



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO *DEL-REI*  
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE GRADUAÇÃO  
BACHARELADO EM ENGENHARIA  
AGRONÔMICA *CAMPUS SETE LAGOAS***

**JOSÉ CLAUDIO SANTANA JUNIOR**

**EFEITO DO SILÍCIO NA REDUÇÃO DA ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM  
LATOSSOLO VERMELHO**

**SETE LAGOAS - MG**

**2026**

**JOSÉ CLAUDIO SANTANA JUNIOR**

# **EFEITO DO SILÍCIO NA REDUÇÃO DA ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLO RICO EM ÓXIDOS DE FERRO E ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Agrônômica da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Ganassali de Oliveira Júnior

Coorientador: MSc. Michel Antoni da Silva

**Sete Lagoas, MG  
2026**

**JOSÉ CLAUDIO SANTANA JUNIOR**

**Revista: <https://revista.faef.br/course/agronomia>**

**REDUÇÃO DA ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS RICOS EM ÓXIDOS DE  
FERRO E ALUMÍNIO UTILIZANDO SILÍCIO**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia de Agrônômica da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Sete Lagoas, 17 de abril de 2026.

**Banca avaliadora:**

MSc. William Gonçalves Souza — Doutorando - UFS

MSc. Cristiano Araújo Meira — UFSJ/ CSL-DCIAG

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| RESUMO .....                    | 5  |
| INTRODUÇÃO.....                 | 7  |
| METODOLOGIA .....               | 8  |
| RESULTADOS E DISCUSSÃO.....     | 9  |
| CONCLUSÃO .....                 | 13 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 13 |

## RESUMO

A alta adsorção de fósforo (P) em solos tropicais limita a eficiência da adubação. Avaliou-se o uso de silício (Si) para mitigar esse processo em um Latossolo Vermelho-Amarelo (UFSJ). Testaram-se doses de Si (0–500 mg dm<sup>-3</sup>) e tempos de incubação (1–6 h). Apenas doses de 300 e 500 mg dm<sup>-3</sup> de Si aumentaram significativamente o P remanescente. A eficácia limitou-se às primeiras 2 h; a redução posterior sugere interferência analítica do extrator CaCl<sub>2</sub>, favorecendo a precipitação de Si-Ca. Conclui-se que o Si compete com o P, mas sua eficiência depende de altas dosagens e ajustes metodológicos no sistema de extração.

**Palavras-chave:** Silicato; Fosfato; Fixação; Latossolo.

## ABSTRACT

High phosphorus (P) adsorption in tropical soils limits fertilization efficiency. This study evaluated silicon (Si) to mitigate this process in a Red-Yellow Latosol (UFSJ). Si doses (0–500 mg dm<sup>-3</sup>) and incubation times (1–6 h) were tested. Only doses of 300 and 500 mg dm<sup>-3</sup> significantly increased remaining P. Effectiveness was limited to the first 2 h; the subsequent decrease suggests analytical interference from the CaCl<sub>2</sub> extractor, favoring Si-Ca precipitation. In conclusion, Si competes with P, but its efficiency depends on high dosages and methodological adjustments in the extraction system.

**Keywords:** Silicate; Phosphate; Fixation; Oxisol.

## INTRODUÇÃO

No caso específico dos fertilizantes fosfatados, essa dependência gira em torno de 75%, tornando o setor especialmente sensível a instabilidades do mercado internacional e a crises geopolíticas (ANDA, 2025). Além disso, a baixa eficiência agrônômica dos fertilizantes fosfatados em solos tropicais obriga os produtores a aplicarem doses superiores à extração das culturas, com o objetivo de saturar os sítios de adsorção do solo para que apenas uma fração permaneça disponível na solução (SCHUCH et al., 2023). Essa estratégia, embora funcional, mostra-se economicamente ineficiente e ambientalmente questionável no longo prazo.

A predominância de solos das classes Latossolo e Argissolo impõe um desafio ao manejo da adubação fosfatada. Estes solos, caracterizados por avançado estágio de intemperismo, apresentam elevada acidez e abundância de minerais de argila 1:1 (caulinita) e óxidos de ferro e alumínio (hematita, goethita e gibbsita) (COSTA et al., 2024). A superfície destes minerais possui alta afinidade pelo ânion fosfato, promovendo reações de adsorção específica (troca O Brasil é altamente dependente da importação de fertilizantes fosfatados, o que torna o custo de produção agrícola vulnerável às oscilações do mercado internacional e à limitação das reservas globais. Segundo a Conab (2025), o volume de importações em 2025 atingiu a marca histórica de 41,7 milhões de toneladas, evidenciando a elevada dependência brasileira de insumos externos. de ligantes) e precipitação, fenômeno conhecido agronomicamente como "fixação de fósforo" (EDUAH et al., 2019). Devido a esse processo, estima-se que uma grande parte do Fósforo (P) aplicado via fertilizantes, onde cerca de 80% ou mais torna-se rapidamente indisponível para as plantas, acumulando-se no solo em formas não lábeis, exigindo correções constantes e onerosa (REZAKHAN et al., 2019; GARCIA et al., 2022).

