



Curva específica de calibração de fósforo para dois solos de cerrado

Specific phosphorus calibration curve for two cerrado soils

Curva de calibración de fósforo específica para dos suelos cerrado

DOI: 10.55905/revconv.18n.9-028

Originals received: 8/1/2025

Acceptance for publication: 8/26/2025

João Herbert Moreira Viana

Doutor em Solos e Nutrição de Plantas

Instituição: Universidade Federal de Viçosa

Endereço: Viçosa – Minas Gerais – Brasil

E-mail: joao.herbert@embrapa.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5872-4816>

Eliane de Paula Clemente

Doutora em Solos e Nutrição de Plantas

Instituição: Universidade Federal de Viçosa

Endereço: Viçosa – Minas Gerais – Brasil

E-mail: eliane.clemente@embrapa.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7814-0455>

Manoel Ricardo de Albuquerque Filho

Doutor em Solos e Nutrição de Plantas

Instituição: Universidade Federal de Viçosa

Endereço: Viçosa – Minas Gerais – Brasil

E-mail: manoel.ricardo@embrapa.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4368-2078>

Flávia Cristina dos Santos

Doutora em Solos e Nutrição de Plantas

Instituição: Universidade Federal de Viçosa

Endereço: Viçosa – Minas Gerais – Brasil

E-mail: flavia.santos@embrapa.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1012-4835>

RESUMO

Este estudo avaliou a resposta de dois solos com texturas contrastantes — argiloso e franco arenoso — à aplicação de doses crescentes de superfosfato triplo, focando na produção de matéria seca de milho e na disponibilidade de fósforo, medida pelos extratores Mehlich I e resina. O solo argiloso demonstrou maior eficiência na utilização do fósforo, com melhor ajuste ao modelo de Mitscherlich e estimativa confiável da dose crítica para atingir 90% da produtividade máxima. Já o solo arenoso apresentou menor eficiência, com dose crítica estimada acima da faixa testada, indicando maior necessidade de fósforo. Ambos os extratores apresentaram correlação linear



com as doses aplicadas, embora a magnitude do fósforo extraído variou conforme o tipo de solo. Os resultados reforçam a importância de recomendações diferenciadas de adubação fosfatada baseadas na textura do solo para otimizar a eficiência agrônômica e minimizar perdas ambientais. O presente estudo avaliou a resposta de dois solos com texturas contrastantes — argiloso e franco arenoso — à aplicação de doses crescentes de superfosfato triplo, com foco na produção de matéria seca de milho e na disponibilidade de fósforo no solo, determinada pelos extratores Mehlich I e resina. O solo argiloso demonstrou maior eficiência na utilização do fósforo aplicado, apresentando melhor ajuste ao modelo de Mitscherlich e permitindo uma estimativa confiável da dose crítica necessária para atingir 90% da produtividade máxima. Por outro lado, o solo franco arenoso apresentou menor eficiência, com a dose crítica estimada situando-se acima da faixa de aplicação testada, sugerindo maior exigência de fósforo para alcançar níveis semelhantes de produtividade. Ambos os extratores apresentaram resposta linear às doses aplicadas, embora a quantidade de fósforo extraída tenha variado de acordo com a textura do solo. Os resultados evidenciam a importância de se adotar recomendações específicas de adubação fosfatada baseadas na textura do solo, a fim de otimizar a eficiência do uso do nutriente e reduzir possíveis perdas ambientais, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes.

Palavras-chave: fósforo, textura do solo, disponibilidade de fósforo, modelo de resposta, extratores de fósforo.

ABSTRACT

This study evaluated the response of two soils with contrasting textures — clayey and sandy loam — to the application of increasing doses of triple superphosphate, focusing on pearl millet dry matter production and phosphorus availability, as measured by the Mehlich I and resin extractants. The clayey soil showed greater efficiency in phosphorus utilization, with a better fit to the Mitscherlich model and a reliable estimate of the critical dose required to reach 90% of maximum yield. In contrast, the sandy loam soil exhibited lower efficiency, with the estimated critical dose falling above the tested range, indicating a higher phosphorus requirement. Both extractants showed a linear correlation with the applied doses, although the amount of phosphorus extracted varied according to soil type. The results reinforce the importance of differentiated phosphorus fertilization recommendations based on soil texture in order to optimize agronomic efficiency and minimize environmental losses. This study evaluated the response of two soils with contrasting textures — clayey and sandy loam — to the application of increasing doses of triple superphosphate, with a focus on pearl millet dry matter production and phosphorus availability in the soil, as determined by the Mehlich I and resin extractants. The clayey soil demonstrated higher efficiency in the use of applied phosphorus, showing a better fit to the Mitscherlich model and allowing a reliable estimate of the critical dose required to reach 90% of maximum productivity. On the other hand, the sandy loam soil showed lower efficiency, with the estimated critical dose lying above the tested application range, suggesting a greater phosphorus demand to achieve similar productivity levels. Both extractants exhibited a linear response to the applied doses, although the amount of phosphorus extracted varied depending on soil texture. The results highlight the importance of adopting phosphorus fertilization recommendations that are specific to soil texture, in order to optimize nutrient use efficiency and reduce potential environmental losses, thus contributing to more sustainable and efficient agricultural practices.



Keywords: phosphorus, soil texture, phosphorus availability, response model, phosphorus extractants.

