

MANEJO DE FÓSFORO: RIZOBACTÉRIAS E FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES COMO ESTRATÉGIA NA DISPONIBILIZAÇÃO DE FÓSFORO PARA AGRICULTURA¹

Jéssyca Adriana Gomes Florência da Silva

Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão

Juliana Silva Rodrigues Cabral

Thays Mendonça Oliveira

Wanessa Thais Ferreira Duarte

Renan Ramos da Rosa

Maria Luiza Terra Vieira

Leonardo Cardoso Gomes

Gabriel Gomes Matias

Gabriel Elias Soares Araújo

Importância do fósforo na planta

A disponibilidade de nutrientes no solo nem sempre supre as necessidades das plantas, o que compromete a produtividade agrícola. A colheita exporta nutrientes e, quando associada à reposição inadequada, ao desgaste natural e às características específicas dos solos, resulta em deficiências nutricionais. Assim, cresce a dependência de fertilizantes minerais (ARNON; STOUT, 1939; WINIWARTER, 2014; PRAKASH *et al.*, 2015).

O fósforo (P) é um macronutriente que frequentemente limita o crescimento das plantas (KALAYU, 2019). Nos solos brasileiros, apresenta baixa disponibilidade e elevada fixação em ambientes de pH reduzido. Na solução do solo, o P pode ser absorvido pela biomassa microbiana, assimilado pelas plantas, fixado na matriz do solo ou precipitar-se na presença de ferro, alumínio e cálcio, dependendo do pH (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; NOVAIS; SMYTH, 1999).

Esse nutriente é constituinte dos ácidos nucleicos (DNA, RNA), trifosfato de adenosina (ATP), participa da divisão celular, regula enzimas e está envolvido no metabolismo de carboidratos, sendo indispensável em todas as fases do desenvolvimento vegetal (RAZAQ *et al.*, 2017; MALHOTRA *et al.*, 2018).

¹ Rede Agrobiotec, Subprojeto VI – Fontes alternativas de fósforo associadas à microrganismos solubilizadores na produção e na rentabilidade da soja.

Autores vinculados a Faculdade de Agronomia e Pós graduação em produção Vegetal da Universidade de Rio Verde – UniRV, Rio Verde, Goiás.

A baixa disponibilidade de fósforo pode resultar de pH ácido, compactação e toxicidade por alumínio. Nas plantas, manifesta-se por crescimento limitado, atraso no florescimento, folhas velhas com manchas arroxeadas ou necróticas, raízes adventícias e baixa absorção de água e nutrientes. Esses fatores reduzem o vigor vegetal e a tolerância a condições adversas (YADAV; YADAV, 2024; DEB *et al.*, 2015). Além disso, a deficiência de P reduz a assimilação de carbono devido à menor produção de ATP, o que compromete a taxa fotossintética, produção de biomassa e, conseqüentemente, a produtividade agrícola (YADAV; YADAV, 2024).

Fontes de fósforo para adubação

A principal forma de fósforo (P) no solo é o fosfato (H_2PO_4^-) de baixa mobilidade. Ele pode estar presente na solução do solo devido ao intemperismo de rochas ou à ação antrópica. A mineralização do P pode ocorrer de forma isolada ou associada à mineralização do carbono orgânico (RICHARDSON; SIMPSON, 2011; JIN *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2025). Já a taxa de imobilização depende da qualidade do resíduo em decomposição e da disponibilidade de carbono e nitrogênio no solo (McGILL; COLE, 1981).

Em solos altamente intemperizados, o fósforo é fortemente adsorvido por óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al); em solos alcalinos, a fixação ocorre principalmente com cálcio (Ca) (Figura 1). Esse processo pode tornar indisponíveis entre 75% e 90% do P aplicado (IGUAL *et al.*, 2001; GYANESHWAR *et al.*, 2002; PRADHAN; SUKLA, 2006). Assim, mesmo após a aplicação de fertilizantes, grande parte do nutriente é rapidamente fixada, especialmente em ambientes tropicais, restando às plantas apenas cerca de 15% do fósforo aplicado (GYANESHWAR *et al.*, 2002; TAKAHASHI; ANWAR, 2007).

Como consequência, agricultores aplicam grandes quantidades de fertilizantes fosfatados, o que eleva os custos de produção e aumenta a dependência da importação. Nesse cenário, estratégias que favoreçam a solubilização do fósforo emergem como alternativas para reduzir custos, ampliar a eficiência e fortalecer a sustentabilidade da agricultura brasileira.

Fonte Mineral de Fósforo

Os fertilizantes minerais fosfatados são produzidos a partir de recursos não renováveis, as rochas fosfáticas. No Brasil, predominam rochas ígneas com baixo teor de P (5% a 15% de P_2O_5) e maior custo de beneficiamento (SASABUCHI *et al.*, 2023). A demanda por fertilizantes, em especial os fosfatados, tem crescido de forma expressiva, e o país consolidou-se como o quarto maior consumidor mundial, impulsionado pela expansão da agricultura e setor de biocombustíveis (DE ARAUJO SOBREIRA *et al.*, 2024).

