

ACESSO DAS PLANTAS AO LEGADO DE FÓSFORO, COM FOCO NOS TRÓPICOS

Luís Ignácio Prochnow¹

Heidi Peterson²

Tom Bruulsema³

O fósforo (P) é um dos nutrientes mais estudados na nutrição de plantas em todo o mundo e há muita preocupação quanto à disponibilidade de suas reservas para as futuras gerações. Nos solos tropicais, oxidicos e com mineralogia predominantemente do tipo 1:1, o P ganha ainda mais atenção devido ao seu alto potencial de fixação, resultando em formas menos disponíveis para as plantas. Atualmente, as quantidades aplicadas deste nutriente normalmente são superiores às removidas pela colheita, o que resulta em estoque de P sob formas menos disponíveis no solo (ou seja, P residual ou legado de P). Recentemente, pesquisadores vêm calculando esse legado de P e discutindo a possibilidade de aumentar sua recuperação e diminuir a dependência da entrada de P no futuro. No Brasil, o excedente acumulado de P aplicado às terras de plantio entre 1900 e 2016, em relação ao P removido pela colheita no mesmo intervalo de tempo, foi calculado recentemente em cerca de 30 milhões de toneladas (Mt) (WITHERS et al., 2018). Este valor pode ser comparado aos obtidos nos EUA e na Europa Ocidental, de cerca de 40 e 65 Mt, respectivamente, calculados a partir de dados apresentados por Mogollón et al. (2018). Considerando que essas três regiões apresentam sistemas de cultivo altamente produtivos, é razoável se pensar que grandes legados de P possam ter se acumulado em outras regiões com níveis semelhantes de produtividade.

Existem práticas industriais e agronômicas que podem aumentar a eficiência do uso de fósforo desde a mineração da rocha fosfática (RF) até as operações de campo. Recuperar parte do legado de P nos solos parece ser uma opção potencialmente lucrativa. Embora grande parte do legado de P possa ter se transformado ao longo do tempo em formas de baixa disponibilidade, as práticas agronômicas discutidas neste artigo podem ajudar as plantas a acessar algumas dessas formas. O foco encontra-se principalmente nos solos ácidos dos trópicos, mas algumas técnicas podem ser aplicadas a uma variedade de solos ao redor do mundo.

MANEJO DA ACIDEZ DO SOLO COM APLICAÇÃO DE CALCÁRIO E GESSO

A calagem melhora a disponibilidade química dos nutrientes para as plantas. Melhora, ainda, a agregação e a densidade do solo, resultando em maior proliferação de raízes. Quando o pH do solo está ótimo, as plantas desenvolvem sistemas radiculares mais ramificados e extensos, e são capazes de utilizar os nutrien-

tes presentes na superfície e no subsolo. Mudanças no pH do solo afetam a disponibilidade dos vários nutrientes de forma diferente, conforme ilustrado na Figura 1. A disponibilidade da maioria dos nutrientes, incluindo o P, é maior na faixa de pH de 5,8 a 7,0. Além de aumentar a disponibilidade dos nutrientes, um dos benefícios mais importantes da calagem é a redução da atividade dos elementos tóxicos, como Al, e, algumas vezes, Mn e Fe.

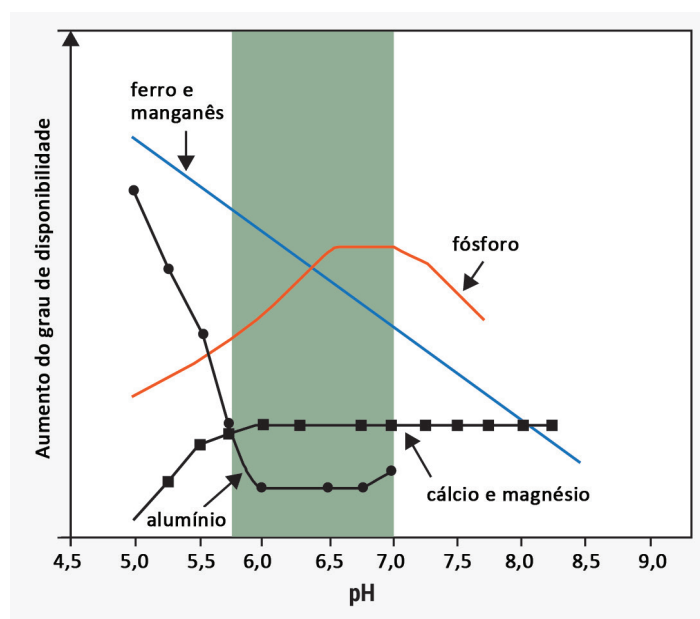


Figura 1. Efeito típico da mudança de pH do solo na disponibilidade de alguns nutrientes e também do alumínio.

