. da; NEVES NETO, D. N. das; SANTOS, E. A. dos; LOPES, D. I. da S.; SANTOS, A. C. dos. Representação espaço-temporal da produção de soja no estado do Tocantins. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 12, n. 7, 2023.

SOUZA, C. G. *et al.* **Manual técnico de pedologia**. Brasília, DF: IBGE, 1995.

SPERA, S. T.; ABREU, D. C. de; ANDREASSE, K. F.; REIS, J. A. V. dos. Caracterização, distribuição geográfica, aptidão de uso e manejo de plintossolos em Mato Grosso. *In*: ROBERTO SOBRINHO, O. *et al.* (org.). **2º Vitrine tecnológica**

agrícola: atualidades na pecuária de corte para baixada cuiabana. Cuiabá: Agrisciences, 2021. p. 28-49.

TAIZ, L.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A.; ZEIGER, E. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. São Paulo: Artmed Editora, 2017.

TARDY, Yves. **Pétrologie des Latérites et des Sols Tropicaux**. Paris: Editora Masson, 1993.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

VIANA, J. H. M. **Determinação da densidade de solos e de horizontes cascalhentos**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, dez. 2008. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/491716/1/Com154.pdf> Acesso em: 5 jun. 2024.

WARNKEN, P. O futuro da soja no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, DF, v. 9, n. 2, p. 54–63, abr./jun. 2000.

CAPÍTULO 2: DISSOCIAÇÃO ESPACIAL ENTRE A FERTILIDADE DO SOLO E A NUTRIÇÃO DA SOJA EM AMBIENTES DE PLINTOSSOLO PÉTRICO

CHAPTER 2: SPATIAL DISSOCIATION BETWEEN SOIL FERTILITY AND SOYBEAN NUTRITION IN PETRIC PLINTHOSOL ENVIRONMENTS

RESUMO

A expansão agrícola sobre os Plintossolos Pétricos no Brasil impõe desafios ao manejo da fertilidade devido à elevada heterogeneidade estrutural causada pelo expressivo teor de cascalho. Diante disso, o presente estudo objetivou avaliar a relação entre o teor de cascalho, os atributos químicos e granulométricos do solo, e o estado nutricional da cultura da soja. A pesquisa foi conduzida em um talhão comercial de 96 hectares no município de Pium-TO. Foram realizadas amostragens de solo (0–20 cm) e de folhas diagnósticas de soja no estágio de florescimento em 102 pontos georreferenciados. Os dados foram submetidos à Análise de Componentes Principais (PCA) e à modelagem geoestatística por krigagem ordinária. A PCA revelou que o aumento do teor de cascalho está fortemente associado à redução de argila, aumento de areia e à maior concentração de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (CTC) e nutrientes (Ca, P, Mn, Soma de Bases) na fração de terra fina, refletindo um efeito de concentração devido à redução do volume de solo explorável. A análise geoestatística confirmou a forte dependência espacial para a maioria desses atributos do solo. Em contrapartida, a distribuição espacial e multivariada dos nutrientes foliares (P, Zn, Cu, Ca, Mn e S) não apresentou correlação com o gradiente de cascalho do solo, permanecendo, para a maioria dos nutrientes, dentro das faixas adequadas ao desenvolvimento da cultura. Conclui-se que o teor de cascalho altera significativamente a química e a física da terra fina nos Plintossolos Pétricos, contudo, essa expressiva variação no solo não refletiu em diferenças no estado nutricional das plantas de soja, evidenciando uma dissociação espacial entre os atributos do solo e a nutrição foliar.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Geoestatística; Cascalho; Fração grosseira; Fertilidade do solo; Glycine max.

ABSTRACT

Agricultural expansion over Petric Plinthosols in Brazil imposes challenges to fertility management due to the high structural heterogeneity caused by the significant gravel content. Given this context, the present study aimed to evaluate the relationship between gravel content, soil chemical and granulometric attributes, and the nutritional status of soybean crops. The research was conducted in a commercial field of 96 hectares in the municipality of Pium, Tocantins State. Soil sampling (0–20 cm) and diagnostic soybean leaf sampling were performed at the flowering stage at 102 georeferenced points. Data were subjected to Principal Component Analysis (PCA) and geostatistical modeling by ordinary kriging. PCA revealed that increasing gravel content is strongly associated with reduced clay content, increased sand content, and higher concentrations of organic matter, cation exchange capacity (CEC), and nutrients (Ca, P, Mn, Sum of Bases) in the fine earth fraction, reflecting a concentration effect due to the reduction in exploitable soil volume. Geostatistical analysis confirmed strong spatial dependence for most of these soil attributes. In contrast, the spatial and multivariate distribution of foliar nutrients (P, Zn, Cu, Ca, Mn, and S) showed no correlation with the soil gravel gradient, remaining within adequate ranges for crop development. It is concluded that gravel content significantly alters the chemistry and physics of the fine earth fraction in Petric Plinthosols; however, this expressive soil variation was not reflected in differences in the nutritional status of soybean plants, evidencing a spatial dissociation between soil attributes and foliar nutrition.

Keywords: Precision agriculture; Geostatistics; Gravel; Soil fertility;

2. INTRODUÇÃO

A crescente expansão da agricultura sobre novas fronteiras agrícolas no Brasil tem conduzido à incorporação de solos com características e limitações anteriormente pouco exploradas, como os Plintossolos Pétricos. Esses solos, presentes em cerca de 5% do território nacional, vêm ganhando destaque nas regiões Norte e Centro-Oeste, especialmente no estado do Tocantins, onde representam uma parcela significativa da paisagem pedológica, sendo os Plintossolos Pétricos a subordem mais frequente, seguidos pelos Plintossolos Argilúvicos e Plintossolos Háplicos (IBGE, 2019; Santos et al., 2025).

A gênese desses materiais está associada a longos processos de intemperismo, sob condições de alternância entre saturação hídrica e secagem, que promovem a concentração e posterior endurecimento dos óxidos de ferro, ocorrendo a formação da plintita e, posteriormente, da petroplintita (Driessen & Deckers, 2001; Tardy, 1993). Embora esses processos sejam relevantes para a compreensão da gênese desses solos, o aspecto funcional mais marcante dos Plintossolos Pétricos no contexto agrícola está relacionado à presença expressiva da fração cascalho.

A coexistência de dois componentes diferentes em solos cascalhentos, terra fina e cascalho, cria uma estrutura heterogênea no solo (Zhang et al., 2016). A ocorrência da petroplintita na fração cascalho em diferentes profundidades, afeta diretamente a estrutura, porosidade e capacidade de retenção hídrica do solo (Severiano et al., 2023). Em geral, os Plintossolos Pétricos apresentam acidez elevada, com baixo teor de nutrientes disponíveis e atividade da fração argila baixa (Lepsch, 2011).

Os Plintossolos Pétricos compartilham características funcionais com solos cascalhentos descritos em diferentes regiões do mundo. Estudos internacionais demonstram que solos com elevada fração grosseira apresentam restrição do volume explorável pelas raízes, redução da capacidade de armazenamento de água e concentração dos nutrientes na fração fina, o que pode resultar em respostas agrônômicas distintas, dependendo da interação entre textura, fertilidade e regime hídrico (Poesen & Lavee, 1994; Zhang et al., 2016; Zheng et al., 2021). Assim, embora os Plintossolos sejam restritos ao espaço intertropical, os processos que controlam seu funcionamento apresentam analogias diretas com solos pedregosos cultivados em outras regiões do mundo.

Apesar da baixa fertilidade natural e das limitações físicas impostas pela presença expressiva de petroplintita, como a reduzida capacidade de armazenamento de água e dificuldade de preparo mecanizado, esses solos vêm sendo progressivamente incorporados a lavouras comerciais, sobretudo a soja (*Glycine max*), por integrarem a última fronteira agrícola do país (Lumbreras et al., 2015; Almeida et al., 2023). A aptidão agrícola dos Plintossolos Pétricos, historicamente considerada regular ou inapta, vem tendo seu potencial produtivo reavaliado a partir da adoção de práticas de manejo conservacionistas e tecnologias voltadas à correção química e à melhoria da estrutura física, como o uso de palhada, adubação verde, sistema de plantio direto e aplicação de corretivos (Marquardt et al., 2023; Ramos, 2022). Entretanto, a aplicação uniforme de corretivos e fertilizantes em ambientes heterogêneos, como os Plintossolos Pétricos, pode resultar em desequilíbrios locais, sobretudo quando o volume de terra fina varia significativamente em função do teor de cascalho.

A heterogeneidade desses solos e a escassez de informações técnicas comprometem a tomada de decisões quanto ao manejo dos Plintossolos. Segundo Coelho et al. (2012), é comum observar situações contrastantes, áreas com produtividade estável ao longo dos anos coexistem com áreas que são rapidamente abandonadas após quedas drásticas no rendimento das culturas. Essas diferenças indicam que há fatores intrínsecos ao solo, como a granulometria, ou seja, a proporção de cascalho e a fertilidade, que podem influenciar de maneira significativa a produtividade agrícola, mas que ainda não são totalmente compreendidos (Ramos et al., 2025).

A presença de cascalhos e calhaus, além de dificultar a mecanização, reduz o volume de solo explorável pelas raízes (Almeida et al., 2023; Ramos, 2022). O armazenamento limitado de água e o aquecimento superficial provocado pela presença da petroplintita exposta também comprometem o desenvolvimento radicular e a produtividade, especialmente em períodos críticos do ciclo da soja (Leite et al., 2024).

Diante desse contexto, a elevada heterogeneidade física dos Plintossolos Pétricos, impõem desafios ao manejo da fertilidade, especialmente quando práticas de correção e adubação são realizadas de forma uniforme em áreas onde o volume de terra fina varia em função do teor de cascalho. Considerando que a maior parte dos fertilizantes é aplicada com base na fração fina do solo, é plausível supor que, em

ambientes com menor volume de terra fina, essa prática resulte em respostas químicas diferenciadas no solo.

Nesse sentido, compreender como a variação do teor de cascalho se relaciona com os atributos químicos e granulométricos do solo torna-se fundamental para avaliar a adequação do manejo de fertilidade em áreas cultivadas com soja sobre Plintossolos Pétricos.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar a relação entre o teor de cascalho e a propriedade química e granulométrica do solo em áreas com Plintossolos Pétricos.

2.1 MATERIAL E MÉTODOS

2.1.1 Caracterização da área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida em um talhão de 96 hectare na Fazenda Gaivota, localizada no município de Pium, TO, a 124 quilômetros de Palmas, região central do estado, conforme ilustrado na Figura 1. A área de estudo está localizada na Bacia Hidrográfica do Rio Formoso, correspondendo a faixas de dobramentos e coberturas metassedimentares do Proterozoico médio e superior. Predominam as formações geológicas Pequizeiro e Couto Magalhães (Seplan, 2012; Schobbenhaus; Neves, 2003). A unidade geológica Pequizeiro apresenta contato tectônico com as rochas da formação Xambioá em sua porção oriental. Sua composição predominante inclui xistos de clorita e quartzo, além de xistos cloríticos, intercalados com camadas de calcários xistosos, xistos talcosos, xistos de talco-actinolita, serpentinitos, metabásicos e filitos (Hasui et al., 1977). A formação Couto Magalhães é composta principalmente por rochas metamórficas de granulagem fina, como filitos, metassiltitos e metargilitos, representando um conjunto de litofácies típicas de origem pelítica. Na região, ocorrem extensas faixas de conglomerados polimíticos intercalados com metarcóseos (Souza & Moreton, 2001).

A região de estudo possui clima tropical com inverno seco, classificado como equatorial quente e úmido a semiúmido, caracterizado por duas estações bem definidas: uma chuvosa, de novembro a abril, e; outra seca, de junho a setembro, sendo os meses de maio e outubro transicionais. As precipitações médias anuais

variam entre 1.400 a 2.000 mm, com valores médios em torno de 1900 mm. A temperatura média anual é de aproximadamente 26 °C, com temperaturas máximas próximas a 32 °C e mínimas em torno de 20 °C. Sua cobertura vegetal nativa é aquela associada ao bioma de Cerrado com vegetação variando de campo cerrado, cerrado *sensu stricto* e cerradão (IBGE, 2021; SEPLAN, 2012; CPRM, 2009).

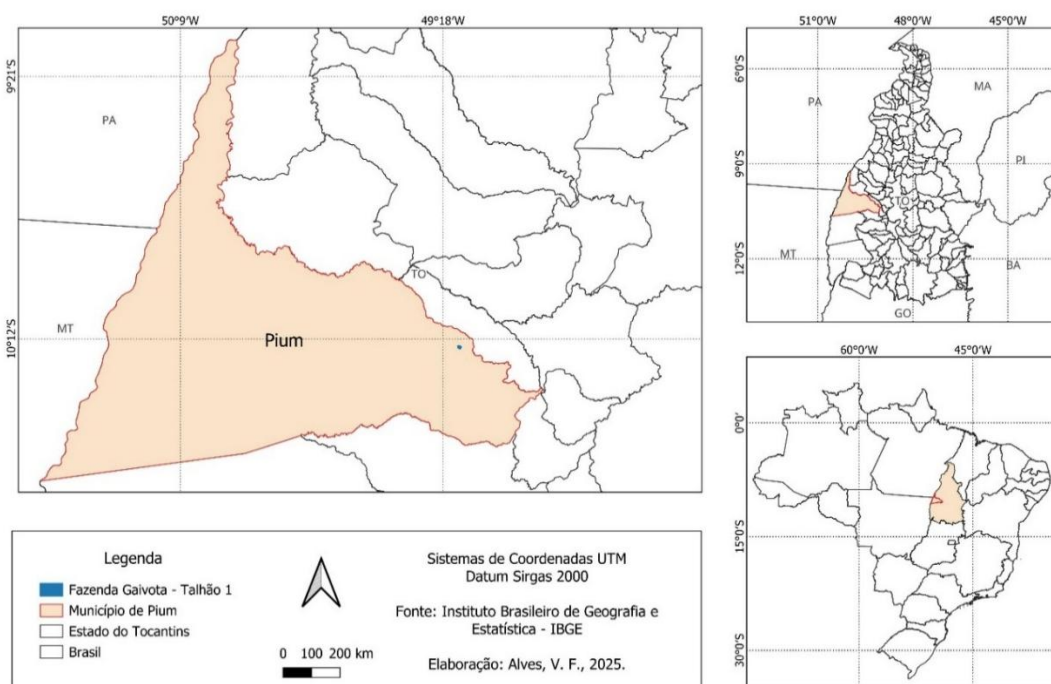


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo, correspondente à Fazenda Gaivota (Talhão 1), no município de Pium, estado do Tocantins, com indicação de sua posição em escala estadual e nacional.

De acordo com dados do IBGE (2023), o município de Pium-TO apresenta uma diversidade de classes de solos, com predominância de Plintossolo Pétrico concrecionário (FFc). Além dele, ocorrem, em menor extensão, Plintossolos Argilúvicos (FTd) e Háplicos (FXd) Distróficos, Gleissolos Háplicos Tb Distróficos (GXbd), Latossolos Vermelho-Amarelo Distróficos (LVAd), e diferentes tipos de Neossolos (RLd, RQo e RYbd). Essa variedade pedológica reflete a diversidade ambiental da região, sendo que nas áreas da fazenda estudada predominamos Plintossolos Pétricos, que são caracterizados pela presença de horizonte concrecionário superficial, alta concentração de cascalhos, baixa fertilidade natural e características de drenagem variável, o que impõe restrições ao uso agrícola intensivo.

2.1.2 Amostragem de solo e georreferenciamento

A classe de solo na área estudada corresponde aos Plintossolos Pétricos concrecionários e litoplínticos (SiBCS 2025). O local foi georreferenciado utilizando malha regular com densidade de 4 pontos por hectare. As amostras de solos foram coletadas na profundidade de 0 – 20 cm, totalizando 102 pontos em um talhão da Fazenda Gaivota cultivado com soja. A distribuição dos 102 pontos amostrais está ilustrada na figura 2.

Posteriormente, foram realizadas coletas de folhas diagnósticas da soja no estágio de florescimento, com objetivo de quantificar os teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn), conforme metodologia descrita por Souza e Lobato (2004). A amostragem constitui na coleta do terceiro trifólio completamente desenvolvido a partir do ápice da planta, incluindo o pecíolo, totalizando em dez folhas por ponto amostral. As coletas foram realizadas nos mesmos pontos georreferenciados utilizados para a amostragem do solo.

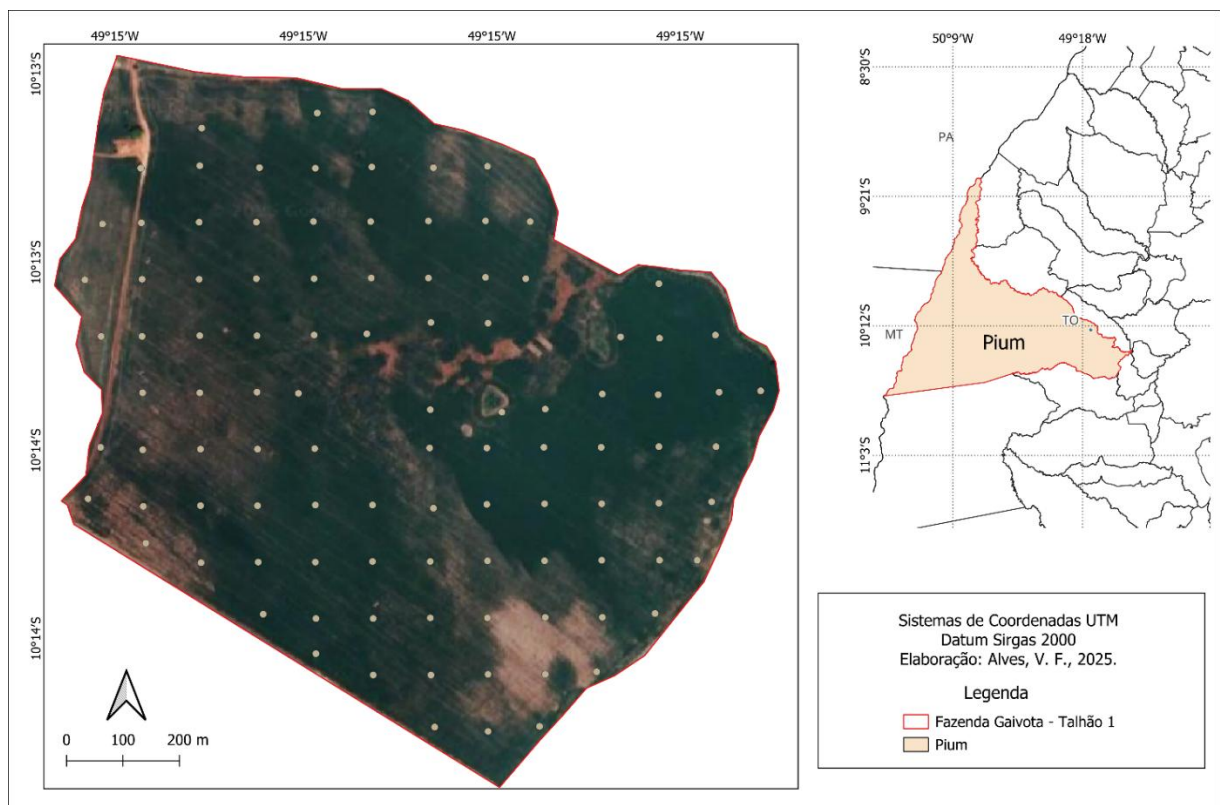


Figura 2. Localização da área de estudo e distribuição dos 102 pontos de amostragem georreferenciados na Fazenda Gaivota no município de Pium.

2.1.3 Análises laboratoriais

Após as coletas de solos, as amostras foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca (< 2 mm) ao ar (TFSA) e da fração de cascalho (> 2 mm). O cascalho retido na peneira foi pesado para cálculo da proporção relativa entre as frações.

Todas as amostras foram enviadas para análises laboratoriais granulométrica e química, conforme os procedimentos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (Donagema et al., 2011), sendo posteriormente calculados os parâmetros de fertilidade, como capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%) (Donagema et al., 2011).

2.1.4 Análise estatística e processamento espacial

Os dados obtidos em cada ponto amostral foram organizados em uma matriz $Y_{(n \times p)}$, composta por 102 unidades amostrais ($n = 102$) e 23 variáveis ($p = 23$), incluindo os atributos químicos do solo, frações granulométricas e teor de cascalho. As variáveis contidas nesta matriz foram padronizadas de modo a apresentar média igual a zero e desvio padrão igual a um ($\mu=0$, $\sigma^2 = 1$), conforme prática comum em estudos multivariados (Manly, 2008). Essa padronização é fundamental para permitir a comparação entre variáveis de diferentes escalas, evitando que aquelas com maior variância exerçam influência desproporcional na análise. A partir da matriz $Y_{(n \times p)}$ foi obtida uma matriz de correlações ($r_{(p \times p)}$) tendo em vista que as variáveis foram padronizadas previamente. Sobre esta matriz, a decomposição espectral da análise de componentes principais (PCA) foi aplicada, resultando na extração de $k=p$ componentes principais e autovalores associados (λ_k).