Dentre os elementos essenciais, o P é classificado como um macronutriente primário, desempenhando funções vitais no metabolismo vegetal, como o armazenamento e transferência de energia (ATP), formação de ácidos nucleicos e estruturação de membranas celulares (Prado, 2020). No entanto, apesar de sua importância fisiológica, o P é frequentemente o nutriente mais limitante para a produtividade das culturas devido ao processo de fixação (MUHAMMAD ISLAM et al., 2024). Diante desse entrave, a pesquisa agrônômica tem buscado alternativas para aumentar a eficiência da adubação fosfatada. Enquanto estratégias biológicas, como o uso de microrganismos solubilizadores (ex: *Bacillus* e *Pseudomonas*), têm ganhado destaqueo manejo químico via competição iônica permanece pouco explorado em condições de campo. É neste nicho que o Silício (Si) desponta como uma ferramenta promissora (DUARTE et al.,

2022).

Embora o Si não seja considerado essencial para as plantas, é um elemento benéfico, atuando na formação de barreiras mecânicas através da deposição na parede celular, o que aumenta a resistência a estresses bióticos, como pragas e doenças, e abióticos, incluindo seca, salinidade e toxidez por metais pesados (THAKRAL et al., 2024). Além disso, o Si potencializa a assimilação de nutrientes como Nitrogênio (N), Potássio (K) e Cálcio (Ca), além do fósforo (P) (MANIVANNAN et al., 2023). Isso ocorre porque o Si, sob a forma de ácido silícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), apresenta comportamento químico similar ao fosfato na solução do solo, competindo pelos mesmos sítios de adsorção em óxidos de ferro e alumínio, o que resulta na maior disponibilidade do P para as plantas (BARÃO; TEIXEIRA, 2024)

Diversos autores sugerem que a aplicação prévia ou conjunta de fontes de Si poderia "ocupar" parte desses sítios de fixação, deslocando o equilíbrio químico e mantendo maior teor de P na solução do solo disponível para absorção radicular (HÖMBERG et al., 2020; SIHUA HUANG et al., 2024). Portanto, desenvolver estratégias que utilizem o Si não apenas como nutriente benéfico, mas como um condicionador de solo para mitigar a fixação de P, pode representar um avanço significativo para a agricultura tropical.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do Si, em diferentes doses e tempos de aplicação, na mitigação da adsorção de P em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, buscando contribuir para o aprimoramento do manejo da adubação fosfatada em sistemas agrícolas tropicais.

## MATERIAL E METODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo e Fertilizantes na Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ), campus Sete Lagoas – MG.

O solo utilizado foi coletado no horizonte B de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, classificado segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018) a uma profundidade superior a 40 cm. O solo coletado foi seco ao ar e passado em peneira de 2 mm para homogeneização. Os nutrientes e as características do solo foram determinados de acordo com Silva (2009). O P e o K foram extraídos por Mehlich 1; o Ca, Mg e Al foram determinados utilizando cloreto de potássio 1 mol L<sup>-1</sup>; o H+Al foi determinado via solução de acetato de cálcio, e a granulometria foi determinada por peneiramento e sedimentação.

**Tabela 1.** Resultado da análise química do solo utilizado no experimento.

| pH           | P                  | K                                 | Ca    | Mg                             | Al   | H+Al  | T   |
|--------------|--------------------|-----------------------------------|-------|--------------------------------|------|-------|-----|
|              | mg/dm <sup>3</sup> | ----- mmolc/dm <sup>3</sup> ----- |       |                                |      |       |     |
| 4,8          | 7,0                | 1,2                               | 14,0  | 8,0                            | 10,0 | 59    | 83  |
| m            | V                  | Areia                             | Silte | Argila                         | Fe   | P-rem | Si  |
| ----- %----- |                    |                                   |       | ----- mg/dm <sup>3</sup> ----- |      |       |     |
| 27           | 29                 | 48                                | 6     | 46                             | 15,4 | 7,5   | 7,3 |

P (mg/dm<sup>3</sup>) extraído em Mehlich 1; K, Ca, Mg, Al, H+Al (mmolc/dm<sup>3</sup>) cátions trocáveis e acidez potencial; SB, t e T (mmolc/dm<sup>3</sup>) soma de bases, capacidade de troca catiônica total e efetiva; V, m (%) e saturação por bases e saturação por alumínio; Fe, (mg/dm<sup>3</sup>) extraído em DTPA.

