

Microrganismos solubilizadores de fósforo e potássio na cultura da soja

Christiane Abreu de Oliveira-Paiva

Vera Maria Carvalho Alves

Eliane Aparecida Gomes

Sylvia Morais de Sousa

Ubiraci Gomes de Paula Lana

Ivanildo Evódio Marriel

Introdução

O Brasil é o País com o maior potencial de expansão da agricultura no globo, devendo se tornar, nos próximos cinco anos, o maior exportador de grãos do planeta, superando os Estados Unidos. Nossa agricultura alimentou em 2020 quase 800 milhões de pessoas e, enquanto a produção de grãos mundial cresceu 2,05% ao ano, entre 2011 e 2020, a do Brasil cresceu 5,33%, mais do dobro da taxa mundial (Contini; Aragão, 2020). Apesar disso, os sistemas de produção agrícola brasileiros são continuamente afetados pela baixa fertilidade dos solos, levando ao uso intensivo de fertilizantes químicos sintéticos, que elevam os custos de produção em termos econômicos e ambientais, além de promover a dependência da importação de insumos. Para suprir a demanda nacional do agronegócio por nutrientes, o País importa, em média, 70% dos fertilizantes nitrogenados e fosfatados e acima de 95% dos fertilizantes potássicos (Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2019; GlobalFert, 2021), sendo o quarto maior consumidor global de fertilizantes, atrás apenas da China, da Índia e dos Estados Unidos.

O fósforo (P) é um dos nutrientes mais limitantes para o crescimento das plantas e sua deficiência pode causar atraso no crescimento e interferir nos processos de fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia, divisão celular e crescimento das células vegetais (Hammond; White, 2008). Em soja, além de essencial para o metabolismo energético, também contribui para a nodulação e consequente fixação do nitrogênio (N) atmosférico. Por impactar diferentes processos vitais, o P torna-se necessário desde a germinação, principalmente em plantas de ciclo curto, como a soja. Nos solos brasileiros, a maior parte do P encontra-se imobilizado nas formas insolúveis de fosfatos de cálcio (Ca), ferro (Fe) e alumínio (Al) ou fortemente adsorvido a argilominerais (Novais; Smyth, 1999). Estima-se que cerca de 70% do P aplicado via fertilizantes minerais ou orgânicos permanece acumulado no solo em formas pouco acessíveis às plantas (Pavinato et al., 2020).

Terceiro macronutriente essencial, o K é absorvido pelas plantas e translocado como cátion. Caracterizado pela sua alta mobilidade nas plantas, não tem função estrutural nem participa da composição, mas desempenha funções importantes em diversos processos do crescimento de plantas, como controle de

atividade enzimática em vários processos fisiológicos e metabólicos da planta, incluindo fotossíntese (Wang et al., 2012); metabolismo do nitrogênio e síntese de proteínas e de carboidratos (Prajapati; Modi, 2012); regulação de estômatos (Hedrich, 2012) e tolerância à seca (Grzebisz et al., 2013); produção e translocação de carboidratos para áreas de crescimento meristemático (Sattar et al., 2019); processos de transporte nos tecidos vasculares (Dreyer et al., 2017) e crescimento e desenvolvimento geral da planta (Sparks; Huang, 1985); resistência a pragas e doenças; dentre outros. É o oitavo elemento mais abundante na terra, compreendendo por volta de 2,1% da crosta terrestre (Sattar et al., 2019). Entretanto, deste total, quase 98% está presente na forma não trocável, indisponível para as plantas (minerais silicáticos como mica e feldspato), sendo frequente a deficiência de K, principalmente em sistemas de produção intensificados.

Uma abordagem estratégica para o manejo integrado de fertilizantes consiste na possibilidade de maximizar a absorção e liberação de P e K do solo pelo uso de microrganismos que promovam o crescimento do sistema radicular das plantas e a disponibilização de formas solúveis desses nutrientes.

