

DIVERSIDADE DE PLANTAS COMO ESTRATÉGIA PARA AUMENTAR A DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO

Carlos Alexandre Costa Crusciol¹
João Paulo Gonsiorkiewicz Rigon²

Juliano Carlos Calonego³
Rogério Peres Soratto⁴

Rotações de culturas associadas ao manejo da conservação do solo têm sido adotadas como estratégias adequadas para melhorar a saúde do solo e a disponibilidade de nutrientes. Por outro lado, os sistemas de monocultura não permitem o manejo sustentável do solo por meio da reciclagem de nutrientes. O aumento da quantidade e da qualidade dos resíduos agrícolas em sistemas de cultivo diversificados promove múltiplos benefícios ao ecossistema, como a reciclagem de nutrientes e o aumento da matéria orgânica do solo. Os impactos variam amplamente de acordo com as espécies de plantas utilizadas, a composição dos resíduos, a classe textural do solo, o clima, o manejo do solo e as suas interações. No entanto, pouca atenção tem sido direcionada para a compreensão das relações entre a diversidade funcional das plantas, a ciclagem de nutrientes e a disponibilidade de fósforo (P) no solo (FAUCON et al., 2015). Neste artigo, destacam-se algumas estratégias para melhorar a disponibilidade de P nos sistemas de cultivo.

LIBERAÇÃO DE FÓSFORO PELA DECOMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DAS CULTURAS

O impacto indireto na disponibilidade de P para as plantas pode ser atribuído à composição bioquímica dos resíduos vegetais dos sistemas de cultivo, incluindo as relações C:N e C:P, bem como à biodiversidade do solo. A concentração de P nos resíduos da cultura é o principal fator que determina se o P será mineralizado no curto prazo durante a decomposição do resíduo. Essas características podem promover diversidade microbiana, causando efeitos positivos na disponibilidade de P e no crescimento da cultura.

No tecido da planta, a fração de fósforo inorgânico solúvel (Pis) representa a maior parte do P, armazenado principalmente no vacúolo, que é liberado nos estádios iniciais de mineralização do resíduo da cultura. No entanto, as frações mais recalcitrantes de P tendem a ter suas proporções aumentadas nos resíduos, pois estão presentes em compostos orgânicos que dependem da composição bioquímica do resíduo da cultura e da mineralização para a liberação do P. Em geral, espécies de plantas que apresentam baixa relação C:N e baixo teor de lignina apresentam maior taxa de liberação de P, enquanto as espécies com maior relação C:N e maior teor de lignina liberam o P ao longo do tempo. Os resíduos das culturas de cereais tendem a apresentar menores concentrações de P e maiores relações C:P e

C:N, o que resulta em menor potencial de mineralização durante a decomposição, em comparação com culturas com menores relações. Portanto, sob condições de baixo teor de P inorgânico (Pi), o Pi do solo pode ser assimilado pela biomassa microbiana, diminuindo a disponibilidade de P para a cultura. Nesse sentido, o sistema de cultivo tem o potencial de limitar ou aumentar a disponibilidade de P no solo.

Os sistemas de cultivo, como reguladores do fornecimento de nutrientes para as plantas, devem ser direcionados para aumentar a reciclagem de P do resíduo (Figura 1). A inclusão de capim-braquiária (*Urochloa brizantha*) na rotação de culturas promove maior disponibilidade de nutrientes no solo, aumentando a produção de soja, aveia branca e milho como culturas principais (CRUSCIOL et al., 2015). Em um experimento sobre rotação de culturas para avaliar o impacto da braquiária ruziziensis (*Urochloa ruziziensis*) no rendimento de soja observou-se que a braquiária não afetou o rendimento da soja, em comparação com um campo de pousio (MERLIN et al., 2013). No entanto, o cultivo de braquiária ruziziensis por anos consecutivos no mesmo local resultou em diminuição no rendimento da soja, em comparação com a leguminosa como monocultura (ALMEIDA et al., 2018). Segundo os autores, a braquiária ruziziensis pode manter o P imobilizado nos resíduos da cultura, afetando a nutrição fosfatada da soja. Portanto, a liberação de P pela mineralização dos resíduos agrícolas pode estar relacionada à sincronia entre a disponibilidade de P no solo, o processo de mineralização e a demanda da cultura principal.

Algumas plantas apresentam maior capacidade de absorver o P sob baixa concentração no solo pelo aumento da atividade da fosfatase, acumulando, depois, o P em seus tecidos (FAUCON et al., 2015). Isso pode reduzir a fixação química por diminuir o tempo de exposição do P às partículas do solo. Essa estratégia pode ser importante em solos altamente intemperizados. Outra estratégia para aumentar a absorção de P pelas plantas inclui a associação micorrízica arbuscular. As micorrizas fornecem uma via eficaz pela qual o P é retirado de grandes volumes de solo e rapidamente entregue às células corticais da raiz, sem a necessidade da absorção direta (SMITH et al., 2011). No entanto, a diversidade de respostas à inoculação com fungos micorrízicos é amplamente reconhecida devido às condições do ecossistema e às estratégias de manejo de cultivo.