O pH do solo foi ajustado para a faixa agrônômica por meio de incubação ao longo de 14 dias. A incubação foi realizada utilizando 1 litro de solo para 10 litros de água. A amostra foi agitada diariamente por 5 minutos, com a adição de Hidróxido de Sódio (NaOH) 1 mol L<sup>-1</sup> até o pH se estabilizar em 6. Após o período de incubação, o material foi seco em estufa a 55 °C por quatro dias, e o pH final foi conferido.

Realizou-se a preparação de uma solução estoque de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> contendo 1000 mg dm<sup>-3</sup> de Si. O pH da solução, originalmente alcalino, foi corrigido para 7,0 utilizando HCl para eliminar a influência do fator pH sobre as análises. Posteriormente, a solução foi diluída para obtenção das doses utilizadas nos experimentos.

A fim de evitar contaminações decorrentes da liberação de sílica por vidrarias, todas as determinações envolvendo silício foram conduzidas em recipientes plásticos, em conformidade com as recomendações metodológicas descritas por Korndörfer et al. (2004).

O Si solúvel foi quantificado com adaptação do método de Korndörfer et al. (2004). Após

agitação por 5 minutos a 200 rpm e decantação por 16 horas, o sobrenadante foi analisado por espectrofotometria ( $\lambda=725$  nm), utilizando o método da coloração azul.

Inicialmente, buscou-se a construção da isoterma de adsorção de Si adaptando o método de Korndörfer et al. (2004), com adição de  $60 \text{ mg dm}^{-3}$  de Si ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) em pH 7,0. Entretanto, observou-se que o uso do extrator  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  resultou em valores incompatíveis superestimados de Si solúvel ( $> 229 \text{ mg dm}^{-3}$ ).

A isoterma de adsorção de P foi determinada com base no valor de P-rem, utilizando 11 doses de P (0;10,5;21;31,5;52,5;73,5;94,5;111,5;147;178; e  $210 \text{ mg dm}^{-3}$ ) conforme Alvarez et al. (1990). As amostras foram agitadas por 24 horas a 200 rpm, decantadas por 16 horas e o sobrenadante analisado por espectrofotometria. O experimento totalizou 33 amostras.

A interação Si/P foi avaliada em sete doses de Si (0;50;100;150;200;300; e  $500 \text{ mg dm}^{-3}$ ), adicionadas simultaneamente a  $60 \text{ mg dm}^{-3}$  de P. Posteriormente, foi determinada a concentração de P-rem. O experimento totalizou 21 amostras.

Para avaliar o efeito de dose e tempo foi conduzido um experimento com 13 tratamentos, em um esquema fatorial  $3 \times 4$ : três doses de silício (120;180; e  $300 \text{ mg dm}^{-3}$ ), sob quatro tempos de agitação (1,2,4,6 horas) e um controle negativo sem Si e sem incubação, em mesa agitadora a 200 rpm. Após cada tempo, as amostras receberam a adição de P, utilizando o teor de  $60 \text{ mg dm}^{-3}$ , que corresponde à maior fixação obtida na isoterma de P. Posteriormente, seguiu-se a determinação de P-rem. O experimento totalizou 36 amostras. O P-rem do controle negativo (sem adição de Si) serviu como valor base.

Sendo todas as análises realizadas com 3 repetições. Em cada unidade experimental contendo  $5 \text{ cm}^3$  de solo, foram adicionados 50 mL de solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  contendo as doses correspondentes de Si e/ou P. Após agitação por 5 minutos, a 200 rpm (com exceção da isoterma de P), e decantação por 16 horas, o sobrenadante foi analisado por espectrofotometria ( $\lambda = 725$  nm), utilizando o método da coloração azul. (SILVA, 2009). O P adsorvido foi calculado pela diferença entre a dose adicionada e o teor disponível encontrado