Microrganismos promotores de crescimento de plantas são capazes de estimular o crescimento vegetal em diferentes estágios de desenvolvimento por meio de mecanismos diretos como a aquisição de P e K, a fixação de N ou ainda modulando níveis de hormônios vegetais, que podem levar ao aumento da superfície radicular e ao maior crescimento vegetativo (Backer et al., 2018; Nazir et al., 2018; Bakhshandeh et al., 2020; Sousa et al., 2021) (Figura 1). Por outro lado, os mecanismos indiretos envolvem a redução ou prevenção de efeitos deletérios de microrganismos patogênicos pela síntese de antibióticos ou sideróforos (Rodríguez; Fraga, 1999; Sharma et al., 2013) (Figura 1). O uso de inoculantes microbianos solubilizadores de P e K ganhou destaque nas últimas três décadas, com vários produtos comerciais no mercado mundial (Tabela 1). Porém, atualmente, não existe no Brasil nenhum inoculante comercial para solubilização de K. Para o nutriente P, existem comercialmente no Brasil os produtos BiomaPhos, Biofree e Pasto Max.

Neste contexto, este capítulo abordará os principais mecanismos utilizados por microrganismos promotores de crescimento de plantas para disponibilização de P e K no solo e seus impactos, especialmente na cultura da soja.

Aumento da aquisição de P em soja por microrganismos solubilizadores de fosfato (MSP)

O P é um nutriente limitante para o crescimento das plantas, pois, apesar de o P total da maioria dos solos ser relativamente elevado, o P disponível para as plantas é muito baixo, principalmente em solos tropicais intemperizados. Encontra-se nos solos sob as formas orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi), que se diferenciam entre si pelo grau de estabilidade ou solubilidade e, portanto, com diferentes disponibilidades à absorção vegetal. O Pi ocorre principalmente em complexos minerais insolúveis e precipitados (Rengel; Marschner, 2005), enquanto a matéria orgânica representa entre 20-80% do Po dos solos (Richardson, 1994). Existem principalmente dois tipos de reações de fixação de íons fosfato nos solos: (a) sorção de fosfato na superfície dos minerais de argila e (b) precipitação de fosfato por Al^{3+} , Fe^{3+} e Ca^{2+} livres no solo (Havlin et al., 1999). Os solos que apresentam maior capacidade de fixação de P ocupam cerca de 1 bilhão de hectares nos trópicos (Sanchez; Logan, 1992). Em geral, apenas 0,1% do P total do solo existe em uma forma solúvel, prontamente disponível para absorção imediata pelas plantas (Zhou et al., 1992).

Tabela 1. Inoculantes comerciais para solubilização de fosfato e potássio disponíveis no mercado mundial.

Nome do produto	Fabricante	País	Benefício/Mecanismo	Microorganismo	Recomendação	Referência
Bio Promotor Phosphobacteria	-	Índia	Solubilização de fosfato	<i>Bacillus megaterium</i>	Trigo, milho, arroz e algodão	indiamart.com/romvijaybiotech/phosphobacteria-biofertilizer.html
BiomaPhos	Bioma/Simbiose	Brasil	Solubilização/mineralização de fosfato	<i>B. megaterium</i> , <i>B. subtilis</i>	Diferentes culturas	bioma.ind.br/product/bioma-phos
Bio-Phospho	Special Biochem (P) Ltd	Índia	Solubilização de fosfato	<i>B. subtilis</i>	Trigo, milho, arroz e algodão	indiamart.com/proddetail/bio-phospho-bio-fertilizer-7618252062.html
Biozote-P	National Agriculture Research Center	Paquistão	Solubilização de fosfato	Microorganismos solubilizadores de fosfato	Leguminosas	-
CataPult	Mapleton Agri Biotec	Austrália	Solubilização de fosfato e absorção de nutrientes	Fungos micorrízicos e <i>Bacillus</i>	Diferentes culturas	mabiotec.com/index.php
Fasloon ka jarasimi teeka	Ayyub Agricultural Research Institute (AARI)	Paquistão	Solubilização de fosfato	Microorganismos solubilizadores de fosfato	Leguminosas, trigo, milho, arroz e algodão	aari.punjab.gov.pk
JumpStart Technology	Bayer		Aumento da disponibilidade de fosfato	<i>Penicillium bilaiae</i>	Trigo	cropscience.bayer.us/seedgrowth/acceleron/other-solutions/jumpstart-wettable-powder-inoculant
N P K liquid	-	Índia	Fixação de nitrogênio, solubilização de fosfato e potássio	<i>Azotobacter chroococcum</i> , <i>Pseudomonas</i>	Diferentes culturas	-
Phosphomax	Varsha Bioscience and Technology India Private Ltd	Índia	Solubilização de fosfato	<i>B. megaterium</i>	Diferentes culturas	varshabioscience.com/products/phosphomax.html
Potash solubilizing liquid	-	Índia	Solubilização de potássio	Espécies de <i>Bacillus</i>	Diferentes culturas	-
Potassium solubilizing bacteria	Vidarbha Biotech Lab"	Índia	Solubilização de potássio	N/D		vbl-biofarming.com/product/k-all-k-m-b/
PotaZ	Varsha Bioscience and Technology India Private Ltd	Índia	Solubilização de potássio	<i>Frateuria aurantia</i>	Diferentes culturas	varshabioscience.com/products/potaz.html
QuickRoots Technology	Bayer	EUA	Aumenta a disponibilidade de nitrogênio, fósforo e potássio	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> e <i>Trichoderma</i>	Milho, trigo, algodão e sorgo	cropscience.bayer.us/seedgrowth/acceleron/other-solutions/quick-roots-technology
Symbion K	T. Stanes & Company Limited	Índia	Solubilização de potássio	<i>Frateuria</i> sp.	Diferentes culturas	tstanes.com/
TagTeam	Bayer	EUA	Solubilização de fosfato e fixação de nitrogênio	<i>Penicillium bilaiae</i> e <i>Bradyrhizobium japonicum</i>	Soja, lentilha e ervilha	cropscience.bayer.us/seedgrowth/acceleron/other-solutions/tag-team-technology