RESUMEN

Este estudio evaluó la respuesta de dos suelos con texturas contrastantes —arcilloso y franco arenoso— a la aplicación de dosis crecientes de superfosfato triple, enfocándose en la producción de materia seca de mijo y en la disponibilidad de fósforo, medida por los extractantes Mehlich I y resina. El suelo arcilloso demostró una mayor eficiencia en la utilización del fósforo, con un mejor ajuste al modelo de Mitscherlich y una estimación confiable de la dosis crítica necesaria para alcanzar el 90% de la productividad máxima. Por otro lado, el suelo franco arenoso presentó menor eficiencia, con una dosis crítica estimada por encima del rango probado, lo que indica una mayor necesidad de fósforo para lograr niveles similares de productividad. Ambos extractantes mostraron una correlación lineal con las dosis aplicadas, aunque la magnitud del fósforo extraído varió según el tipo de suelo. Los resultados refuerzan la importancia de recomendaciones diferenciadas de fertilización fosfatada basadas en la textura del suelo para optimizar la eficiencia agronómica y minimizar las pérdidas ambientales. El presente estudio evaluó la respuesta de dos suelos con texturas contrastantes —arcilloso y franco arenoso— a la aplicación de dosis crecientes de superfosfato triple, con énfasis en la producción de materia seca de mijo y en la disponibilidad de fósforo en el suelo, determinada por los extractantes Mehlich I y resina. El suelo arcilloso demostró mayor eficiencia en la utilización del fósforo aplicado, presentando un mejor ajuste al modelo de Mitscherlich y permitiendo una estimación confiable de la dosis crítica necesaria para alcanzar el 90% de la productividad máxima. En cambio, el suelo franco arenoso presentó menor eficiencia, con la dosis crítica estimada ubicándose por encima del rango de aplicación evaluado, lo que sugiere una mayor exigencia de fósforo para alcanzar niveles similares de productividad. Ambos extractantes presentaron respuesta lineal a las dosis aplicadas, aunque la cantidad de fósforo extraído varió de acuerdo con la textura del suelo. Los resultados evidencian la importancia de adoptar recomendaciones específicas de fertilización fosfatada basadas en la textura del suelo, con el fin de optimizar la eficiencia en el uso del nutriente y reducir posibles pérdidas ambientales, contribuyendo así a prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes.

Palabras clave: fósforo, textura del suelo, disponibilidad de fósforo, modelo de respuesta, extractantes de fósforo.

1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um macronutriente essencial ao desenvolvimento vegetal, desempenhando papel estrutural e funcional em moléculas fundamentais como o trifosfato de adenosina (ATP), os ácidos nucleicos e fosfolipídios. Além disso, participa de processos fisiológicos vitais, incluindo a fotossíntese, respiração celular e divisão celular (Malavolta, 2006). Em solos tropicais, a disponibilidade de fósforo é geralmente limitada devido à elevada



capacidade de adsorção por óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), especialmente em solos argilosos altamente intemperizados Novais *et al.* (2007).

A textura do solo é um dos principais fatores que influenciam a disponibilidade de P. Solos argilosos, por possuírem maior superfície específica e, em alguns casos, concentrações elevadas de óxidos de Fe e Al, apresentam maior capacidade de adsorção e fixação do fósforo, tornando-o menos disponível para as plantas (Barrow, 2017).

Em contraste, os solos arenosos, com baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e menor teor de argila, retêm menos fósforo, o que eleva o risco de perdas por lixiviação (Fageria *et al.*, 2011). Dessa forma, estratégias para aumentar a eficiência da adubação fosfatada devem considerar as características físicas e químicas do solo. Em solos argilosos, são frequentemente necessárias doses mais elevadas de fertilizantes fosfatados para saturar os sítios de adsorção. Já em solos arenosos, ainda que doses menores possam ser eficazes, o manejo deve ser criterioso para evitar perdas por percolação (Novais *et al.*, 2007; Shen *et al.*, 2011). Bahia filho (1974), ao utilizar curvas de adsorção de fósforo para caracterizar a capacidade dos solos em reter o nutriente, observou que solos com maior teor de óxidos de Fe e Al apresentaram curvas mais inclinadas, refletindo maior capacidade tampão e, conseqüentemente, menor disponibilidade imediata de P. Solos com menor teor de argila ou com mineralogia menos reativa apresentaram curvas mais suaves, com maior presença de fósforo em solução mesmo com menores doses aplicadas. A inclinação da curva representa diretamente a capacidade tampão do solo. Solos com alta inclinação retêm P mais fortemente, dificultando seu aproveitamento pelas plantas no curto prazo. Esses solos exigem maiores doses iniciais para saturar os sítios de adsorção. Estes resultados também foram observados em Machado *et al.* (2011) e ainda, verificou que disponibilidade de P no solo diminuiu ao longo do tempo de incubação (30, 60 e 90 dias), indicando que o tempo de contato entre o fertilizante e o solo influencia na retenção do nutriente.

Existe um patamar crítico de concentração de P, abaixo do qual o crescimento vegetal é severamente limitado. A resposta vegetal não cresce indefinidamente com o aumento do P em solução, havendo uma saturação do crescimento após certo ponto. Esse tipo de curva ilustra o conceito de nível crítico de fósforo, essencial para interpretação de análises de solo e recomendações agronômicas. A presença de solos com diferentes curvas reforça a necessidade de interpretação específica por tipo de solo e não o uso de valores universais. As recomendações de adubação fosfatada devem considerar a curva de cada solo: adubações de mesma dose podem



resultar em respostas muito diferentes dependendo da capacidade tampão. O uso de corretivos e condicionadores do solo (como silicato, carbonato ou gesso) pode ser estratégico para modificar a reatividade do solo e reduzir a fixação de P (Bahia Filho, 1974). Por essa razão, diversas estratégias têm sido desenvolvidas para melhorar a eficiência do uso de fósforo, incluindo o uso de materiais corretivos e fontes alternativas de nutrientes.