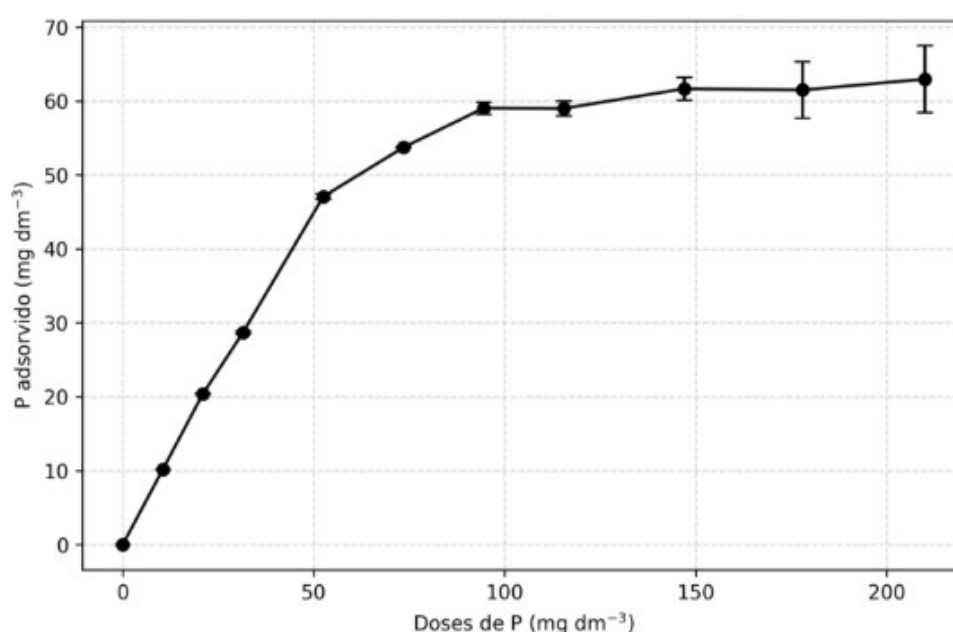
Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e a testes de regressão com o auxílio do software RStudio (R Core Team, 2021). Quando detectadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p<0,05$ ).

## RESULTADOS

### ISOTERMA DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO

Os valores de fósforo adsorvido aumentaram progressivamente com a elevação das doses de fósforo aplicadas ao solo (Figura 1). Nas menores doses (até aproximadamente  $52,5 \text{ mg dm}^{-3}$ ), observou-se incremento acentuado do fósforo adsorvido. A partir das doses intermediárias, especialmente acima de  $73,5 \text{ mg dm}^{-3}$ , o aumento tornou-se menos pronunciado. Nas maiores doses avaliadas ( $115,5$  a  $210 \text{ mg dm}^{-3}$ ), os valores de fósforo adsorvido variaram em torno de 60 a  $65 \text{ mg dm}^{-3}$ .

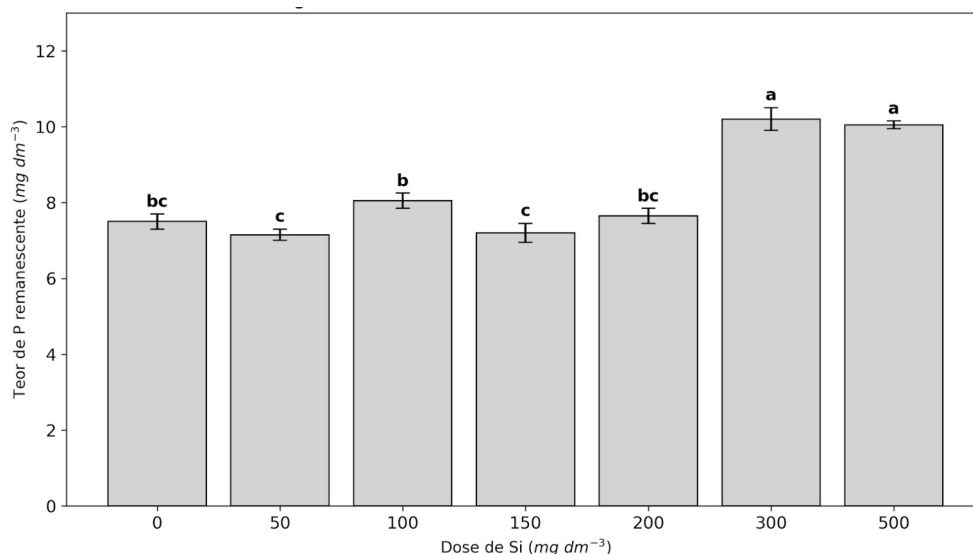
**Figura 1.** Média da isoterma de adsorção de fósforo (P) em Latossolo Vermelho distrófico.



### DOSES LINEARES DE SI

Na presença de  $60 \text{ mg dm}^{-3}$  de P, apenas as doses de 300 e  $500 \text{ mg dm}^{-3}$  de Si apresentaram diferença significativa em relação ao controle ( $0 \text{ mg dm}^{-3}$  de Si) (Figura 2).

**Figura 2.** Teor médio de fósforo remanescente na presença de diferentes doses de silício adicionadas simultaneamente com o P.



Letras minúsculas iguais em barras indicam que não há diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

### TEMPOS DE INCUBAÇÃO DE SI

A análise de variância indicou efeito significativo da dose de Si, do tempo de incubação e da interação entre esses fatores (Tabela 1).