A escassez de rochas fosfáticas é um desafio para países com reservas limitadas, pois as principais jazidas concentram-se na China e Marrocos (ZOU *et al.*, 2022). No caso

brasileiro, estima-se que parte das reservas possa se esgotar até 2050 (BRASIL, 2022). Essa limitação aumenta a dependência da importação e expõe os produtores a riscos decorrentes de instabilidades geopolíticas que afetam o comércio internacional. Diante disso, torna-se essencial identificar e explorar manejos e fontes alternativas de fósforo.

Fertilizantes Orgânicos e Organominerais de Fósforo

Fertilizantes orgânicos e organominerais contêm matéria orgânica, mas apresentam diferenças importantes. Segundo o Decreto Federal nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, fertilizante orgânico é o “produto de natureza fundamentalmente orgânica, obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, vegetal ou animal, enriquecido ou não de nutrientes minerais”. Já o fertilizante organomineral (FOM) é definido como “produto resultante da mistura física ou combinação de fertilizantes minerais e orgânicos”.

A fertilização orgânica enriquece a matéria orgânica do solo, estimula a atividade microbiana e promove a liberação gradual de nutrientes, reduzindo a dependência exclusiva de insumos minerais (CARVALHO *et al.*, 2011). No Brasil, destaca-se o uso de cama de aves, consolidado especialmente na agricultura familiar (BORDIN *et al.*, 2025; LEMOS *et al.*, 2014). Outra prática é a reciclagem de fósforo a partir de esterco bovino, que contém até cinco vezes mais P do que os excrementos humanos (PANTANO *et al.*, 2016).

O biochar, também classificado como fertilizante orgânico, apresenta estrutura porosa e elevada estabilidade, melhorando as propriedades físicas e químicas do solo (DAI *et al.*, 2020). Rico em carbono, favorece infiltração de água, aeração do solo e desenvolvimento radicular (LAGHARI *et al.*, 2016). Além disso, pode aumentar a disponibilidade de fósforo tanto pela liberação direta de compostos quanto pela adsorção e posterior dessorção de íons fosfatados, reduzindo perdas em solos ácidos (GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002). Esse efeito é potencializado pela estimulação da microbiota, que promove a mineralização e solubilização de fósforo orgânico e inorgânico (MUKHERJEE, LAL, 2014; ZHAO *et al.*, 2022).

Os fertilizantes organominerais de fósforo (FOM-P) combinam fontes minerais e orgânicas, aumentando a eficiência do nutriente. Entre suas vantagens estão o baixo custo das matérias-primas orgânicas, como cama de frango, dejetos de suínos e torta de filtro de cana-de-açúcar (BHUNIA *et al.*, 2021), o apelo ambiental e a possibilidade de formulações específicas para cada cultura. Essa combinação favorece a liberação imediata de P da fração mineral e o efeito residual da matéria orgânica incorporada (ESPINOZA *et al.*, 2025). Estudos demonstram que FOM derivados de cama de frango apresentam maior eficácia agrônômica, refletida na absorção de P, no peso seco da parte aérea e no rendimento de grãos, quando comparados a fertilizantes minerais convencionais (FRAZÃO *et al.*, 2021). Enquanto a produção de FOM pode ser uma alternativa viável para substituir fertilizantes minerais fosfatados no crescimento e produção de plantas de milho e soja (FRAZÃO *et al.*,

2021). Além disso, esses produtos podem substituir os fertilizantes fosfatados de origem mineral em culturas como milho e soja (FRAZÃO *et al.*, 2021). A presença de compostos orgânicos ainda reduz a fixação de fósforo em solos tropicais altamente intemperizados, aumentando sua biodisponibilidade para as plantas (SILVA *et al.*, 2023).

Microrganismos do solo na disponibilidade de fósforo

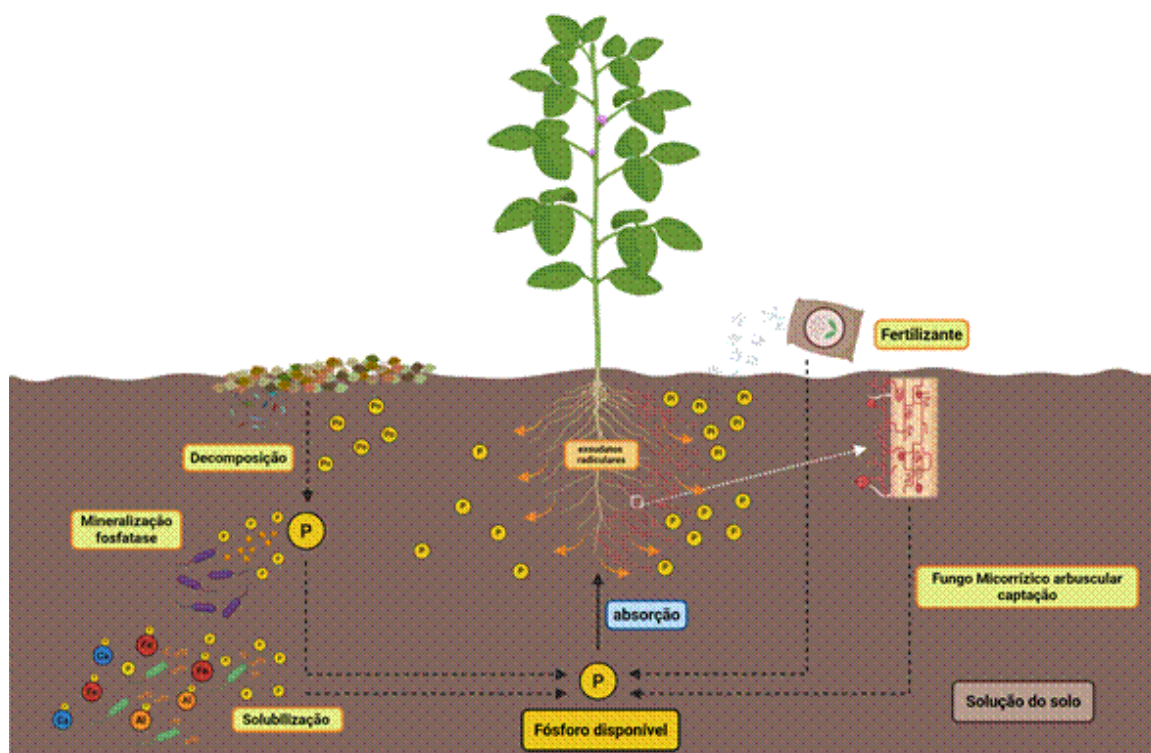
Os solos abrigam grande diversidade de microrganismos, concentrados principalmente na rizosfera, região próxima às raízes e influenciada pela exsudação radicular (AHKAMI *et al.*, 2017) (Figura 1).

