

Disponibilidade de fósforo em função de diferentes manejo e uso de solo: Uma revisão de literatura.

Hevellyn Emanuely Mahnic Neves, agronomia, Centro Universitário Integrado, Brasil;

Laura Daleffe Nespolo, agronomia, Centro Universitário Integrado, Brasil;

Lucas Daniel Dos Anjos, agronomia, Centro Universitário Integrado, Brasil;

Marcos Kauã Quirino De Matos, agronomia, Centro Universitário Integrado, Brasil.

Raylla Vaz Bagini, agronomia, Centro Universitário Integrado, Brasil

Orientadora: Dione Aguiar, agronomia, Centro Universitário Integrado, Brasil,
dione.aguiar@grupointegrado.br

INTRODUÇÃO

O fósforo é um dos nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas, uma vez que desempenha papel fundamental em importantes processos fisiológicos. Contudo, em virtude de suas características químicas (eletronegativo), em solos altamente intemperizados este ânion é adsorvido aos minerais presentes na fração argila como os óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al). O tipo de adsorção (química ou física) determinará se este elemento poderá retornar a solução do solo, ou permanecerá indisponível para as plantas.

A adsorção de P aos colóides do solo, acontece principalmente em solos com mineralogia de carga variável ou pH dependente, onde, formam precipitados insolúveis com os óxidos de Fe e Al. Ainda, solos altamente intemperizados apresentam altos teores de hematita e goethita, que apresentam alta capacidade de adsorção de P por complexo de esfera interna, a qual possui como principal característica a ligação covalente, considerada de difícil reversão dada a elevada energia requerida.

No Brasil, grande parte dos solos são altamente intemperizados e dada as características mineralógicas desses solos, há uma intensificação da limitação de fósforo disponível na solução do solo para as plantas. Ainda essas características reduzem significativamente a eficiência da adubação fosfatada, fazendo com que apenas uma fração do nutriente aplicado seja efetivamente aproveitado pelas culturas.

Esse cenário torna-se ainda mais crítico diante do aumento recente no custo dos fertilizantes fosfatados, influenciado por tensões geopolíticas envolvendo importantes países exportadores, como Estados Unidos, Irã e Israel, o que impacta diretamente o preço dos insumos no Brasil. Como consequência, do aumento nos custos de produção agrícola, pode ocorrer uma elevação do preço dos alimentos e na redução da rentabilidade dos produtores.

O manejo adequado do solo é essencial para melhorar o aproveitamento deste nutriente, mas para manejá-lo de modo a aumentar a eficiência deste adubo torna-se

necessária uma compreensão profunda e integrada dos fatores químicos, físicos e biológicos dos solos tropicais.

Diante disso, este trabalho influencia os fatores que influenciam sua disponibilidade e as estratégias de manejo e uso de solo para aumentar sua eficiência na agricultura.

MÉTODO

Este estudo consiste em uma revisão da literatura, realizada com base em pesquisas na plataforma Google Acadêmico, com auxílio do software Mendeley para organização e gerenciamento das referências. A seleção dos materiais foi orientada pelo uso dos seguintes descritores: “fósforo na agricultura”, “fixação de fósforo no solo”, “disponibilidade de fósforo em solos tropicais” e “manejo de solo que maximizam a eficiência de fósforo”. Foram incluídos na análise artigos publicados entre os anos de 1990 e 2025, que abordassem a dinâmica do elemento a campo, com ênfase no contexto de solos tropicais e nas estratégias de manejo para aumentar sua eficiência e disponibilidade às plantas.

REVISÃO DE LITERATURA

O fósforo (P) configura-se como um dos nutrientes mais limitantes à produção de biomassa em regiões tropicais, em função da elevada capacidade de fixação em solos altamente intemperizados (CORRÊA et al., 2004). No Brasil, a baixa disponibilidade desse elemento está diretamente associada ao avançado estágio de intemperização e à mineralogia predominantemente composta por óxidos de ferro e alumínio.

A dinâmica do fósforo não se limita à adsorção inicial, envolvendo também processos cinéticos como o “envelhecimento” (aging). Após a adsorção, o ortofosfato pode migrar de sítios de baixa energia para microporos ou difundir-se para o interior da estrutura cristalina de óxidos de ferro e alumínio (GONÇALVES et al., 1989; NOVAIS & SMYTH, 1999). Esse processo promove a transformação de frações moderadamente lábeis em formas oclusas, contribuindo para a redução progressiva da eficiência da adubação fosfatada. Contudo, a literatura apresenta controvérsias quanto à reversibilidade desse fenômeno: enquanto alguns autores consideram o P ocluso como um dreno praticamente irreversível, outros sugerem que, sob condições específicas da rizosfera, parte desse fósforo pode ser remobilizada (BARROW, 1985).