A determinação das doses para aplicação de P em experimentos e em cultivos em geral deve ser feita com base nas curvas de sorção deste elemento, e os procedimentos para ensaios de calibração de fósforo foram desenvolvidos e testados conforme descritos na literatura (Fox e Kamprat, 1970; Bahia Filho, 1974; 1982). O objetivo deste trabalho foi determinar as curvas de sorção de P em dois solos com diferentes texturas para determinação das doses de P a serem utilizadas em ensaios em casa de vegetação e em campo, nos locais destes solos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foi montado um ensaio em casa de vegetação em um delineamento inteiramente casualizado, com dois Latossolos Vermelho Amarelos (um argiloso e outro franco arenoso, Tabela 1), e sete doses de P, fornecidas sob a forma de superfosfato triplo (Tabela 2). Os solos foram coletados em áreas não cultivadas e corrigidos com calcário, conforme a tabela de recomendação oficial (Alvarez e Ribeiro, 1999). Além da correção e dos tratamentos com P, foi feita uma aplicação de 100 mL de uma solução nutritiva para suplementação de adubação com os outros nutrientes, conforme a Tabela 3. Foi plantado o cultivar de milho BRS-1502.

Tabela 1 – Análise de fertilidade dos solos antes do ensaio.

Solo	Textura	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	P Mehlich	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	CTC	M.O.
		1:2,5		mg dm ⁻³				cmol _c dm ⁻³				dag kg ⁻¹
LVAd	Argila	5,0	4,1	2,2	25,1	0,42	0,00	1,47	5,6	0,52	6,12	3,3
LVAd	Franco-arenosa	5,1	4,0	3,0	11,7	0,40	0,30	0,70	3,1	0,73	3,83	1,2

Fonte: Autores



Tabela 2 – Doses de P dos tratamentos aplicados

Tratamento	Dose de P (mg kg ⁻¹ de solo)
1	0
2	50
3	100
4	150
5	200
6	250
7	300

Fonte: Autores

Tabela 3 – Solução nutritiva aplicada aos tratamentos.

Nutriente	Fonte	Solo Arenoso Peso em g da fonte por L de solução	Solo Argiloso
N	Ureia	26,667	20,000
K	KCl	8,654	6,490
B	H ₃ BO ₃	0,278	0,209
Cu	CuSO ₄ .5H ₂ O	0,621	0,466
Fe	FeCl ₃ .6H ₂ O	0,450	0,338
Mn	MnCl ₂ .4H ₂ O	0,791	0,594
Mg e S	MgSO ₄ .7H ₂ O	18,438	13,829
Mo	NaMoO ₄ .2H ₂ O	0,021	0,015

Fonte: Autores

Os solos foram inicialmente saturados com água deionizada antes do plantio, e mantidos próximos à capacidade de campo durante toda a condução do experimento. Foram plantadas três sementes por vaso, e mantidas as plântulas germinadas até a colheita.

Após 45 dias da emergência, as plantas nos vasos foram colhidas, cortadas rentes ao solo, armazenadas em sacos de papel e levadas para determinação do peso seco em estufa (60 °C) e moídas para as análises químicas. Foi retirada uma amostra do solo de cada vaso do experimento, a qual foi seca ao ar, peneirada em peneira de 2,0 mm e encaminhada para as análises químicas de rotina, conforme os procedimentos de Teixeira *et al.* (2017).

Foram efetuadas as análises estatísticas de variância, de regressão e de ajuste de modelo não linear por meio dos pacotes “rio” (Chan *et al.*, 2023), “agricolae” (Mendiburu, 2023), “tidyverse” (Wickham *et al.*, 2019), “nlstools” (BATY *et al.*, 2015), “nlme” (Pinheiro e Bates, 2024) e “minpack.lm” (Elzhov *et al.*, 2023), do sistema estatístico R (R Core Team, 2024).

O modelo de Mitscherlich (Ware *et al.*, 1982; Powel *et al.*, 2020) foi aplicado aos dados de produção para identificar os valores de produtividade ótima (equivalente a 90% da produção máxima), conforme a equação abaixo:

$$P_s = A - (A - B) * e^{-C * t} \quad (1)$$



onde:

A: Produção máxima em peso seco da planta (g)

B: Produção mínima em peso seco da planta (g)

c: parâmetro da curva ajustável

P_s: Produção em peso seco da planta (g)

t: taxa de aplicação de P (kg ha⁻¹)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A calibração das doses de fósforo (P) por meio do modelo de Mitscherlich evidenciou comportamentos contrastantes entre os solos estudados, com maior eficiência de resposta no solo argiloso em comparação ao solo arenoso (Tabela 4). Essa diferença pode ser atribuída à maior capacidade de retenção e adsorção de P nos colóides da fração argilosa, conforme demonstrado por Novais *et al.* (2007), que indicam que solos com maior CTC e teor de argila tendem a apresentar menor mobilidade do P e, conseqüentemente, respostas mais eficientes em menores doses.

Tabela 4 - Estimativas dos parâmetros de ajuste do modelo de Mitscherlich para a relação entre a dose aplicada de P e a produção em peso seco de planta.

Solo argiloso						
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr> t ¹		Erro padrão residual
A	23,084	1,171	19,7	0,000	***	4,259
B	1,971	2,459	0,8	0,433		
C	0,041	0,020	2,0	0,057	.	
Solo arenoso						
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr> t		Erro padrão residual
A	23,734	4,187	5,7	0,000	***	5,057
B	1,544	2,801	0,6	0,588		
C	0,009	0,005	1,9	0,071	.	

