

## Avaliação da eficiência agrônômica de fosfatos naturais brasileiros em ensaios em vaso

Julia Alfano Keller Ventura Neves da Costa<sup>(1)</sup>; Jessica Franciele Kaminski Ramos<sup>(2)</sup>; Vinicius de Melo Benites<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Estudante de Engenharia Química na UFRJ, estagiária na Embrapa Solos. <sup>(2)</sup>Mestra em Agronomia pela UFRRJ, estagiária na Embrapa Solos. <sup>(3)</sup>PHD

**Resumo** – O fósforo (P) é um nutriente essencial no desenvolvimento vegetal. Os solos brasileiros apresentam alta capacidade de fixação de P, o que pode limitar sua disponibilidade para as plantas e afetar seu crescimento. Para suprir essa demanda, são utilizados fertilizantes fosfatados, em sua maioria importados. Para diminuir essa dependência, é necessário explorar fontes de fosfato nacionais. Foram analisadas ao todo 10 amostras, incluindo três fosfatos ígneos brasileiros, três de fosfato sedimentares brasileiros, três fosfatos importados com eficiência agrônômica conhecida e uma fonte solúvel de referência superfosfato triplo (STP). Foram realizadas análises de difratogramas de raios X e análises de caracterização química envolvendo pH em água, determinação de solubilidade de P total (HNO<sub>3</sub> 10%) e ácido cítrico 2%. Além disso, para a avaliação do desempenho agrônômico foi conduzido um experimento em casa de vegetação, por dois cultivos de 45 dias com 10 tratamentos de fertilização e o controle (-P). Todas as fontes de fosfato foram aplicadas na dose de 160 mg/kg de solo. Os resultados obtidos revelaram variações nas respostas da eficiência agrônômica e na eficiência de recuperação de fósforo, as quais estão relacionadas à origem de cada tipo de fosfato, ao teor de fósforo solúvel e aos componentes químicos presentes.

**Palavras-Chave:** Fertilizantes brasileiros, Fósforo, Recuperação de Fósforo, Solubilidade de Fósforo-total, Desempenho agrônômico.

### Introdução

O fósforo (P) desempenha um papel fundamental no desenvolvimento vegetal. Ele está diretamente ligado à transferência de energia entre as células, a respiração celular e os processos fotossintéticos. Sua limitação nas fases iniciais das plantas pode impedir o desenvolvimento adequado da cultura, mesmo com suplementação posterior. (Silva; Delatorre, 2009). Os solos brasileiros têm alta capacidade de fixação de P, o que pode limitar sua disponibilidade para as plantas (Bernardi et al. 2002). Ao longo do tempo, os fertilizantes solúveis, como superfosfatos, foram muito utilizados para suprir a demanda de P nas culturas. (Bindraban, et al, 2020). Isso gerou uma grande dependência da agricultura brasileira nesses fertilizantes, que em sua maioria são importados, além de causar impactos ambientais. Por isso, outras formas de realizar o fornecimento de P para as plantas têm ganhado relevância. (Abisolo, 2018). Uma das principais formas de produção de fertilizantes fosfatados é por meio do processamento de rochas fosfáticas, que contém mineral apatita em sua composição. (Roy et al. 2023). Esses fosfatos têm grande importância econômica, são utilizados tanto na indústria para a fabricação de ácido fosfórico quanto para a aplicação direta ao solo como fontes de liberação lenta de P, reduzindo a necessidade de fertilizantes convencionais (Kaminski, Peruzzo, 1997). A disponibilidade e a liberação de P nessas fontes podem variar conforme a origem e as propriedades físico-químicas das rochas, impactando, conseqüentemente, as culturas. (Rajan et al. 1996). O Brasil produz cerca de dois milhões de toneladas de fertilizantes fosfatados por ano, o que corresponde a 3% da produção mundial. Esse valor não teve mudanças significativas nas últimas décadas. Apesar da baixa produção, o Brasil é o quarto maior consumidor de fertilizantes fosfatados no mundo. Essa diferença entre a produção e o consumo acarreta na importação desses 85% desses insumos. (Abisolo, 2018).

É de grande importância realizar estudos específicos para determinar a solubilidade, a disponibilidade e o desempenho agrônômico das fontes de P nacionais, a fim de otimizar o uso de recursos disponíveis pelos agricultores e minimizar o desperdício de P. Para isso, esse estudo teve como

objetivo caracterizar os fosfatos nacionais por difração raio X, determinar os teores de P total e P solúvel em ácido cítrico em 2% dos mesmos fosfatos e determinar a eficiência agrônômica deles em casa de vegetação.