A adsorção e precipitação do fósforo são governadas principalmente pela fração argila e pelo pH do solo. Em ambientes ácidos, predominam reações de troca de ligantes com grupos hidroxila na superfície de minerais como goethita, hematita e gibbsita. Em contrapartida, em solos alcalinos ou carbonáticos, a limitação ocorre pela precipitação com cálcio, formando compostos de baixa solubilidade, como a hidroxiapatita (AGUIAR, 2021). Embora a atividade microbiana possa favorecer a dissolução desses compostos por meio da acidificação do meio (MENDES & REIS JÚNIOR, 2003), ainda há lacunas na quantificação da relevância desse processo em condições de campo, especialmente em sistemas com elevado tamponamento mineralógico.

A capacidade do solo em manter a concentração de fósforo na solução é descrita pelo Poder Tampão de Fosfato (PTF). Solos ricos em gibbsita e goethita apresentam elevada energia de adsorção e alta Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP), frequentemente descritas por isotermas do tipo Langmuir. Estudos comparativos indicam que Latossolos derivados de rochas basálticas apresentam CMAP superior àqueles originados de arenitos, implicando diferentes estratégias de manejo e recomendação de adubação (ROLIM NETO et al., 2004). Nesse contexto, o fósforo remanescente (P-rem) destaca-se como ferramenta diagnóstica eficiente para estimar o potencial de fixação do solo (ALVAREZ V. et al., 2000).

A compartimentalização do fósforo em frações lábil, moderadamente lábil e não lábil evidencia um dos principais entraves da agricultura tropical: a formação de complexos de esfera interna e a oclusão mineral. Enquanto a fração lábil mantém equilíbrio com a solução do solo, o P não lábil apresenta elevada estabilidade, sendo associado a ligações covalentes de alta energia. Esse comportamento explica a baixa eficiência residual da adubação fosfatada, geralmente inferior a 30% (FRANCO JÚNIOR et al., 2024). Ainda assim, há debate quanto à irreversibilidade dessas formas, com evidências de que minerais como a gibbsita exercem forte controle sobre a dessorção (FERNÁNDEZ et al., 2008). Nesse cenário, o fósforo legado (P-legado) surge como um potencial reservatório estratégico, cuja utilização depende do desenvolvimento de estratégias eficientes de mobilização (WITHERS et al., 2018).

A interação entre matéria orgânica e fração mineral constitui um dos principais mecanismos de mitigação da fixação do fósforo. Ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como citrato, malato e oxalato, competem por sítios de adsorção e promovem a complexação de Fe e Al, reduzindo a energia de ligação do fosfato e aumentando sua disponibilidade (ANDRADE et al., 2003). No entanto, em solos com elevada CMAP, a eficácia desse mecanismo pode ser limitada, uma vez que a rápida mineralização da matéria orgânica em ambientes tropicais tende a restabelecer os sítios de adsorção em curto intervalo de tempo.

Do ponto de vista biológico, microrganismos como *Bacillus subtilis*, bem como gêneros como *Pseudomonas* e *Aspergillus*, apresentam capacidade de solubilizar fosfatos inorgânicos por meio da excreção de prótons e ácidos orgânicos. A simbiose com fungos micorrízicos potencializa esse processo ao ampliar a zona de exploração do solo, permitindo acesso a compartimentos inacessíveis às raízes (SMITH & READ, 2008). Apesar desse potencial, uma importante lacuna científica reside na formulação de consórcios microbianos capazes de manter eficiência em condições variáveis de campo, especialmente em ambientes tropicais.

Embora microrganismos desempenham papel fundamental na ciclagem do fósforo (CARNEIRO et al., 2004), a eficácia de inoculantes biotecnológicos ainda é inconsistente em condições reais. Fatores como competição com a microbiota nativa e a rápida readsorção do fósforo liberado por óxidos de ferro limitam sua eficiência, configurando um desafio relevante para pesquisas futuras (AGUIAR, 2021).