¹ >|t|: probabilidade de exceder o valor t. Códigos de significância: '***': significativo a 0,1% de probabilidade; '.': significativo a 10% de probabilidade.

Fonte: Autores

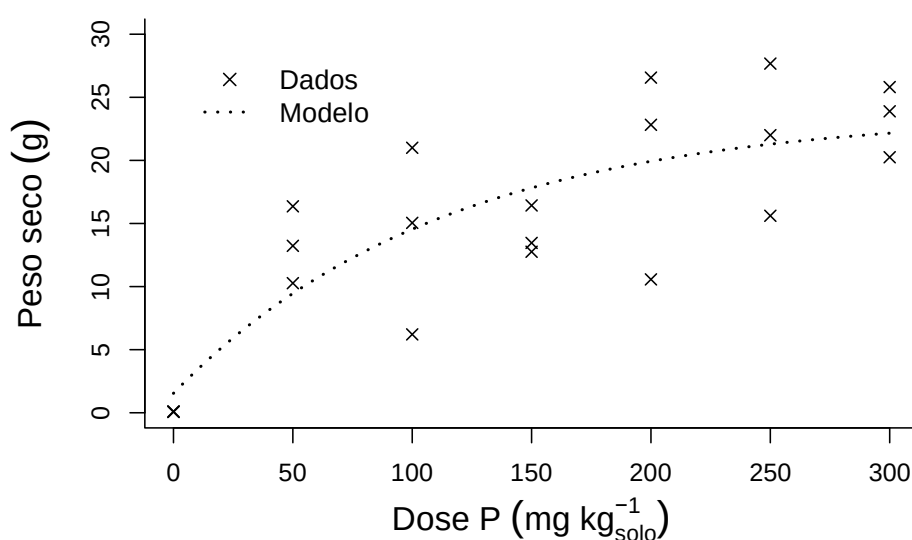
No solo argiloso, a resposta ao P foi mais bem delimitada, com uma estimativa de 72,5 mg kg⁻¹ para atingir 90% da produtividade máxima, valor que está dentro do intervalo experimental, reforçando a adequação do delineamento adotado. Por outro lado, no solo arenoso, o valor estimado de 310,5 mg kg⁻¹ ultrapassou a maior dose aplicada (300 mg kg⁻¹), o que sugere que o patamar de máxima produtividade ainda não foi atingido, corroborando os achados de



Gatiboni *et al.* (2013), que alertam para o risco de lixiviação e menor eficiência do fósforo em solos arenosos.

A baixa significância estatística dos parâmetros B e C no modelo de Mitscherlich para ambos os solos (Tabela 4) indica limitações do modelo frente a dados com alta variabilidade residual, como também discutido por Fageria *et al.* (2011), ao analisarem modelos de resposta à adubação. Contudo, o parâmetro A, correspondente à produção máxima teórica, mostrou-se significativo nos dois solos, sustentando o uso do modelo como ferramenta de calibração inicial.

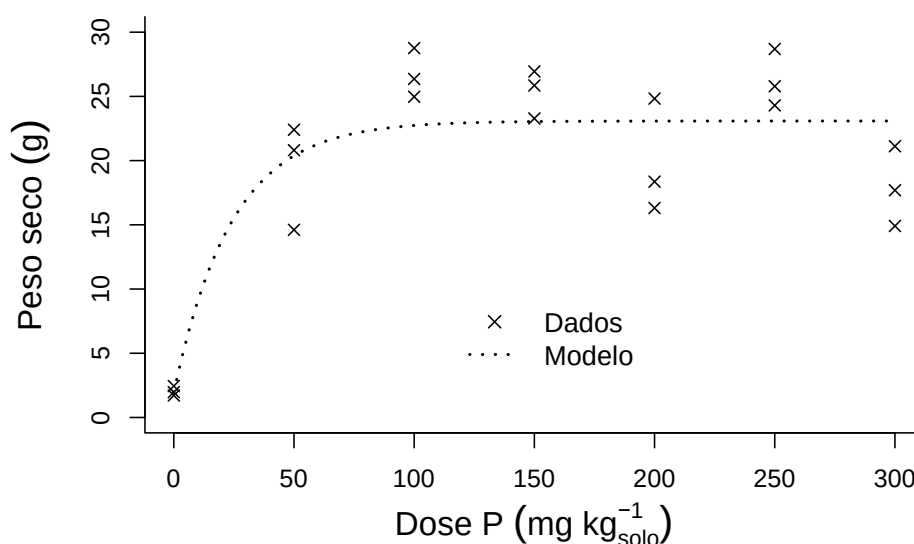
Figura 1 – Gráfico do ajuste do modelo de Mitscherlich aplicado aos dados de peso seco de milho aos 45 dias em função da dose de P aplicada para o solo arenoso.



Fonte: autores



Figura 2 – Gráfico do ajuste do modelo de Mitscherlich aplicado aos dados de peso seco de milho aos 45 dias em função da dose de P aplicada para o solo argiloso.



Fonte: Autores

No caso do solo argiloso, o ajuste do modelo de Mitscherlich apresenta um patamar de produção máxima a partir da dose de $100,0 \text{ mg kg}_{\text{solo}}^{-1}$ (Figura 2 e Tabela 4), sendo a estimativa da dose para se obter 90% da máxima produção ($72,5 \text{ mg kg}_{\text{solo}}^{-1}$) dentro do intervalo de doses do ensaio. Não houve efeito do solo sobre a produção do milho nas doses acima de $200 \text{ mg kg}_{\text{solo}}^{-1}$ de P, conforme indicado na Tabela 5.