**Tabela 3.** Resultados da Análise de Variância para tempos de incubação de Si

| Fonte de Variação | GL   | SQ     | QM    | F     | p-valor |
|-------------------|------|--------|-------|-------|---------|
| Dose (D)          | 2    | 4.51   | 2.25  | 10.93 | 0.0004* |
| Tempo (T)         | 3    | 32.85  | 10.95 | 53.05 | 0.0001* |
| Interação (D X T) | 6    | 4.21   | 0.70  | 3.40  | 0.0143* |
| Resíduo           | 24   | 4.95   | 0.20  | -     | -       |
| Total             | 35   | 46,524 | -     | -     | -       |
| Média Geral:      | 8,35 |        |       |       |         |
| CV (%)            | 5,14 |        |       |       |         |

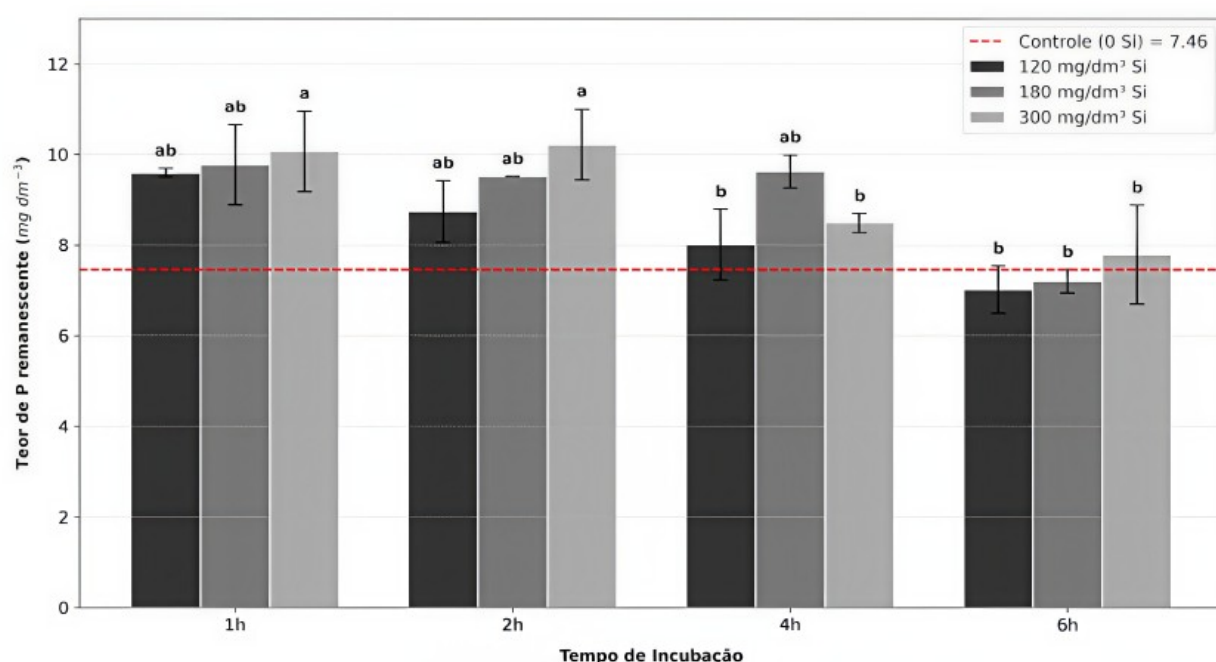
GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma de Quadrados; QM: Quadrado Médio; F: Teste F de Snedecor; p-valor: probabilidade de erro. \*\*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; CV: Coeficiente de Variação

Fonte: Dados do autor (2023)

Os tratamentos com 300 mg dm<sup>-3</sup> de Si incubados por 1 e 2 horas apresentaram teores de P de 10,07 e 10,21 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente, diferindo do controle (0 mg dm<sup>-3</sup> de Si), que apresentou 7,50 mg dm<sup>-3</sup> (Figura 3). Para tempos de 4 e 6 horas, não foram observadas diferenças

significativas.