## Material e Métodos

Foram analisadas seis amostras de fosfatos naturais, sendo três fosfatos ígneos: Catalão - GO, Registro - SP e Jacupiranga - SP, três fosfatos sedimentares: Arraias-TO, Bonito-MS e Pratápolis -MG. Além disso, também foram analisadas fontes de fosfatos naturais conhecidos: Argélia, Bayóvar e Marrocos, e uma fonte de fosfato solúvel de referência: o Superfosfato Triplo (STP).

## Tratamentos e amostragens

Os materiais foram secos em estufa à 65°C. Todos os fertilizantes fosfatados foram moídos até serem passantes na peneira de 0,3 mm, conforme indica a Instrução Normativa nº 61, de 08 de Julho de 2020 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Essa faixa granulométrica foi utilizada para as análises de caracterização e posteriormente para o experimento de desempenho agrônômico, em casa de vegetação.

## Caracterização mineral dos fosfatos por difração de Raio-X

A determinação e quantificação dos minerais foi realizada por meio da técnica de difratometria de raios X (DRX), no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Os difratogramas de raio-X foram obtidos através do método de pó no equipamento *Bruker-D8 Advance*, operando nas seguintes condições: radiação CuK $\alpha$  (40kV), velocidade 0,02°2 $\theta$  por passo, com o tempo de contagem de 1 segundo por passo e coletados de 5 a 80°2 $\theta$ . A análise dos dados foi feita através da comparação com os padrões salvos no software *Bruker DiffraPlus*. Além disso, foi utilizado o método Rietveld (1969) com auxílio do software *Bruker AXS Topas, v.30* para a quantificação dos teores de quartzo, conforme o exigido pela Normativa nº 5 do MAPA.

## Análise de P total e P solúvel em ácido cítrico 2% e pH

As extrações de solubilidade de P total (HNO<sub>3</sub> 10%) e ácido cítrico 2% foram realizadas na proporção 1:100, com 0,4 g de amostra do fertilizante e 40 mL de solução. A amostra do fertilizante e a matriz ácida foram adicionadas em tubos Falcon de 50 mL e foram agitadas por um período de 12 horas em um agitador horizontal automático em 90 rpm. Após esse processo, as amostras foram filtradas. O método empregado para a determinação de P foi adaptado de Murphy e Riley (1962). Uma solução base de 1000 ppm de P foi preparada utilizando como padrão fosfato de potássio, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (-seco na estufa). Para isso foram pesados 0,44 g do padrão, dissolvido e avolumado para um balão volumétrico de 100 mL. Dessa solução retirou-se uma alíquota de 1,0 mL que foi avolumada para 100 mL, também em balão volumétrico, resultando em uma solução de 10 ppm de P. A partir dessa nova solução foram preparados cinco pontos para a curva de calibração de P: 0 ppm, 0,5 ppm, 1 ppm, 1,5 ppm e 2 ppm de P.

Para a leitura de P total das amostras em ácido nítrico em 10%, o fator de diluição (FD) foi de 1600 e para o ácido cítrico, o FD de 500 vezes.

A leitura do P foi feita no aparelho Espectrofotômetro modelo 'Nova 1600 UV', sob a faixa de 880 nm. Para isso foram utilizados 5 mL (4 mL de solução diluída e 1 mL da solução reagente de trabalho). As leituras foram feitas em triplicatas, assim como a extração e a determinação, de acordo com o Manual de Métodos e Análise de Solo (TEIXEIRA, P.C. et al, 2017)..

Para a leitura do pH em água foram pesados 0,2g de cada amostra e analisados 20 mL de água também em triplicata.

## Avaliação de eficiência agrônômica

A avaliação de eficiência agrônômica foi conduzida em casa-de-vegetação nas instalações da Embrapa Agrobiologia em Seropédica, RJ. As unidades experimentais foram compostas por vasos plásticos contendo 2 kg de Latossolo Vermelho Eutroférico coletado no distrito de Avelar, Paty do Alferes, RJ. O delineamento experimental adotado foi em DIC com 11 tratamentos e quatro repetições, que foram todas as amostras analisadas nas outras etapas e o tratamento controle (-P).

Antes da instalação do experimento, o solo foi incubado com carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) na proporção de 1,5 g/kg de solo, durante um período de 45 dias, para ajustar o pH do solo, atingindo uma faixa de 6,3. Todos os fosfatos foram aplicados nos vasos com a dose equivalente de 160 mg/kg de solo. Foram semeadas três plantas de milho híbrido AG 8740 PRO3 e, após cinco dias de emergência, foi realizado o desbaste, mantendo uma planta por vaso.