Sword, 2015) depois da inoculação com diferentes espécies de fungos entomopatogênicos. Mecanismos de promoção do crescimento relacionados com a transferência de nitrogênio (Behie et al., 2012), a produção de sideróforos (Jirakkakul et al., 2015) ou o aumento na absorção de ferro (Sánchez-Rodríguez et al., 2015) já foram relatados em plantas colonizadas com *B. bassiana*. Além disso, foi observada a produção do fitormônio ácido indol acético (AIA) associada com diferentes cepas de *Metarhizium* e *Beauveria* (Liao et al., 2017). Esses organismos são ubíquos, mas variam em densidade e capacidade de solubilização de fosfato mineral em diferentes tipos de solo ou sistemas de produção. São geralmente isolados de solos, rizosfera, rizoplano, filosfera e rochas, dentre outros, utilizando o método de diluição seriada ou a técnica de enriquecimento da cultura (Zaidi et al., 2009).

Os microrganismos desempenham um papel importante em todos os três componentes principais do ciclo de P do solo (dissolução-precipitação, sorção-dessorção e mineralização-imobilização). Os principais mecanismos de solubilização de P empregados pelos microrganismos incluem: (1) liberação de ácidos orgânicos, sideróforos, prótons, íons hidroxila, CO_2 ; (2) liberação de enzimas extracelulares (mineralização bioquímica de P) e (3) liberação de P durante a degradação do substrato (mineralização biológica de P) (McGill; Cole, 1981). Além disso, esses microrganismos, na presença de carbono lábil, servem como dreno para o P, imobilizando-o rapidamente, mesmo em solos com baixo teor de P (Sharma et al., 2013).

A inoculação com MSP tem sido realizada em soja, desde a década de 50 (Kudashev, 1956), em diferentes regiões do globo (Wasule et al., 2007; Fernández et al., 2007; Afzal et al., 2010; Wang et al., 2020; Bononi et al., 2020), com aumento significativo na produtividade. Por exemplo, nove estirpes de BSP dos gêneros *Bacillus* e *Pseudomonas* foram isoladas da rizosfera de soja consorciada na China e apresentaram alta capacidade de secretar ácidos orgânicos, solubilizar P, produzir AIA e sideróforos e promover crescimento das plantas de soja (Wang et al., 2020). A inoculação de duas cepas de *B. aryabhattai* isoladas na Índia, com capacidade para mineralizar fitato e solubilizar fosfato tricálcico, resultou em aumento significativo dos parâmetros de crescimento, rendimento, aquisição de P de soja e o teor de P disponível no solo (Ramesh et al., 2015).