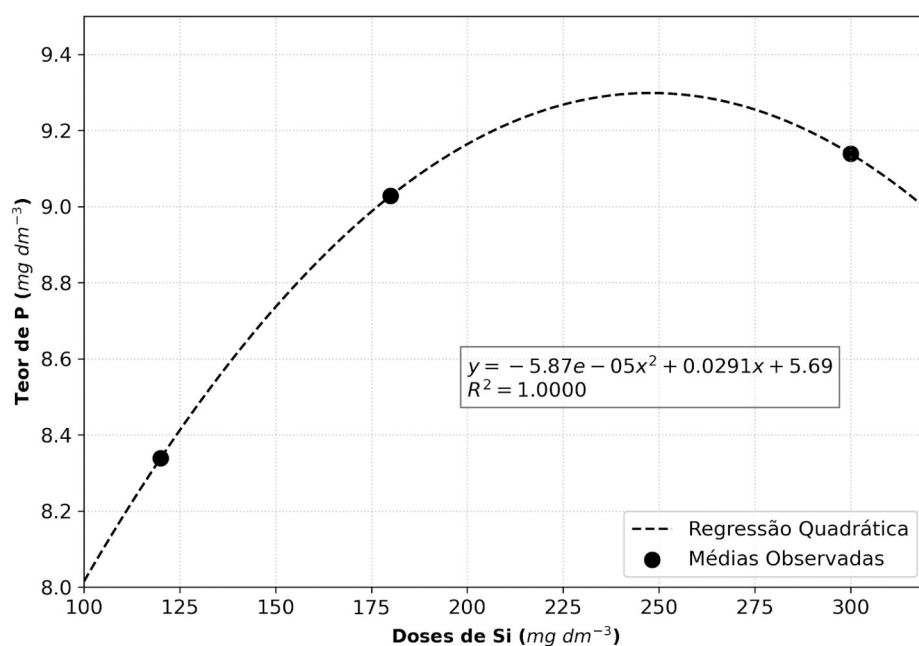
**Figura 3.** Teor de P adsorvido em função das doses de Si e dos tempos de agitação.



## ANÁLISES DE REGRESSÃO

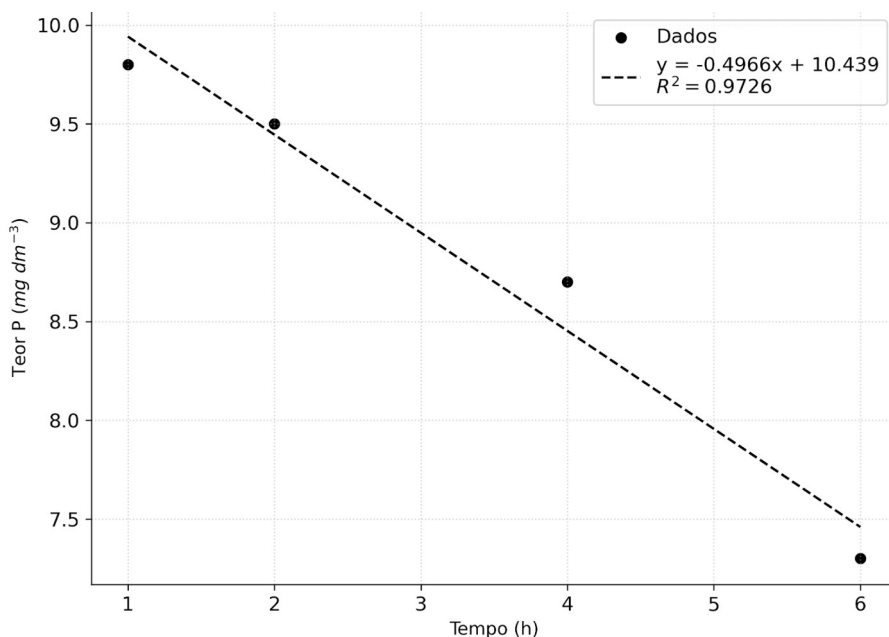
A regressão para a disponibilidade de P em função das doses de Si apresentou comportamento quadrático ( $R^2 = 1,00$ ), com máxima disponibilidade técnica estimada na dose de 247,87 mg dm<sup>-3</sup> de Si, resultando em teor de 9,30 mg dm<sup>-3</sup> de P.

**Figura 4.** Influência das doses de Si na disponibilidade de P em diferentes tempos de incubação.



O efeito do tempo de agitação mostrou redução linear progressiva da disponibilidade de P com o aumento do tempo de contato entre Si e solo (Figuras 5).

**Figura 5.** Influência do tempo de agitação na disponibilidade de P em solos submetidos a diferentes doses de Si.



## DISCUSSÃO

O comportamento da isoterma de adsorção de fósforo indica saturação progressiva dos sítios de adsorção do solo com o aumento das doses aplicadas. Esse padrão é típico de solos tropicais altamente intemperizados, como Latossolos, nos quais a adsorção inicial de fósforo é elevada devido à alta afinidade dos óxidos de ferro e alumínio pelos íons fosfato, especialmente em condições de pH ácido. A tendência de estabilização dos valores de fósforo adsorvido sugere limitação dos sítios disponíveis de adsorção, conforme relatado por Fontes e Alleoni (2019) e Almeida et al. (2020).