No dia do plantio, cada vaso foi fertilizado com solução nutritiva adaptada de Santos et al. (2019), contendo macro e micronutrientes, exceto o P. Além disso, foram realizadas pesagens periódicas e, quando necessário, o volume foi completado com água filtrada para manter a umidade em torno de 70% da capacidade do campo.

O ensaio foi conduzido por dois cultivos sucessivos, cada um com duração de 45 dias. Após o período de crescimento, as plantas foram coletadas, sendo separadas em parte aérea (PA) e as raízes. Essas amostras foram lavadas em água corrente e secas em estufa de circulação forçada a 65°C até atingirem peso constante. A massa secada parte aérea (MSPA) foi determinada utilizando balança de precisão. O material vegetal foi triturado em moinhos do tipo Willey e pulverizado em moinho de bolas. As análises dos teores de P foliares das amostras foram realizadas por meio de digestão nitroperclórica, conforme descrito no Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes (EMBRAPA, 1999). O teor de P total foi determinado pelo método colorimétrico utilizando espectrofotometria UV/Visível.

Para analisar a eficiência agrônômica dos diferentes tratamentos, foram calculados o Índice de Eficiência Agrônômica Relativa (EAR), conforme Junior et al. (2019). O EAR foi calculado com base na produção de massa seca, comparando a produtividade do tratamento em relação ao controle, utilizando a fórmula:

$$EAR\% = \frac{(prod. \text{ com tratamento} - prod. \text{ com controle})}{(prod. \text{ com STP} - prod. \text{ com controle})} * 100$$

Quando a produtividade do tratamento for igual ao controle estatisticamente, sua eficiência será nula. Já quanto a produtividade for semelhante ao tratamento referência (STP) será considerada de máxima eficiência.

Já a eficiência de recuperação de fósforo (ERP) foi calculada com base no acúmulo de P no tratamento sem adubação (-P) em relação à quantidade de P aplicada por vaso, com a fórmula:

$$ERP\% = \frac{(acúmulo \text{ de P no tratamento} - acúmulo \text{ de P no controle})}{(quantia \text{ de P aplicada})} * 100$$

## Resultados e Discussão

### Caracterização dos fosfatos naturais

As análises de DRX revelaram que a fase principal dos fosfatos é a apatita.

**Tabela 1.** Minerais presentes nas amostras de fosfato natural e concentrado fosfático, identificados pelo Método de Rietveld.

Fase mineral	Catalão	Registro	Bonito	Pratápolis	Arraias	Marrocos	Argélia	Bayóvar
%								
Apatita	84,7	68,9	48,3	41,6	51,6	87,9	92,7	92,8
Quartzo	7,8	0,8	39,1	36,9	35,8	3,9	1,6	1,6
Caulinita	-	-	4,2	4,3	4,9	-	-	-
Muscovita	-	-	5,3	13,2	7,8	-	-	-
Calcita	-	3,1	2,3	-	-	3,7	-	-
Dolomita	-	0,1	0,8	4,1	-	4,5	5,6	5,6
Clorita	3,9	-	-	-	-	-	-	-
Goethita	3,5	6,5	-	-	-	-	-	-
Barita	-	14,9	-	-	-	-	-	-
Gorceixita	-	5,6	-	-	-	-	-	-

Os materiais fosfáticos de Catalão e Registro foram obtidos de depósitos ígneos. Mas a alta concentração de minerais de ganga no fosfato de Registro pode ser relacionada com seu processamento que elimina apenas a parte fina da sílica. Já o fosfato de Catalão é concentrado via flotação.

Os fosfatos de Bonito, Pratápolis e Registro foram submetidos apenas a processos mecânicos e, por isso, são considerados fosfatos in natura, o que explica os maiores teores de ganga associados ao minério da apatita, com o alto teor de quartzo e presença de argilominerais. Já os fosfatos de Marrocos, Argélia e Bayóvar são considerados apatíticos. Eles passam por processos mais intensos de separação e liberação dos minerais formando um concentrado fosfático relativamente livre de impurezas, como sílica, argila e carbonatos.

O teor de P solúvel e do pH variou conforme as fontes de fosfatos (Tabela 2).