Efeitos positivos foram observados na inoculação consorciada ou isolada de *Bradyrhizobium* e *Pseudomonas* na produtividade da soja no Paquistão (Afzal et al., 2010). As estirpes bacterianas foram capazes de produzir os fitormônios AIA e ácido giberélico. A eficiência de sobrevivência de *Bradyrhizobium* foi até 46% maior por causa da coinoculação, em comparação com sua inoculação simples. Por outro lado, a eficiência de sobrevivência de *Pseudomonas* foi até 33% maior em comparação com sua inoculação simples. Os resultados mostraram que a coinoculação das estirpes de *Bradyrhizobium* e *Pseudomonas* resultou em aumento no rendimento de grãos de 38% em experimentos com vasos e 12% no experimento de campo, em comparação com o tratamento não inoculado. Além disso, foi observado um aumento no número de vagens, conteúdo de N e P nas sementes e disponível no solo, em comparação com o controle, indicando o papel positivo desses microrganismos na mobilização de nutrientes e produtividade da soja.

Plantas de soja inoculadas com estirpes selecionadas do fungo *Trichoderma*, isoladas da Floresta Amazônica, foram cultivadas em solo em casa de vegetação sob um gradiente de fosfato de rocha e superfosfato triplo (Bononi et al., 2020). Das cepas isoladas de *Trichoderma*, 19,5% foram capazes de solubilizar o fosfato e produziram diferentes ácidos orgânicos durante o processo de solubilização. Além

disso, a inoculação com as estirpes de *Trichoderma* mostraram respostas positivas de até 41% na promoção do crescimento da soja, assim como um aumento de até 141% na eficiência de aquisição de P. Já a inoculação com uma cepa de *B. subtilis* aumentou o peso seco da raiz, a relação raiz: parte aérea, o número de nódulos e a nodulação específica, além de contribuir para o maior teor de clorofila de plantas de soja crescidas em condições controladas. Além disso, *B. subtilis* modificou a partição de assimilados na soja, levando ao aumento da superfície radicular de raízes intermediárias e da biomassa da raiz (Araújo et al., 2021).

Isolados bacterianos endofíticos de soja das espécies *Acinetobacter*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Chryseobacterium*, *Citrobacter*, *Curtobacterium*, *Enterobacter*, *Methylobacterium*, *Microbacterium*, *Micromonospora*, *Pantoea*, *Paenibacillus*, *Pseudomonas*, *Ochrobactrum*, *Streptomyces* e *Tsukamurella* apresentaram potencial biotecnológico, sendo que 18% dos isolados controlaram o crescimento de fungos fitopatogênicos, 100% produziram AIA e 39% solubilizaram fosfato. Um isolado da espécie *Enterobacter* aumentou significativamente a massa de matéria seca da raiz da soja. No entanto, a inoculação de isolados com elevado potencial biotecnológico, em avaliações *in vitro*, não promoveu o crescimento de plantas de soja na maioria dos casos (Assumpção et al., 2009). Fernández et al. (2007) também observaram disparidade dos resultados *in vitro* e na planta. Plantas inoculadas com *Burkholderia* apresentaram a maior altura da parte aérea e mostraram uma relação N/P adequada. No entanto, nenhuma das BSP aumentou a absorção de P pelas plantas. Nesses casos, os resultados sugerem que a inoculação de BSP não promoveu necessariamente a nutrição de P na soja, nem houve qualquer relação entre a disponibilidade de P no ensaio *in vitro* e o teor de P na parte aérea da soja, nas condições avaliadas em casa de vegetação (Fernández et al., 2007). Esses resultados indicam que a seleção de cepas de BSP eficientes como possíveis inoculantes para solos deficientes em P deve se concentrar na interpretação integral de ensaios *in vitro*, experimentos em casa de vegetação e ensaios de campo em diversos anos e locais (Raymond et al., 2021).

Uso de inoculante contendo microrganismos solubilizadores de fosfato na cultura da soja

A equipe da Embrapa Milho e Sorgo vem pesquisando e selecionando MSP há quase 20 anos (Oliveira-Paiva et al., 2009; Gomes et al., 2014; Sousa et al., 2021; Velloso et al., 2020).