Por fim, o manejo do solo exerce influência decisiva sobre a dinâmica do fósforo. O sistema plantio direto apresenta vantagens em relação ao preparo convencional, ao

reduzir a exposição de novas superfícies adsorventes e favorecer a formação de complexos organometálicos (SILVA & RAIJ, 1999). Entretanto, o bloqueio de sítios de adsorção por compostos orgânicos tende a ser temporário frente à persistência dos processos de fixação mineral (FERNÁNDEZ et al., 2008). Assim, a sustentabilidade da adubação fosfatada requer uma abordagem integrada, que considere não apenas a reposição do nutriente, mas também a sincronização entre sua liberação e a demanda das culturas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A dinâmica do fósforo em solos tropicais, marcada pela interação com a mineralogia oxidica e a adsorção específica, impõe o desafio de transformar o solo de um dreno persistente em um sistema de alta eficiência. A superação dessa limitação e a valorização do "fósforo legado" exigem uma abordagem sistêmica que integre a química do solo à biotecnologia, superando a visão estritamente geoquímica através do gerenciamento inteligente das interações biogeoquímicas. Nesse contexto, o fortalecimento de sistemas conservacionistas, como o plantio direto, aumenta a matéria orgânica e a diversidade de microrganismos que secretam metabólitos capazes de atuar nos mecanismos de dessorção do P, permitindo a sincronização da liberação do nutriente com a demanda fisiológica das culturas. Assim, a compreensão integrada desses processos e o desenvolvimento de bioprodutos adaptados a condições de mineralogia extrema são fundamentais para otimizar a produtividade, reduzir a dependência de insumos externos e promover a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

PALAVRAS-CHAVE: Fósforo. Solos Tropicais. Adsorção. Ciclagem de Nutrientes. Manejo do Solo.

AGRADECIMENTOS: Ao Centro Universitário Integrado.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L.S. **Dinâmica do fósforo em solos tropicais**. 2021. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.
- ALVAREZ V., V. H. et al. Determinação do fósforo remanescente em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 113-124, jan./mar. 2000.
- ANDRADE, F. V. et al. Adsorção de fosfato em solos influenciada pela adição de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 3, p. 439-446, mar. 2003.
- BARROW, N. J. Reactions of plant nutrients and pollutants with southeastern Brazilian soils. **British Journal of Soil Science**, v. 36, p. 1-20, 1985.

CARNEIRO, K. A. A. et al. Dessorção de fósforo com o uso de fitas de ferro em um Neossolo Regolítico adubado com esterco bovino. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO, 2., 2017. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2017.

CARNEIRO, R. G. et al. Indicadores biológicos associados ao ciclo do fósforo em solos de Cerrado sob plantio direto e plantio convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 7, p. 661-669, jul. 2004.

CORRÊA, J. C.; MAUAD, M.; ROSOLEM, C. A. Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciados pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 1231-1237, dez. 2004.

DAISE, S. et al. Fósforo em solos representativos do estado da Paraíba: I- isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 623-632, jun. 2009.

FERNÁNDEZ, I. E. R. et al. Reversibilidade de fósforo não-lábil em solos submetidos à redução microbiana e química. II - Extrações sucessivas do fósforo pela resina de troca aniônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2319-2330, 2008.

FRANCO JÚNIOR, K. S.; DIAS, M. S.; RIBEIRO, V. M. Curva de disponibilidade de fósforo no solo. **Research, Society and Development**, v. 13, n. 10, e86131047146, 2024.

GATIBONI, L. C. et al. Fracionamento sequencial de fósforo e formas acumuladas em solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 701-711, jul./ago. 2007.

GONÇALVES, J. L. M. et al. Cinética de adsorção de fósforo em solos de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 13, n. 1, p. 13-19, jan./abr. 1989.

MENDES, I. C.; REIS JÚNIOR, F. B. **Microrganismos e disponibilidade de fósforo (P) nos solos: uma análise crítica**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003. (Documentos / Embrapa Cerrados, 85).

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999.

REICHARD, P. U.; KRETZSCHMAR, R.; KRAEMER, S. M. Dissolution mechanisms of goethite in the presence of siderophores and organic acids. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 71, n. 23, p. 5635-5650, 2007.

ROLIM NETO, F. C. et al. Adsorção de fósforo em solos de diferentes frações argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 965-971, nov./dez. 2004.

SANTOS, D. R. DOS; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, p. 576-586, abr. 2008.

SILVA, F. C.; RAIJ, B. van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 267-288, fev. 1999.

SMITH, S. E.; READ, D. J. **Mycorrhizal Symbiosis**. 3. ed. [S. l.]: Academic Press, 2008.

VINHA, A. P. C. et al. Adsorção de fósforo em solos de regiões tropicais. **Nativa**, Sinop, v. 9, n. 1, p. 30-35, jan./fev. 2021.

WITHERS, P. J. et al. Stewardship to tackle global phosphorus inefficiency: The case of Brazil. **Earth's Future**, v. 6, n. 6, p. 837-846, jun. 2018.