Fonte: Adaptada de Malavolta (2006).

Quimicamente, o gesso é um sal neutro, sem efeito direto no pH do solo. No entanto, muitos pesquisadores mostraram que ele pode melhorar a acidez do subsolo, com influências positivas no desenvolvimento das raízes das plantas. Como o gesso tem maior solubilidade em água, comparado ao calcário, ele pode se dissolver e lixiviar através do perfil do solo, adicionando quantidades significativas de Ca e sulfato (SO_4^{2-}) em profundidade. O aumento da concentração de SO_4^{2-} nas camadas mais profundas do solo favorece a formação do sulfato de alumínio (AlSO_4^-), que diminui

Abreviações: Ca = cálcio; Fe = ferro; FG = fosfogesso; P = fósforo; RF = rocha fosfática; Mn = manganês; MOS = matéria orgânica do solo.

¹ Ex-Diretor do International Plant Nutrition Institute (IPNI), Piracicaba, SP; email: Lprochnow@npct.com.br

² Ex-Diretor do IPNI, Programa Fósforo, Stillwater, MN, EUA; email: hpeterson@ipni.net

³ Ex-Vice-Presidente do IPNI (Américas) e Diretor de Pesquisa, Guelph, ON, Canadá; email: tbruulsema@ipni.net

a atividade do Al^{3+} . Como resultado, a toxicidade do Al^{3+} diminui e, ao mesmo tempo, a disponibilidade de Ca aumenta, favorecendo o alongamento das raízes das plantas em subsolo ácido. A Tabela 1 mostra resultados de estudos sobre o desenvolvimento do sistema radicular de plantas, com e sem aplicação de fosfogesso (FG), em diferentes partes do mundo. O FG é um subproduto da produção de ácido fosfórico. Observa-se claramente que a aplicação de FG ajudou a desenvolver sistemas radiculares mais densos, em profundidades além de 30 cm. Uma grande preocupação em relação ao uso do FG é a quantidade de elementos radioativos que ele pode conter. Assim, é necessária uma caracterização cuidadosa do FG antes de utilizá-lo como insumo no combate à acidez do subsolo. Isto normalmente não é um problema no Brasil.

Tanto o calcário como o gesso proporcionam melhores condições de solo, as quais favorecem o alongamento das raízes, o desenvolvimento da planta e, conseqüentemente, aumentam os rendimentos da cultura. Mais raízes significam mais solo explorado e condições mais favoráveis para absorver nutrientes e água. Assim, essas técnicas podem aumentar o acesso ao legado de P.

PLANTIO DIRETO CORRETO

Sabe-se que o plantio direto realizado corretamente, mediante rotação de culturas e manutenção dos resíduos na superfície do solo, proporciona menor erosão, maiores quantidades de matéria orgânica

(MOS) e melhores condições físicas do solo (Figura 1). Os resultados tem sido tão bem-sucedidos que a área sob plantio direto vem aumentando consideravelmente, em relação aos sistemas de preparo convencional, em muitas regiões tropicais do mundo. Um dos efeitos benéficos do plantio direto são os teores mais altos de MOS, protegendo os sítios de adsorção de P e/ou substituindo o P em tais locais, que promovem maior disponibilidade de P. Além disso, melhores condições físicas do solo promovem maior área explorada pelas raízes e maior chance de absorção de P. Entre outros, esses efeitos indicam que o plantio direto pode contribuir para aumentar a utilização do legado de P pelas plantas.

ROTAÇÃO DE CULTURAS E CONSÓRCIO DE CULTURAS DE GRÃOS COM GRAMÍNEAS

Recentemente, vários estudos mostraram as vantagens da integração das culturas de grãos com certos tipos de gramíneas visando aumentar a saúde do solo e a produção (Figura 2). Muitas gramíneas têm sistemas radiculares robustos e profundos, apresentam alta tolerância ao estresse hídrico e, conseqüentemente, podem se desenvolver bem em condições adversas à maioria das culturas de grãos e algumas culturas de cobertura convencionais.

Muitos pesquisadores também notaram que algumas dessas gramíneas melhoram o ciclo e a disponibilidade de nutrientes no solo, particularmente de P. Como exemplo, a Figura 3 mostra o aumento no teor de P disponível entre 5 e 30 cm de profundidade

Tabela 1. Efeito da aplicação de fosfogesso (FG) no desenvolvimento de sistemas radiculares em diferentes profundidades de solo, em diferentes culturas e em diferentes partes do mundo.