O inoculante contém as estirpes *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *B. megaterium* (CNPMS B119), BSP capazes de aumentar a eficiência do uso de P para as plantas, o que pode resultar no aumento da produtividade e, no futuro, na utilização de menores doses de fertilizantes fosfatados. Estas duas estirpes foram isoladas de áreas agrícolas distintas no País, onde prevalece o cultivo de cereais (Oliveira-Paiva et al., 2009; Abreu et al., 2017). A estirpe de *B. megaterium* (CNPMS B119) foi isolada da rizosfera de milho, e tem capacidade de solubilizar fosfatos de cálcio e de rocha e produzir fosfatase, enquanto a estirpe de *B. subtilis* (CNPMS B2084) é endofítica, solubiliza fosfatos de cálcio e ferro, apresenta alta produção de ácido glucônico e enzima fitase (Abreu et al., 2017; Oliveira-Paiva et al., 2020b). Além disso, estas estirpes possuem propriedades distintas de promoção de crescimento, como a produção de AIA, sideróforos, exopolissacarídeos e formação de biofilme que estimulam o aumento da superfície radicular, especialmente de raízes mais finas (Sousa et al., 2021; Velloso et al., 2020). Bactérias do gênero *Bacillus* possuem ainda a capacidade de formar endósporos, permitindo que

se adaptem a condições abióticas extremas, como temperatura, pH, radiação, dessecação, luz ultravioleta ou exposição a pesticidas (Bahadir et al., 2018).

O inoculante BiomaPhos® foi indicado inicialmente para milho, no entanto, para fins de recomendação agrícola e expansão de seu uso, diversos experimentos foram realizados para avaliar sua eficiência na cultura da soja, o que resultou no registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) para esta cultura em 2021. Um exemplo dos resultados da inoculação do BiomaPhos® na cultura da soja e na promoção do crescimento das raízes dessa cultura pode ser visualizado na Figura 2. A inoculação com BiomaPhos® em sementes de soja na dose de 100 mL.ha⁻¹ foi realizada em 181 unidades de observação localizadas em diferentes regiões produtoras do Brasil nas safras 2018/2019 e 2019/2020 (Tabela 2). Os resultados demonstraram que em todos os locais, a produção foi maior na área inoculada com o bioproduto. Considerando todos os locais de avaliação, o ganho médio variou de 0,3% a 18,5%, com média de 6,3%. Os ganhos variaram de 0,1 a 11,5 sacas/ha, com média de 4,3 sacas/ha. Quando analisamos os dados por estado, o maior ganho médio foi registrado em Goiás (10%), e o menor, em Santa Catarina (2,8%). O maior ganho, em sacas/ha, foi registrado no Paraná (5,3 sc/ha), e o menor, em Santa Catarina (2,2 sc/ha). Na grande maioria dos locais avaliados (175) o ganho com a inoculação da soja foi maior que o custo de aplicação. O custo médio da aplicação do inoculante foi 0,7 sc/ha de soja, de modo que o ganho com a inoculação do BiomaPhos® em soja foi, em média, igual a seis vezes o custo da aplicação (Oliveira-Paiva et al., 2020b).

Em outro experimento em Lavras-MG, realizado em parceria com a Embrapa Milho e Sorgo na safra 2018/2019, a inoculação do BiomaPhos® na dosagem de 100 mL.ha⁻¹ no sulco de semeadura da soja promoveu maior enchimento de grãos e produção de massa seca da parte aérea e sistema radicular das plantas. As maiores produtividades da cultura foram obtidas sob a aplicação da dose cheia do fertilizante fosfatado em conjunto com a utilização do inoculante via sulco de semeadura e tratamento de sementes, com ênfase para a aplicação de 100 mL.ha⁻¹ do BiomaPhos® no sulco (Figura 3).

Tabela 2. Ganho médio (%), amplitude do ganho (%), ganho médio (sc/ha), amplitude de ganho (sc/ha), custo por saca (R\$/sc) e custo de aplicação (sc/ha) do inoculante BiomaPhos® na cultura da soja, em unidades de observação conduzidas nas safras 2018/2019 e 2019/2020 em diferentes estados do Brasil.