As Rizobactérias Promotoras do Crescimento de Plantas (RPCP) destacam-se por estimular o crescimento e o desenvolvimento vegetal por diferentes mecanismos: (i) supressão de microrganismos patogênicos do solo (MENDEZ; GARBEVA; RAAIJMAKERS, 2013); (ii) modulação da sinalização de fitormônios (VERBON; LIBERMAN, 2016); e (iii) incremento da biodisponibilidade de nutrientes (VAN DER HEIJDEN *et al.*, 2008; BACKER *et al.*, 2018; GLICK *et al.*, 2020).

A atuação das rizobactérias na ciclagem de nutrientes impulsionou seu uso como bioinsumos, com potencial para promover a mineralização, solubilização, fixação e transporte de nutrientes às plantas. Algumas espécies mineralizam fosfatos orgânicos complexos por meio da produção de enzimas extracelulares, como fosfoesterases, fosfodiesterases, fitases e fosfolipases (WALPOLA; YOON, 2012). Essas enzimas catalisam monoésteres em faixas de pH específicas (TABATABAI, 1994). Outras espécies solubilizam fósforo inorgânico pela produção de ácidos orgânicos de baixo peso molecular (KUSS *et al.*, 2007; CHAGAS JUNIOR *et al.*, 2010). Esses processos tornam compostos de fósforo insolúveis em formas assimiláveis pelas plantas (KALAYU, 2019). Os principais mecanismos são: (i) redução do pH por ácidos orgânicos ou prótons, (ii) quelação, em que grupos hidroxila e carboxila complexam cátions ligados ao fosfato, e (iii) mineralização de compostos orgânicos por fosfatases (WALPOLA; YOON, 2012; SATYAPRAKASH *et al.*, 2017; KALAYU, 2019).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) são microrganismos simbióticos que formam associações com as raízes de cerca de 80% das espécies vegetais, originando a micorriza arbuscular (Figura 2) (FIORILLI *et al.*, 2024). Essa simbiose favorece o crescimento das plantas principalmente pelo fornecimento de fósforo (P).

Figura 3. Interações microbianas na disponibilização de fósforo para as plantas.

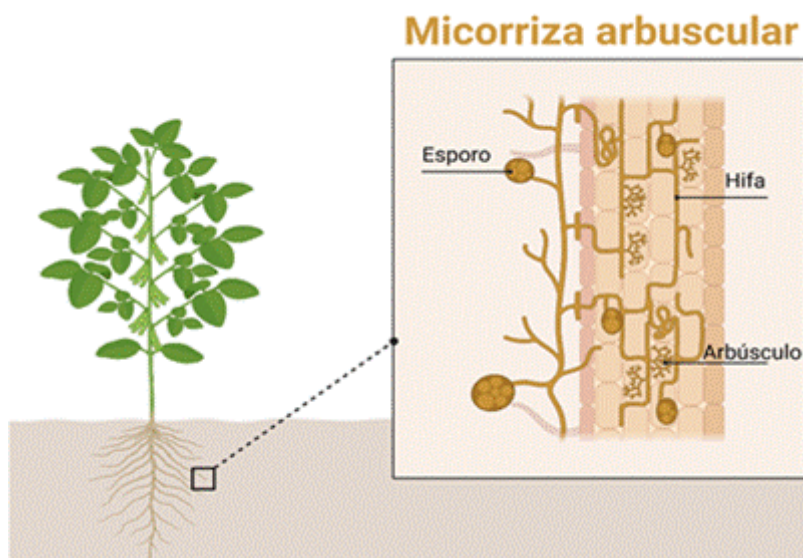


(Figura criada com BioRender.com)

Os FMA ocorrem em praticamente todos os ecossistemas terrestres, incluindo florestas tropicais e temperadas, manguezais, solos agrícolas e pastagens (ROSENDAHL, 2008). Sua comunidade é considerada essencial para a manutenção da biodiversidade e do funcionamento dos ecossistemas, devido à diversidade e multiplicidade de espécies (MIRANDA, 2012).