A PCA, como análise exploratória, tem dois objetivos: (1) reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados por meio da correlação entre as variáveis (redundâncias) e (2) ordenar as observações de modo a tornar possível a identificação de tendências e gradientes. Os autovalores avaliam quanto da variância dos dados foi capturada por cada um dos k -componentes principais e, no caso presente em que a PCA foi aplicada a uma matriz de correlações ($r_{(p \times p)}$) a variância total é igual ao número total de variáveis contida na matriz de correlações ($\sigma^2 = p$). Assim, a razão

entre o autovalor k e $p(\sigma_k^2 = \lambda_k/p)$ representa o percentual de variância capturada pelo autovetor associado ao k -autovalor.

A PCA foi realizada com a função “prcomp”, pertencente ao pacote base stats do ambiente R. Após uma primeira inspeção dos autovalores (que indicam o percentual de variação atribuída a cada componente principal), aplicou-se uma seleção de componentes principais e variáveis segundo um algoritmo de duplo critério.

A seleção do número de componentes retidos baseou-se no critério de Kaiser, considerando apenas aqueles com autovalores iguais ou superiores a 1 ($\lambda_k \geq 1$). Em seguida, avaliou-se a qualidade de representação das variáveis por meio da soma das comunalidades associadas aos componentes retidos. Variáveis cuja comunalidade acumulada tenha sido inferior a 0,7 foram excluídas da análise, e a PCA foi recalculada considerando apenas o conjunto final de variáveis com representação satisfatória no espaço reduzido. Assim, os dados finais da PCA foram a representação do resultado da seleção de duplo critério dos componentes principais (por meio do critério de Kaiser) e das variáveis (por meio da escolha daquelas com maior soma dos valores de comunalidades associados aos eixos selecionados).

A correlação de Pearson foi utilizada para medir o grau de associação linear entre os escores dos componentes principal selecionados e as p-variáveis originais. Esta correlação, quando projetada em um biplot representa o posicionamento das p-variáveis no eixo de ordenação, utilizado comumente para verificar o grau de redundância (correlação) entre as variáveis e que pode ser deduzido pela associação de múltiplas p-variáveis com um k-componente principal. A representação final dos resultados da PCA foi feita por intermédio de um biplot, no qual foram projetados no espaço bidimensional (reduzido, portanto) as variáveis selecionadas e os primeiros componentes principais assumindo que estes capturaram a maior parte da variância contida na matriz original.

Para fins exploratórios e de visualização gráfica no biplot, o teor de cascalho foi classificado em intervalos de classe, calculados de acordo com a regra de Sturges (Sturges, 1926) e os pontos (n=102 observações) identificados por ícones e cores associados a cada um dos intervalos de classe.

Da mesma forma que os dados químicos e granulométricos dos solos, os dados de nutrição foliar também foram submetidos a PCA. A matriz dos dados brutos, neste caso, foi constituída pelo mesmo número de observações (n=102), mas incluiu p= 12

variáveis. Da mesma maneira, as variáveis foram padronizadas ($\mu=0$; $\sigma^2 = 1$) fazendo com que a análise fosse aplicada sobre uma matriz de correlações entre as p-variáveis ($r_{(pxp)}$). O mesmo algoritmo de seleção de componentes principais e variáveis foi aplicado aqui e o resultados visualizado na forma de um biplot no qual as observações foram identificadas em classes de teor de cascalho seguindo os mesmos critérios descritos anteriormente.

As variáveis que apresentaram maior representatividade na PCA e correlações estatisticamente significativas foram utilizadas nas análises geoestatísticas, com o objetivo de avaliar sua dependência espacial e elaborar mapas temáticos de distribuição na área de estudo.

A análise geoestatística foi realizada por meio do método da Krigagem Ordinária, muito utilizada no mapeamento digital do solo (Veronesi; Schillaci, 2019), o qual permite estimar valores em locais não amostrados com base na estrutura de dependência espacial observada. Para descrever a dependência espacial entre as amostras, foram ajustados diferentes modelos de semivariogramas (esférico, exponencial e gaussiano) conforme descrito por Oliver e Webster (2014).

Nos ajustes dos modelos, foram estimados os parâmetros geoestatísticos como, efeito pepita (C_0), variância estrutural (C_1), patamar ($(C_0 + C_1)$) e alcance (a). A seleção do modelo mais adequado para cada atributo baseou-se nos maiores coeficiente de correlação de Pearson (r) entre os valores observados e os estimados e nos menores valores da raiz do desvio quadrático médio (RSMD), obtido por meio de validação cruzada do tipo *leave-one-out*.

O grau de dependência espacial foi avaliado por meio do índice de dependência espacial (IDE), calculado conforme proposto por Cambardella et al. (1994), de acordo com a seguinte equação:

$$IDE = \frac{C_0}{C_0 + C_1} \times 100$$

Segundo esses autores, a dependência espacial é classificada como forte (IDE < 25%), moderada (IDE entre 25% e 75%) ou fraca (IDE > 75%), sendo esse índice utilizado como referência para avaliação da viabilidade da interpolação por krigagem. Todas as análises estatísticas e geoestatísticas foram realizadas no ambiente R (R Development Core Team, 2019). A Análise de Componentes Principais (PCA), a padronização das variáveis e as correlações de Pearson foram conduzidas com os pacotes *vegan* (Oksanen et al., 2015), *psych* (Revelle, 2023), *factoextra* (Kassambara

& Mundt, 2020), ggfortify (Tang et al., 2016) e car (Fox & Weisberg, 2025), os quais possibilitaram a organização das matrizes de dados, extração de autovalores e autovetores, cálculo de comunalidades e visualização gráfica dos resultados multivariados. As análises geoestatísticas, incluindo o ajuste de semivariogramas, validação cruzada dos modelos e a interpolação espacial por krigagem ordinária, foram realizadas com os pacotes gstat (Pebesma, 2004; Pebesma; Graeler, 2018), sp (Pebesma; Bivand 2005), sf (Pebesma; Bivand 2023) e raster (Hijmans *et al.* 2025), permitindo o tratamento dos dados espaciais, a modelagem da dependência espacial e a geração de mapas contínuos dos atributos do solo e dos nutrientes foliares da soja.

Para confecção dos mapas, os dados foram processados no software QGIS 3.34.13, uma plataforma gratuita e de código aberto que permite trabalhar com diversos formatos de dados vetoriais e matriciais. Foram elaborados mapas temáticos de teor de cascalho, fertilidade, granulometria e nutrição foliar.

2.2 RESULTADOS

2.2.1 Atributos do solo

Após a aplicação do critério de Kaiser ($\lambda_k \geq 1$), a análise de componentes principais indicou a retenção de cinco componentes principais, os quais apresentaram autovalores superiores a 1 e, em conjunto, explicaram cerca de 84% da variância total do conjunto de dados (Tabela 1). O primeiro componente principal (PC1) explicou 44% da variância enquanto a variância acumulada pelos dois primeiros componentes principais (PC1 + PC2) correspondeu a aproximadamente 60% (Tabela 1). Esse resultado indica que os dois primeiros eixos são suficientes para representar a maior parte da variabilidade dos dados, não havendo perdas significativas de informação ao se restringir a interpretação aos dois primeiros componentes principais.

Tabela 1. Autovalores, percentuais de variância explicada e variância acumulada dos componentes principais obtidos por meio da PCA, aplicada à matriz de correlação das variáveis descritoras do solo nas unidades amostrais, considerando apenas os eixos que atenderam o critério de Kaiser ($\lambda_k \geq 1$).

Dimensões	Autovalor (λ_k)	% explicado	% cumulativo da explicação
Dim 1	8,40	44,18	44,18
Dim 2	3,03	15,93	60,11
Dim 3	2,22	11,70	71,81
Dim 4	1,27	6,67	78,47
Dim 5	1,14	6,03	84,50

Fonte: Autora, 2025.

A figura 3 apresenta, por meio de um biplot, o resultado da PCA, no qual observa-se um ordenamento das amostras ao longo do eixo do primeiro componente principal (PC1), associado ao gradiente de teor de cascalho. Amostras com maior conteúdo de cascalho concentram-se no quadrante direito do diagrama, enquanto aquelas com menor teor de cascalho e maior volume de terra fina distribuem-se à esquerda.

As correlações entre as p -variáveis e os cinco componentes principais, cujos autovalores foram superiores a um, estão representados na Tabela 2. Os maiores coeficientes de correlação indicam os atributos que mais contribuíram para a formação de cada eixo da PCA.

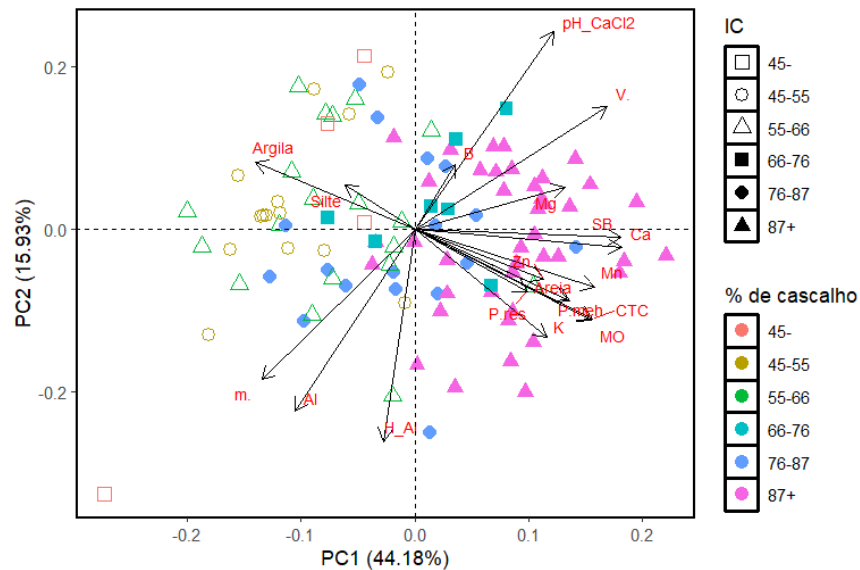


Figura 3. Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) dos atributos químicos e granulométricos do solo, mostrando a distribuição das unidades amostrais em função dos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2). Símbolos e cores representam os intervalos de classes de teor de cascalho (%).

Fonte: Autora, 2025.

O PC1 representou um gradiente de fertilidade e textura do solo em função do teor de cascalho. As variáveis, cálcio (Ca^{2+}), manganês (Mn^{2+}), fósforo (P-Mehlich), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e matéria orgânica (MO) apresentam correlações positivas elevadas (acima de 0,7) com este eixo, e tendem a apresentar maiores valores para estes parâmetros no quadrante direito do biplot (Figura 3 e Tabela 2), onde se concentram as amostras com maior teor de cascalho ($\geq 76\%$). Marginalmente, o valor m% também possui correlação elevada, mas negativa com esse mesmo eixo.

As variáveis granulométricas também demonstram forte relação com o PC1, os teores de areia aumentam e os de argila diminuem à medida que aumenta o volume de cascalho no solo. Assim, o PC1 expressa um gradiente de concentração associado à fertilidade química e à textura do solo, influenciado principalmente pela variação no teor de cascalho.

Tabela 2. Correlações entre as variáveis avaliadas e os três primeiros componentes principais, obtidos a partir das 102 unidades amostrais. Em negrito estão destacados os maiores valores de correlação para cada variável, indicando o eixo ao qual apresentam maior associação.

Variável	PCA 1	PCA 2	PCA 3	PCA 4	PCA 5
Ca ²⁺	0,92	-0,08	-0,28	-0,004	-0,007
Al ³⁺	-0,53	-0,68	-0,08	-0,01	0,02
Mn ²⁺	0,80	-0,21	0,1	-0,03	0,12
P Mehlich	0,70	-0,26	0,48	-0,23	0,19
pH (CaCl ₂)	0,62	0,73	0,01	-0,02	-0,10
H+Al	-0,13	-0,79	-0,42	-0,03	0,12
MO	0,78	-0,34	-0,31	0,09	0,04
CTC	0,78	-0,34	-0,48	-0,02	0,004
SB	0,91	-0,03	-0,34	-0,003	-0,05
m%	-0,68	-0,56	0,02	0,04	0,02
V%	0,85	0,45	-0,01	-0,01	-0,09
Areia	0,67	-0,26	0,43	0,49	0,03
Argila	-0,71	0,25	-0,23	-0,35	-0,15

Ca²⁺ – Cálcio; Al³⁺ – Alumínio; Mn²⁺ – Manganês; P Mehlich – Fósforo disponível (extrator Mehlich-1); pH (CaCl₂) – Potencial hidrogeniônico em cloreto de cálcio; H+Al – Acidez potencial; MO – Matéria orgânica; CTC – Capacidade de troca catiônica; SB – Soma de bases; m% – Saturação por alumínio; V% – Saturação por bases; Areia – Fração areia; Argila – Fração argila.

Fonte: Autora, 2025.

O segundo componente principal (PC2) apresentou correlação positiva com pH em CaCl₂, e negativa com teores de alumínio (Al³⁺) e H+Al. Esse eixo reflete principalmente o gradiente de acidez, distinguindo solos com maior acidez e teores de Al³⁺ daqueles com maior pH (CaCl₂), embora explique uma proporção menor da variabilidade em relação ao PC1. A associação do pH (CaCl₂) com o PC2, indica um comportamento distinto daquele observado para os indicadores de fertilidade do solo, os quais apresentaram maior associação com o PC1, variando de acordo com o gradiente de pedra no talhão.

A análise do primeiro componente principal (PC1) destaca as variáveis que apresentam comunalidades mais elevadas, indicando forte representação por este eixo. Entre elas, Ca²⁺ (0,85), V% (0,73) e SB (0,84) apresentam valores associados à PCA 1 superiores a 70%. Isso significa que a maior parte de sua variância associada a estas variáveis é explicada por este eixo, o que é corroborado por suas altas correlações com o PCA 1 (Tabela 2). Assim, essa tendência demonstra que, áreas com elevados teores de cascalho tendem a apresentar “melhores” condições

químicas, expressas por valores elevados de Ca^{2+} , V% e SB, além de maior teor de areia, enquanto áreas menos cascalhentas concentram maiores valores de pH (CaCl_2) e de argila (Tabela 2).

A análise de correlação de Pearson entre os escores do primeiro componente principal, que sintetiza a variabilidade conjunta dos atributos químicos e de textura do solo, e o percentual de cascalho indicou associação positiva e significativa ($r = 0,76$; $p < 0,01$) entre as variáveis. Esse resultado mostra que valores mais elevados de PC1 estão associados a maiores teores de cascalho na camada superficial do solo, indicando a existência de um gradiente espacial no qual a variação do conteúdo de cascalho ocorre de forma concomitante à variação dos atributos representados por esse componente.

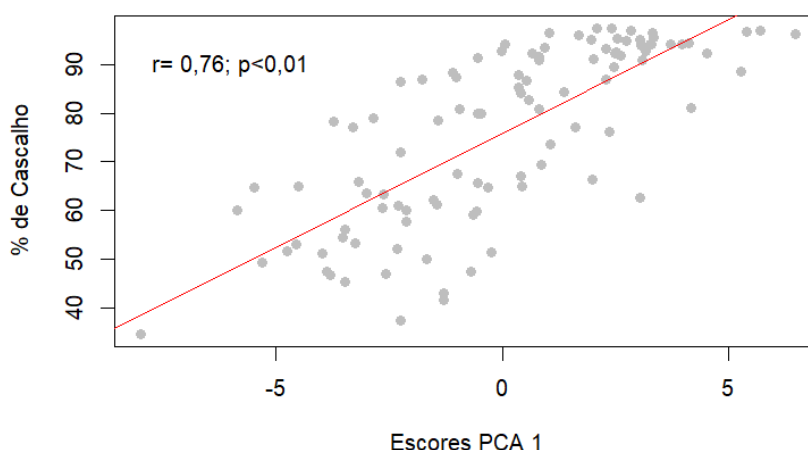


Figura 4. Diagrama de dispersão entre os escores do primeiro componente principal (PCA 1) e o percentual de cascalho das amostras.

Fonte: Autora, 2025.

A compreensão do padrão observado entre os escores do PC1 e o teor de cascalho baseia-se na análise conjunta do biplot (Figura 3) e do gráfico de dispersão da correlação de Pearson (Figura 4). No diagrama de ordenação (Figura 3), verifica-se que as amostras se distribuem ao longo do eixo PC1 de acordo com o conteúdo de cascalho, de forma que escores mais elevados estão associados a maiores percentuais dessa fração na camada superficial do solo. Essa relação é reforçada pela correlação positiva e estatisticamente significativa entre os escores da PC1 e o teor de cascalho (Figura 4).

Além disso, os atributos do solo que apresentam associação positiva com o PC1 (Ca^{2+} , Mn^{2+} , P mehlich, MO, CTC, SB e V%) (Tabela 2; Figura 5) concentram valores mais elevados nas áreas caracterizadas por maior conteúdo de cascalho. Os atributos associados negativamente ao PC1, como o teor de argila, apresentaram maior valor associado a escores mais baixos desse componente, conforme demonstrado pelos diagramas de dispersão entre os escores da PC1 e esses atributos (Figura 5H).

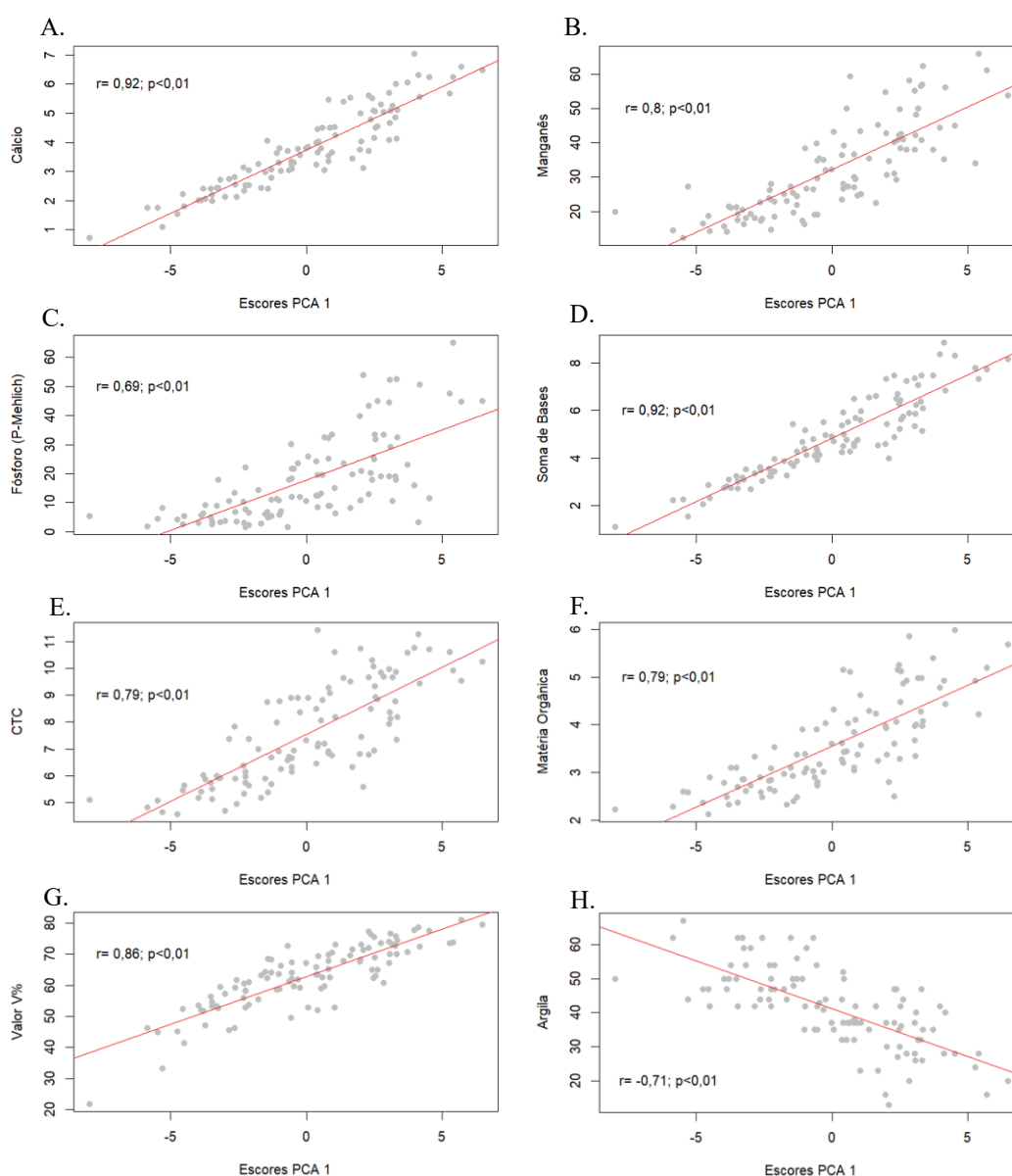


Figura 5. Diagramas de dispersão entre os escores do primeiro componente principal (PCA 1) e os atributos químicos e granulométricos do solo (cálcio - Ca^{2+} (A), manganês - Mn^{2+} (B), fósforo - P – Mehlich (C), soma de bases – SB (D), capacidade de troca catiônica - CTC (E), matéria orgânica - MO (F), saturação por bases - V% (G), e Argila (H)).