A necessidade de doses elevadas de silício para promover redução significativa na adsorção de fósforo confirma a maior afinidade do fosfato pelos sítios reativos do solo. Esse comportamento também foi observado por Schuch et al. (2023), que destacam que a competição entre silicato e fosfato ocorre, mas depende da concentração relativa dos íons na solução do solo.

Em relação ao tempo de agitação, a maior eficiência do silício nos períodos iniciais sugere competição direta pelos sítios de adsorção logo após a aplicação. Entretanto, a redução desse efeito ao longo do tempo diverge de resultados obtidos por Yong Bok Lee et al. (2007) e Hilbrandt (2019). Essa diferença pode estar relacionada ao uso do extrator  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol L<sup>-1</sup> no presente estudo.

A presença de cálcio na solução extratora pode ter favorecido a formação de complexos ou precipitados de silicato de cálcio, reduzindo a fração de silício solúvel disponível para competir com o fósforo pelos sítios de adsorção. Esse possível efeito químico pode explicar a diminuição

da disponibilidade de fósforo observada com o aumento do tempo de incubação. Indicando a necessidade de extratores alternativos, como o NaCl, para evitar superestimação dos teores disponíveis (Haynes & Zhou 2018).

A regressão quadrática observada e a redução da disponibilidade de fósforo em doses mais elevadas de silício reforçam a hipótese de interferência do cálcio na dinâmica entre silício e fósforo no solo. De acordo com Haynes e Zhou (2018), interações entre silício, cálcio e fósforo podem influenciar a disponibilidade desses elementos, especialmente em sistemas experimentais nos quais há alteração da composição da solução do solo.

Assim, os resultados indicam que o silício possui potencial para interferir na adsorção de fósforo em Latossolo Vermelho. Contudo, a magnitude desse efeito depende das doses aplicadas, do tempo de contato e das condições químicas do sistema de extração utilizado.

## CONCLUSÃO

A aplicação de silício reduziu a adsorção de fósforo no solo apenas em doses elevadas, indicando competição entre silicato e fosfato pelos sítios de adsorção. A dose estimada de 248 mg dm<sup>-3</sup> de Si proporcionou o maior aumento de fósforo disponível.

O aumento do tempo de agitação resultou em redução da disponibilidade de fósforo, possivelmente devido à formação de complexos envolvendo cálcio e silício. Esse resultado sugere limitações do uso do extrator CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> em estudos que avaliam a interação entre silício e fósforo no solo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, V. H. de; FONSECA, D. M. Definição de doses de fósforo para determinar a capacidade máxima de adsorção de fosfato em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, n. 1, p. 49–55, 1990.
- ALVAREZ, V. H. de; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da SBCS**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 27–32, 2000.
- ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2024**. São Paulo: ANDA, 2025.
- BARÃO, L.; TEIXEIRA, R. F. M. **Interaction of silicon-phosphorus**: the unexplored connection in the soil ecosystem. Preprints, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.20944/preprints202410.0945.v1>. Acesso em: 18 mar. 2026.
- BERTHELSEN, S. et al. **Improving yield and CCS in sugarcane through the application of silicon-based amendments**. Final report of project SRDC CLW009. Sugar Research and Development Corporation, 2003.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Boletim logístico**: importações de fertilizantes: volume recorde em 2025. Brasília, DF: CONAB, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/logistica/boletim-logistico/boletim-logistico-dezembro-2025.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2026.
- COSTA, K. S. de Q. et al. Fósforo no sistema solo-planta: uma revisão. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, Curitiba, v. 22, n. 6, p. 1–24, 2024.
- DUARTE, N. F. et al. Phosphate solubilization by microorganisms. In: SINGH, H.; VAISHNAV, A. (ed.). **New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering**. Elsevier, 2022.

cap. 15, p. 257–282. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85163-3.00019-3>. Acesso em: 18 mar. 2026.

EDUAH, J. O. et al. Phosphorus retention and availability in three contrasting soils amended with rice husk and corn cob biochar at varying pyrolysis temperatures. **Geoderma**, Amsterdam, v. 341, p. 10–17, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.016>. Acesso em: 18 mar. 2026.

GARCIA, J. C.; MENDES, M. B. Fontes de fósforo mineral e organomineral no estado nutricional e no crescimento inicial da cana-de-açúcar. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 5, n. 2, p. 2003–2013, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n2-044>. Acesso em: 18 mar. 2026.

HAYNES, R. J.; ZHOU, Y. F. Competitive and non-competitive adsorption of silicate and phosphate by two Si-deficient acid soils and their effects on P and Si extractability. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 64, n. 4, p. 535–541, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1473008>. Acesso em: 18 mar. 2026.