A ausência de diferença significativa entre os solos nas maiores doses (Tabela 5) sugere que, apesar das características físico-químicas distintas, a resposta do milho converge em altas disponibilidades de P. Essa constatação está em consonância com os resultados de Souza *et al.* (2012), que observaram respostas semelhantes entre solos contrastantes quando os níveis de P atingem valores superiores ao nível crítico.

Tabela 5 – Análise de variância para a relação entre o tipo de solo e a produção em peso seco de planta.

Anova Peso Seco x Solo					
Parâmetro	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor F	Pr>F
Solo	1	0.6	0.562	0.021	0.887
Resíduos	16	429	26.814		
Solo	Peso Seco (g)	grupo			
Arenoso	21.7	a			
Argiloso	21.3	a			

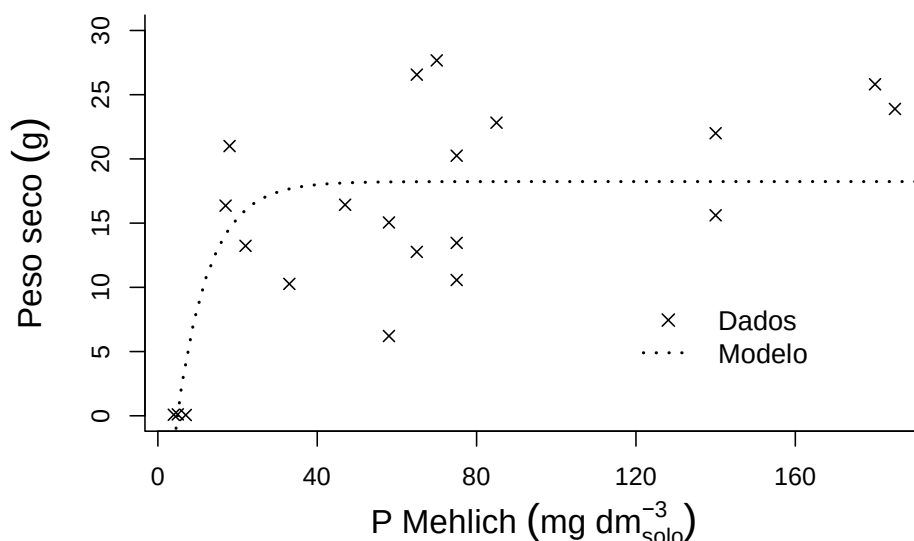
(*) Pr>F probabilidade de exceder o valor F.

Fonte: autores



Os dados de produção em função do teor de P disponível pelo extrator Mehlich I (Tabelas 6 e Figuras 3 e 4) demonstraram que, já com as doses iniciais, a produtividade se aproximou do platô, especialmente no solo argiloso. Isso reforça a necessidade de inclusão de doses menores nos experimentos futuros para estimativa acurada do nível crítico de P, conforme metodologia defendida por Alvarez (1996).

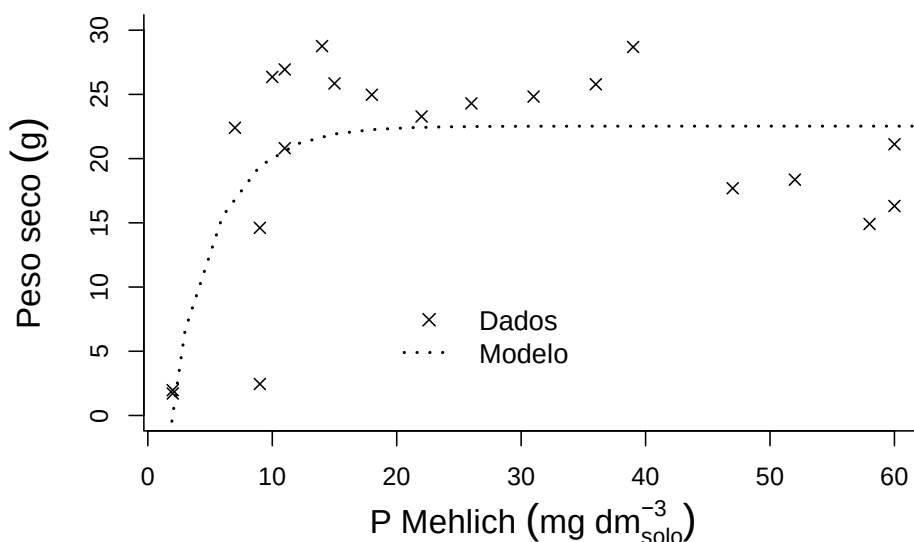
Figura 3 – Gráfico do ajuste do modelo de Mitscherlich aplicado aos dados de peso seco de milho aos 45 dias em função do valor de P disponível pelo extrator de Mehlich I, para o solo arenoso.



Fonte: autores



Figura 4 – Gráfico do ajuste do modelo de Mitscherlich aplicado aos dados de peso seco de milho aos 45 dias em função do valor de P disponível pelo extrator de Mehlich I, para o solo argiloso.



Fonte: autores

Tabela 6 - Estimativas dos parâmetros de ajuste do modelo de Mitscherlich para a relação entre o valor de P disponível pelo extrator de Mehlich I e a produção em peso seco de planta.