Fonte: Autora, 2025.

A variabilidade espacial dos atributos do solo foi avaliada por meio da análise de semivariogramas ajustados aos dados amostrais (Tabela 3). Para todos os atributos considerados, os semivariogramas evidenciaram a presença de estrutura espacial.

A Tabela 3 apresenta os respectivos valores da raiz do desvio quadrático médio (RMSD) e da correlação de Pearson (r), bem como os parâmetros geoestatísticos efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C_1$), alcance (A), índice de dependência espacial (IDE). Esses indicadores evidenciam um desempenho satisfatório dos modelos empregados na krigagem ordinária, a qual se mostrou adequada para representar a variabilidade espacial dos atributos químicos e granulométricos do solo, permitindo a identificação de áreas com maiores e menores concentrações desses atributos no talhão estudado.

Os atributos do solo apresentaram, em sua maioria, dependência espacial classificada como forte, destacando-se o teor de cascalho, a fração argila, a soma de bases, o cálcio, a CTC, a saturação por bases e a matéria orgânica, com alcances variando de aproximadamente 159 a 795 metros, caracterizando padrões espaciais bem definidos. O fósforo (P-Mehlich) e o manganês (Mn) exibiram dependência espacial moderada, com alcances estimados em cerca de 188 m e 512 m respectivamente.

Tabela 3. Modelos de semivariograma ajustados aos atributos químicos e granulométricos do solo, com os respectivos parâmetros geoestatísticos efeito pepita (C_0); contribuição (C_1); patamar ($C_0 + C_1$); alcance (a) e índice de dependência espacial (IDE), bem como os valores da raiz do desvio quadrático médio (RMSD) e da correlação de Pearson (r), obtidos por validação cruzada da krigagem ordinária.

Atributo	Modelo	C_0	C_1	$C_0 + C_1$	a (m)	IDE (%)	Classe	RMSD	r
Cascalho	Esférico	21,45	442,32	463,77	795,23	4,63	Forte	8,71	0,87
P-Mehlich	Gaussiano	78,45	144,57	223,02	188,24	35,18	Moderada	10,99	0,65
SB	Esférico	0	3,06	3,06	336,42	0	Forte	1,18	0,71
Ca ²⁺	Exponencial	0	2,5	2,5	229,3	0	Forte	0,93	0,73
CTC	Exponencial	0	4,25	4,25	190,8	0	Forte	1,25	0,73
V%	Exponencial	0	143,30	143,30	159,74	0	Forte	7,73	0,66
Matéria orgânica	Exponencial	0,03	1,3	1,34	341,99	2,73	Forte	0,63	0,74
Argila	Exponencial	0	292,31	292,31	614,96	0	Forte	5,90	0,86
Mn	Esférico	62,67	132,27	194,94	512,83	32,15	Moderada	10,05	0,64

Fonte: Autora, 2025.

Os mapas resultantes da krigagem ordinária (Figura 6 e 7) corroboram e espacializam o padrão revelado pelo primeiro componente principal (PC1). Conforme demonstrado na Figura 6, áreas com maior teor de cascalho e menor volume de terra fina concentram maiores valores de matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%) e soma de bases (SB).

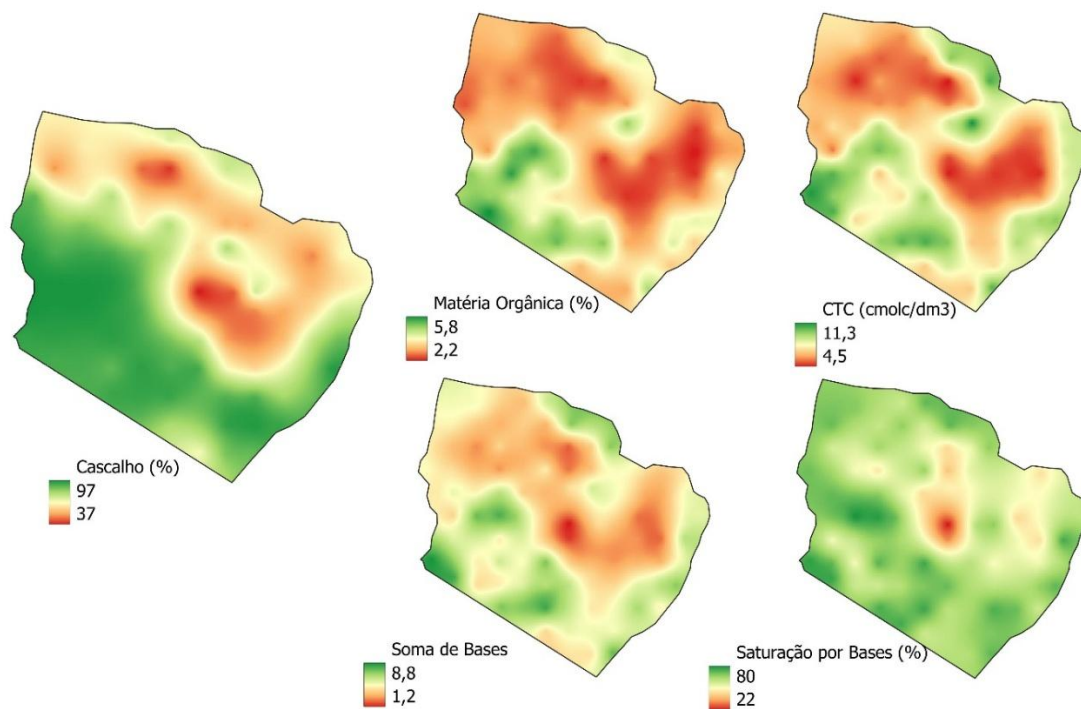


Figura 6. Mapas de Cascalho, MO, CTC, SB e V% de um talhão da Fazenda Gaivota, Pium-TO.

Fonte: Autora, 2025.

Os mapas de fertilidade e textura do solo (Figura 7), evidenciam que áreas mais cascalhentas, com menor volume de terra fina, apresentam maiores concentrações de cálcio (Ca^{2+}), manganês (Mn^{2+}) e fósforo (P-Mehlich). Por outro lado, os teores mais elevados de argila ocorreram nas zonas menos cascalhentas, conforme indicado no biplot (Figura 3). Esses resultados reforçam que a variação espacial do teor de cascalho exerce influência direta tanto sobre a fertilidade química quanto sobre a textura do solo, confirmando os gradientes representados pelos componentes principais.

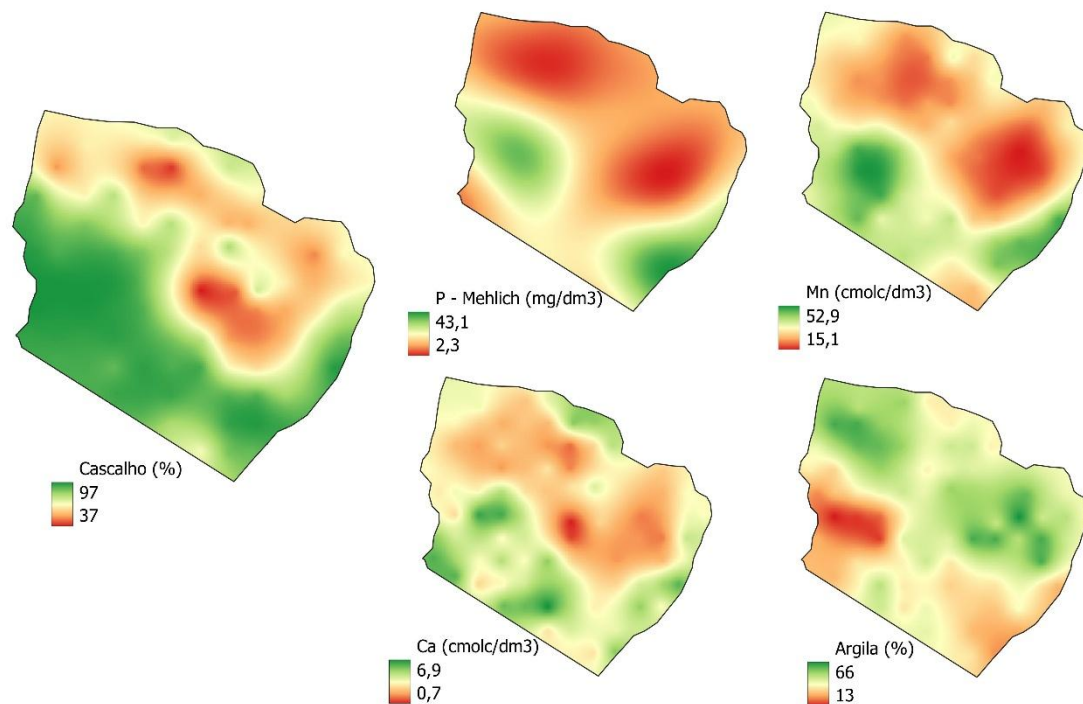


Figura 7. Mapas de Cascalho, P - Mehlich, Mn^{2+} , Ca^{2+} e Argila de um talhão da Fazenda Gaivota, Pium-TO.

Fonte: Autora, 2025.

2.1.1 Nutrição foliar da soja

Os resultados apresentados até este ponto evidenciam que o teor de cascalho exerce influência sobre a variabilidade química e granulométrica do solo. Na sequência, são apresentados os resultados referentes a nutrição foliar da soja.

A análise de componentes principais (PCA) aplicada aos dados foliares resultou na retenção de dois componentes principais com autovalores iguais ou superiores a um, conforme o critério de Kaiser ($\lambda_k \geq 1$). Esses dois componentes explicam, em conjunto, aproximadamente 71% da variância total dos dados, sendo que o primeiro componente responde sozinho por cerca de 49%, maior parte da variância do conjunto (Tabela 4). Esse resultado indica que uma grande parte da variabilidade das variáveis analisadas pode ser representada por apenas dois componentes principais.

Tabela 4. Autovalores e percentual da variância explicada resultantes da Análise de Componentes Principais (PCA), aplicada à matriz de correlações das variáveis nutricionais foliares da soja nas unidades amostrais, considerando apenas aqueles componentes que atenderam ao critério de Kaiser ($\lambda_k \geq 1$).

Dimensões	Autovalor (λ_k)	% explicado	% cumulativo da explicação
Dim 1	2,46	49,17	49,17
Dim 2	1,12	22,33	71,50

Fonte: Autora, 2025.

Diferentemente do observado para os atributos do solo, a ordenação das amostras obtidas a partir da PCA aplicada aos dados de nutrição foliar não revelou um padrão de organização associado ao gradiente de teor de cascalho. No biplot (Figura 8), as unidades amostrais distribuíram-se de forma dispersa, sem agrupamento consistente das classes de cascalho ao longo dos eixos, indicando que a variabilidade nutricional das folhas não acompanhou o padrão espacial identificado para os atributos do solo.

A análise conjunta do biplot (Figura 8) e da matriz de correlação das variáveis com os eixos principais (Tabela 5) indica que o primeiro componente (PCA 1) está fortemente associado de forma negativa às concentrações foliares de zinco (Zn), fósforo (P) e cobre (Cu), não havendo relação direta entre este gradiente e o percentual de cascalho. O segundo componente (PCA 2), mostra maior associação positiva com o enxofre (S), enquanto o terceiro componente (PCA 3; Tabela 5) está relacionado principalmente ao Mn, que apresenta correlação positiva elevada com esse eixo.

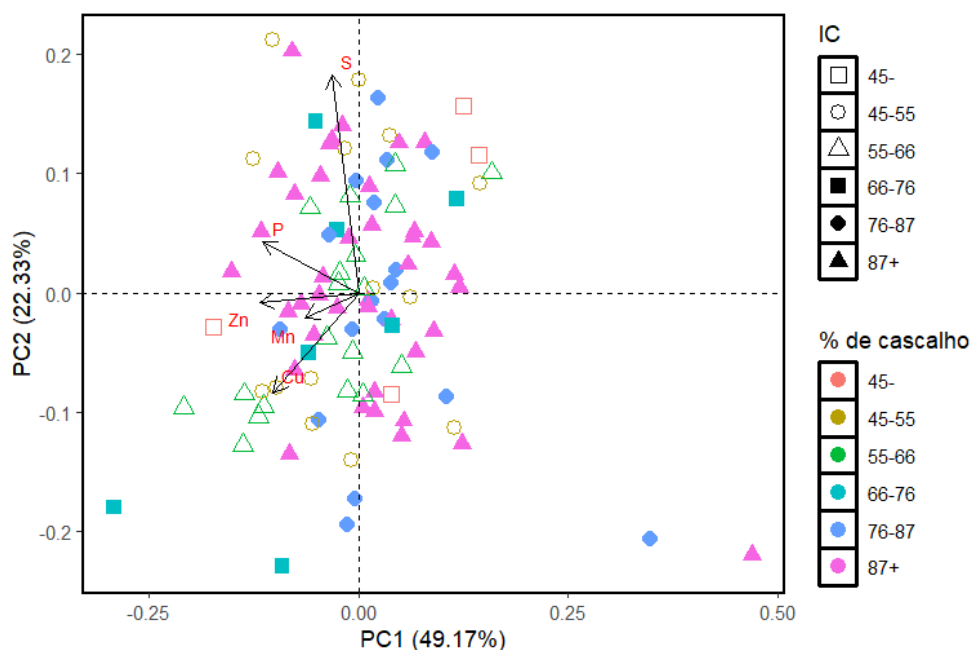


Figura 8. Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA), representando a distribuição das amostras em função dos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2), responsáveis por 49,17% e 22,33% da variância total. Os símbolos e cores representam as classes de teor de cascalho no solo, respectivamente.

Fonte: Autora, 2025.

A Figura 9 apresenta o biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) considerando o primeiro (PC1) e o terceiro componente principal (PC3), com o objetivo de avaliar a relação entre o manganês (Mn) e o teor de cascalho no solo. Essa abordagem foi adotada uma vez que, conforme indicado na Tabela 5, o Mn apresentou forte associação com o PC3, o que é corroborado pela orientação do vetor desse nutriente no biplot.

Observa-se que o vetor de Mn apresenta direção distinta daquela observada para Zn, Cu e P, indicando baixa similaridade na distribuição multivariada e reduzida correlação entre esses nutrientes. Além disso, a distribuição das amostras ao longo do eixo associado ao Mn não evidenciou agrupamento ou separação consistente em função das classes de cascalho. Esse comportamento reforça que, embora o Mn contribua de forma relevante para a variabilidade explicada pelo PC3, sua variação não está associada ao gradiente de cascalho no talhão, indicando independência entre esse nutriente foliar e o teor de fragmentos grosseiros do solo.

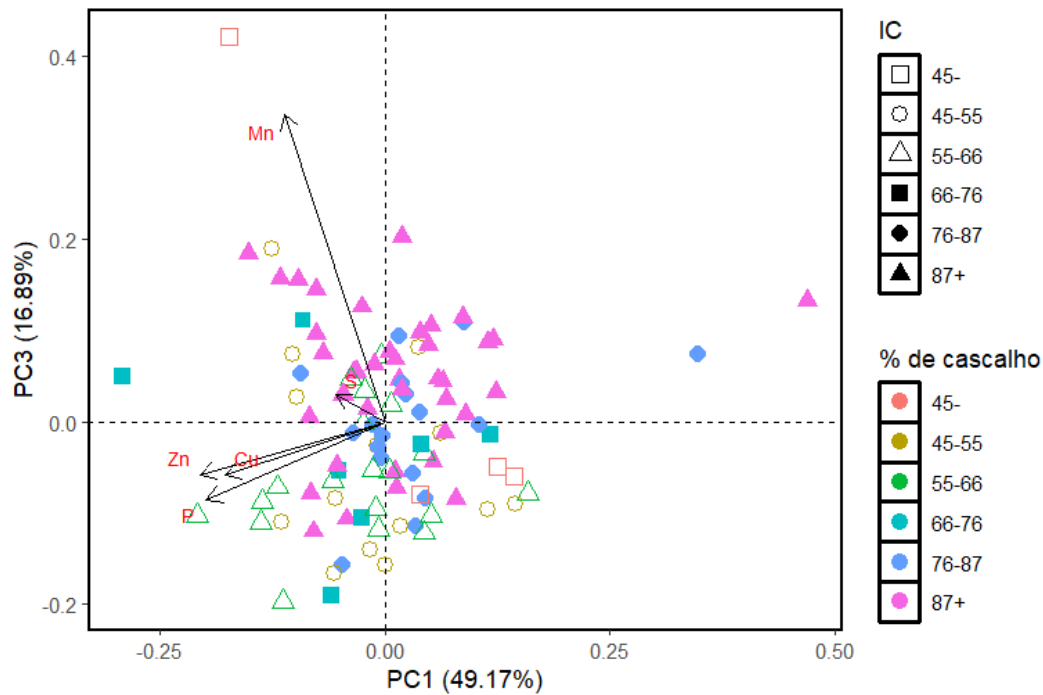


Figura 9. Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA), representando a distribuição das amostras em função do primeiro (PC1) e do terceiro componente principal (PC3), responsáveis por 49,17% e 16,89% da variância total, respectivamente. Os vetores indicam a contribuição e a direção de associação dos nutrientes foliares, enquanto os símbolos e cores representam as classes de teor de cascalho no solo, respectivamente.
Fonte: Autora, 2025.

Tabela 5. Correlação das variáveis analisadas com os três primeiros componentes principais, considerando 101 unidades amostrais. Os coeficientes destacados em negrito representam a maior associação de cada variável com os respectivos eixos.

Variável	PCA 1	PCA 2	PCA 3
Zn	-0,89	-0,03	-0,14
P	-0,86	0,21	-0,22
Cu	-0,77	-0,42	-0,15
Mn	-0,49	-0,10	0,86
S	-0,24	0,93	0,07

Fonte: Autora, 2025.

Para interpretar a relação entre os escores do primeiro componente principal (PC1) e os nutrientes foliares, é necessário analisar em conjunto o biplot da PCA (Figura 8) e os gráficos de dispersão da correlação de Pearson (Figura 10). O biplot evidencia que variáveis como Zn, P e Cu apresentam forte associação negativa com o eixo PC1. Essa tendência é confirmada pelas correlações negativas significativas

observadas nos gráficos de dispersão, em que os teores desses nutrientes diminuem à medida que os escores do PC1 aumentam. Assim, verifica-se que valores mais elevados de PC1 estão relacionados a menores concentrações desses elementos nas folhas, enquanto valores negativos de PC1 estão associados a maiores disponibilidades de Zn, P e Cu.