Profundidade do solo (cm)	Densidade de raízes de milho (África do Sul) ¹		Distribuição relativa de raízes de milho (Brasil) ²		Densidade de raízes de macieira (Brasil) ³		Comprimento de raízes de alfafa (EUA) ⁴	
	Controle	Fosfogesso	Controle	Fosfogesso	Controle	Fosfogesso	Controle	Fosfogesso
	----- (mg dm ⁻³) -----		----- (%) -----		----- (cm g ⁻¹) -----		----- (m m ⁻³) -----	
0-15	3,10	2,95	53	34	50	119	115	439
15-30	2,85	1,60	17	25	60	104	30	194
30-45	1,80	2,00	10	12	18	189	19	196
45-60	0,45	3,95	18	19	18	189	10	112
60-75	0,08	2,05	12	10	18	189	16	128

Fontes: ¹Farina e Channon (1988); ²Sousa e Ritchey (1986); ³Pavan e Bingham (1986); ⁴Sumner e Carter (1988).



Figura 1. Cultura de feijoeiro sob plantio direto realizado corretamente. Observe as quantidades favoráveis de resíduos das culturas anteriores na superfície do solo.



Figura 2. Consórcio de milho com *Brachiaria brizantha*.

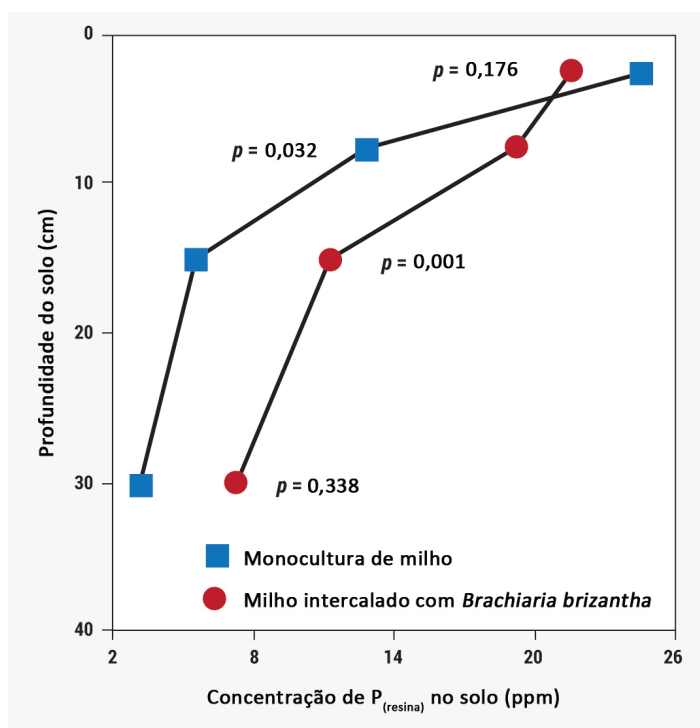


Figura 3. Sistemas agrícolas que incluem gramíneas podem aumentar o teor de P disponível no perfil do solo em sistemas de plantio direto bem manejados.

Fonte: Crusciol et al. (2015).

quando o milho foi consorciado com a braquiária (*Urochloa brizantha*), diferente da monocultura de milho. Há indícios de que o aumento da concentração de P é devido à extração de formas lentamente solúveis do elemento pela braquiária. Estudos de campo realizados no Brasil indicaram que a recuperação de P em sistemas de cultivo com mais de 15 anos que incluíram gramíneas, como *Urochloa brizantha* e *Panicum maximum*, pode ser da ordem de 85% ao longo dos anos, enquanto em culturas solteiras de soja e/ou de milho foram recuperados apenas 40% do P. Estes resultados sugerem que o legado de P pode ser melhor aproveitado pelas plantas quando gramíneas são consorciadas ou utilizadas em sequência a outras espécies.

Devido às diferenças nos ecossistemas e nas características das plantas, é importante estudar o tipo adequado de rotação de culturas para cada região. Não há regra geral na recomendação de uma sequência de culturas para as diversas áreas agrícolas do mundo, mas manter a cobertura verde sobre o solo durante boa parte do ano geralmente contribui para o aumento do teor de carbono no solo, o que, com o tempo, será agronomicamente e ambientalmente benéfico.