Estado	N*	Ganho médio (%)	Amplitude ganho (%)	Ganho médio (sc/ha**)	Amplitude ganho (sc/ha)	Custo por saca R\$/sc	Custo de aplicação (sc/ha)
GO	26	10	1,6-13,2	4,5	1,1-9,0	102,2	0,7
MS	14	4,7	1,5-8,8	2,9	1,0-5,2	104,9	0,7
MT	48	5,4	0,3-14,7	3,5	0,2-9,2	104,1	0,7
MG	31	6,3	0,1-18,5	4,4	0,1-11,5	104,4	0,7
PR	55	7,5	1,2-16,7	5,3	1,1-11,1	99,7	0,7
RS	5	5,5	3,7-8,9	3,5	2,4-5,5	104,7	0,7
SC	2	2,8	2,2-3,4	2,2	2,2-2,2	102,2	0,7
Brasil	181	6,3	0,3-18,5	4,3	0,1-11,5	102,9	0,7

*Número de pontos avaliados em áreas de lavoura comercial de 20 ha. **Saca de 60 Kg. Extraído de Oliveira-Paiva et al. (2020b).

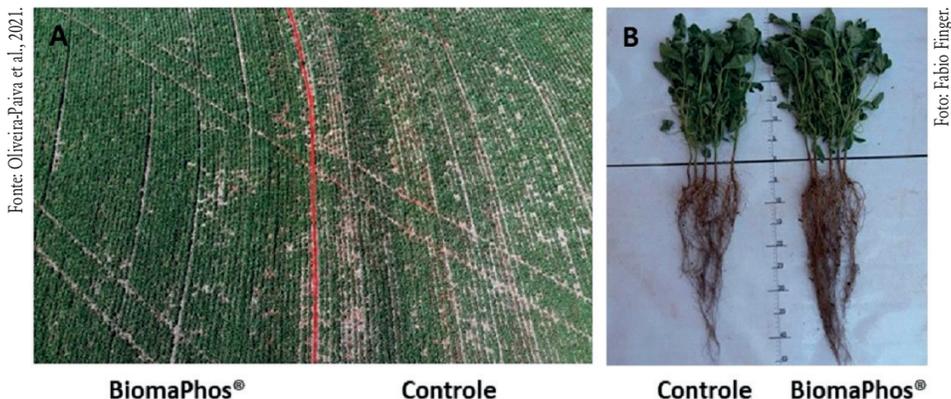


Figura 2. A) Área plantada de soja com e sem inoculação com BiomaPhos[®] sob pivô central em Cascavel-PR na safra 2019. B) Plantas de soja da zona rural de São Luiz do Oeste-PR na safra 2019.

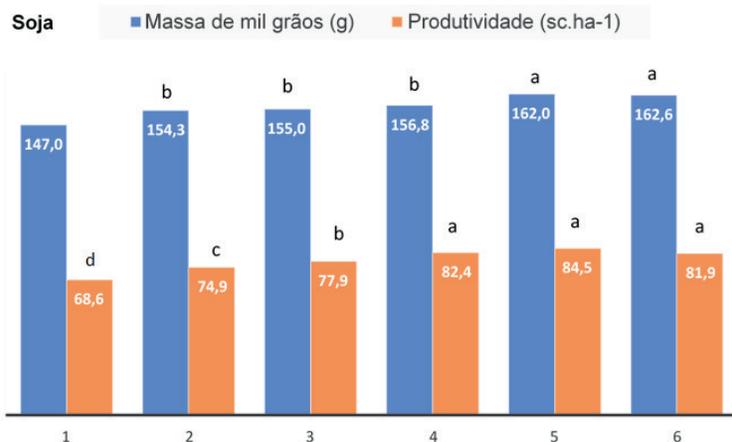


Figura 3. Produtividade da soja em função do tratamento utilizado na safra 2018/2019 em Lavras-MG. Tratamentos: 1. Superfosfato triplo (ST) 50%; 2. ST 100%; 3. ST 50% + BiomaPhos (2 mL.kg⁻¹ de semente); 4. ST 100% + BiomaPhos (2 mL.kg⁻¹ de semente); 5. ST 100% + BiomaPhos no sulco (100 mL.ha⁻¹); 6. ST 100% + BiomaPhos no sulco (150 mL.ha⁻¹). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