Os FMA favorecem o aumento do sistema radicular das plantas através de sua rede de hifas, com a simbiose ultrapassando a zona de depleção (resistência alta), e com isto, permitindo a exploração de maior volume de solo e absorvendo maior quantidade de nutrientes e água (MATHUR *et al.*, 2018). Estes micro-organismos contribuem para que as plantas consigam mitigar efeitos adversos de estresses abióticos ou bióticos.

Figura 4. Associação entre planta e fungo micorrízico arbuscular formando a micorriza arbuscular.



(Figura criada com BioRender.com)

Bacillus subtilis* e *Priestia megaterium

Bactérias como *Bacillus subtilis* e *Priestia megaterium* são amplamente reconhecidas pela capacidade de solubilizar elementos fundamentais, como fósforo, potássio e silício, aumentando sua disponibilidade para as plantas. O estudo dessas interações tem ganhado destaque na agricultura moderna, com potencial para melhorar a eficiência no uso de nutrientes, aumentar a resistência das plantas a estresses e a qualidade das colheitas.

A inoculação com rizobactérias apresenta resultados positivos em condições controladas, como ensaios de laboratório e casa de vegetação (SHARMA *et al.*, 2025; DE ZUTTER *et al.*, 2022). Estudos de campo também demonstram efeitos promissores, embora variáveis conforme o tipo de solo, manejo e formulação do inoculante, indicando viabilidade de aplicação em larga escala (RICHARDSON *et al.*, 2011; RAYMOND *et al.*, 2021; PAN *et al.*, 2023).

No Brasil, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), em parceria com o setor privado, desenvolveu o inoculante Biomaphos®, produzido em escala comercial. O produto combina cepas bacterianas de *B. subtilis* BRM 2084 e *P. megaterium* BRM 119, selecionadas por sua eficiência na solubilização de fósforo (OLIVEIRA *et al.*, 2020; EMBRAPA, 2019). Desde 2019, o Biomaphos® tem sido aplicado em milhões de hectares, gerando impactos econômicos significativos.

Ensaios em regiões produtoras de milho, realizados em mais de 542 localidades, indicaram ganho médio de 8,6% na produtividade ($\approx 11,9$ sacas ha^{-1}), com custo de aplicação de 1,7 sacas ha^{-1} (EMBRAPA, 2020). Em soja, os resultados mostram ganho médio de 6,3% ($\approx 4,3$ sacas ha^{-1}), com custo de 0,7 sacas ha^{-1} .

Bacillus subtilis é uma das espécies mais estudadas na agricultura e indústria, devido à produção de metabólitos secundários, incluindo ácidos orgânicos envolvidos na solubilização de P (BANIK; DEY, 1983). Essa espécie também forma biofilmes que favorecem a colonização radicular (QIN *et al.*, 2022) e produz endósporos, responsáveis pela resistência a condições adversas, como calor, radiação ultravioleta, agentes oxidantes e pH elevado (NICHOLSON *et al.*, 2000).

De modo semelhante, *Priestia megaterium* solubiliza fosfatos naturais do solo, aumentando a disponibilidade de P para as plantas (BERGEY; HOLT, 2000). Cepas como IHB B 7164 apresentaram crescimento e sobrevivência em diferentes condições ambientais, demonstrando resistência a estresses variados (THAKUR *et al.*, 2024). Estudos genômicos identificaram genes relacionados à tolerância a frio, calor e estresses osmótico e oxidativo, reforçando o potencial dessa espécie em condições de campo (THAKUR *et al.*, 2024).

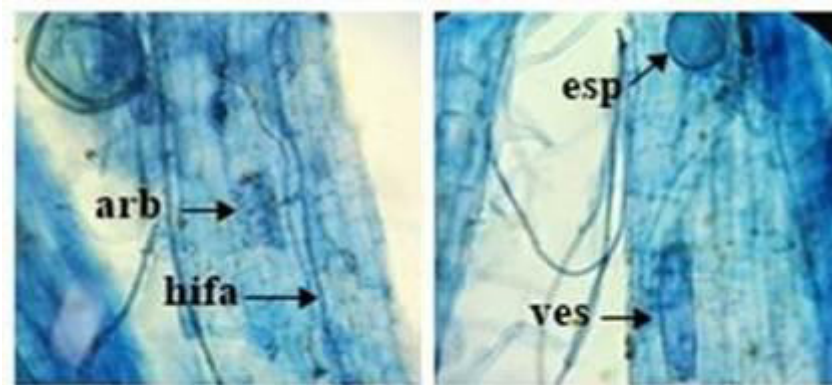
Essas características conferem à *P. megaterium* potencial como inoculante microbiano de amplo espectro, justificando sua aplicação em biotecnologia agrícola (SHARMA *et al.*, 2025; THAKUR *et al.*, 2024). Além disso, evidências recentes indicam que sua inoculação pode aumentar a eficiência de uso do fósforo, por meio da produção de fitohormônios e da indução de resistência sistêmica em plantas (SHARMA *et al.*, 2025).