Solo argiloso						
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr> t		Erro padrão residual
A	22,527	1,834	12285	0,000	***	6,170
B	-13,280	13,793	-963	0,348		
C	0,272	0,149	1817	0,086	.	
Solo arenoso						
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr> t		Erro padrão residual
A	18,235	1,640	11116	0,000	***	6,202
B	-14,868	15,191	-979	0,341		
C	0,123	0,079	1556	0,137		

1) Pr>|t|: probabilidade de exceder o valor t. Códigos de significância: "***": significativo a 0,1% de probabilidade; '.': significativo a 10% de probabilidade.

Fonte: autores

Os resultados das análises de solo efetuadas após o ensaio indicam que a resposta da aplicação de P foi linear para os dois extratores testados, resina e Mehlich I, conforme esperado. As estimativas dos parâmetros estão apresentadas na Tabela 5, indicando que as regressões foram significativas em todos os casos. O resultado corrobora a expectativa que o aumento da disponibilidade do P, indicada pelos extratores, não é correspondido pelo aumento da produção acima do nível crítico para cada solo.



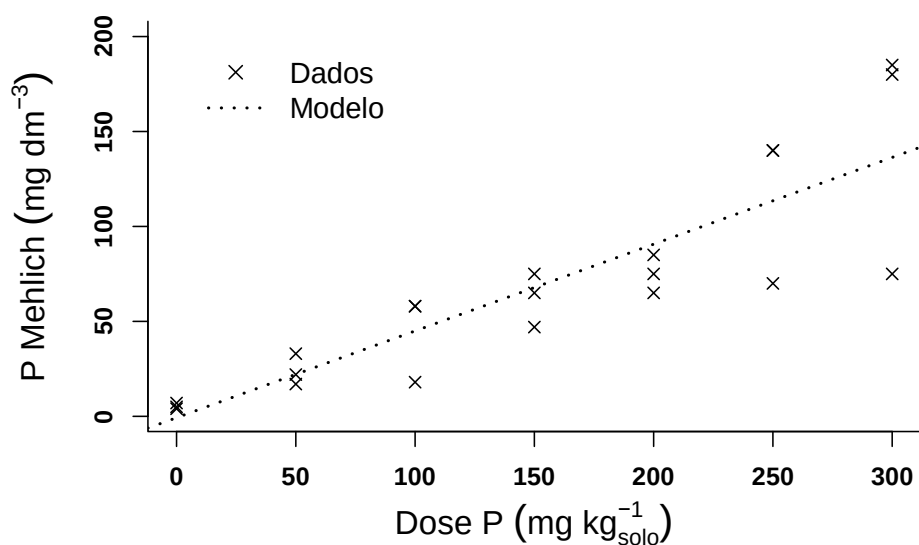
Tabela 7 - Estimativas dos parâmetros de ajuste das regressões lineares entre a dose aplicada de P e os tipos de extratores de P.

Regressão linear P Mehlich x Dose de P					
Solo argiloso					
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr> t	R² ajustado
Intercepto	0,488	4,005	122,000	904,000	***
Dose de P	0,168	0,022	7555,000	0,000	
Solo arenoso					
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr> t	R² ajustado
Intercepto	-0,726	10,712	-68,000	947,000	***
Dose de P	0,457	0,059	7690,000	0,000	
Regressao linear P resina x Dose de P					
Solo argiloso					
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr> t	R² ajustado
Intercepto	4,417	9,265	477,000	639,000	***
Dose de P	0,310	0,051	6036,000	0,000	
Solo arenoso					
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Valor t	Pr> t	R² ajustado
Intercepto	10,393	20,249	513,000	614,000	***
Dose de P	0,754	0,112	6709,000	0,000	

(*) Pr>|t|: probabilidade de exceder o valor t.

Fonte: autores

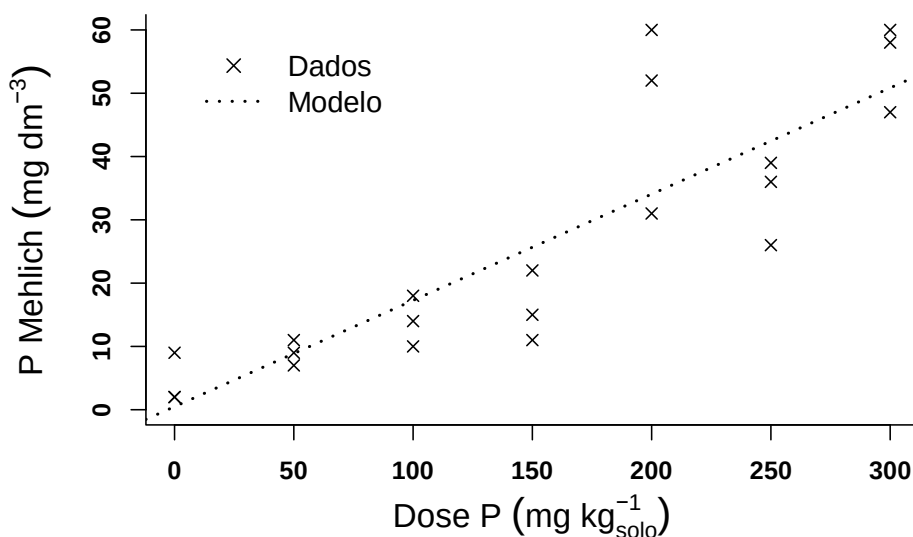
Figura 5 – Gráfico do ajuste da regressão linear aplicado aos dados de P no solo pelo extrator de Mehlich em função da dose de P aplicada para o solo arenoso.