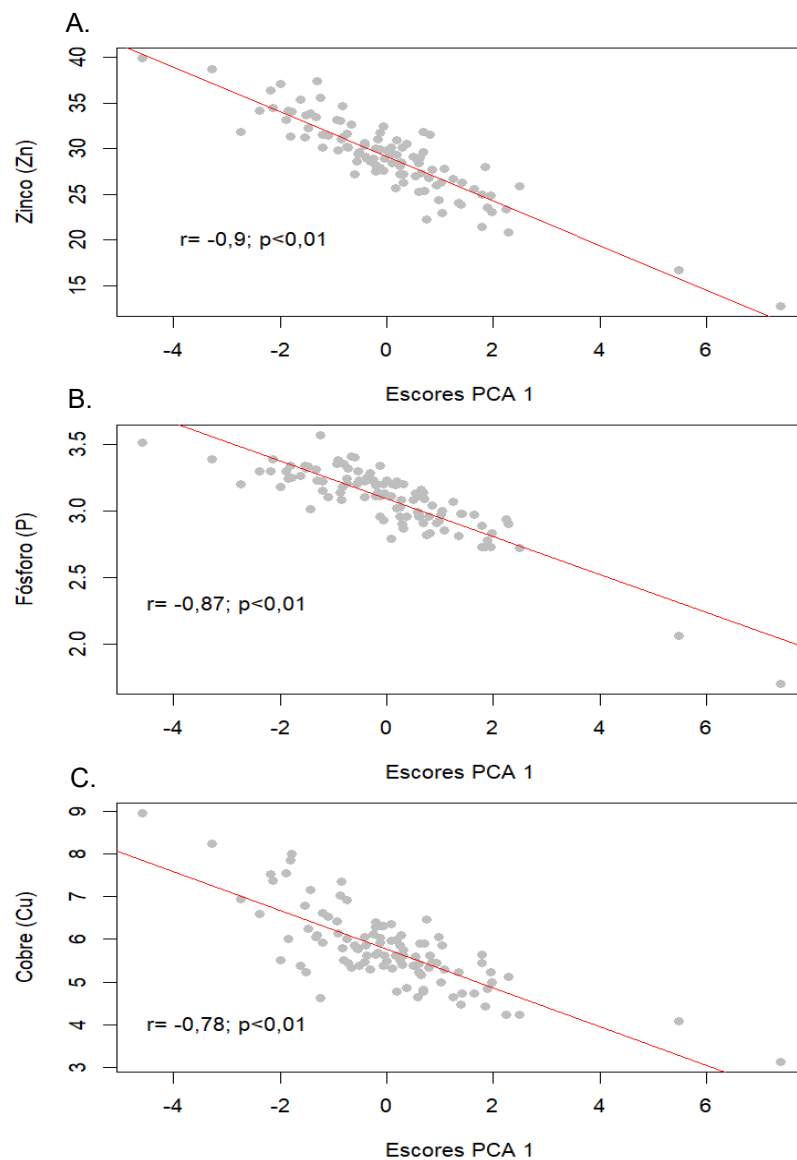


Figura 10. Diagramas de dispersão entre os escores do primeiro componente principal (PCA 1) e as concentrações foliares de Zn (A), P (B) e Cu (C).
Fonte: Autora, 2025.

A partir da Tabela 6, observam-se os modelos de semivariograma ajustados para os atributos nutricionais foliares da soja, bem como os parâmetros geoestatísticos associados, incluindo o efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C_1$), alcance

(A), índice de dependência espacial (IDE), além dos valores da raiz quadrada do desvio padrão médio (RMSD) e do coeficiente de correlação de Pearson (r), obtidos por meio da validação cruzada dos modelos de krigagem ordinária. Os resultados indicam a presença de dependência espacial para todos os nutrientes avaliados, com classificação variando de moderada a forte. O alcance das variáveis variou de 128 a 479 metros, representando a distância máxima em que os pontos estão correlacionados. O Fósforo foi o nutriente que apresentou o maior alcance, caracterizando uma continuidade maior na distribuição desse nutriente.

Tabela 6. Modelos de semivariograma ajustados aos atributos nutricionais foliares da soja (P, S, Cu, Mn e Zn), com os respectivos parâmetros geoestatísticos (efeito pepita (C_0); contribuição (C_1); patamar ($C_0 + C_1$); alcance (A) e índice de dependência espacial (IDE) e os valores da raiz do desvio quadrático médio (RMSD) e da correlação de Pearson (r), obtidos por validação cruzada da krigagem ordinária.

Atributo foliar	Modelo	C_0	C_1	$C_0 + C_1$	a (m)	IDE (%)	Classe	RMSD	R
Fósforo (P)	Esférico	0,03	0,04	0,07	479,96	43,93	Moderada	0,25	0,25
Enxofre (S)	Exponencial	0,002	0,03	0,037	227,81	6,36	Forte	0,14	0,56
Cobre (Cu)	Exponencial	0,43	0,56	0,98	347,54	43,29	Moderada	0,70	0,65
Manganês (Mn)	Esférico	0	648,15	648,15	208,82	0	Forte	17,66	0,62
Zinco (Zn)	Exponencial	0	18,49	18,49	66,37	0	Forte	4,11	0,28
Cálcio (Ca)	Exponencial	0	1,88	1,88	128,03	0	Forte	1,09	0,58

Fonte: Autora, 2025.

Embora os valores de correlação e ajuste sejam, em geral, inferiores aos observados para os atributos químicos e granulométricos do solo, os resultados indicam que a krigagem ordinária foi capaz de capturar a dependência espacial dos nutrientes foliares, permitindo a geração de mapas para todos os atributos avaliados (P, S, Cu, Mn, Ca e Zn). Esses mapas possibilitam a visualização da variabilidade espacial dos teores foliares no talhão estudado, conforme apresentado na Figura 11.

Neles é possível observar que os teores de P, S, Cu, Mn, Ca e Zn apresentam variação entre os pontos amostrados, sem, contudo, evidenciar relação direta com a quantidade de cascalho presente nas áreas avaliadas. Esses resultados, associados às análises da PCA, sugerem que a disponibilidade de nutrientes às plantas não depende somente do volume de terra fina dos Plintossolos Pétricos concrecionários, indicando que, mesmo em áreas com maior proporção de cascalho, as plantas podem alcançar níveis nutricionais compatíveis com o adequado desenvolvimento da cultura.

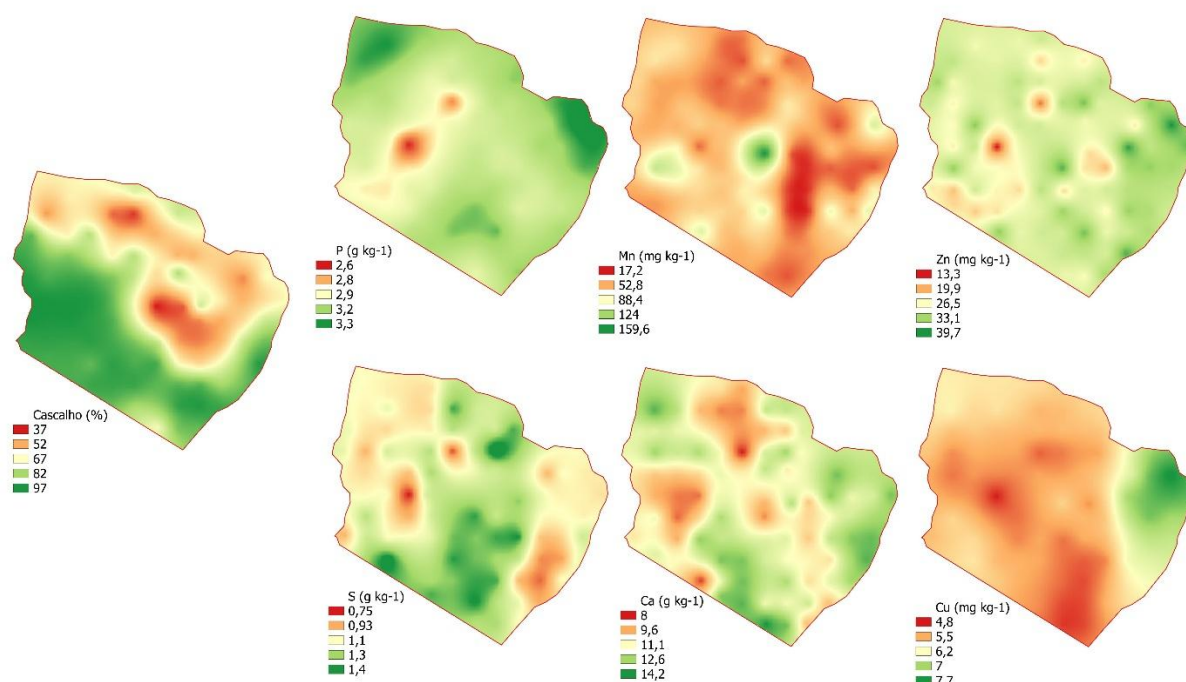


Figura 11. Mapas de distribuição espacial de nutrientes foliares em soja de um talhão da Fazenda Gaivota, Pium, TO.

Fonte: Autora, 2025.

Os mapas de distribuição espacial dos nutrientes foliares obtidos por krigagem ordinária (Figura 11) não demonstrou padrões espaciais bem definidos ou gradientes contínuos ao longo do talhão. Para a maioria dos nutrientes avaliados, observam-se manchas difusas de maior e menor concentração, sem organização espacial consistente.

De modo geral, esses resultados corroboram aqueles obtidos pela PCA, indicando que a variabilidade espacial dos teores foliares de P, S, Cu Mn e Zn não apresentam correspondência com o gradiente de teor de cascalho identificado para os atributos do solo. Assim, embora exista variabilidade espacial nos teores nutricionais das folhas, essa variabilidade não acompanha o padrão de distribuição do cascalho no talhão estudado.

2.3 DISCUSSÃO

Os resultados da Análise de Componentes Principais aplicada aos atributos do solo (químico e granulométrico) indicaram que o PC1 foi responsável por explicar a maior parcela da variância total dos dados, configurando-se como um gradiente químico e de textura do solo fortemente associado ao teor de cascalho. Esse componente sintetizou a variação conjunta de variáveis como cálcio (Ca^{2+}), manganês (Mn^{2+}), fósforo (P-Mehlich), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), matéria orgânica (MO) e frações granulométricas (Tabela 2), revelando que o teor de cascalho está parcialmente associado à organização da variabilidade dos atributos do solo no talhão, influenciando a distribuição espacial da textura e dos atributos químicos de fertilidade.

Resultados semelhantes foram reportados por Costa *et al.* (2021), que, ao aplicarem análise de componentes principais a atributos do solo, também observaram que o primeiro componente sintetizou a variabilidade química, permitindo a diferenciação de ambientes de solo com distintos níveis de fertilidade.

A associação do pH em CaCl_2 e saturação por bases (V%) com o PC2, embora estatisticamente relevante, apresentou orientação aproximadamente ortogonal entre os vetores dessas variáveis no biplot (Figura 3), indicando ausência de correlação linear direta entre elas, apesar de contribuírem para o mesmo eixo. Essa ortogonalidade evidencia que esses atributos respondem a controles distintos, de modo que, no presente estudo, variações no pH não refletiram necessariamente em aumentos proporcionais da saturação por bases.

Nos ambientes mais cascalhentos, observa-se aumento no teor de areia, associado à diminuição do teor de argila do solo. Estudos demonstram que solos com elevado conteúdo de cascalho tendem a apresentar menor proporção de material fino entre os fragmentos grosseiros, em decorrência de processos de erosão diferencial ao longo do tempo, resultando em classes texturais mais arenosas, mesmo quando comparados dentro de um mesmo contexto climático (Swanson *et al.*, 1955). Assim, o gradiente identificado no PC1 reflete não apenas as variações químicas, mas também um controle textural, no qual o teor de cascalho atua condicionando a proporção relativa de areia e argila no solo.

Os valores mais elevados de alguns atributos químicos observados nas áreas com maior teor de cascalho não devem ser interpretados como indicativos de maior

fertilidade do solo, mas sim, estão associados à redução do volume de terra fina e, consequentemente, da fração argila, o que tende a concentrar elementos químicos na fração fina que foi analisada. À medida que aumenta o teor de cascalho e diminui a proporção de terra fina, ocorre redução das superfícies reativas associadas à fração argila e, sobretudo, aos óxidos de ferro e alumínio, principais responsáveis pela adsorção e fixação de fósforo em solos altamente intemperizados (Novais et al., 2007). Essa relação é documentada por Freire (2001), que demonstrou forte correlação negativa entre o teor de argila e o fósforo, indicando maior capacidade de retenção de P em solos mais argilosos. Dessa forma, os maiores teores de fósforo (P-Mehlich) observados em áreas com maior volume de cascalho no presente estudo podem estar relacionados a um menor potencial de fixação desse nutriente, decorrente da redução da fração argila, e não necessariamente a uma maior fertilidade efetiva do solo.

Zheng *et al.* (2021), ao avaliarem a influência de fragmentos rochosos em solos cascalhentos, cujas características se assemelham aos Plintossolos Pétricos, verificaram por meio de análise multivariada, que as características físicas dos fragmentos rochosos, como densidade numérica, conteúdo volumétrico e área superficial da fração cascalho explicaram grande parte da variabilidade dos dados. Os autores observaram que o aumento dessas características apresentou correlação positiva com maiores teores de carbono orgânico, nitrogênio e fósforo disponível na fração fina. Além disso, foram observadas associações com atributos físicos, como menores valores de densidade aparente e na capacidade de campo. Esses achados reforçam que a presença de fragmentos grosseiros pode atuar como fator estruturante da variabilidade do solo, influenciando atributos químicos e físicos, em acordo com padrões observados no presente estudo.

Ferreira et al. (2024), ao avaliarem as características químicas de diferentes classes de solo, incluindo Neossolo Quartzarênico, Plintossolo Pétrico e Plintossolo Háptico, observaram que o Plintossolo Pétrico apresentou correlação positiva com maiores teores de fósforo e potássio, além de menores valores de H+Al, evidenciando uma relação inversa entre a disponibilidade de nutrientes básicos e a acidez potencial do solo. No referido estudo, entretanto, foram observados menores teores de cálcio no Plintossolo Pétrico, diferindo dos resultados obtidos no presente trabalho, no qual os maiores teores de Ca apresentaram forte associação com áreas de maior volume de cascalho.

Estudos adicionais em solos cascalhentos, com características semelhantes às dos Plintossolos Pétricos, demonstram que o elevado conteúdo de fragmentos grosseiros pode reduzir o volume de solo efetivamente explorável pelas raízes e a capacidade de armazenamento de água, influenciando a dinâmica de absorção de nutrientes pelas plantas (Poesen & Lavee, 1994; Zhang et al., 2016; Zheng *et al.*, 2021). Nessas condições, a menor disponibilidade hídrica e a limitação ao crescimento radicular podem resultar em menor exportação de nutrientes pela cultura, favorecendo a concentração desses elementos na fração fina do solo, mesmo quando os teores indicados pelas análises químicas são elevados.

As elevadas correlações da matéria orgânica (MO) e da capacidade de troca catiônica (CTC) com o eixo 1 indicam que essas variáveis são componentes centrais na definição do gradiente de fertilidade representado por esse eixo. Esse gradiente expressa um padrão no qual, à medida que aumenta o percentual de cascalho, observam-se maiores valores de MO e, conseqüentemente, maior CTC na fração de terra fina do solo, evidenciando a importância da matéria orgânica na ampliação da capacidade de retenção de cargas do sistema.

Resultados semelhantes foram reportados por Meersmans et al. (2012), que observaram aumento da concentração de carbono orgânico na fração terra fina (< 2 mm) à medida que houve incremento no teor de fragmentos rochosos, evidenciando que a redução do volume de solo fino pode promover efeito de concentração desses atributos na fração analisada, sem que isso implique necessariamente maior estoque total de carbono por unidade de área.

De acordo com Almeida et al. (2025), esse padrão observado demonstra que os Plintossolos Pétricos, quando submetidos a práticas de adubação corretiva, tendem a apresentar maior concentração de nutrientes na fração de terra fina remanescente no solo, criando assim um gradiente de fertilidade facilitado pelo aumento do teor de cascalho e diminuição da terra fina.

Em conjunto, a análise geoestatística e os mapas obtidos por krigagem ordinária permitiram espacializar os padrões identificados pela análise multivariada, evidenciando que a variabilidade dos atributos químicos e granulométricos do solo não ocorre de forma aleatória no talhão. Esse comportamento é corroborado pelos valores do índice de dependência espacial (IDE), que indicaram dependência espacial forte para a maioria dos atributos avaliados, com exceção do fósforo (P-Mehlich) e do Mn, os quais apresentaram dependência espacial classificada como moderada.

Além de confirmar a existência de organização espacial, os parâmetros dos semivariogramas indicam diferenças na escala e na intensidade dessa variabilidade. Os baixos valores de efeito pepita observados para a maioria dos atributos sugerem menor contribuição da variabilidade aleatória e maior proporção de variância estruturada, favorecendo a obtenção de estimativas mais confiáveis por krigagem na representação espacial dos atributos do solo, conforme discutido por Vieira (2000) e corroborado por estudos recentes que relacionam baixos valores de pepita a maior continuidade espacial e melhor desempenho da interpolação geoestatística (Miranda et al., 2025).

Os alcances estimados evidenciam que diferentes atributos respondem a processos que atuam em escalas espaciais distintas no talhão. Atributos como o teor de cascalho e a fração de argila apresentaram alcances elevados, indicando maior continuidade espacial e controle por fatores pedogenéticos. Em contraste, o fósforo (P-Mehlich) apresentou alcance mais curto, refletindo maior heterogeneidade local e possível influência de práticas de manejo. Esse comportamento é consistente com interpretações geoestatísticas que associam maiores alcances a distribuições mais homogêneas e alcances reduzidos a variabilidade espacial em menor escala, representando a distância máxima na qual um ponto de amostragem influencia outro para uma determinada variável (Matos et al., 2025; Vogado et al., 2020).

A krigagem mostrou-se eficiente ao revelar zonas contínuas de maior e menor intensidade dos atributos do solo. Nesse sentido a amplitude observada nos valores dos atributos químicos do solo ao longo do talhão reforça a limitação do uso de valores médios para o manejo de fertilidade. Estudos anteriores demonstram que mapas de distribuição espacial frequentemente revelam padrões semelhantes entre fósforo, matéria orgânica, cálcio e CTC, evidenciando heterogeneidade intra-área (Corrêa et al., 2022).

Segundo esses autores, a adoção de valores médios pode resultar em subadubação em determinadas zonas, atendimento adequado em outras e aplicação excessiva de insumos em áreas específicas, comprometendo a eficiência agronômica e ambiental. Essa dinâmica é consistente com os padrões observados no presente estudo, nos quais a variabilidade espacial associada ao teor de cascalho gera ambientes heterogêneos que demandam estratégias de manejo conservacionistas.

Diferentemente do observado para os atributos do solo, os resultados da PCA aplicada à nutrição foliar (P, Zn, Cu, Mn e S) não evidenciaram correlação entre os

nutrientes avaliados e o teor de cascalho. Esse comportamento é claramente ilustrado no biplot da PCA (Figura 8), no qual as amostras não apresentam agrupamento ou separação consistente em função das classes de cascalho, distribuindo-se de forma sobreposta ao longo dos dois primeiros componentes principais. A ausência de organização espacial das classes de cascalho no espaço multivariado indica que a variabilidade associada a esse atributo físico não se refletiu em diferenças no estado nutricional das folhas.

Essa interpretação é corroborada pela análise comparativa dos mapas de distribuição espacial dos nutrientes foliares (Figura 11), os quais não apresentam padrões espaciais ou zonas definidas semelhantes às aquelas observadas para os atributos do solo (Figura 7). Enquanto os mapas de fósforo, cálcio e manganês no solo exibem estrutura espacial clara e padrões associados ao gradiente de cascalho, os teores foliares distribuem-se de forma mais difusa, sem correspondência evidente com esse gradiente. Resultados semelhantes foram reportados por Gazola et al. (2017), que observaram que, embora os atributos químicos do solo apresentassem dependência espacial bem definida, a correspondência espacial com os nutrientes foliares foi seletiva e restrita a poucos elementos.

A ausência de correspondência espacial entre atributos do solo e a nutrição foliar observada no presente estudo contrasta com os resultados obtidos por Almeida et al. (2025), que, avaliando o mesmo talhão estudado nesse trabalho, no ano agrícola de 2022, identificaram correlações entre alguns nutrientes foliares e o teor de terra fina no solo. Nesse estudo, áreas com maior proporção de terra fina e, consequentemente, menor conteúdo de cascalho, apresentaram maiores teores foliares de cobre (Cu), enquanto áreas com menor volume de terra fina apresentaram maiores concentração de manganês (Mn). No presente trabalho, entretanto, ambos os nutrientes não apresentam correlação com o teor de cascalho, indicando que a relação espacial entre atributos do solo e a nutrição foliar pode variar entre diferentes anos de cultivo.

Essa variabilidade temporal é consistente com os resultados apresentados por Vieira et al. (2010), que demonstraram que a dependência espacial dos nutrientes foliares da soja não ocorre de maneira constante ao longo do tempo, podendo inclusive estar ausente para determinados nutrientes, mesmo sob adubação homogênea. Os autores observaram que, em diferentes anos agrícolas, nutrientes como o Mn deixaram de apresentar dependência espacial, enquanto para o Cu o

padrão espacial não apenas se modificou, como também apresentou inversão em relação ao observado em anos anteriores.

De modo geral, os valores encontrados para P, Zn, Ca e Mn na planta enquadram-se, segundo Oliveira (2004), nas faixas consideradas adequadas para a cultura da soja, embora o Zn apresente pequenas áreas com valores abaixo do intervalo recomendado, indicando ocorrência pontual de deficiência.