Fungos Micorrízicos Arbusculares

A associação micorrízica aumenta a absorção de nutrientes pelas plantas, sobretudo o fósforo, melhora a eficiência de uso de fertilizantes fosfatados em solos de baixa fertilidade e potencializa o aproveitamento tanto do P natural do solo quanto do aplicado via adubação (MIRANDA, 2012).

As raízes colonizadas por fungos micorrízicos arbusculares (FMA) apresentam crescimento intracelular de hifas no tecido cortical, que se diferenciam em arbúsculos — estruturas responsáveis pela troca bidirecional de fósforo e carboidratos entre fungo e planta. Também podem formar vesículas e células auxiliares, associadas ao armazenamento de nutrientes (Figuras 1 e 3). Além disso, as hifas ampliam o alcance da raiz no solo, favorecendo a movimentação de microrganismos, como bactérias, e a mineralização de fósforo orgânico em zonas distantes da rizosfera (VIEIRA *et al.*, 2025; KAMEOKA *et al.*, 2019; MAIA, 2010; JIANG *et al.*, 2021).

Figura 5. Raízes de plantas associadas com fungos micorrízicos arbusculares.



Arb=arbúsculo, esp=esporo e ves=vesícula. Fotos de arquivo pessoal.

No Brasil, a empresa NovaTero foi a primeira a obter registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para comercializar inoculante à base do FMA *Rhizophagus intraradices*, voltado às culturas de milho e soja.

Ensaio demonstram que plantas de milho inoculadas com FMA em condições de baixa disponibilidade de P apresentam maior absorção, eficiência de uso e produtividade (WAHID *et al.*, 2020; QIN *et al.*, 2022; BATTINI *et al.*, 2017; HOU *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2020; PIOUFLE *et al.*, 2019). Resultados semelhantes foram observados em trigo, quando a inoculação de FMA foi associada a bactérias solubilizadoras de fosfato ou a fontes alternativas de P (WAHID *et al.*, 2020; QIN *et al.*, 2022; BAGYARAJ *et al.*, 2015). Em soja, a inoculação em condições de adubação reduzida aumentou a eficiência de uso do nutriente e a produtividade (THIOUB *et al.*, 2019). Já em jambu, a inoculação de *Rhizophagus clarus* promoveu maior peso seco da parte aérea e incremento nos teores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio (VIEIRA *et al.*, 2021).

Rizobactérias e fungos micorrízicos arbusculares configuram alternativas sustentáveis para ampliar a disponibilidade de fósforo (P) nos solos agrícolas (Figura 1). A interação desses microrganismos reduz a dependência de fertilizantes minerais, aumenta a eficiência no uso de nutrientes e contribui para ganhos de produtividade de forma economicamente viável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHKAMI, A. H.; WHITE III, R. A.; HANDAKUMBURA, P. P.; JANSSON, C. Rhizosphere engineering: enhancing sustainable plant ecosystem productivity. **Rhizosphere**, v. 3, p. 233-243, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2017.04.012>

ARNON, D. I.; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant Physiology**, v. 14, n. 2, p. 371-375, 1939. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.14.2.371>

- BACKER, R.; ROKEM, J. S.; ILANGUMARAN, G.; LAMONT, J.; PRASLICKOVA, D.; RICCI, E.; SMITH, D. L. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 1473, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- BAGYARAJ, D. J.; SHARMA, M. P.; MAITI, D. Phosphorus nutrition of crops through arbuscular mycorrhizal fungi. **Current Science**, v. 108, n. 7, p. 1288-1293, 2015.
- BANIK, S.; DEY, B. K. Phosphate-solubilizing potentiality of the microorganisms capable of utilizing aluminium phosphate as a sole phosphate source. **Zentralblatt für Mikrobiologie**, v. 138, n. 1, p. 17-23, 1983.
- BATTINI, F.; GRØNLUND, M.; AGNOLUCCI, M.; GIOVANNETTI, M.; JAKOBSEN, I. Facilitation of phosphorus uptake in maize plants by mycorrhizosphere bacteria. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 4686, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04959-0>
- BERGEY, D. H.; HOLT, J. G. **Bergey's manual of determinative bacteriology**. 9. ed. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins, 2000.
- BHUNIA, S.; BHOWMIK, A.; MALLICK, R.; MUKHERJEE, J. Agronomic efficiency of animal-derived organic fertilizers and their effects on biology and fertility of soil: A review. **Agronomy**, v. 11, n. 5, p. 823, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11050823>
- BORDIN, A. V.; SCHWENGBER, R. P.; REZENDE, M. K. A.; LAVA, C. T.; THOMAZ, D. R.; FRANCISCO, J. P. Cama de frango como alternativa sustentável de resíduo sólido orgânico na produção de hortaliças. **Journal of Agricultural Science**, Maringá, v. 46, p. e78506, 2024.
- BRASIL. Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004. Aprova o Regulamento da Lei no 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de insumos agropecuários, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 15 jan. 2004. Seção 1, p. 1. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2004/d4954.htm. Acesso em: 5 set. 2025.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **As reservas minerais para fertilizantes no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/as-reservas-minerais-para-fertilizantes-no-brasil>. Acesso em: 2 set. 2025.
- CARVALHO, E.; REZENDE, P. M.; ANDRADE, M. J.; PASSOS, E. M.; OLIVEIRA, J. A. Mineral fertilizer and organic waste on soybean crop and soil nutrients. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 930-938, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000400015>
- CHAGAS JUNIOR, A. F.; OLIVEIRA, L. A.; OLIVEIRA, A. N.; WILLERDING, A. L. Capacidade de solubilização de fosfatos e eficiência simbiótica de rizóbios isolados de solos da Amazônia. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 2, p. 359-366, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i2.3185>