A rotação de culturas e as práticas de cultivo que aumentam o teor de MOS só serão bem sucedidas quando o teor de P no solo estiver adequado ao crescimento das plantas. Entradas de fósforo, por meio da adubação, muitas vezes são necessárias para obter essa condição. Isso significa que essas práticas não serão eficazes em solos com baixo teor de P disponível para as plantas. A fertilidade do solo precisa ser construída ao longo do tempo para que outras práticas sejam efetivas.

CULTURAS E CULTIVARES EFICIENTES NA ABSORÇÃO DE FÓSFORO

Diferentes culturas apresentam diferentes exigências em relação à disponibilidade de P no solo. Como exemplo, estima-se que a soja necessite de uma concentração de P na solução do solo 20 vezes maior do que a cultura de amendoim para atingir

95% de seu rendimento máximo. Além disso, algumas espécies desenvolvem estratégias para melhorar sua capacidade de absorver o P do solo, aprimorando sua habilidade em utilizar as formas menos lábeis de P sob condições limitantes. Estas estratégias incluem melhor eficiência de absorção (capacidade de absorver maior quantidade de P em condições limitantes de P) e/ou melhor eficiência de uso (capacidade de produzir maior quantidade de matéria seca por unidade de P absorvida). Algumas estratégias de absorção incluem modificação da arquitetura das raízes, desenvolvimento de sistemas radiculares mais amplos, com raízes mais longas e finas, maior razão raiz-parte aérea, exsudação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular e maior associação com micorrizas. Os programas de melhoramento podem utilizar tais características para melhorar o uso de P do solo. Do exposto, fica claro que as espécies de plantas ou os genótipos da mesma espécie que apresentam maior eficiência na absorção de P podem fazer melhor uso do legado de P nos solos.

MANEJO DE NUTRIENTES 4C

Aplicar a fonte certa, na dose certa, na época certa e no local certo é a fórmula para garantir a eficiência no uso dos nutrientes e alcançar maiores rendimentos. Essas práticas, em conjunto com outras práticas de semeadura, proteção de plantas e manejo da irrigação, podem melhorar o desenvolvimento das plantas, favorecendo sua saúde, o alongamento das raízes e, conseqüentemente, aumentar a absorção de água e nutrientes. Como exemplo, fica claro que o posicionamento do P no sulco de plantio, e não apenas a sua aplicação a lanço, na superfície do solo, pode proporcionar alongamento radicular e permitir a exploração de maior volume de solo, o que, com o tempo, pode resultar em maior utilização do legado de P por diferentes culturas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todas as práticas descritas anteriormente devem ser seriamente consideradas nos planos estratégicos de recuperação de parte do legado de P dos solos tropicais, o que otimizará os recursos, beneficiando os agricultores e a segurança alimentar a médio e longo prazos. Espera-se que o desenvolvimento científico resulte na disponibilidade de novas tecnologias de manejo, variedades de plantas e produtos para proteção de plantas que possam levar ao melhor uso do legado de P do solo.

REFERÊNCIAS

- CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; BORGHI, E.; SORATTO, R. P.; MARTINS, P. O. Improving soil fertility and crop yield in a tropical region with palisade-grass cover crops. *Agronomy Journal*, v. 107, p. 2271-2280, 2015.
- FARINA, N. P. W.; CHANNON, P. Acid-subsoil amelioration: I. A comparison of several mechanical procedures. *Soil Science Society of American Journal*, v. 52, n. 1, p. 169-175, 1988.
- MALAVOLTA, E. *Manual de Nutrição Mineral de Plantas*. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 631 p.
- MOGOLLÓN, J. M.; BEUSEN, A. H. W.; van GRINSVEN, H. J. M.; WESTHOEK, H.; BOUWMAN, A. F. Future agricultural phosphorus demand according to the shared socioeconomic pathways. *Global Environmental Change*, v. 50, p. 149-163, 2018.
- PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T. Effects of phosphogypsum and lime on yield, root density, and fruit and foliar composition of apple in Brazilian Oxisols. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF PHOSPHOGYPSUM, 2., 1986. *Condensed Papers...* s.l., s.ed., p. 51-58.
- SOUZA, D. M. G.; RITCHEY, K. D. Uso de gesso no solo de cerrado. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DE FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 1., Brasília, DF, 1985. *Anais...* Brasília, EMBRAPA-DDT, 1986. p. 119-144.
- SUMNER, M. E.; CARTER, E. Amelioration of subsoil acidity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 19, n. 7, p. 1309-1317, 1988.
- WITHERS, P. et al. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. *Nature Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 2537, 2018.