Fonte: autores

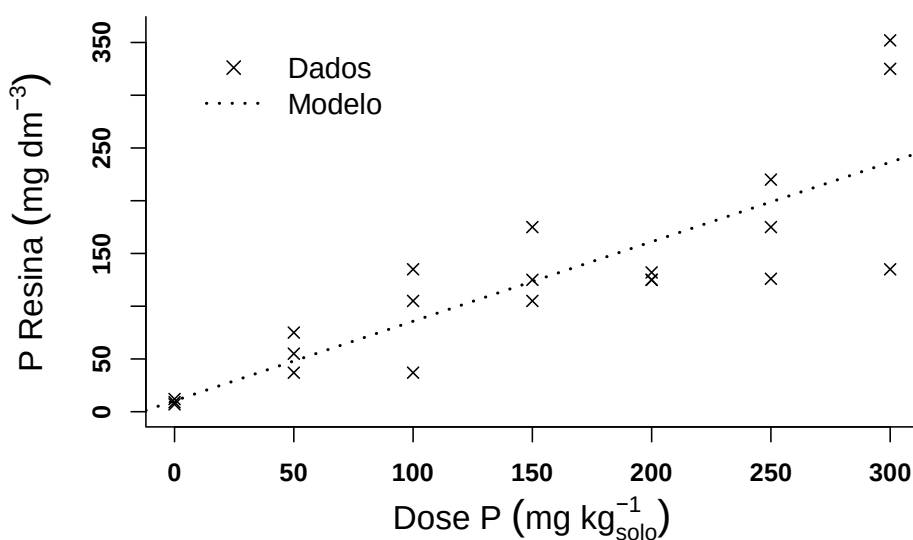


Figura 6 – Gráfico do ajuste da regressão linear aplicado aos dados de P no solo pelo extrator de Mehlich em função da dose de P aplicada para o solo argiloso.



Fonte: autores

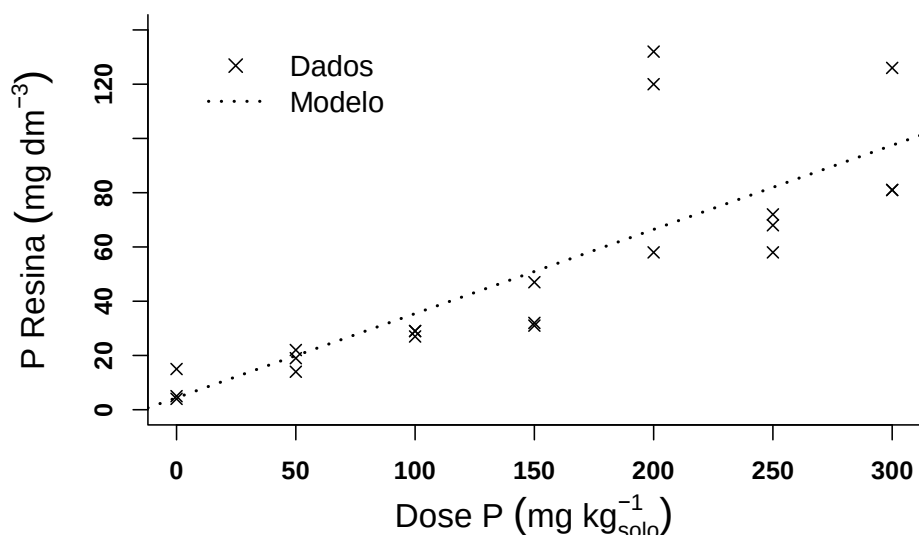
Figura 7 – Gráfico do ajuste da regressão linear aplicado aos dados de P no solo pelo extrator de resina em função da dose de P aplicada para o solo arenoso.



Fonte: autores



Figura 8 – Gráfico do ajuste da regressão linear aplicado aos dados de P no solo pelo extrator de resina em função da dose de P aplicada para o solo argiloso.



Fonte: autores

Tabela 8 – Análise de variância para a relação entre o tipo de extrator e o teor de P no solo.

Anova P Resina x Solo

Parâmetro	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor F	Pr(>F)
Solo	1	45763	45763	6.243	0.067
Resíduos	4	29323	7331		
Solo	P resina (mg kg ⁻¹)	grupo			
Arenoso	270.7	a			
Argiloso	96.0	a			

Anova P Mehlich x Solo

Parâmetro	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	Valor F	Pr(>F)
Solo	1	12604	12604	6.452	0.064
Resíduos	4	7815	1954		
Solo	P Mehlich (mg kg ⁻¹)	grupo			
Arenoso	146.7	a			
Argiloso	55.0	a			

Fonte: autores

A linearidade observada nas relações entre doses aplicadas de P e os teores extraídos por Mehlich I e resina (Tabela 7, Figuras 5 a 8) confirma a eficiência de ambos os extratores na quantificação do P disponível, embora a magnitude das leituras tenha diferido entre solos. No solo arenoso, os teores extraídos foram consistentemente mais elevados, ainda que estatisticamente semelhantes (Tabela 8). Isso é coerente com os estudos de Schlindwein *et al.*



(2020), que destacam a tendência de superestimação de P em solos de baixa capacidade tampão pelo extrator Mehlich I.

No geral, os resultados apontam para a maior eficiência do P no solo argiloso, mesmo sob menores doses, ao passo que o solo arenoso demandaria maiores aplicações para alcançar níveis similares de produtividade, o que reforça a necessidade de critérios diferenciados de recomendação de adubação fosfatada para esses dois tipos de solo, conforme também discutido por Ernani *et al.* (2007).