DAI, Y.; ZHENG, H.; JIANG, Z.; XING, B. Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: A meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 713, p. 136635, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136635>

DE ARAUJO SOBREIRA, H.; FERREIRA, M. V.; FARIA, A. M.; ASSUNÇÃO, R. M. N. Commercial organomineral fertilizer produced through granulation of a blend of monoammonium phosphate and pulp and paper industry waste post-composting. **Industrial Crops and Products**, v. 222, p. 119816, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119816>

DE ZUTTER, N.; AMEYE, M.; BEKAERT, B.; VERWAEREN, J.; DE GELDER, L.; AUDENAERT, K. Uncovering new insights and misconceptions on the effectiveness of phosphate solubilizing rhizobacteria in plants: a meta-analysis. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 858804, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.858804>

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Inoculação reduz custos com fertilizantes na soja**. 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/46716731/inoculacao-reduz-custos-com-fertilizantes-na-soja>. Acesso em: 4 ago. 2025.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Produto com tecnologia brasileira pode reverter dependência externa por adubos fosfatados**. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/45773416/produto-com-tecnologia-brasileira-pode-reverter-dependencia-externa-por-adubos-fosfatados>. Acesso em: 26 ago. 2025.

ESPINOZA, A. L. D. F.; LUZ, J. H. S. D.; TEZOTTO, T.; PAVINATO, P. S. Sewage sludge-based organomineral fertilizer improves phosphorus efficiency in *Urochloa brizantha*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 49, e0240124, 2025. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20240124>

FIORILLI, V.; MARTÍNEZ-MEDINA, A.; POZO, M. J.; LANFRANCO, L. Plant immunity modulation in arbuscular mycorrhizal symbiosis and its impact on pathogens and pests. **Annual Review of Phytopathology**, v. 62, p. 341-361, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-121423-042014>

FRAZÃO, J. J.; BENITES, V. M.; PIEROBON, V. M.; RIBEIRO, J. V. S.; LAVRES, J. A poultry litter-derived organomineral phosphate fertilizer has higher agronomic effectiveness than conventional phosphate fertilizer applied to field-grown maize and soybean. **Sustainability**, v. 13, n. 21, p. 11635, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132111635>

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, n. 4, p. 219–230, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>

GLICK, B. R. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. **Scientifica**, v. 2012, p. 963401, 2012. DOI: <https://doi.org/10.6064/2012/963401>

- GYANESHWAR, P.; KUMAR, G. N.; PAREKH, L. J.; POOLE, P. S. Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. **Plant and Soil**, v. 245, n. 1, p. 83-93, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020663916259>
- HOU, L.; ZHANG, X.; FENG, G.; LI, Z.; ZHANG, Y.; CAO, N. Arbuscular mycorrhizal enhancement of phosphorus uptake and yields of maize under high planting density in the black soil region of China. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1100, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80074-x>
- IGUAL, J. M.; VALVERDE, A.; CERVANTES, E.; VELÁZQUEZ, E. Phosphate-solubilizing bacteria as inoculants for agriculture: use of updated molecular techniques in their study. **Agronomie**, v. 21, n. 6-7, p. 561-568, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1051/agro:2001145>
- JIANG, F.; ZHANG, L.; ZHOU, J.; GEORGE, T. S.; FENG, G. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance mineralisation of organic phosphorus by carrying bacteria along their extraradical hyphae. **New Phytologist**, v. 230, n. 1, p. 304-315, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.17081>
- KALAYU, G. Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers. **International Journal of Agronomy**, v. 2019, p. 4917256, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/4917256>
- KAMEOKA, H.; MAEDA, T.; OKUMA, N.; KAWAGUCHI, M. Structure-specific regulation of nutrient transport and metabolism in arbuscular mycorrhizal fungi. **Plant and Cell Physiology**, v. 60, n. 10, p. 2272-2281, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1093/pcp/pcz122>
- KHATOON, Z.; HUANG, S.; RAFIQUE, M.; FAKHAR, A.; KAMRAN, M. A.; SANTOYO, G. Unlocking the potential of plant growth-promoting rhizobacteria on soil health and the sustainability of agricultural systems. **Journal of Environmental Management**, v. 273, p. 111118, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111118>
- KUSS, A. V.; KUSS, V. V.; LOVATO, T.; FLÔRES, M. L. Fixação de nitrogênio e produção de ácido indolacético in vitro por bactérias diazotróficas endofíticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 10, p. 1459-1465, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007001000013>
- LAGHARI, M.; XIAO, B.; JOGI, Q.; CHEN, Z.; FAZAL, S.; HU, M.; MIRJAT, M. S.; ABUDI, Z. N.; GUO, D.; KANDHRO, M. N.; NAIDU, R.; HU, Z. Recent developments in biochar as an effective tool for agricultural soil management: a review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 15, p. 4840-4849, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.7753>
- LEMOES, M. S.; MAIA, E.; FERREIRA, E.; STACHIW, R. Uso da cama de frango como adubo na agricultura. **Revista Brasileira de Ciências da Amazônia**, Rolim de Moura, v. 3, n. 1, p. 57-68, 2014.
- LI, D.; WEI, H.; ZOU, Y.; WANG, X.; BAO, Q.; DUAN, R.; HE, H. The role of mineral mediation in organic carbon preservation and phosphorus removal in saline lake sediments

of the Tibetan Plateau. **Journal of Hydrology**, v. 638, p. 133568, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133568>