O Mn foi o único nutriente a apresentar valores acima da faixa de referência em setores específicos do talhão, atingindo concentrações acima de 100 mg kg^{-1} . Esse comportamento é compatível com o conceito de consumo de luxo descrito na literatura de nutrição mineral de plantas, segundo o qual a absorção de nutrientes pode ocorrer em níveis superiores àqueles estritamente necessários para o crescimento e a produção, sem resultar em incrementos adicionais de rendimento, quando a disponibilidade no solo é elevada (Marschner, 2012).

No que se refere aos valores apresentados nos mapas de S e Cu, os resultados indicaram que a concentração desses nutrientes na soja estava abaixo da faixa considerada adequada em toda a área avaliada, indicando deficiência desses nutrientes. De acordo com Oliveira (2004), os valores de referência nas folhas diagnósticas são de 2,1 a $4,0 \text{ g kg}^{-1}$ para o S, de 10 e 30 mg kg^{-1} para o Cu, de 21 a 100 mg kg^{-1} para Mn, de 2,5 e $5,0 \text{ g kg}^{-1}$ para o P, de 20 a 50 mg kg^{-1} para o Zn e de 4,0 a 20 g kg^{-1} para o Ca.

De acordo com Artur et al. (2014), mapas baseados em dependência espacial permitem localizar áreas com limitações específicas e avaliar a eficiência das práticas de manejo adotadas, subsidiando a definição de zonas de manejo em lavouras comerciais. Nesse sentido, a utilização da krigagem na agricultura de precisão é fundamental para a análise da variabilidade espacial do solo, permitindo a criação de mapas que subsidiam intervenções localizadas, como a aplicação de fertilizantes em taxa variável (Oliver & Webster, 2014).

A utilização de taxas fixas de adubação, sem considerar a variabilidade espacial dos atributos do solo, pode contribuir para os padrões observados, sobretudo em Plintossolos Pétricos, nos quais recomendações de calagem e adubação frequentemente seguem os mesmos critérios adotados para solos sem cascalho, como os Latossolos, que ocorrem simultaneamente na paisagem (Dantas et al., 2019).

Esses achados ressaltam a necessidade de estratégias de manejo que considere a variabilidade espacial dos Plintossolos Pétricos, especialmente no que se

refere às recomendações de calagem e adubação, evitando a adoção de taxas fixas em ambientes altamente heterogêneo.

2.4 CONCLUSÃO

O teor de cascalho exerceu influência sobre as características químicas e granulométricas do solo.

Áreas com maior proporção de cascalho apresentaram valores mais elevados de alguns atributos do solo na fração terra fina, bem como redução do teor de argila e aumento do teor de areia.

A nutrição foliar da soja não apresentou correlação espacial com o teor de cascalho, indicando dissociação entre os padrões espaciais dos atributos do solo e dos nutrientes nas folhas.

De modo geral, a nutrição foliar da soja enquadrou-se em faixas consideradas adequadas para a maioria dos nutrientes avaliados, inclusive em áreas com maior teor de cascalho.

REFERÊNCIAS

- Almeida, R. E. M.; Bueno, J. A. R.; Ramos, M. R.; Ummus, M. E.; Alves, V. F.; Rocha, B. R.; Costa, R. V. da; Uhlmann, A. de. Os desafios da produção agrícola em plintossolos pétricos. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Tópicos em ciência do solo. v.13, cap.15. Viçosa: SBCS, 2025.
- Almeida, R. E. M.; Dias, T. S. dos S.; Uhlmann, A.; Ramos, M. R.; Evangelista, B. A.; Costa, R. V. da; Simon, J.; Vidal-Torrado, P. Uso agrícola dos Plintossolos Pétricos do oeste do estado de Tocantins. In: Santos, G. G. et al. Guia de campo da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Goiás e Tocantins. Brasília: Embrapa, 2023.
- Artur, A. G.; Oliveira, D. P.; Costa, M. C. G.; Romero, R. E.; Silva, M. V. C.; Ferreira, T. O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo associada ao microrrelevo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.18, n.2, p.141-149, 2014.
https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/80901/1/2014_art_agartur.pdf.
- Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>.
- Coelho, M. R.; Fontana, A.; Avanzi, J. C.; Ummus, M. E.; Martins, A. L. da S.; Oliveira, A. P. de; Costa, T. V. da; Cirqueira, A. L. O.; Dart, R. de O.; Souza, J. S. de; Áglio, M. L. D. Solos do campo experimental de Buritirana da Embrapa Pesca e Aquicultura, município de Palmas-TO. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2012.
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/950986?locale=e>
- Corrêa, M. F.; Gadotti, G. I.; Pinheiro, R. de M.; Nadal, A. P.; Vergara, R. de O.; Navroski, R.; Schuch, L. O. B. Análise dos componentes do rendimento e da qualidade fisiológica de sementes de soja sob variabilidade espacial do solo. Diversitas Journal, v.7, n.2, p.542-554, 2022.
https://diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/2058.
- Costa, A. G.; Souza, L. da S.; Xavier, F. A. da S.; Cova, A. M. W.; Silva, E. F. da; Bonfim, M. R. Characterization of soils cultivated with cassava under different managements. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.25,

- n.11, p.764-771, 2021. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n11p764-771>
- Dantas, M. E.; Shinzato, E.; Carvalho-Filho, A.; Lumbrreras, J. F.; Teixeira, W. G.; Rocha, M. G.; Machado, M. F. Origem das paisagens do estado do Tocantins. In: Rocha, M. G. Geodiversidade do estado do Tocantins. Goiânia: CPRM, 2019. Cap.4, p.47-84.
- Donagema, G. K.; Campos, D. V. B.; Calderano, S. B.; Teixeira, W. G.; Viana, J. H. M. Manual de métodos de análise do solo. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.
- Driessen, P. M.; Deckers, J. A. Lecture notes on the major soils of the world. Rome: FAO, 2001. Available on: <https://www.fao.org/4/y1899e/y1899e00.htm>. Accessed on: Feb. 2025.
- Ferreira, C. C. B.; Rosanova, C.; Barbosa, J. M.; Lima, S. O. Caracterização química por meio do uso de remineralizador em solos do Tocantins. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v.7, 2024.
- Fox, J.; Weisberg, S. effects: Effect displays for linear, generalized linear, and other models. R package version. CRAN - Contributed Packages, 2025. Available on: <https://cran.r-project.org/package=effects>. Accessed on: Feb. 2025.
- Gazola, R. de N.; Lovera, L. H.; Celestrino, T. de S.; Dinalli, R. P.; Montanari, R.; Queiroz, H. A. Variabilidade espacial das concentrações de nutrientes foliares da soja correlacionadas com atributos químicos de um Latossolo Vermelho distroférico. Revista Ceres, v.64, n.4, p.441-449, 2017. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764040014>.
- Hasui, Y.; Abreu, F. A. M.; Silva, J. M. R. Estratigrafia da faixa de dobramentos Paraguai-Araguaia no centro-norte do Brasil. Boletim IG - Instituto de Geociências, v.8, p.107-118, 1977.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Banco de dados e informações ambientais: um instrumento para organização e preservação. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Available on: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>. Accessed on: March 2026.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de solos do Brasil - versão 2023. Arquivo vetorial. Escala nominal 1:250.000. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/15829-solos.html?=&t=downloads>.

- Kassambara, A.; Mundt, F. factoextra: Extract and visualize the results of multivariate data analyses. R package version 1.0.5. CRAN - Contributed Packages, 2020. Available on: <https://cran.r-project.org/package=factoextra> Accessed on: March 2026.
- Leite, O. da C.; Luz, J. H. S. da; Lima, S. de O.; Silva, R. R. da; Fidelis, R. R.; Manhães, C. M. C.; Peluzio, J. M.; Ferreira Júnior, O. J.; Santos, M. G. dos; Pinto, I. de O.; Araújo Filho, R. N. de; Silva, A. D. P. da; Cachoeira, J. N.; Scheidt, G. N. Effect of liming in plinthic and petroplinthic soils for soybean cultivation in the Brazilian Savanna. **AJCS**, [S. l.], v.18, n.2, p. 64-71, 2024. <https://doi.org/10.21475/ajcs.24.18.02.PNE3872>.
- Lepsch, I. F. 19 lições de pedologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- Lumbreras, J. F.; Carvalho Filho, A. de; Motta, P. E. F. da; Barros, A. H. C.; Áglio, M. L. D.; Dart, R. de O.; Silveira, H. L. F. da; Quartaroli, C. F.; Almeida, R. E. M.; Freitas, P. L. de. Aptidão agrícola das terras do Matopiba. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2015. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1025303>.
- Manly, B. F. J. Métodos estatísticos multivariados: uma introdução. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2008. 229p.
- Marquardt, L.; Ramos, M. R.; Santos, D. M. A. dos; Marquardt, G. Produtividade de cultivares de soja sob diferentes manejos em plintossolo pétrico. Cuadernos de Educación y Desarrollo, v.15, n.1, p.199-217, 2023. <https://ojs.cuadernoseducacion.com/ojs/index.php/ced/article/view/943>.
- Marschner, P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3.ed. London: Academic Press, 2012.
- Martin-Neto, L.; Tadini, A. M.; Bento, L. R.; Santos, J. V. dos; Milori, D. M. B. P. Estrutura e natureza química da matéria orgânica do solo. In: Bettiol, W.; Silva, C. A.; Cerri, C. E. P.; Martin-Neto, L.; Andrade, C. A. de. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Brasília: Embrapa, 2023. Cap.5, p. 145-184.
- Matos, A. P. de; Matias, S. S. R.; Pires, M. de F. M.; Costa, R. M.; Oliveira Neto, C. J. de; Ferreira, M. V. de L.; Batista, R. A. Spatial distribution of nutrients in banana leaves under the effect of liming. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.29, n.11, e293164, 2025. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n11e293164>.

- Meersmans, J., Martin, M. P., De Ridder, F., Lacarce, E., Wetterlind, J., De Baets, S., et al. A Novel Soil Organic C Model Using Climate, Soil Type and Management Data at the National Scale in France. *Agron. Sustain. Dev.* 32, n. 4, 873–888, 2012. doi:10.1007/s13593-012-0085-x
- Miranda, I. B.; Santos, Í. E. dos A.; Amorim, M. do N.; Turco, S. H. N.; Lins, A. C. de S. Climatized packing house with evaporative coolers - Part 2: Geostatistical mapping. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.29, n.6, e281082, 2025. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n6e281082>.
- Novais, R. F.; Smyth, T. J.; Nunes, F. F. Fósforo. In: Novais, R. F.; Alvarez V., V. H.; Barros, N. F.; Fontes, R. L. F.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. *Fertilidade do solo*. Viçosa: SBCS, 2007. Cap.8, p.276-374.
- Oksanen, J.; Simpson, G. L.; Blanchet, F. G.; Kindt, R.; Legendre, P.; Minchin, P. R.; O'Hara, R. B.; Solymos, P.; Stevens, M. H. H.; Szoecs, E.; Wagner, H.; Barbour, M.; Bedward, M.; Bolker, B.; Borcard, D.; Carvalho, G.; Chirico, M.; De Caceres, M.; Durand, S.; Evangelista, H. B. A.; Fitzjohn, R.; Friendly, M.; Furneaux, B.; Hannigan, G.; Hill, M. O.; Lahti, L.; McGlinn, D.; Ouellette, M.-H.; Cunha, E. R.; Smith, T.; Stier, A.; Ter Braak, C. J. F.; Weedon, J.; Borman, T. *vegan: Community ecology package*. R package version 2.2-1. CRAN - Contributed Packages, 2015. Available on: <<http://cran.r-project.org/package=vegan>> Accessed on: Feb. 2025.
- Oliveira, S. A. Análise foliar. In: Sousa, D. M. G.; Lobato, E., ed. *Cerrado: correção do solo e adubação*. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.245-256.
- Oliver, M. and Webster, R. A Tutorial Guide to Geostatistics: Computing and Modelling Variograms and Kriging. *Catena*, n. 113, p. 56-69, 2014.
- Poesen, J.; Lavee, H. Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena*, v.23, n.1-2, p.1-28, 1994. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90050-7).
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2019. Available on: <https://www.r-project.org/>. Accessed on: Feb. 2025.
- Ramos, M. R. A. Review of soybean cultivation on stony soils in Tocantins, Brazil. *International Journal of Science and Research*, v.11, p.367-371, 2022. <https://www.ijsr.net/getabstract.php?paperid=SR22305001852>.

- Ramos, M. R.; Figueiredo, M. S. S.; Loureiro, R. M.; Alves, G. B. Panorama das pesquisas sobre Plintossolos, Petroplintitas e Plintitas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.18, n.4, p.2882-2898, 2025. <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/263077/49632>.
- Santos, H. G. dos; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C. dos; Oliveira, V. A. de; Lumbrreras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A. de; Araújo Filho, J. C. de; Oliveira, J. B. de; Cunha, T. J. F. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5.ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2025.
- Schobbenhaus, C.; Neves, B. B. de. A geologia do Brasil no contexto da Plataforma Sul-Americana. In: Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil = Geology, tectonics and mineral resources of Brazil: texto, mapas & SIG. Brasília: CPRM, 2003.
- Severiano, E. da C.; Souza, I. R. M. de; Souza, L. G.; Santos, G. G.; Collier, L. S. Caracterização físico-hídrica de amostras de solos da XIV RCC, estados de Goiás e Tocantins. In: Santos, G. G.; Oliveira, V. A. de; Lumbrreras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, R. E. M. de; Madari, B. E. Guia de campo da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC de Goiás e Tocantins. Brasília, DF: Embrapa, 2023.
- Sodré, F. F. Química do solo: uma introdução. Artigos Temáticos do AQQUA, v.1, p.17-29, 2012. <https://aqqua.unb.br/biblioteca-aqqua/>.
- Souza, J. O.; Moreton, L. C. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil - PLGB. Xambioá - Folha SB.22-Z-B. Estados do Pará e Tocantins. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001.
- SEPLAN – Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública. **Atlas do Tocantins**: subsídios ao planejamento da gestão territorial. 6. ed. Palmas: SEPLAN, 2012.
- Sturges, H. A. The choice of a class interval. Journal of the American Statistical Association, v.21, p.65-66, 1926. <https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
- Swanson, C. L. W.; Ritchie, A.; Doehne, H. A. Coarse particle distribution in the skeleton of some coarse- to medium-textured soils. Journal of Soil Science, v.6, n.2, p.209-218, 1955. <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2389.1955.tb00844.x>.

- Tang, Y.; Horikoshi, M.; Li, W. ggfortify: Unified interface to visualize statistical results of popular R packages. *The R Journal*, v.8, n.2, p.474-485, 2016. <https://journal.r-project.org/issues/2016-2/>.
- Tardy, Y. *Pédrologie des latérites et des sols tropicaux*. Paris: Masson, 1993.
- Veronesi, F.; Schillaci, C. Comparison between geostatistical and machine learning models as predictors of topsoil organic carbon with a focus on local uncertainty estimation. *Ecol. Indic.* v. 101, p. 1032–1044, 2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X19301359?via%3Dihub>.
- Vieira, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R. F.; Alvarez V., V. H.; Schaefer, C. E. G. R. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-54, 2000.
- Vieira, S. R.; Guedes Filho, O.; Chiba, M. K.; Mellis, E. V.; Dechen, S. C. F.; De Maria, I. C. Variabilidade espacial dos teores foliares de nutrientes e da produtividade da soja em dois anos de cultivo em um Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.1503-1514, 2010. <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/wH67Y7KpDvb36dGnhRXvZ5p/?format=pdf&lang=pt>.
- Vogado, R. F.; Souza, H. A.; Matias, S. S. R.; Gualberto, A. V. S.; Cunha, J. R. da; Leite, L. F. C. Spatial variability of carbon and nitrogen stocks in integrated management systems and pasture in a Cerrado region. *Research, Society and Development*, v.9, e67291110220, 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.10220>.
- Wang, E.; Cruse, R. M.; Zhao, Y.; Chen, X. Quantifying soil physical condition based on soil solid, liquid and gaseous phases. *Soil and Tillage Research*, v.146, p.4-9, 2015. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198714001974>.
- Zhang, Y.; Zhang, M.; Niu, J.; Li, H.; Xiao, R.; Zheng, H.; Wang, J. Rock fragments and soil hydrological processes: Significance and progress. *Catena*, v.147, p.153-166, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.012>.
- Zheng, Y.; Chen, N.; Zhang, C.; Dong, X.; Zhao, C. Effects of rock fragments on the soil physicochemical properties and vegetation on the northeastern Tibetan Plateau. *Frontiers in Environmental Science*, v.9, 693769, 2021. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.693769>.

CAPÍTULO 3: PLASTICIDADE FENOTÍPICA DA SOJA FRENTE À HETEROGENEIDADE DOS PLINTOSSOLOS PÉTRICOS

CHAPTER 3: PHENOTYPIC PLASTICITY OF SOYBEAN IN RESPONSE TO THE HETEROGENEITY OF PETRIC PLINTHOSOLS

RESUMO

A expansão da sojicultura sobre áreas com predominância de Plintossolos Pétricos no estado do Tocantins levanta questionamentos acerca das limitações impostas pela elevada pedregosidade desses solos ao desempenho produtivo da cultura. Diante disso, o presente estudo objetivou avaliar a influência da variação do teor de cascalho de um Plintossolo Pétrico Concrecionário sobre a produtividade da soja. A pesquisa foi conduzida em um talhão comercial de 96 hectares localizado no município de Pium-TO. Foram realizadas avaliações biométricas da cultura em 72 unidades amostrais distribuídas com base na variabilidade espacial do teor de cascalho previamente interpolado por krigagem ordinária. Os dados foram analisados por meio de Análise de Componentes Principais (ACP) e correlação de Pearson. A análise multivariada indicou que maiores teores de cascalho interferiram no estabelecimento inicial do estande, reduzindo a densidade populacional. No entanto, essa restrição física não comprometeu a produtividade final da área. A cultura demonstrou elevada plasticidade fenotípica, acionando mecanismos de compensação nos quais as plantas em áreas menos densas apresentaram maior eficiência reprodutiva individual, com incremento no número de vagens e de grãos por planta. Conclui-se que o teor de cascalho não determinou diretamente a produtividade da soja, mas influenciou atributos estruturais do estande, evidenciando que a capacidade adaptativa e compensatória da cultura dissocia as restrições físicas do solo do desempenho produtivo final.

Palavras-chave: Fração grosseira; Plasticidade fenotípica; Componentes de rendimento; Análise multivariada.

ABSTRACT

The expansion of soybean cultivation into areas dominated by Petric Plinthosols in the state of Tocantins raises questions regarding the limitations imposed by the high stoniness of these soils on crop performance. Therefore, this study aimed to evaluate the influence of gravel content variation in a Petric Plintossol on soybean productivity. The research was conducted in a 96-hectares commercial field located in the municipality of Pium, Tocantins. Biometric evaluations of the crop were performed in 72 sampling units distributed according to the spatial variability of gravel content previously interpolated by ordinary kriging. The data were analyzed using Principal Component Analysis (PCA) and Pearson correlation. Multivariate analysis indicated that higher gravel contents interfered with the initial establishment of the stand, reducing plant population density. However, this physical constraint did not compromise the final productivity of the area. The crop showed high phenotypic plasticity, activating compensatory mechanisms in which plants established in less dense areas exhibited greater individual reproductive efficiency, with increases in the number of pods and grains per plant. It is concluded that gravel content did not directly determine soybean productivity but influenced structural attributes of the stand, indicating that the adaptive and compensatory capacity of the crop dissociates soil physical constraints from the final productive performance.

Keywords: Coarse fraction; Phenotypic plasticity; Yield components; Multivariate analysis.

3. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* [L.] Merr.) apresenta grande relevância para o setor agrícola brasileiro, sendo o país um dos maiores produtores mundiais dessa leguminosa. Nas últimas décadas, a produção de soja no Brasil tem apresentado crescimento significativo, impulsionado principalmente pela alta demanda no mercado internacional e pelas condições edafoclimáticas favoráveis que o país apresenta (Silva; Lima; Batista, 2011).

O cultivo da soja exerce expressiva influência socioeconômica, especialmente em razão de sua importância na produção de biodiesel e no fornecimento de proteína vegetal para alimentação humana e animal (Mauad *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2017). Essa relevância está associada ao elevado teor de óleo presente nos grãos, que varia entre 17% e 22%, conferindo grande importância industrial, especialmente na produção de biodiesel e em outras aplicações agroindustriais (Clemente; Cahoon, 2009; Dayana *et al.*, 2022).

O fortalecimento da cadeia produtiva da soja no Brasil é resultado de diversos fatores, entre os quais se destacam o desenvolvimento de cultivares adaptadas, o uso de tecnologias agrícolas, políticas públicas de incentivo e, sobretudo, a constante incorporação de novas áreas produtivas às fronteiras agrícolas, especialmente no Cerrado e na região do MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) (Campos, 2011; Dall'agnol; Hirakuri, 2008; Warnken, 2000).