4 CONCLUSÕES

O solo argiloso apresentou maior eficiência na utilização do fósforo, atingindo a produtividade máxima com doses menores em comparação ao solo arenoso. A resposta linear entre as doses aplicadas e os teores extraídos por Mehlich I e resina confirma a eficácia dos extratores utilizados. Esses resultados evidenciam que o comportamento do fósforo depende fortemente da textura do solo. No solo argiloso, a maior capacidade de retenção favoreceu melhor aproveitamento do nutriente. Já no solo arenoso, foram necessárias doses mais elevadas para alcançar níveis semelhantes de produtividade. Dessa forma, a adubação fosfatada não deve ser generalizada para diferentes tipos de solo. Recomendações específicas são essenciais para aumentar a eficiência agrônômica das práticas de manejo. Além disso, a diferenciação entre solos auxilia no controle experimental e na interpretação dos resultados. A pesquisa reforça a importância de estratégias de adubação ajustadas à realidade edafoclimática. Portanto, a adoção de critérios técnicos distintos contribui para o uso racional de fertilizantes e a sustentabilidade agrícola.

AGRADECIMENTOS

Ao projeto "Desenvolvimento de fertilizantes a base de escória de siderurgia rica em silício enriquecidos com fósforo", fonte dos recursos pelo Convênio Embrapa – HARSCO (30.22.90.015.00.02.004).



REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, V. V. H.; RIBEIRO, A. C. Calagem. In: Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez, V. V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em minas gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 43-60.
- ALVAREZ V., V. H. Interpretação dos resultados das análises de solos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 17, n. 184, p. 15–18, 1996.
- BAHIA FILHO, A. F. de C. **Fósforo em latossolos do estado de Minas Gerais: intensidade, capacidade tampão e quantidade de fósforo, fósforo "disponível" e crescimento vegetal**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 1974. 69 p.
- BAHIA FILHO, A. F. de C. **Índices de disponibilidade de fósforo em latossolos do planalto central com diferentes características texturais e mineralógicas**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 1982. 179 p.
- BARROW, N. J. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. **Plant and Soil**, v. 410, n. 1-2, p. 401-410. 2017.
- BATY, F.; RITZ, C.; CHARLES, S.; BRUTSCHE, M.; FLANDROIS, J.P.; DELIGNETTE-MULLER, M.L. A Toolbox for Nonlinear Regression in R: The Package nlstools. **Journal of Statistical Software**, 66(5), 1-21. 2015. doi 10.18637/jss.v066.i05
- CHAN, C.; LEEPER, T.; BECKER, J.; SCHOCH, D. **rio: A Swiss-army knife for data file I/O**. 2023. <https://cran.r-project.org/package=rio>
- ELZHOV, T.V.; MULLEN, K.M.; SPIESS, A.; BOLKER, B. **minpack.lm: R Interface to the Levenberg-Marquardt Nonlinear Least-Squares Algorithm Found in MINPACK, Plus Support for Bounds**. R package version 1.2-4. 2023. <https://CRAN.R-project.org/package=minpack.lm>
- ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Lages: UDESC, 2007.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and Mineral Nutrition of Field Crops**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press. 2011. 560p.
- FOX, R. L.; KAMPRAT, E. J. Phosphate Sorption Isotherms for Evaluating the Phosphate Requirements of Soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 34, n. 5, p. 902-907, 1970.
- GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. dos S. Disponibilidade de fósforo em solos sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 2, p. 389–397, 2013.
- MACHADO, V.J.; SOUZA, C.H.E.; ANDRADE, B.B.; LANA, R.M.Q.; KORNDORFER, G.H. Curvas de disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 27, n. 1, p. 70-76. 2011.



MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 638 p. ISBN: 8531800471

MENDIBURU, F. **agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research**. R package version 1.3-7. 2023. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>

NOVAIS, R. F., SMYTH, T. J., & NUNES, F. N. Fósforo. In: Novais, R. F., Alvarez V., V. H., Barros, N. F., Fontes, R. L. F., Cantarutti, R. B., & Neves, J. C. L. (Eds.) **Fertilidade do Solo** (pp. 471–550). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa-MG. 2007.

PINHEIRO, J; BATES, D. **R Core Team nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models**. R package version 3.1-166. 2024. <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>

POWELL, C.D.; DHANOA, M.S.; GARBER, A.; MURRAY, J.-A.M.D.; LÓPEZ, S.; ELLIS, J.L.; FRANCE, J. Models Based on the Mitscherlich Equation for Describing Typical and Atypical Gas Production Profiles Obtained from In Vitro Digestibility Studies Using Equine Faecal Inoculum. **Animals**, 10, 308. 2020. <https://doi.org/10.3390/ani10020308>

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2024. URL <https://www.R-project.org/>.

SHEN J, YUAN L, ZHANG J, LI H, BAI Z, CHEN X, ZHANG W, ZHANG F. Phosphorus dynamics: From soil to plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997-1005, 2011.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo** (Ed.). 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

WARE, G.O.; OHKI, K.; MOON, L.C. The Mitscherlich plant growth model for determining critical nutrient deficiency levels. **Agron. J.**, 74: 88-91. 1982. <https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400010024x>

WICKHAM, H.; AVERICK, M.; BRYAN, J.; CHANG, W.; MCGOWAN, LD.; FRANÇOIS, R.; GROLEMUND, G.; HAYES, A.; HENRY, L.; HESTER, J.; KUHN, M.; PEDERSEN, T.L.; MILLER, E.; BACHE, S.M.; MÜLLER, K.; OOMS, J.; ROBINSON, D.; SEIDEL, D.P.; SPINU, V.; TAKAHASHI, K.; VAUGHAN, D.; WILKE, C.; WOO, K.; YUTANI, H. Welcome to the tidyverse. **Journal of Open Source Software**, 4(43), 1686. 2019. doi:10.21105/joss.01686