**Tabela 2.** Teor de P solúvel em ácido cítrico 2%, P total ( $P_2O_5\%$ ) e pH das amostras de fosfatos naturais.

Fosfatos	P solúvel ác. cítrico <sup>1</sup>	P total	pH
Jacupiranga	9,2	35,7	9,8
Catalão	11,0	34,2	9,6
Registro	18,2	25,4	7,6
Bonito	20,0	18,1	8,1
Pratápolis	18,3	17,5	7,7
Arraias	26,0	20,5	8,7
Marrocos	24,6	30,1	8,0
Argélia	27,9	27,9	8,2
Bayóvar	27,0	31,2	8,5

<sup>(1)</sup>Teor relativo ao conteúdo total de P

Os teores de P solúvel em ácido cítrico 2% indicam a disponibilidade imediata de fósforo para as plantas. Os valores observados variam entre 11,0% e 27,9% de  $P_2O_5$ , sendo os fosfatos de Argélia e Bayóvar os com maiores teores solúveis. Para os fosfatos naturais, o Arraias teve maior solubilidade em ácido cítrico 2%.

Em relação ao teor de P total, os valores variaram de 17,5% a 35,7% de  $P_2O_5$ . Os fosfatos de ígneos de Jacupiranga, Catalão e Registro apresentaram conteúdo maior do que os sedimentares de Bonito, Pratápolis e Arraias.

Sobre o pH, os valores variaram entre 7,6 e 9,8. O fosfato de Jacupiranga e de Catalão apresentaram os pH mais elevados, indicando uma condição alcalina. Já os demais fosfatos apresentaram valores de pH próximos.

### Eficiência agrônômica e recuperação de fósforo

Foi possível observar que os fosfatos sedimentares da Argélia e Bayóvar apresentaram máximo desempenho em termos de eficiência agrônômica relativa ao STP tanto no primeiro cultivo quanto na eficiência total acumulada dos dois plantios. (Tabela 3)

**Tabela 3.** Índice de eficiência agrônômica (EAR) da parte aérea total do milho adubado com diferentes classes de fosfatos, no primeiro cultivo e no total acumulado em dois cultivos sucessivos.

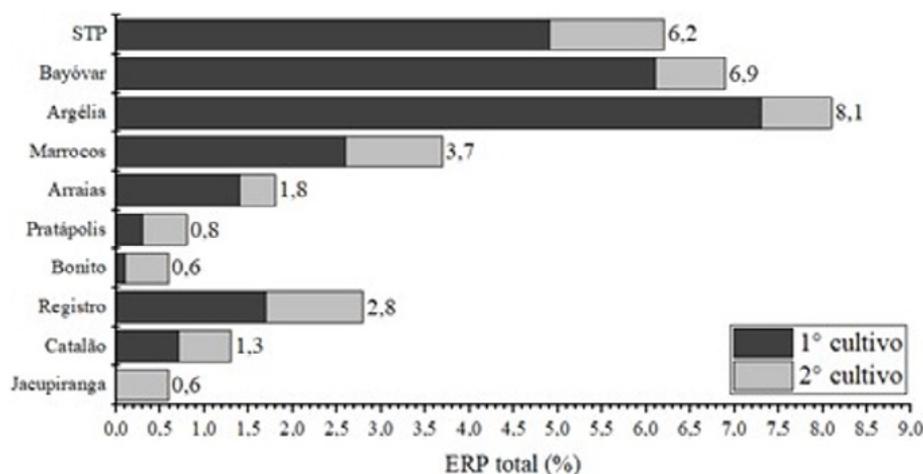
Tratamentos	1° cultivo	Total	Média
	-----EAR%-----		
Jacupiranga	0	0	0
Catalão	8	17	13
Registro	18	25	22
Bonito	0	0	0
Pratápolis	0	0	0
Arraias	15	20	18
Marrocos	23	36	30
Argélia	100	100	100
Bayóvar	100	100	100

Os fosfatos de Bonito, Pratápolis e Jacupiranga se comportam de forma semelhante ao tratamento controle (-P).

Na eficiência agrônômica total, acumulada nos dois cultivos, Bayóvar e Argélia tiveram maior desempenho, comparando-se ao STP. O segundo grupo de eficiência de produção de massa seca da parte aérea foi formado pelos tratamentos Marrocos, Arraias, Registro e Catalão.

Pode-se observar a diferença no desempenho para cada fonte de P aplicada. (Figura 1)

**Figura 1.** Eficiência de recuperação de fósforo (ERP%) dos fosfatos.



Com base nos dados, foi possível analisar que os fosfatos de Registro e Arraias foram capazes de recuperar uma quantidade maior de P em comparação aos outros fosfatos nacionais. Por outro lado, os fosfatos de Jacupiranga, Bonito e Pratápolis demonstraram uma resposta significativa no segundo cultivo, com um aumento no acúmulo de P.