De acordo com Campagnaro *et al.* (2025), o desempenho produtivo da soja está diretamente associado às condições edafoclimáticas das regiões de cultivo. O desenvolvimento radicular da cultura é favorecido em solos profundos, bem drenados e de textura média a leve, características que permitem à planta maior exploração do perfil do solo e, conseqüentemente, melhor aproveitamento de água e nutrientes. Paraginski *et al.* (2024) destacam que a produtividade está diretamente associada à eficiência morfofisiológica das plantas e as condições sanitárias, enquanto Zuffo *et al.* (2020) ressaltam a importância dos componentes do rendimento, principalmente o número de vagens por planta, como determinantes do potencial produtivo.

Além disso, a produtividade da soja é influenciada pela escolha de cultivares adaptadas, pelo manejo adequado do solo e da nutrição, bem como pelo controle eficiente de pragas e doenças. Cultivares com maior adaptação às condições locais tendem a apresentar melhor desempenho produtivo, enquanto práticas como

adubação balanceada, e redução da compactação do solo contribuem para otimizar o rendimento da cultura (Santos *et al.*, 2018).

A soja apresenta elevada plasticidade, caracterizada pela capacidade de adaptação a diferentes ambientes e sistemas de manejo. Essa plasticidade é expressa por variações morfológicas e nos componentes de rendimento, uma vez que a planta ajusta seu crescimento e arquitetura ao arranjo espacial disponível, buscando o aproveitamento mais eficiente dos recursos para alcançar um melhor rendimento possível (Pires *et al.*, 2000).

O desenvolvimento da soja é fortemente condicionado por fatores climáticos, especialmente temperatura, disponibilidade hídrica e fotoperíodo. Segundo Farias, Nepomuceno e Neumaier (2007), as temperaturas mais favoráveis à produção da soja situam-se entre 20°C e 30°C. Os autores também destacam a sensibilidade da cultura ao fotoperíodo, característica variável entre cultivares, classificando a soja como uma planta de dia curto.

A exigência hídrica da soja ao longo do ciclo varia entre 450 e 800 mm, sendo a disponibilidade de água considerada crítica nos estádios de germinação-emergência e floração-enchimento de grãos (Embrapa Soja, 2013). Conforme descrito por Taiz, Moller, Murphy e Zeiger (2017), a deficiência hídrica desencadeia respostas fisiológicas como o fechamento estomático, a queda de folhas e o abortamento de estruturas reprodutivas, resultando em redução da produtividade. Nesse contexto, a cultura apresenta melhor desempenho em solos bem drenados, de textura média, com boa fertilidade e disponibilidade de nutrientes.

No entanto, a expansão da sojicultura tem avançado, nos últimos anos, sobre áreas do estado do Tocantins consideradas inaptas à agricultura, caracterizadas pelo predomínio de Plintossolos Pétricos. Esses solos apresentam limitações naturais, como elevado teor de cascalho, baixa capacidade de retenção de água e elevada acidez. Apesar disso, sua ocupação tem sido impulsionada pela disponibilidade de extensas áreas com relevo plano, favorável à mecanização agrícola, e por um regime de chuvas adequado ao cultivo. Além disso, essas regiões integram a última fronteira agrícola do país, o que reforça seu potencial estratégico para a expansão da produção (Coelho *et al.* 2012; Lumbreras *et al.*, 2015 Ramos, 2022).

Dentre as principais limitações impostas pelos Plintossolos Pétricos, destaca-se a presença de fração cascalhenta composta por concreções ferruginosas. A variação no volume, tamanho e arranjo dessa fração no perfil conferem

heterogeneidade pedológica e pode resultar em diferentes graus de restrição física do crescimento radicular. Em situações de maior proporção de cascalho, observam-se redução do volume de solo efetivamente explorável pelas raízes, limitação no armazenamento de água no perfil e aquecimento da petroplintita, comprometendo a uniformidade da emergência da cultura e, conseqüentemente, sua produtividade (Almeida *et al.*, 2023; Lumbreras *et al.*, 2015). Diversos estudos demonstram que solos com elevada fração grosseira apresentam restrição do volume de solo explorável pelas raízes, redução da capacidade de armazenamento de água e concentração de nutrientes na fração fina, o que pode resultar em respostas agrônômicas distintas, em função da interação entre textura, fertilidade e regime hídrico (Poesen; Lavee, 1994; Zhang *et al.*, 2016; Zheng *et al.*, 2021).

De acordo com Ramos *et al.* (2022), apesar das limitações naturais, os Plintossolos Pétricos têm apresentado produtividade de soja próxima às obtidas em Latossolos, tradicionalmente considerados de alta aptidão agrícola. Esse desempenho pode estar relacionado à adoção de práticas de manejo conservacionistas, como utilização de palhada que promove aumento da matéria orgânica, conservação da umidade e diminuição da temperatura do solo (Almeida *et al.*, 2025). Nesse sentido, Marquardt *et al.* (2023), ao avaliarem diferentes estratégias de manejos em Latossolo e Plintossolo Pétrico, observaram incrementos significativos na produtividade da soja em ambos os tipos de solo, evidenciando que o manejo adotado exerce influência sobre o desempenho da cultura, mesmo em ambientes com restrições naturais.

Dados da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2025), revelam que a produção nacional de soja na safra 2024/2025 atingiu 168,34 milhões de toneladas, representando um aumento de aproximadamente 14% em relação à safra anterior (2023/2024), que foi de 147,72 milhões de toneladas. No estado do Tocantins, a produção apresentou crescimento ainda mais expressivo, passando de 4,58 milhões de toneladas na safra 2023/2024 para 5,86 milhões de toneladas em 2024/2025, o que corresponde a um incremento de 28,1%. Esses resultados reforçam a importância crescente da sojicultura tocantinense no cenário nacional, mesmo em regiões com predominância de solos com limitações naturais, como os Plintossolos Pétricos.

Nesse contexto, coloca-se a questão acerca da relação entre a variação do teor de cascalho e a produtividade da soja. Embora o cascalho seja tradicionalmente reconhecido como fator limitante ao desenvolvimento radicular e à retenção de água,

seus efeitos sobre o desempenho produtivo podem não ocorrer de forma isolada, mas resultar da interação com atributos químicos, condições de manejo e pela plasticidade da cultura em responder à heterogeneidade do pedoambiente.

Portanto, parte-se da hipótese de que o teor de cascalho em Plintossolo Pétrico pode exercer influência significativa sobre a produtividade da soja, seja por efeitos diretos no ambiente físico, seja por sua atuação nos atributos químicos e de manejo.

Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência da variação do teor de cascalho de um Plintossolo Pétrico Concrecionário sobre a produtividade da soja.

3.1 MATERIAL E MÉTODOS

3.1.1 Caracterização da área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida em um talhão de 96 hectare na Fazenda Gaivota, localizada no município de Pium, TO, a 124 quilômetros de Palmas, região central do estado, conforme ilustrado na Figura 1. A área de estudo está localizada na Bacia Hidrográfica do Rio Formoso, correspondendo a faixas de dobramentos e coberturas metassedimentares do Proterozoico médio e superior. Predominam as formações geológicas Pequizeiro e Couto Magalhães (Seplan, 2012; Schobbenhaus; Neves, 2003). A unidade geológica Pequizeiro apresenta contato tectônico com as rochas da formação Xambioá em sua porção oriental. Sua composição predominante inclui xistos de clorita e quartzo, além de xistos cloríticos, intercalados com camadas de calcários xistosos, xistos talcosos, xistos de talco-actinolita, serpentinitos, metabásicos e filitos (Hasui; Abreu; Silva, 1977). A formação Couto Magalhães é composta principalmente por rochas metamórficas de granulagem fina, como filitos, metassiltitos e metargilitos, representando um conjunto de litofácies típicas de origem pelítica. Na região, ocorrem extensas faixas de conglomerados polimíticos intercalados com metarcóseos (Souza; Moreton, 2001).

A região de estudo possui clima tropical com inverno seco, classificado como equatorial quente e úmido a semiúmido, caracterizado por duas estações bem definidas: uma chuvosa, de novembro a abril, e; outra seca, de junho a setembro, sendo os meses de maio e outubro transicionais. As precipitações médias anuais variam entre 1.400 a 2.000 mm, com valores médios em torno de 1900 mm. A temperatura média anual é de aproximadamente 26 °C, com temperaturas máximas

próximas a 32 °C e mínimas em torno de 20 °C. Sua cobertura vegetal nativa é aquela associada ao bioma de Cerrado com vegetação variando de campo cerrado, cerrado *sensu stricto* e cerradão (IBGE, 2021; SEPLAN, 2012; CPRM, 2009).

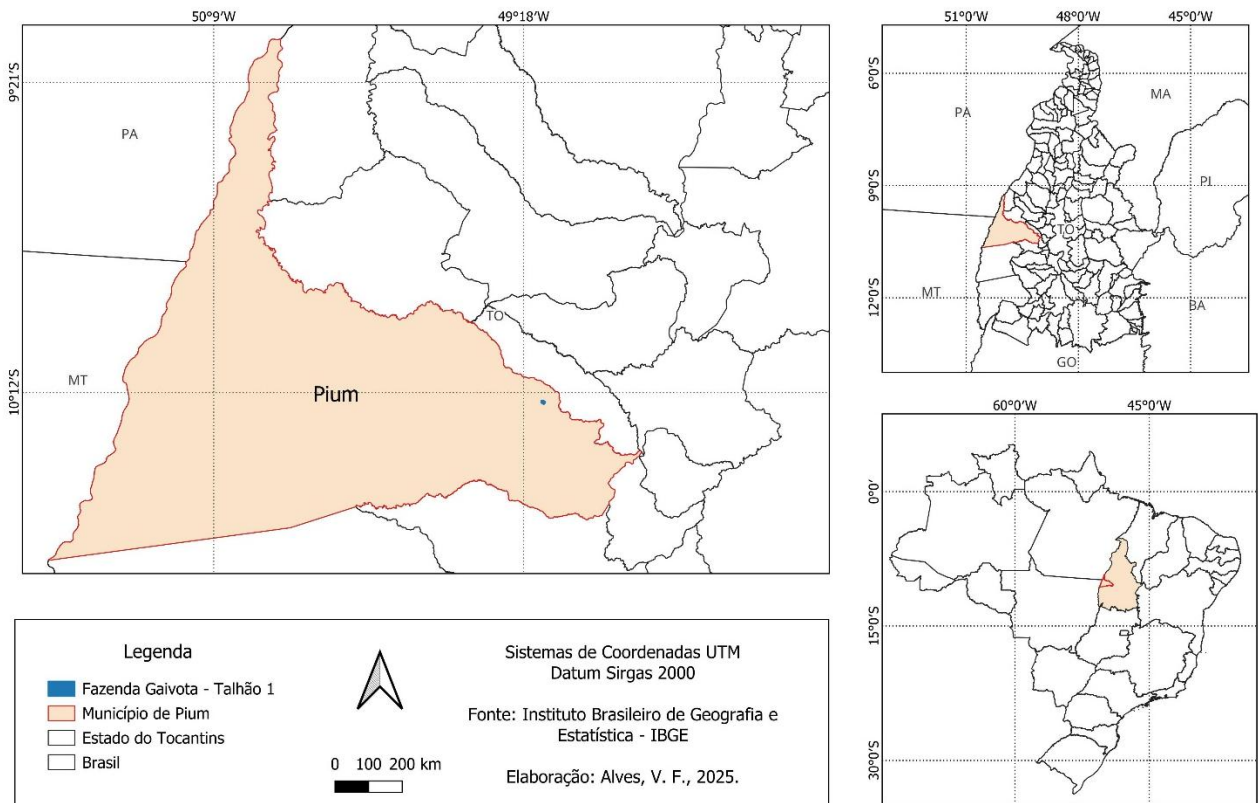


Figura 1 – Localização geográfica da área de estudo, correspondente à Fazenda Gaivota (Talhão 1), no município de Pium, estado do Tocantins, com indicação de sua posição em escala estadual e nacional.

Fonte: adaptado pela autora a partir dos dados do IBGE.

De acordo com dados do IBGE (2023), o município de Pium-TO apresenta uma diversidade de classes de solos, com predominância de Plintossolo Pétrico concrecionário (FFc). Além dele, ocorrem, em menor extensão, Plintossolos Argilúvicos (FTd) e Háplicos (FXd) Distróficos, Gleissolos Háplicos Tb Distróficos (GXbd), Latossolos Vermelho-Amarelo Distróficos (LVAd), e diferentes tipos de Neossolos (RLd, RQo e RYbd). Essa variedade pedológica reflete a diversidade ambiental da região, sendo que nas áreas da fazenda estudada prevalecem os Plintossolos Pétricos, solos marcados pela presença de horizonte concrecionário

superficial, alta concentração de cascalhos, baixa fertilidade natural e características de drenagem variável, o que impõe restrições ao uso agrícola intensivo.

3.1.2 Avaliação dos caracteres agronômicos da soja

A avaliação dos caracteres agronômicos foi realizada em plantas da cultivar de soja (Olimpo 80182 RSF IPRO). A semeadura e o manejo da adubação seguiram as práticas adotadas na propriedade.

Com base na partir da superfície interpolada do teor de cascalho, obtida por krigagem ordinária conforme descrita no Capítulo 2, foram distribuídas as unidades amostrais, de modo a representar a variabilidade espacial do atributo na área de estudo (Figura 2). A distribuição das unidades amostrais considerou a variação espacial dos atributos granulométricos do solo, com ênfase no teor de cascalho e na fração terra fina, obtidos a partir das análises de solo.

Para cada unidade amostral das plantas de soja, foi extraído o valor estimado de cascalho correspondente ao pixel da superfície interpolada no qual o ponto amostral estava inserido. Assim, os valores de teor de cascalho associado a cada unidade amostral correspondem a uma estimativa espacial do atributo no local de coleta, permitindo a integração entre os atributos do solo e os dados agronômicos.

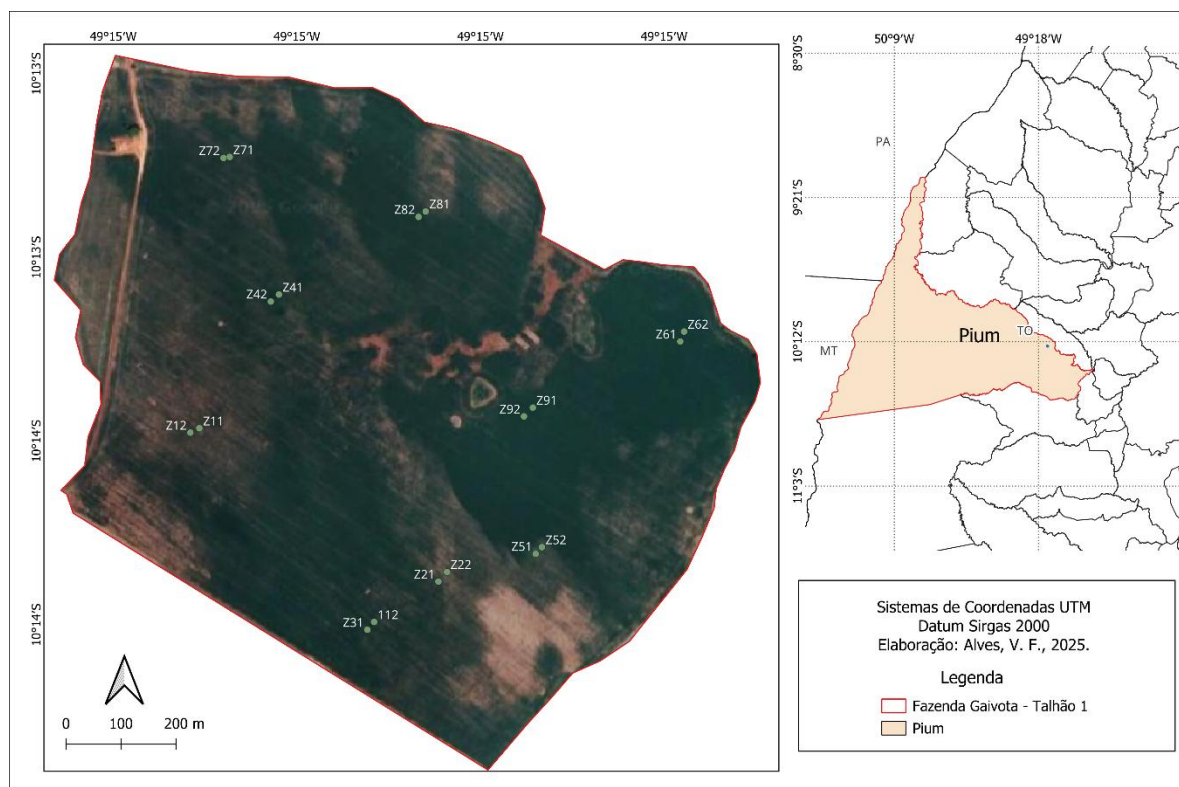


Figura 12 – Localização das unidades amostrais e dos pontos de coleta das amostras de soja no Talhão 1 da fazenda Gaivota, no município de Pium.

A coleta das plantas de soja foi realizada manualmente em campo. Em cada unidade amostral foram definidos dois pontos de amostragem, totalizando dezoito pontos amostrais na área de estudo. Em cada ponto de coleta, foram amostradas quatro linhas de cultivo, considerando um metro linear por linha, todas as plantas contidas nesse espaço foram coletadas integralmente, caracterizando a unidade amostral.

As plantas foram devidamente identificadas por unidade amostral e ponto de amostragem, enfeixadas e acondicionadas para transporte até o laboratório, onde se procedeu o processamento das amostras.

No laboratório, os feixes de plantas correspondentes a cada unidade amostral foram submetidos à secagem em estufa de circulação de ar forçada a 65 °C, por um período mínimo de 72 horas. Esse procedimento teve como objetivo evitar perdas por decomposição mediada por microrganismos.

Após a secagem, as amostras foram processadas para obtenção dos seguintes caracteres agronômicos:

- a. Altura de planta (H): altura média das plantas, medida da base ao ápice do caule, por unidade amostral;
- b. Diâmetro do caule (D): diâmetro médio da base do caule das plantas em cada unidade amostral;
- c. Altura de inserção da primeira vagem (IPV): altura média da inserção da primeira vagem por unidade amostral;
- d. Número de vagens (NV): número médio de vagens em cada unidade amostral;
- e. Número de grãos por vagem (NGV): número médio de grãos nas vagens em cada unidade amostral;
- f. Número de nós (NN): número médio de nós na unidade amostral;
- g. Densidade de plantas (Dens): número de plantas por metro linear;
- h. Número de grãos por planta (NGP): número médio de grãos em cada planta da unidade amostral;
- i. Número de grãos total (NGL): número total de grãos em cada unidade amostral;
- j. Massa de grãos total (MGL): massa de grãos corrigida para 13% de umidade obtidos na unidade amostral;
- k. Massa de mil grãos (MMG): massa total de 1.000 grãos corrigida para 13% de umidade, na unidade amostral.

A produtividade foi estimada a partir da massa de grãos e corrigida para sacas por hectare (sc).

3.1.3 Análise estatística

Os dados obtidos em cada unidade amostral foram reunidos em uma matriz $Y_{(n \times p)}$, composta por 72 unidades amostrais ($n = 72$) e 15 variáveis ($p = 15$) ou descritores da soja em cada unidade amostral.

A partir da matriz $Y_{(n \times p)}$ foi obtida uma matriz de correlações ($r_{(p \times p)}$) tendo em vista que as variáveis foram padronizadas de modo a apresentar média igual a zero e desvio padrão igual a um ($\mu=0$; $\sigma^2 = 1$). Sobre esta matriz, a decomposição espectral da análise de componentes principais (ACP) foi aplicada, resultando na extração de $k=p$ componentes principais e autovalores associados (λ_k).

Os autovalores avaliam quanto da variância dos dados foi capturada por cada um dos k -componentes principais e, no caso presente em que a ACP foi aplicada a uma matriz de correlações ($r_{(p \times p)}$) a variância total é igual ao número total de variáveis contida na matriz de correlações ($\sigma^2 = p$). Assim, a razão entre o autovalor k e p ($\sigma_k^2 = \lambda_k/p$) representa o percentual de variância capturada pelo autovetor associado ao k -autovalor.