Abreviações: Al = alumínio; C = carbono; Fer = ferro; N = nitrogênio; P = fósforo; Pi = fósforo inorgânico; Pis = fósforo inorgânico solúvel; Po = fósforo orgânico.

¹ Professor Titular, Faculdade de Ciências Agronômicas, FCA/UNESP, Departamento de Ciência do Solo, Botucatu, SP; email: crusciol@fca.unesp.br

² Professor Doutor, Faculdade de Ciências Agronômicas, FCA/UNESP, Botucatu, SP; email: jprigon@fca.unesp.br

³ Professor Doutor, Faculdade de Ciências Agronômicas, FCA/UNESP, Botucatu, SP; e-mail: juliano@fca.unesp.br

⁴ Professor Doutor, Faculdade de Ciências Agronômicas, FCA/UNESP, Botucatu, SP; e-mail: soratto@fca.unesp.br



Figura 1. As braquiárias *Urochloa ruziziensis* (à esquerda) e *Urochloa brizantha* (à direita) foram estudadas no Brasil com o objetivo de avaliar seu impacto na disponibilidade de fósforo para as principais culturas no sistema de rotação.

MOBILIZAÇÃO DO FÓSFORO POUCO LÁBIL DO SOLO

Embora não existam muitos casos, algumas espécies de plantas de cobertura conseguem absorver eficientemente as formas menos lábeis de P do solo. A introdução dessas espécies nos sistemas de cultivo pode aumentar a disponibilidade de P para as principais culturas agrícolas, ou seja, aquelas com menor capacidade de mobilizar as formas menos lábeis de P. Espécies de plantas mobilizadoras de P melhoram a nutrição fosfatada pela liberação de fosfatases ácidas ou fitases na rizosfera – característica peculiar da rizosfera dos sistemas de cultivos múltiplo. Nessas condições, elas hidrolisam o P orgânico (Po) para liberar o Pi, prótons e/ou carboxilatos nos solos, diminuindo a sorção do P nos óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al). Malato e citrato são carboxilatos que mobilizam o P ligado ao Ca em solo calcário e o P ligado a óxidos e hidróxidos de Fe e Al em solos ácidos (HINSINGER, 2001). Por exemplo, o feijão-fava libera prótons, malato e citrato na rizosfera, mobilizando o P insolúvel do solo. O grão-de-bico acessa o Po mediante exsudação de fosfatases ácidas, que hidrolisam o Po em Pi, facilitando a aquisição de P pelo trigo ou milho cultivados em

sistema consorciado (LAMBERS et al., 2011). De acordo com a literatura, alguns sistemas consorciados têm sido empregados para estimular a facilitação interespecífica na aquisição de P por espécies que mobilizam o P: consórcio de trigo com tremoço branco/grão-de-bico (ambas as espécies são mobilizadoras de P), consórcio de sorgo com guandu (espécie mobilizadora de P); consórcio de milho com amendoim/feijão-fava (ambas as espécies mobilizadoras de P) (LI et al., 2007, 2014).

O consórcio de plantas mobilizadoras e não-mobilizadoras de P cria um nicho temporal e espacial que aumenta a capacidade de exploração do P do solo, colonizando o perfil e aumentando o volume total de solo ocupado por essas espécies, comparado ao sistema de monocultura (LI et al., 2014).

Pesquisas que relacionam o aumento de rendimento decorrente da interação entre as espécies e a melhoria na nutrição fosfatada têm sido limitadas, mas alguns exemplos estão listados na Tabela 1. Existe um consenso, com base nas pesquisas, de que aumentar a disponibilidade de P no solo nos sistemas de cultivo requer: manejo do solo e adubação fosfatada, incorporando espécies



Figura 2. O grão-de-bico (à esquerda) e o feijão-fava (à direita) mobilizam ou facilitam o acesso às formas menos lábeis de fósforo no solo.

Tabela 1. Exemplos de rotações de culturas nas quais o aumento de rendimento foi atribuído, em parte, à melhoria da nutrição fosfatada.

Cultura principal	Sistema de cultivo	Produtividade (t ha ⁻¹)	Referência
Milho	Monocultura	12,8	Li et al. (2007) ¹
	Rotação feijão-fava/milho	18,9	
	Consórcio contínuo com feijão-fava	17,3	
Milho	Monocultivo	9,1	Wang et al. (2014) ²
	Consórcio com feijão-fava	11,0	
	Consórcio com soja	12,6	
Batata	Consórcio com grão-de-bico	12,4	Gitari et al. (2018) ³
	Monocultura	35,5	
	Consórcio com ervilha	37,7	
Trigo	Consórcio com feijão comum	40,3	Bai et al. (2013) ⁴
	Consórcio com <i>Lablab purpureus</i>	43,1	
	Rotação arroz/trigo	2,4	
Soja	Rotação milho/trigo	2,7	Crusciol et al. (2015) ⁵
	Rotação soja e milho/trigo	3,1	
	Após dois anos de milho/pousio	3,4	
Aveia branca	Após 2 anos de milho em consórcio com <i>U. brizantha</i>	3,7	Crusciol et al. (2015) ⁵
	Após dois anos de milho/pousio/soja	1,5	
Milho	Após dois anos de milho intercalado com <i>U. brizantha</i> /soja	1,9	Crusciol et al. (2015) ⁵
	Após dois anos de milho/pousio/soja/aveia branca	8,7	
	Após dois anos de milho intercalado com <i>U. brizantha</i> /soja/aveia branca	9,9	