MAIA, L. C.; SILVA, F. S. B.; GOTO, B. T. Estrutura, ultraestrutura e germinação de glomerosporos. In: SIQUEIRA, J. O.; SOUZA, F. A.; CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M. (Ed.). **Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil**. Lavras: Editora UFLA, 2010. p. 76-118.

MALHOTRA, H.; PANDEY, R.; SHARMA, S. Phosphorus nutrition: plant growth in response to deficiency and excess. In: RAI, V.; SAIRAM, R.; RUSU, A. (Ed.). **Plant nutrients and abiotic stress tolerance**. Singapore: Springer, 2018. p. 171-190. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_7

MATHUR, S.; SHARMA, M. P.; JAJOO, A. Improved photosynthetic efficacy of maize (*Zea mays*) plants with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under high temperature stress. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 180, p. 149–154, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.02.002>

MCGILL, W. B.; COLE, C. V. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. **Geoderma**, v. 26, n. 4, p. 267–286, 1981. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(81\)90024-0](https://doi.org/10.1016/0016-7061(81)90024-0)

MENDEZ, R.; GARBEVA, P.; RAAIJMAKERS, J. M. The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 37, n. 5, p. 634–663, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/1574-6976.12028>

MIRANDA, J. C. C. **Cerrado: micorriza arbuscular: ocorrência e manejo**. 2. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2012.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.

MUKHERJEE, A.; LAL, R. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. **Agronomy**, v. 4, n. 2, p. 398–423, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy3020313>

NICHOLSON, W. L.; MUNAKATA, N.; HORNECK, G.; MELOSH, H. J.; SETLOW, P. Resistance of *Bacillus* endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 64, n. 3, p. 548-572, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1128/MMBR.64.3.548-572.2000>

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

OLIVEIRA, C. A.; SANTOS, J. G. D.; SOARES, T. S.; GOMES, E. A.; LANA, U. G. P.; MARRIEL, I. E. **Viabilidade técnica e econômica do Biomaphos® (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) nas culturas de milho e soja**. Sete

Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. 25 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 247).

PANTANO, G.; GROSSELI, G. M.; MOZETO, A. A.; FADINI, P. S. Sustainability in phosphorus use: a question of water and food security. **Química Nova**, v. 39, n. 6, p. 732-740, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20160086>

PIOUFLE, O.; GANOUDI, M.; CALONNE-SALMON, M.; DHAOU, F. B.; DECLERCK, S. Rhizophagus irregularis MUCL 41833 improves phosphorus uptake and water use efficiency in maize plants during recovery from drought stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 897, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00897>

PRADHAN, N.; SUKLA, L. B. Solubilization of inorganic phosphates by fungi isolated from agriculture soil. **African Journal of Biotechnology**, v. 5, n. 10, p. 850-854, 2006.

PRAKASH, O.; SHARMA, R.; RAHMANI, S.; TIWARI, P.; YADAV, A.; NIMJE, M. Role of microorganisms in plant nutrition and health. In: RAKSHIT, A.; SINGH, H. B.; SEN, A. (Ed.). **Nutrient use efficiency: from basics to advances**. New Delhi: Springer, 2015. p. 125-161. DOI: https://doi.org/10.1007/978-81-322-2169-2_9

QIN, Y.; ANGELINI, L. L.; CHAI, Y. *Bacillus subtilis* cell differentiation, biofilm formation and environmental prevalence. **Microorganisms**, v. 10, n. 6, p. 1108, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10061108>

QIN, Z.; PENG, Y.; YANG, G.; FENG, G.; CHRISTIE, P.; ZHOU, J.; ZHANG, J.; LI, X.; GAI, J. Relationship between phosphorus uptake via indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and crop response: A ³²P-labeling study. **Applied Soil Ecology**, v. 180, p. 104603, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104603>

RAYMOND, N. S.; GÓMEZ-MUÑOZ, B.; VAN DER BOM, F. J.; NYBROE, O.; JENSEN, L. S.; MÜLLER-STÖVER, D. S.; RICHARDSON, A. E. Phosphate-solubilising microorganisms for improved crop productivity: a critical assessment. **New Phytologist**, v. 229, n. 3, p. 1268-1277, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.16924>

RAZAQ, M.; ZHANG, P.; SHEN, H. Influence of nitrogen and phosphorous on the growth and root morphology of Acer mono. **PLoS One**, v. 12, n. 2, p. e0171321, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171321>

RICHARDSON, A. E.; SIMPSON, R. J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 989-996, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.111.175448>