A ACP foi utilizada com o objetivo de reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados, identificar gradientes de variação, avaliar quais caracteres agrônômicos apresentam maior associação com a produtividade da soja e verificar se o teor de cascalho nas diferentes zonas de manejo exerce influência sobre o desempenho produtivo da cultura. A análise foi realizada por meio da função “prcomp”, do pacote base stats, disponível no ambiente R. Após uma primeira inspeção dos autovalores (que indicam o percentual de variação atribuída a cada componente principal), aplicou-se uma seleção de componentes principais e variáveis segundo um algoritmo de duplo critério.

A seleção do número de componentes retidos baseou-se no critério de Kaiser, considerando apenas aqueles com autovalores iguais ou superiores a 1 ($\lambda_k \geq 1$). Em seguida, avaliou-se a qualidade de representação das variáveis por meio da soma das comunalidades associadas aos componentes retidos. Variáveis cuja comunalidade acumulada tenha sido inferior a 0,6 foram excluídas da análise, e a ACP foi recalculada considerando apenas o conjunto final de variáveis com representação satisfatória no espaço reduzido. Assim, os dados finais da ACP foram a representação do resultado da seleção de duplo critério dos componentes principais (por meio do critério de Kaiser) e das variáveis (por meio da escolha daquelas com maior soma dos valores de comunalidades associados aos eixos selecionados).

A correlação de Pearson foi utilizada para avaliar o grau de associação linear entre os escores dos componentes principais selecionados e o teor de cascalho. A representação final dos resultados da ACP foi feita por intermédio de um biplot, no qual foram projetados no espaço bidimensional (reduzido, portanto) as variáveis selecionadas e os primeiros componentes principais assumindo que estes capturaram a maior parte da variância contida na matriz original.

Para fins exploratórios e de visualização gráfica no biplot, o teor de cascalho foi classificado em intervalos de classe, calculados de acordo com a regra de Sturges

(Sturges, 1926) e os pontos (n=72 observações) identificados por ícones e cores associados a cada um dos intervalos de classe.

Todas as análises foram realizadas no ambiente R (R Core Team, 2019) utilizando os pacotes *vegan*, *factoextra* e *ggfortify*, executados no software RStudio (Kassambara; Mundt, 2020; Oksanen *et al.*, 2015; Tang; Horikoshi; Li, 2016).

3.2 RESULTADOS

A Análise dos Componentes Principais (ACP) permitiu identificar os caracteres agrônômicos que mais estão relacionados com a produtividade da soja, bem como compreender como esses atributos variam entre as unidades amostrais.

A tabela 7 apresenta os três primeiros componentes principais que apresentaram autovalores superiores a 1 (critério de Kaiser ($\lambda_k \geq 1$)) e juntos, esses eixos explicam cerca de 85,53% da variância total. Os dois primeiros componentes principais explicaram conjuntamente 71,18% da variância total dos dados, sendo o primeiro componente principal (PC1) responsável por explicar 42,5% e o segundo componente principal (PC2) 28,67%. Isto indica que estes explicam adequadamente a variabilidade dos dados, não havendo perdas significativas de informações ao limitar a interpretação dos dados apenas a esses dois primeiros eixos.

Tabela 7 – Autovalores e variância acumulada dos três componentes principais obtidos por meio da ACP, aplicada à matriz de correlação das variáveis descritoras da soja nas unidades amostrais, considerando apenas os eixos que atenderam o critério de Kaiser ($\lambda_k \geq 1$).

Dimensões	Autovalor (λ_k)	% explicado	% cumulativo da explicação
Dim 1	3,83	42,5	42,5
Dim 2	2,58	28,67	71,18
Dim 3	1,29	14,35	85,53

Fonte: Autora, 2025.

A Figura 13 apresenta, por meio de um biplot, o resultado da ACP aplicada aos caracteres agrônômicos da soja, no qual se observa o ordenamento das amostras ao longo do eixo do primeiro componente principal (PC1), associado a um gradiente relacionado com a densidade de plantas e variações estruturais do corpo vegetal.

Estas variações podem ser melhor visualizadas na Tabela 8, onde estão representadas as correlações entre as variáveis e os três primeiros componentes principais. Os maiores coeficientes de correlação indicam os caracteres agrônômicos que mais contribuíram para a estruturação de cada eixo da ACP.

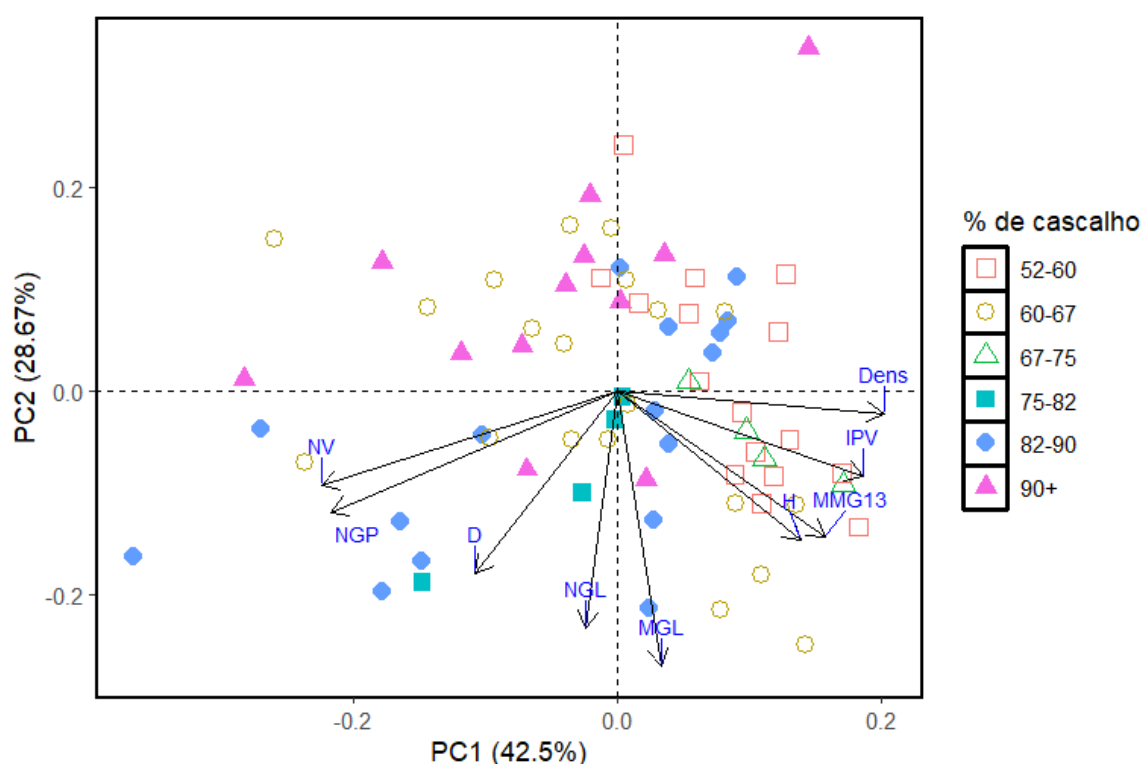


Figura 13 – Biplot da Análise de Componentes Principais (ACP) dos caracteres agrônômicos da soja, representando a distribuição das unidades amostrais em função dos dois primeiros componentes principais (PC1 = 42,5% e PC2 = 28,67%)

Fonte: Autora, 2025.

O primeiro eixo (PC1) expressa um gradiente estruturado principalmente pela relação entre densidade populacional e desempenho reprodutivo individual. Conforme demonstrado pelas correlações apresentadas na Tabela 8, esse eixo apresentou correlação positiva com a densidade de plantas (Dens; $r = 0,82$), inserção da primeira vagem (IPV; $r = 0,76$), altura das plantas (H; $r = 0,56$) e massa média de grãos (MMG13; $r = 0,64$), e correlação negativa com o número de vagens (NV; $r = -0,92$) e

número de grãos por planta (NGP; $r = -0,88$). Assim, valores elevados de PC1 estão associados a maiores densidades populacionais e menores valores de NV e NGP, enquanto valores negativos refletem estandes menos densos com maior produção reprodutiva individual.

O segundo componente principal (PC2) apresentou forte associação com variáveis relacionadas ao rendimento da cultura, destacando-se as correlações negativas com massa total de grãos (MGL; $r = -0,90$), número total de grãos (NGL; $r = -0,79$) e diâmetro do caule (D; $r = -0,61$). Esse eixo pode ser interpretado como um gradiente de produção acumulada por área, refletindo variações no rendimento do estande.

Por sua vez, o terceiro componente principal (PC3), visualizado no biplot PC1 $\times$ PC3 (Figura 14), apresentou correlação positiva com o número total de grãos (NGL; $r = 0,58$) e correlações negativas com a altura das plantas (H; $r = -0,53$). Esse eixo expressa um gradiente morfo-produtivo, indicando variações simultâneas no porte das plantas e na produção total de grãos.

Sumariamente, a partir da leitura conjunta dos biplot (Figuras 13 e 14) e das correlações apresentadas na Tabela 8, é possível identificar três gradientes principais envolvidos na organização dos dados: um gradiente associado à densidade e produção individual (PC1), um gradiente de rendimento total do estande (PC2) e um gradiente morfológico e produtivo relacionado à altura das plantas e a produção total de grãos (PC3).

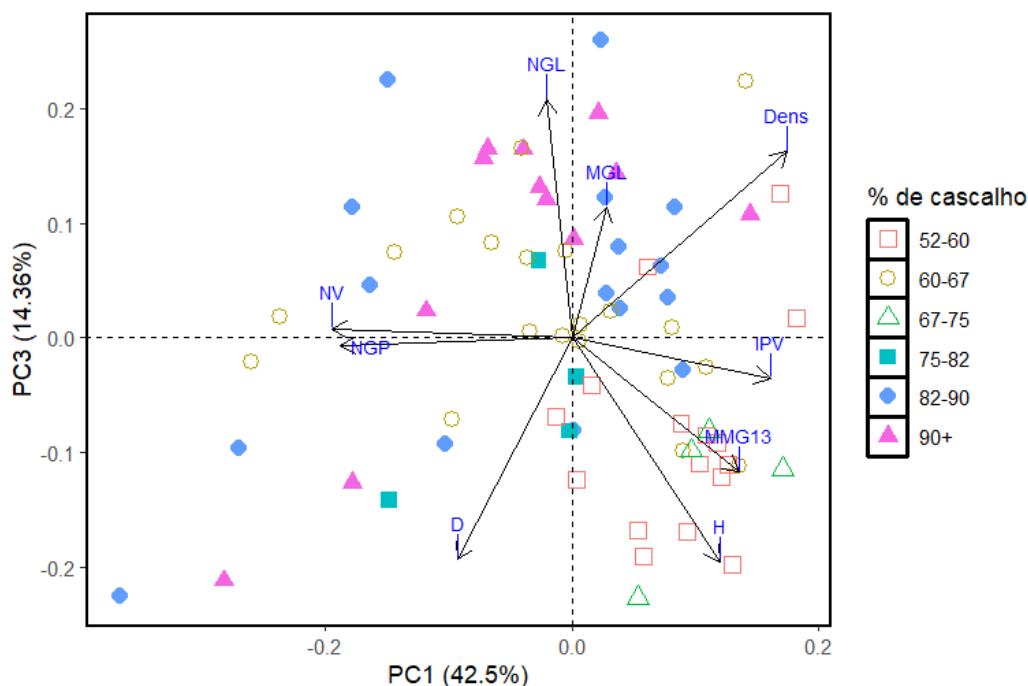


Figura 14 – Biplot da Análise de Componentes Principais (ACP) representando a distribuição das unidades amostrais nos eixos PC1 (42,5% da variância explicada) e PC3 (14,36%)

Fonte: Autora, 2025.

Tabela 8 – Correlações entre os escores dos componentes principais e os caracteres agrônômicos. Valores em negrito indicam os coeficientes de maior associação com seus respectivos eixos

Variável	PCA 1	PCA 2	PCA3
H	0,56	-0,49	-0,53
D	-0,44	-0,61	-0,53
IPV	0,76	-0,28	-0,09
NV	-0,92	-0,31	0,02
Dens	0,82	-0,07	0,44
NGP	-0,88	-0,41	-0,02
NGL	-0,09	-0,79	0,58
MMG13	0,64	-0,48	-0,32
MGL	0,13	-0,90	0,31

Fonte: Autora, 2025.

A partir da identificação desses gradientes estruturais, analisou-se a associação entre os escores dos componentes principais e o teor de cascalho no solo.

Os teores de cascalho variaram entre 52,7% e 96,94% nas unidades amostrais, evidenciando elevada heterogeneidade espacial na área experimental.

A análise de correlação entre o teor de cascalho e os escores dos três primeiros componentes principais (Figura 15) revelou associação significativa com o PC1 (gradiente relacionado à densidade e a produção individual) ($r = -0,389$; $p < 0,001$), indicando que a variação do cascalho está associada à redução dos valores desse eixo. Considerando que o PC1 apresenta correlação positiva com a densidade de plantas e negativa com número de vagens e grãos por planta, esse resultado sugere que maiores teores de cascalho tendem a se associar a menores densidades populacionais e a alterações nos caracteres reprodutivos individuais.

Não foi observada associação significativa entre o teor de cascalho e o PC2 ($r = 0,086$; $p = 0,473$), eixo caracterizado pelo rendimento total da cultura, sugerindo que a variação do volume de cascalho não se relacionou diretamente com o desempenho produtivo do estande.

Por outro lado, a PC3 apresentou correlação significativa com o teor de cascalho ($r = 0,346$; $p = 0,003$). Considerando que esse componente está positivamente associado ao número total de grãos (NGL) e negativamente à altura das plantas (H), o resultado indica que o aumento do teor de cascalho está associado a variações nesses atributos, com tendência a redução da altura das plantas e aumento do número total de grãos à medida que aumenta o volume de cascalho no solo.

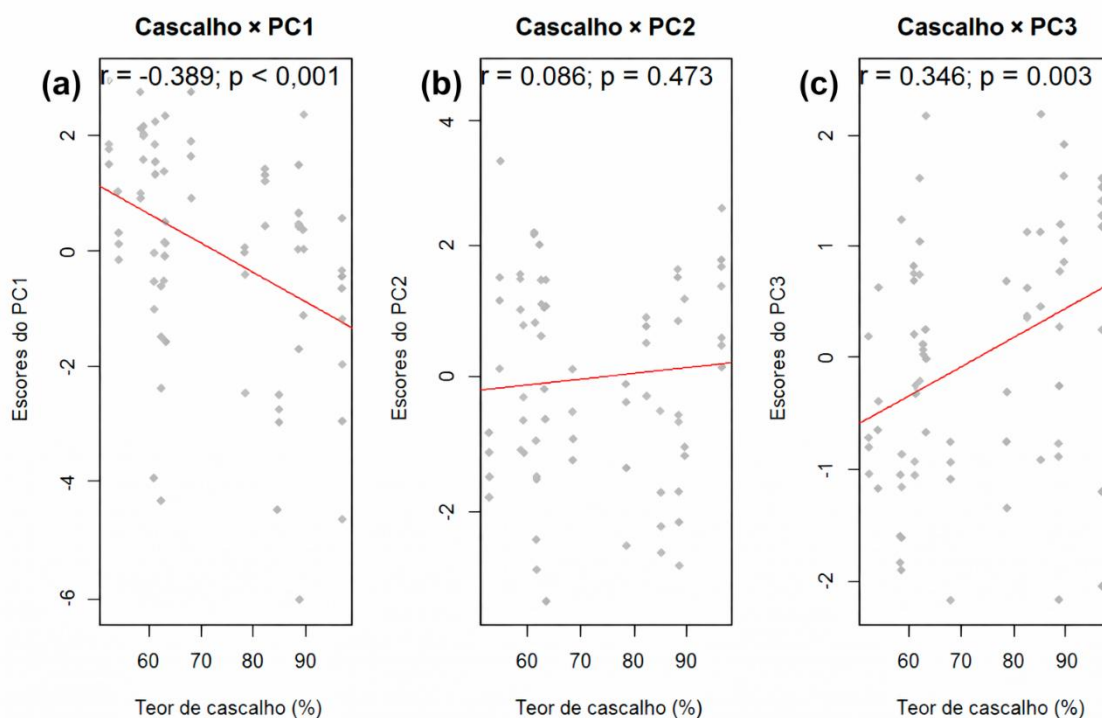
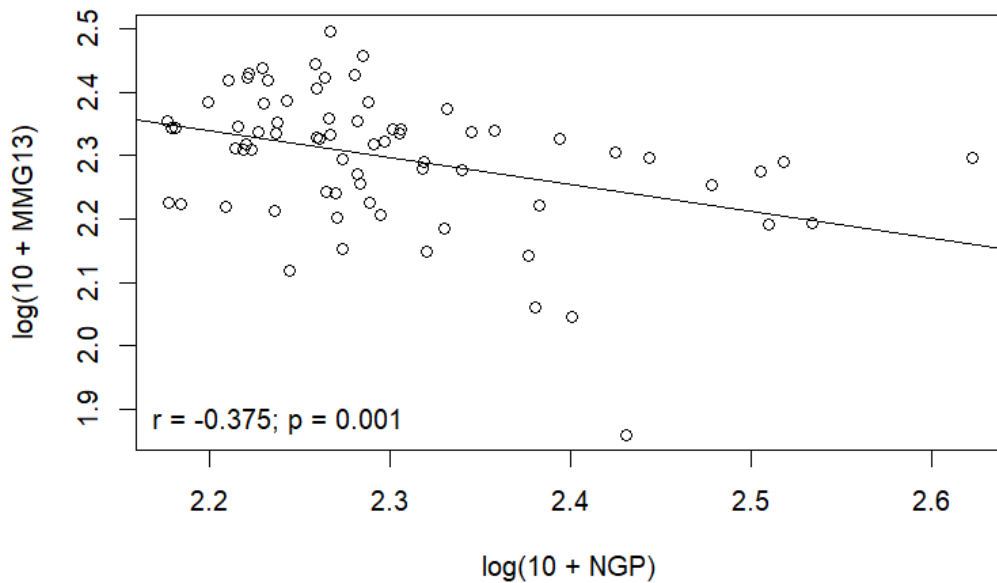


Figura 15 – Dispersão entre o teor de cascalho (%) e os escores dos três primeiros componentes principais: (a) PC1, (b) PC2 e (c) PC3. Observou-se correlação negativa com o PC1 e positiva com o PC3, enquanto o cascalho não apresentou correlação significativa com o PC2. As linhas vermelhas indicam os ajustes lineares.

Fonte: Autora, 2025.

A análise de correlação entre os valores transformados de NGP e a MMG13 demonstrou associação negativa significativa ($r = -0,375$; $p = 0,001$) (Figura 16). Observa-se que o aumento no NGP está associado à redução da MMG13, indicando uma relação inversa entre esses dois componentes do rendimento. Esse padrão é consistente com o arranjo observado no biplot da ACP e com as correlações entre os escores dos componentes principais e os caracteres agronômicos (Figura 13; Tabela 8).

Figura 116 – Relação entre o número de grãos por planta (NGP) e massa média de grãos (MMG13), ambas transformadas em escala logarítmica



Fonte: Autora, 2025.

3.3 DISCUSSÃO

Os resultados demonstram que o teor de cascalho do Plintossolo Pétrico Concrecionário não foi fator determinante na produtividade da soja, contrariando a expectativa inicial baseada nas limitações físicas que esse tipo de solo apresenta. Entretanto, a distribuição das unidades amostrais classificadas de acordo com o teor de cascalho no diagrama de ordenação (Figuras 13 e 14) sugere aumento da variabilidade da resposta da cultura naquelas unidades pertencentes aos grupamentos com maiores proporções de fragmentos grosseiros. As classes com teores superiores a 90% de cascalho apresentaram maior variabilidade dos escores dos componentes principais, indicando maior heterogeneidade do estande. Isso sugere que a cultura não responde a um ambiente uniforme, mas a um mosaico de condições que não é completamente dependente da variação do volume de pedras. A variância dos dados da Figura 15 apontam para esta mesma conclusão. Então, embora o padrão geral seja o de que a variação do volume de cascalho afete a morfologia estrutural da planta, ainda assim existe muito ruído resultante da heterogeneidade ambiental, denunciando a desuniformidade do pedoambiente.

Esta desuniformidade, tende a gerar maior variabilidade na resposta biológica (Chesson, 2000), o que explica a maior amplitude de dispersão das UA no plano de ordenação. Solos com elevado conteúdo de cascalho apresentam maior descontinuidade espacial na retenção hídrica e na exploração radicular, criando microambientes distintos dentro da mesma área. Essa heterogeneidade física pode ampliar a amplitude de respostas fenotípicas da cultura, favorecendo maior variabilidade nos caracteres agrônômicos mesmo quando a média produtiva não é reduzida.