Tipo de influência na disponibilidade de P

¹ O feijão-fava facilita a absorção de P pelo milho porque acidifica a sua rizosfera e exsuda malato e citrato, mobilizando o P insolúvel do solo.

² O consórcio aumenta a atividade da fosfatase ácida do solo, em comparação com o monocultivo.

³ Sugerem que o *Lablab purpureus* produz exsudatos, como fosfatases e carboxilatos, aumentando a disponibilidade de P para a cultura acompanhante.

⁴ Sugerem a liberação de prótons e a exsudação de carboxilatos pelas raízes do milho e a mobilização do Pi do solo, em solo calcário.

⁵ Sugerem a ação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular exsudados pelas raízes.

com capacidade de mobilizar o P insolúvel do solo em sistemas de monocultivo, e melhor compreensão do processo de liberação de P na decomposição dos resíduos das culturas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudar a reciclagem de P nos sistemas de cultivo com foco na disponibilidade de P é um desafio, devido às interações solo-planta. As estratégias resumidas neste artigo abordam o manejo do solo para aumentar a disponibilidade de P, com foco na reciclagem de P e na mudança do equilíbrio entre as frações de P do solo para as frações disponíveis nas plantas nos sistemas de cultivo. Grandes esforços são necessários neste campo de pesquisa aplicada para manter estratégias sustentáveis no manejo dos sistemas de cultivo em relação à reciclagem de P nas culturas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D.; ROCHA, K.; SOUZA, M.; DELAIA, L.; ROSOLEM, C. Soil phosphorus bioavailability and soybean grain yield impaired by ruzigrass. *Agronomy Journal*, v. 110, p. 654-663, 2018.

BAI, Z.; LI, H.; YANG, X.; ZHOU, B.; SHI, X.; WANG, B.; LI, D.; SHEN, J.; CHEN, Q.; QIN, W.; OENEMA, O.; ZHANG, F. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types. *Plant and Soil*, v. 372, p. 27-37, 2013.

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 palisadegrass cover crops. *Agronomy Journal*, v. 107, p. 2271-2280, 2015.

FAUCON, M. P.; HOUBEN, D.; REYNOIRD, J. P.; MERCADAL-DULAURENT,

A. M.; ARMAND, R.; LAMBERS, H. Advances and perspectives to improve the phosphorus availability in cropping systems for agroecological phosphorus management. *Advances in Agronomy*, v. 134, p. 51-79, 2015.

GITARI, H. I.; KARANJA, N. N.; GACHENE, C. K. K.; KAMAU, S.; SHARMA, K.; SCHULTE-GELDERMANN, E. Nitrogen and phosphorus uptake by potato (*Solanum tuberosum* L.) and their use efficiency under potato-legume intercropping systems. *Field Crops Research*, v. 222, p. 78-84, 2018.

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant and Soil*, v. 237, p. 173-195, 2001.

LAMBERS, H.; FINNEGAN, P. M.; LALIBERTÉ, E.; PEARSE, S. J.; RYAN, M. H.; SHANE, M. W.; VENEKLAAS, E. J. Phosphorus nutrition of Proteaceae in severely phosphorus-impooverished soils: are there lessons to be learned for future crops? *Plant Physiology*, v. 156, p. 1058-1066, 2011.

LI, L.; TILMAN, D.; LAMBERS, H.; ZHANG, F. S. Plant diversity and overyielding: insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture. *New Phytologist*, v. 203, p. 63-69, 2014.

LI, L.; LI, S. M.; SUN, J. H.; ZHOU, L. L.; BAO, X. G.; ZHANG, H. G.; ZHANG, F. S. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. *PNAS*, v. 104, p. 11192-11196, 2007.

MERLIN, A.; HE, Z. L.; ROSOLEM, C. A. Ruzigrass affecting soil-phosphorus availability. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 48, p. 1583-1588, 2013.

SMITH, S. E.; JAKOBSEN, I.; GRONLUND, M.; SMITH, F. A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant Physiology*, v. 156, p. 1050-1057, 2011.

WANG, Z. G.; JIN, X.; BAO, X. G.; LI, X. F.; ZHAO, J. H. et al. Intercropping enhances productivity and maintains the most soil fertility properties relative to sole cropping. *PLOS ONE*, v. 9, n. 12, p. e113984, 2014.