Além disso, constatou-se que os fosfatos de Argélia e Bayóvar foram capazes de recuperar a mesma quantidade de P que a fonte solúvel padrão. Observou-se um maior acúmulo de P no primeiro cultivo por essas fontes.

## Conclusões

Com base nos dados analisados, pode-se concluir que os fertilizantes importados tiveram eficiência melhor do que os nacionais.

Em relação ao primeiro cultivo, os fertilizantes nacionais não se mostraram eficientes na recuperação de fósforo. Já os internacionais (Bayóvar, Argélia e Marrocos) e o solúvel (STP) tiveram grande desempenho. Em relação ao segundo cultivo, os fertilizantes nacionais tiveram um desempenho um pouco maior quando comparado com o primeiro cultivo, mas ainda pequenos em relação aos internacionais e o solúvel. O único nacional que se destacou foi o Registro, devido ao processo térmico que passa para ser produzido.

Analisando a eficiência agrônômica, podemos notar que os fertilizantes internacionais de Bayóvar e Argélia tiveram maior eficiência se igualando ao STP. Os fertilizantes brasileiros Jacupiranga, Bonito e Pratápolis se igualaram a repetição controle (-P), mostrando-se pouco eficientes. Já os fertilizantes brasileiros Catalão, Registro e Arraias mostraram algum nível de eficiência, mas considerada baixa quando comparados com os internacionais.

## Agradecimentos

Ao CNPq por ter fornecido recursos para a realização da pesquisa.

Ao CETEM que realizaram a pesquisa sobre os raio X nos fertilizantes.

À Embrapa Agrobiologia que disponibilizou o espaço e materiais necessários para a pesquisa de ensaio de vaso.

## Referências

BINDRABAN, P. S; DIMKPA, C. O; PANDEY, R. Exploring phosphorus fertilizers and fertilization strategies for improved human and environmental health. *Biology and Fertility of Soils*, v. 56, p. 299–317, 2020. Disponível em: <10.1007/s00374-019-01430-2>.

ABISOLO - Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal. Anuário brasileiro de tecnologia em nutrição vegetal, 2018. Anuário Abisolo, 179 p, 2018.

SILVA, A. A. S; DELATORRE, C. A. Alterações na arquitetura de raiz em resposta à disponibilidade de fósforo e nitrogênio. *Revista de Ciências Agroveterinárias*. Lages, v.8, n.2, p. 152-163, 2009.

BERNARDI, A. C. C; MACHADO, P. L. O. A; SILVA, C. A. Fertilidade do solo e demanda por nutrientes no Brasil. In: MANZATTO, C. M; FREITAS JÚNIOR, E; PERES, J. R. R. *Uso agrícola dos solos brasileiros*. Embrapa Solos, p. 61-77, 2002.

ROY, A; KANUNGO, B; PATRA, P. K; BHATTACHARYA, B. Temperature effects on elastic constants and related properties of apatites. *Materials today communications*, v. 35, 2023. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106223>>.

KAMINSKI, J; PERUZZO, G. Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo. Núcleo Regional Sul da Soc. Brasileira de Ciência do Solo, Boletim técnico n 3, 31 p. Santa Maria, RG, 1997

RAJAN, S. S. S; WATKINSON, J. H; SINCLAIR, A. G. Phosphate rocks for direct application to soils. *Advances in Agronomy*, v. 57, 1996.

TEIXEIRA, P. C. DONAGEMMA, G. K. FONTANA, A. TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise do solo. Embrapa, Brasília, DF, 2017.

SANTOS, S. R; FILHO, J. F. L; VERGUTZ, L; MELO, L. C. A. Biochar association with phosphate fertilizer and its influence on phosphorus use efficiency by maize. *Agricultural Sciences*, v. 43, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1413-7054201943025718>>.

JUNIOR, J. P. S; FLORES, R. A; CAMPOS, C. N. S; CORREIA, M. A. R; FRAZÃO, J. J; PRADO, R. M; TEIXEIRA, W. G; BRASIL, E. P. F; JÚNIOR, J. P. O;

MARCHÃO, R. L. A sustentabilidade agrícola na região do Cerrado. In: FLORES, R. A; CUNHA, P. P; MARCHÃO, R. L; MORAES, M.

F. Nutrição e adubação de grandes culturas na região do Cerrado. Gráfica UFG, 1º ed, 620 p, 2019.

MURPHY, J; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica chimica acta*, v. 27, p. 31-36, 1962. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)>.

RIETVELD, H.M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *J. Appl. Cryst.*, n.2, p.65-71, 1969.