De acordo com Valladares *et al.* (2007), a plasticidade fenotípica constitui um dos principais mecanismos pelos quais as plantas lidam com a variação espacial. Diversos estudos demonstram que as plantas apresentam plasticidade para inúmeras características ecologicamente importantes, abrangendo morfologia, fisiologia, anatomia, desenvolvimento e sistema reprodutivo (Sultan, 2000). Assim, em ambientes heterogêneos, como aqueles com alto teor de fragmentos grosseiros, a cultura pode manter rendimento por meio de ajustes estruturais e funcionais que compensam limitações locais. Estes ajustes são visíveis nos conflitos de decisão expressos por meio da relação inversa entre a MMG e a NGP (Figura 16).

Embora a literatura descreva que o alto volume de petroplintita reduz a capacidade de retenção de água, área de solo explorável pelas raízes das plantas e provoca aumento da temperatura do solo, práticas de manejo conservacionistas podem diminuir esses efeitos e promover um ambiente mais favorável para o desenvolvimento da soja (Almeida *et al.*, 2023; Dal Santo; Santos; Ramos, 2024; Ferreira *et al.*, 2024; Lumbreras *et al.*, 2015;). Resultados semelhantes foram relatados por Ramos (2022), que observou produtividades comparáveis entre Plintossolos Pétricos e Latossolos quando práticas de manejo conservacionistas são adequadamente aplicadas. Soma-se a isso o fato de que a safra de soja ocorre na região justamente no período de maior precipitação, o que contribui para minimizar a principal restrição desses solos, a baixa retenção hídrica, garantindo suprimento de água suficiente para atender às exigências fisiológicas da cultura durante as fases críticas de crescimento e enchimento de grãos (Almeida *et al.*, 2023).

A análise multivariada evidenciou que os caracteres agrônômicos da soja se organizam em três gradientes funcionais distintos, refletindo diferentes níveis de estruturação do estande. O primeiro componente principal (PC1) expressou um gradiente associado à relação entre densidade populacional e desempenho produtivo

individual, apresentando correlação positiva com a densidade de plantas (Dens), inserção da primeira vagem, massa média de grãos (MMG13) e altura da planta (H), e negativas com o número de vagens (NV) e número de grãos por planta (NGP). Esse padrão indica que o aumento da densidade está associado a redução da produção individual por planta, caracterizando um mecanismo de compensação.

Esse comportamento é amplamente descrito na ecologia de populações vegetais. Ford (1975) demonstrou que o aumento da proximidade entre indivíduos altera a morfologia da “planta média”, promovendo maior crescimento em altura e redução da eficiência reprodutiva individual. De forma complementar, modelos espaciais de competição indicam que interações locais de vizinhança reorganizam a estrutura populacional sem implicar, necessariamente, em queda proporcional da biomassa ou produção total (Weiner; Conte, 1981). Assim, o padrão observado na soja é consistente com princípios ecológicos de regulação populacional dependente da densidade.

Além disso, a redução do desempenho reprodutivo individual sob maiores densidades pode ser interpretada com base na competição assimétrica e na plasticidade fenotípica descritas por (Weiner, 1990; Weiner; Thomas, 1986). Segundo esses autores, o aumento da densidade intensifica a disputa por recursos limitantes, especialmente luz, promovendo alterações na arquitetura das plantas e na redistribuição de biomassa. Em condições de maior competição, as plantas tendem a investir proporcionalmente mais em crescimento em altura, caracterizando um padrão de estiolamento associado a competição luminosa.

No presente estudo, esse ajuste estrutural foi evidenciado pela redução no NV e NGP em estandes mais densos, em conjunto com o aumento da altura das plantas e da MMG13 (Figura 13). Esse padrão sugere uma reorganização na distribuição de recursos sob condições de maior competição, na qual a limitação imposta pelo adensamento populacional está associado a redução do número de estruturas reprodutivas formadas por indivíduo e ao aumento da massa dos grãos remanescentes. Dessa forma, observa-se um possível mecanismo de compensação, no qual a diminuição no número de grãos por planta pode ser atenuada pelo incremento em sua massa, contribuindo para a manutenção do rendimento do estande.

Em sua revisão sobre a influência da densidade na produtividade do morango, Menzel (2024) demonstrou que, embora o rendimento total possa aumentar sob

maiores densidades, a produção individual por planta tende a diminuir, com redução no número de coroas e flores por indivíduo. De forma semelhante, Yang *et al.* (2025) observaram, em soja, que maiores densidade promoveram aumento da altura das plantas e redução do diâmetro do caule, padrão também identificado no presente estudo, no qual a altura e diâmetro do caule apresentam associação inversa (Tabela 8). Resultados equivalentes foram relatados por Xing *et al.* (2024), que verificaram que elevadas densidades reduzem o desempenho individual sem necessariamente comprometer o rendimento total da cultura.

No contexto específico da soja, esse padrão também tem sido amplamente documentado em experimentos de densidade de semeadura, reforçando que a resposta observada no presente estudo não constitui um comportamento isolado. Mauad *et al.* (2010) observaram redução linear no número de vagens por planta com o aumento da densidade de semeadura, bem como com Balbinot-Junior *et al.* (2015a), que relataram aumento na produtividade da soja em função da redução da densidade de plantas, destacando que estandes mais elevados intensificam a competição intraespecífica por luz, água e nutrientes, reduzindo a produção individual e não compensando o maior número de plantas por área.

Em condições de Plintossolos Pétricos, comportamento semelhante também foi observado por Campos *et al.* (2025), que ao avaliarem diferentes populações de plantas de soja verificaram que o aumento da população de plantas não resultou em incrementos significativos na produtividade da cultura. Resultados semelhantes foram descritos por Assefa *et al.* (2018) na cultura da canola, na qual verificou relação negativa entre densidade de plantas e número de vagens por planta, o que reforça o papel da competição intraespecífica na redução dos componentes do rendimento. Esse comportamento sugere que a redução da densidade diminuiu a competição intraespecífica, aumentando o desempenho produtivo da cultura em determinadas áreas.

Do ponto de vista fisiológico, a intensificação da competição por recursos ambientais, especialmente luz, em maiores densidades populacionais pode reduzir a disponibilidade de fotoassimilados para o crescimento vegetativo, comprometendo a emissão de ramos e, conseqüentemente, a ramificação da planta (Martins *et al.*, 1999). Nesse contexto, menores densidades tendem a favorecer maior número de ramos produtivos, resultando em maior número de vagens por planta, por outro lado, o aumento da densidade intensifica a competição entre plantas, favorece o

crescimento vertical e reduz a emissão de ramos, resultando em menor número de vagens por planta (Balbinot-Junior *et al.*, 2015b).

Zuffo *et al.* (2020) demonstram que o número de vagens exerce efeito direto sobre a produtividade da soja, enquanto Paraginski *et al.* (2024) reforçam que o número de vagens por planta e o número de grãos por planta apresentam elevada correlação com o rendimento final. Esses achados são coerentes com os resultados do presente estudo, nos quais tais variáveis apresentaram forte associação com o gradiente produtivo identificado pela análise de componentes principais.

Estudos adicionais demonstram que genótipos superiores tendem a apresentar maior eficiência reprodutiva, expressa pelo maior número de vagens e grãos por planta, o que contribui significativamente para o rendimento (Obua *et al.*, 2024; Zuffo *et al.*, 2025).

A associação negativa observada entre o NGP e MMG13 (Figura 16) reforça o padrão compensatório, indicando que incrementos no número de grãos por planta tendem a ser acompanhados por redução na massa média dos grãos. Esse padrão reflete uma compensação na redistribuição de recursos sob limitações ambientais ou estruturais. Essa dinâmica é explicada pela alometria reprodutiva, segundo a qual a produção reprodutiva segue relações com a biomassa da planta, impondo restrições na alocação simultânea de recursos entre número e tamanho de estruturas (Du *et al.*, 2020; Weiner *et al.*, 2021).

O segundo componente principal (PC2) foi fortemente associado às variáveis de rendimento total, destacando-se as correlações negativas com massa total de grãos (MGL) e número total de grãos (NGL). Esse eixo pode ser interpretado como um gradiente de produtividade acumulada do estande. Notavelmente, o teor de cascalho não apresentou associação significativa com esse componente (Figura 15b), indicando que, apesar de influenciar atributos estruturais do estande, a pedregosidade não determinou diretamente o rendimento final da cultura na área avaliada.

A influência do teor de cascalho mostrou-se significativa sobre o PC1 e PC3, mas não sobre o PC2. A relação negativa significativa entre os escores do PC1 e o teor de cascalho (Figura 15a), evidencia que maiores densidades populacionais ocorreram nas áreas com menor conteúdo de cascalho, enquanto o aumento da pedregosidade esteve associado à redução da densidade do estande.

Esse padrão sugere que o teor de fragmentos grosseiros interfere principalmente na fase de estabelecimento da cultura. De acordo com Almeida *et al.*

(2023), a proporção de fragmentos grosseiros em relação a terra fina influencia a eficiência do estabelecimento do estande, uma vez que maiores volumes de cascalho nas áreas de deposição das sementes reduzem seu contato com a terra fina, comprometendo a absorção de água e dificultando a germinação.

Além disso, os autores destacam que o aquecimento do cascalho quando exposto a radiação solar pode elevar a temperatura na superfície do solo, favorecendo a escaldadura das plântulas, aumentando a mortalidade. Assim, embora o teor de cascalho não tenha impactado diretamente o rendimento final por área (PC2), seus efeitos sobre o estabelecimento inicial do estande contribuíram para a organização estrutural da população de plantas, refletida nos gradientes identificados pela análise multivariada.

Embora o teor de cascalho não tenha impactado diretamente o rendimento final por área, seus efeitos sobre o estabelecimento inicial do estande e sobre a organização estrutural da população demonstram que a pedregosidade atua como moduladora da arquitetura e da dinâmica intraespecífica do sistema produtivo. Em ambientes pedregosos, a cultura responde não por meio de redução direta da produtividade média, mas por meio de reorganizações estruturais e compensações entre componentes do rendimento.

Assim, a heterogeneidade física do solo impõe ajustes morfológicos que são amortecidos por mecanismos de plasticidade e compensação, permitindo a manutenção do desempenho global da cultura. Esse padrão evidencia que, em sistemas agrícolas estabelecidos sobre Plintossolos Pétricos, a pedregosidade atua principalmente na organização estrutural do estande, densidade, arquitetura e componentes individuais do rendimento, sem necessariamente comprometer o desempenho produtivo final.

3.4 CONCLUSÃO

O teor de cascalho no Plintossolo Pétrico não determinou o rendimento final da soja nas condições avaliadas. Contudo, a pedregosidade influenciou a organização estrutural do estande, afetando principalmente a densidade populacional e atributos morfológicos das plantas.

Os resultados indicam que, embora a heterogeneidade física do solo modifique a arquitetura e a dinâmica da cultura, mecanismos de compensação entre os

componentes do rendimento e a plasticidade fenotípica permitem a manutenção da produtividade.

Assim, em ambientes com elevado teor de fragmentos grosseiros, a soja apresenta capacidade adaptativa suficiente para reorganizar seus componentes produtivos sem comprometer o desempenho global do sistema.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. E. M. *et al.* de Os desafios da produção agrícola em plintossolos pétricos. *In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Tópicos em ciência do solo*: volume 13, cap. 15. Viçosa, MG: SBCS, 2025.
- ALMEIDA, R. E. M. *et al.* Uso agrícola dos Plintossolos Pétricos do oeste do estado de Tocantins. *In: SANTOS, G. G. et al. (org.). Guia de campo da XIV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos*: RCC de Goiás e Tocantins. Brasília, DF: Embrapa, 2023.
- ASSEFA, Y. *et al.* Major management factors determining spring and winter canola yield in North America. **Crop Science, Madison**, v. 58, p. 1–16, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.02.0079>.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. *et al.* Espaçamento reduzido e plantio cruzado associados a diferentes densidades de plantas em soja. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 5, p. 2977–2986, set./out. 2015a. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n5p2977>.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. *et al.* **Densidade de plantas na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja. 2015b.
- CAMPAGNARO, N. *et al.* A produtividade da soja e seu resultado associado às condições ambientais: revisão de literatura. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, Curitiba, v. 23, n. 1, p. 1–25, 2025. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv23n1-209>.
- CAMPOS, L. J. M. *et al.* Can an increase in plant population benefit or impede soybean crop productivity in Petric Plinthosols? **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 46, n. 3, p. 711–728, maio/jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2025v46n3p711>.
- CAMPOS, M. C. Modernização da agricultura, expansão da soja no Brasil e as transformações socioespaciais no Paraná. **Revista Geografar**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 161–191, jun. 2011. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/geografar/article/view/23030>. Acesso em: 27 maio 2025.
- COELHO, M. R. *et al.* **Solos do campo experimental de Buritirana da Embrapa Pesca e Aquicultura, Município de Palmas - TO**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2012.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO [CONAB]. Boletim da safra de grãos. **Conab**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos?start=10>. Acesso em: 7 set 2025.
- CHESSON, P. Mechanisms of maintenance of species diversity. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto, v. 31, p. 343–366, 2000. DOI: [10.1146/annurev.ecolsys.31.1.343](https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.31.1.343).

CLEMENTE, T. E.; CAHOON, E. B. Soybean oil: genetic approaches for modification of functionality and total content. **Plant Physiology**, Rockville, v. 151, p. 1030–1040, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.109.146282>.

DAYANA, K. et al. Integrating omics approaches to discover and prioritize candidate genes involved in oil biosynthesis in soybean. **Gene**, [S.l.], v. 808, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gene.2021.145976>.

DAL SANTO, T. S.; DOS SANTOS, D. M. A.; RAMOS, M. R. Produtividade da soja em Latossolo Vermelho e Plintossolo Pétrico concrecionário no cerrado. **Agri-Environmental Sciences**, v. 10, n. 1, p. 8–8, 2024.

DU, Y.-L. et al. Yield components, reproductive allometry and the tradeoff between grain yield and yield stability in dryland spring wheat. **Field Crops Research**, v. 257, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107930>.

EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de produção de soja**: região Central do Brasil 2014. Londrina: Embrapa Soja, 2013.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007.

FERREIRA, C. C. B. et al. Impacto do tipo de solo, adubação e técnica de cultivo na temperatura do solo e no desenvolvimento inicial da soja. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 7, n. 1, 2024.

FORD, E. D. Competition and stand structure in some even-aged plant monocultures. **Journal of Ecology**, London, v. 63, n. 1, p. 311–333, mar. 1975.

HASUI, Y.; ABREU, F. A. M.; SILVA, J. M. R. Estratigrafia da faixa de dobramentos Paraguai-Araguaia no centro-norte do Brasil. **Boletim IG – Instituto de Geociências**, São Paulo, v. 8, p. 107–118, 1977.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Mapa de solos do Brasil: versão 2023. Arquivo vetorial. Escala nominal 1:250.000. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/15829-solos.html?=&t=downloads>. Acesso em: 2 fev. 2026.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses. R package version 1.0.5. [S.l.]: **CRAN – Contributed Packages**, 2020. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=factoextra>. Acesso em: 6 fev. 2025.

LUMBRERAS, J. F. et al. **Aptidão agrícola das terras do Matopiba**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2015.

MARQUARDT, L. et al. Produtividade de cultivares de soja sob diferentes manejos em plintossolo pétrico. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 199–217, 2023.

MARTINS, M.C. *et al.* Épocas de semeadura, densidades de plantas e desempenho vegetativo de cultivares de soja. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 851-858, 1999.

MAUAD, M. *et al.* Influência da densidade de semeadura sobre características agrônômicas na cultura da soja. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 3, n. 9, p. 175–181, 2010.

MENZEL, C. M. The relationship between yield and plant density in strawberry: competition does not impose an upper limit to population-level production. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, [S.l.], 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/14620316.2024.2400127>.

OBUA, T. *et al.* Unravelling yield and yield-related traits in soybean using GGE biplot and path analysis. **Agronomy**, Basel, v. 14, p. 2826, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14122826>.

OKSANEN, J. *et al.* vegan: community ecology package. R package version 2.2-1. [S.l.]: CRAN – Contributed Packages, 2015. Disponível em: <http://cran.r-project.org/package=vegan>. Acesso em: fev. 2025.

PARAGINSKI, J. A. *et al.* Correlation between productive components and grain yield of soybean cultivars sown in the northwest region of Rio Grande do Sul. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 71, e71017, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X2024710017>.

POESEN, J.; LAVEE, H. Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena*, [S.l.], v. 23, n. 1–2, p. 1–28, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90050-7).

PIRES, J. L. F. *et al.* Efeito de populações e espaçamentos sobre o potencial de rendimento da soja durante a ontogenia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 8, p. 1541–1547, ago. 2000.

RAMOS, M. R. A. Review of Soybean Cultivation On Stony Soils in Tocantins, Brazil. **International Journal of Science and Research (IJSR)**, [S. l.], v. 11, p. 367-371, 2022.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2019. Available on: <https://www.r-project.org/>. Accessed on: Feb. 2025.

SANTOS, R. A. *et al.* Sistema de plantio direto: conservação e manutenção da capacidade produtiva dos solos do Cerrado Goiano. **Revista Sapiência: Sociedade, Saberes e Práticas Educacionais**, Anápolis, v. 7, n. 2, p. 230–255, jan./jul. 2018.

SILVA, F. C. S. *et al.* Importância econômica e evolução da criação. In: SILVA, F. L. *et al.* (ed.). **Melhoramento da Soja**. [S.l.]: Springer, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-57433-2_1.

SILVA, A. C.; DE LIMA, É. P. C.; BATISTA, H. R. **A importância da soja para o agronegócio brasileiro**: uma análise sob o enfoque da produção, emprego e exportação. [S.l.]: Associação de Pesquisadores em Economia Catarinense, 2011.

SOUZA, J. O.; MORETON, L. C. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil – PLGB: Xambioá – Folha SB.22-Z-B, Estados do Pará e Tocantins. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001.

SULTAN, S. E. Phenotypic plasticity for plant development, function and life history. **Trends in Plant Science**, [S.l.], v. 5, n. 12, p. 537–542, 2000.

SCHOBENHAUS, C.; BRITO NEVES, B. B. de. A geologia do Brasil no contexto da Plataforma Sul-Americana. In: SCHOBENHAUS, C. et al. (org.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas & SIG**. Brasília: CPRM, 2003.

TAIZ, L.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A.; ZEIGER, E. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. São Paulo: Artmed Editora, 2017.

TANG, Y.; HORIKOSHI, M.; LI, W. ggfortify: unified interface to visualize statistical results of popular R packages. *The R Journal*, [S.l.], v. 8, n. 2, p. 474–485, 2016.

VALLADARES, F.; GIANOLI, E.; GÓMEZ, J. M. Ecological limits to plant phenotypic plasticity. **New Phytologist**, [S.l.], v. 176, p. 749–763, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02275.x>.

WARNKEN, P. O futuro da soja no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, DF, v. 9, n. 2, p. 54–63, abr./jun. 2000.

WEINER, J. *et al.* Allometry and yield stability of cereals. *Frontiers in Plant Science*, v. 12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.681490>.

WEINER, J. Asymmetric competition in plant populations. **Trends in Ecology & Evolution**, Amsterdam, v. 5, n. 11, p. 360–364, nov. 1990.

WEINER, J.; CONTE, P. T. Dispersal and neighborhood effects in an annual plant competition model. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 13, p. 131–147, 1981.

WEINER, J.; THOMAS, S. C. Size variability and competition in plant monocultures. **Oikos**, Copenhagen, v. 47, p. 211–222, 1986.

XING, Z. *et al.* Effect of plant density on growth and bioactive compounds in *Salvia miltiorrhiza*. **Agronomy**, Basel, v. 14, p. 1157, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14061157>.

YANG, L. *et al.* Integrating source-sink coordination and pod-setting optimization: a field study on plant density effects for soybean productivity enhancement in the Huang-Huai-Hai Plain. **Journal of Agriculture and Food Research**, [S.l.], v. 22, 102070, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102070>.

ZHANG, Y. et al. Rock fragments and soil hydrological processes: significance and progress. **Catena**, [S.l.], v. 147, p. 153–166, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.012>.

ZHENG, Y. et al. Effects of rock fragments on the soil physicochemical properties and vegetation on the northeastern Tibetan Plateau. **Frontiers in Environmental Science**, [S.l.], v. 9, 693769, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.693769>.

ZUFFO, A. M. et al. Correlations and path analysis in agronomic traits of soybeans under defoliation. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 36, n. 5, p. 1629–1637, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14393/BJ-v36n5a2020-48220>.

ZUFFO, A. M. *et al.* Correlations and path analysis of soybean cultivars sown in two seasons in the Cerrado Sul Maranhense. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, São José dos Pinhais, v. 18, n. 2, p. 01–12, 2025. DOI: <https://doi.org/10.55905/revconv.18n.2-182>.