HILBRANDT, I. et al. Quantification and isotherm modeling of competitive phosphate and silicate adsorption on microscale granular ferric hydroxide. **RSC Advances**, v. 9, p. 23642–23651, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/c9ra04865k>. Acesso em: 18 mar. 2026.

HÖMBERG, A. et al. Increased silicon concentration in fen peat leads to a release of iron and phosphate and changes in the composition of dissolved organic matter. **Geoderma**, Amsterdam, v. 374, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114422>. Acesso em: 18 mar. 2026.

ISLAM, M. et al. A critical review of soil phosphorus dynamics and biogeochemical processes for unlocking soil phosphorus reserves. **Advances in Agronomy**. Academic Press, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2024.02.004>. Acesso em: 18 mar. 2026.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 2004.

LEE, Y. B.; KIM, P. Reduction of phosphate adsorption by ion competition with silicate in soil. **Korean Journal of Environmental Agriculture**, v. 26, n. 4, p. 286–292, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.5338/KJEA.2007.26.4.286>. Acesso em: 18 mar. 2026.

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer and plant silicon research in Japan**. Amsterdam: Elsevier Science, 2002.

MANIVANNAN, A.; SOUNDARARAJAN, P.; JEONG, B. R. Silicon: a “quasi-essential” element’s role in plant physiology and development. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1157185>. Acesso em: 18 mar. 2026.

PRADO, R. M. **Nutrição de plantas**. 2. ed. São Paulo: Editora Unesp, 2020.

REZAKHANI, L. et al. Phosphate-solubilizing bacteria and silicon synergistically augment phosphorus uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.) fertilized with soluble or insoluble P source. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 173, p. 504–513, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.060>. Acesso em: 18 mar. 2026.

SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SIHUA, H. et al. Silicon in soil and its interaction with nitrogen, phosphorus, and potassium nutrients on rice yield. **Soil and Tillage Research**, v. 238, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106027>. Acesso em: 18 mar. 2026.

TEIXEIRA, P. C. et al. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

THAKRAL, V. et al. Silicon, a quasi-essential element: availability in soil, fertilizer regime, optimum dosage, and uptake in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 208, 108459, 2024.

VINHA, A. P. C. et al. Adsorção de fósforo em solos de regiões tropicais. **Nativa**, Sinop, v. 9, n. 1, p. 30–35, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i1.10973>. Acesso em: 18 mar. 2026.

YIN, Y. et al. Adsorption of arsenic by activated charcoal coated zirconium-manganese nanocomposite: performance and mechanism. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 575, p. 318–328, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.04.093>. Acesso em: 18 mar. 2026.



Universidade Federal  
de São João del-Rei

### Termo de autorização para publicação no Repositório Institucional da UFSJ

Eu José Claudio Santana Junior, RG MG23925458

Org. Exp.SSP, CPF 165.717.527-86, e-mail: joseclaudiosantana317@gmail.com, telefone (31) 994471430, na qualidade de titular dos direitos de autor que recaem sobre minha produção de:

( X ) trabalho de conclusão de curso ( ) dissertação de mestrado ( ) tese de doutorado

( ) \_\_\_\_\_ (outro).

Título: EFEITO DO SILÍCIO NA REDUÇÃO DA ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM LATOSSOLO VERMELHO , defendida em: 17 de abril de 2026, no programa de ( X ) Graduação ( ) Pós-Graduação em \_\_\_\_\_, com fundamento nas disposições sobre direitos autorais (Lei nº 9.610 de 19 de fevereiro de 1998), autorizo a Universidade Federal de São João del-Rei a disponibilizar gratuitamente a obra citada, sem ressarcimento de direitos autorais, para fins de leitura e impressão, a título de divulgação da produção científica gerada pela universidade, a partir desta data. Autorizo a liberação:

( X ) Total

( ) Parcial (serão disponibilizados apenas resumo, palavras-chave e os dados: autor, título, membros da banca examinadora e data de defesa).

Motivo: \_\_\_\_\_.

#### Obs.:

- No caso de liberação parcial, a dissertação/tese impressa não poderá ser consultada no acervo.
- Estou ciente que, em caso de liberação parcial, o documento será mantido nesta opção durante 1 (um) ano a partir da data de autorização da publicação. Para ampliação deste prazo, devo manifestar-me junto a DIBIB/UFSJ. Para liberação antes do prazo estipulado, formalizarei a autorização. Se não houver manifestação, o texto completo da dissertação/tese será liberado em sua totalidade e a versão impressa será disponibilizada para consulta.
- O conteúdo disponibilizado é de minha inteira responsabilidade.

Sete Lagoas, MG, 09 de julho de 2026.

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** JOSE CLAUDIO SANTANA JUNIOR  
Data: 09/07/2026 17:02:22-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Assinatura do Autor**