ROSENDAHL, S. Communities, populations and individuals of arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytologist**, v. 178, n. 2, p. 253-266, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02378.x>

SASABUCHI, I. T. M.; KRIEGER, K. S.; NUNES, R. S.; FERREIRA, A. C.; XAVIER, G. T. M.; URZEDO, A. L.; CARVALHO, W. A.; FADINI, P. S. Sustainability in phosphorus use: a

bibliographic review focusing on the current situation in the state of São Paulo, Brazil. **Química Nova**, v. 46, n. 2, p. 185-198, 2023. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170967>

SATYAPRAKASH, M.; NIKITHA, T.; REDDI, E. U. B.; SADHANA, B.; VANI, S. S. Phosphorous and phosphate solubilising bacteria and their role in plant nutrition. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 6, n. 4, p. 2133-2144, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.604.251>

SHARMA, H.; GUPTA, S.; CHAUHAN, R.; TRIPATHI, D. K.; PANDEY, S. Phosphorus solubilizing *Priestia Megaterium* AIOASP1 enhances tomato growth and wilt resistance through antioxidant gene regulation. **Plant Science**, v. 350, p. 112636, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2025.112636>.

SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; ANDRADE, C. A.; NETO, L. M.; BETTIOL, W. Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. In: BETTIOL, W. et al. (Ed.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. p. 17-47.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGLE, J. S.; BOTTOMLEY, P. S. (Ed.). **Methods of soil analysis: part 2 microbiological and biochemical properties**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 775–833. (SSSA Book Series, 5).

TAKAHASHI, S.; ANWAR, M. R. Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. **Field Crops Research**, v. 101, n. 2, p. 160-171, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.11.003>

THAKUR, R.; DHAR, H.; SWARNKAR, M. K.; SONI, R.; SHARMA, K. C.; SINGH, A. K.; GULATI, A. Understanding the molecular mechanism of PGPR strain *Priestia megaterium* from tea rhizosphere for stress alleviation and crop growth enhancement. **Plant Stress**, v. 12, p. 100494, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100494>

THIOUB, M.; EWUSI-MENSAH, N.; SARKODIE-ADDO, J.; ADJEI-GYAPONG, T. Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation enhances phosphorus use efficiency and soybean productivity on a Haplic Acrisol. **Soil and Tillage Research**, v. 192, p. 174-186, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.001>

VERBON, E. H.; LIBERMAN, L. M. Beneficial microbes affect endogenous mechanisms controlling root development. **Trends in Plant Science**, v. 21, n. 3, p. 218-229, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.01.013>

VIEIRA, C. K.; MARASCALCHI, M. N.; ROZMOŠ, M.; BENADA, O.; BELOVA, V.; JANSÁ, J. Arbuscular mycorrhizal fungal highways – What, how and Why? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 202, p. 109702, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109702>

VIEIRA, M. E.; FREITAS, M. S. M.; PEÇANHA, D. A.; LIMA, T. C.; MARTINS, M. A.; VIEIRA, I. J. C. V. Arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus in spilanthol and phenolic compound yield in jambu plants. **Horticultura Brasileira**, v. 39, n. 2, p. 192-198, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-909X20210001>

org/10.1590/s0102-0536-20210212

WAHID, F.; FAHAD, S.; DANISH, S.; ADNAN, M.; YUE, Z.; SAUD, S.; SIDDIQUI, M.; BRTNICKÝ, M.; HAMMERSCHMIEDT, T.; DATTA, R. Sustainable management with mycorrhizae and phosphate solubilizing bacteria for enhanced phosphorus uptake in calcareous soils. **Agriculture**, v. 10, n. 8, p. 334, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10080334>

WALPOLA, B. C.; YOON, M. Prospectus of phosphate solubilizing microorganisms and phosphorus availability in agricultural soils: a review. **African Journal of Microbiology Research**, v. 6, n. 37, p. 6600-6605, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJMR12.889>

WANG, X.; HOFFLAND, E.; FENG, G.; KUYPER, T. W. Arbuscular mycorrhizal symbiosis increases phosphorus uptake and productivity of mixtures of maize varieties compared to monocultures. **Journal of Applied Ecology**, v. 57, n. 11, p. 2203-2211, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13739>

WINIWARTER, V. Environmental history of soils. In: AGNOLETTI, M.; NEVILLE, S. (Ed.). **The basic environmental history**. Cham: Springer, 2014. p. 79-119. (Environmental History, 4). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-09180-8_3

YADAV, A.; YADAV, K. Regulation of plant-microbe interactions in the rhizosphere for plant growth and metabolism: role of soil phosphorus. In: HAKS, A. (Ed.). **Phosphorus in soils and plants**. London: IntechOpen, 2024. p. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.112572>

ZHAO, Y.; LIN, Z.; SHAN, S.; YAO, G.; XU, L.; PING, L.; WANG, X.; JIANG, Y.; JIN, Z. Advances in the effects of biochar on microbial ecological function in soil and crop quality. **Sustainability**, v. 14, n. 16, p. 10411, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141610411>

ZOU, T.; ZHANG, X.; DAVIDSON, E. A. Global trends of cropland phosphorus use and sustainability challenges. **Nature**, v. 611, n. 7934, p. 81-87, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05220-z>