O produto BiomaPhos[®] foi também avaliado para fins de registro no Mapa, por Hungria e Nogueira (Embrapa Soja)¹, nas localidades de Guapirama-PR e Lutécia-SP, em doses que variaram entre 1 e 4 mL.kg⁻¹ de sementes de soja, com 50% da recomendação da adubação fosfatada (superfosfato triplo), além dos controles sem inoculação com 0%, 50% e 100% da adubação fosfatada recomendada para a cultura na safra 2019/2020. Alterações nos teores e acúmulos de P na parte aérea foram observadas em Guapirama, onde a dose de 1 mL.kg⁻¹ de sementes e 50% da adubação fosfatada resultaram nos maiores valores. A inoculação com BiomaPhos[®] e 50% da dose de P resultou em aumento na quantidade total de

¹Dados não publicados (2020).

P acumulada nos grãos, que foi equivalente à adubação com 100% de P sem o bioproduto. Em Lutécia, a inoculação com BiomaPhos® na dose de 1 mL.kg⁻¹ de sementes e 50% da adubação fosfatada resultou em produtividade de grãos superior à do controle, com 100% da dose de P sem inoculação.

Pesquisas conduzidas pela equipe de pesquisadores da Embrapa Soja, resultaram no lançamento do inoculante contendo na mesma formulação os microrganismos *Azospirillum brasilense* (Ab-V6) e *Pseudomonas fluorescens* (cepa CNPSo 2719), com ações de fixação de Nitrogênio, Mobilização de Fósforo e promoção de crescimento de plantas, sendo registrado para as culturas da soja e do milho. Adicionalmente, o microrganismo *Pseudomonas fluorescens* (cepa CNPSo 2719) em formulação isolada foi registrado para a mobilização de P para as culturas do milho e da Brachiaria (*Urochloa ruziziensis*), demonstrando, uma possibilidade na gestão no nutriente P no solo em rotação de culturas, bem como, quando associados a cultura de cobertura. Ressaltando também, o benefício na visão do sistema de produção, como por exemplo, na integração Lavoura-Pecuária.

Aumento da aquisição de K em culturas produtoras de grãos por microrganismos solubilizadores de K

O K é o segundo nutriente mais absorvido pela cultura da soja. A quantidade média acumulada pela parte aérea de plantas de soja para uma produtividade média de 3,4 t/ha de grãos é de 165 kg/ha de K, com uma exportação pelos grãos de 61 kg/ha (37%) (Oliveira Júnior et al., 2020).

Zörb et al. (2014) classificam o K do solo em quatro grupos, dependendo de sua disponibilidade para as plantas: a) Solúvel em água: é o K na solução do solo, sendo prontamente disponível para as plantas e microrganismos e potencialmente sujeito à lixiviação. É mantido principalmente pelo K-trocável, em um rápido equilíbrio; b) K-trocável: é o K adsorvido na superfície dos argilominerais e da matéria orgânica do solo. Estas duas primeiras formas correspondem apenas a 0,1% a 0,2% e 1% a 2% do K total do solo, respectivamente; c) K-não trocável e d) K-estrutural. As duas últimas formas são consideradas lentamente disponíveis ou não disponíveis para as plantas, contribuindo para o suprimento de K em longo prazo.

As principais fontes para produção de fertilizantes são os sais solúveis de K encontrados em depósitos de evaporitos, que são de pequena ocorrência no território nacional (Cara et al., 2012). Apesar da escassez de jazidas de K tradicionais, existem reservas de minerais primários com teores relativamente elevados de K, encontradas em quase todas as regiões do País. Diversas rochas portadoras de K de ocorrência no território nacional vêm sendo estudadas como opção para o fornecimento do nutriente às plantas ou em rotas alternativas de obtenção de fertilizantes, com destaque para carnalita, biotita, leucita, nefelina sienita, mica xisto, feldspato potássico, clorita xisto, muscovita e verdete (Martins et al., 2010). Entretanto, por serem de dissolução lenta e complexa, sua utilização depende de diversos fatores como granulometria, composição química e mineralógica da rocha, além do pH e da atividade biológica do solo (Dettmer et al., 2019). Além disso, a liberação do nutriente pode ser lenta e incompatível com a dinâmica de sistemas de produção agrícola.

Uma forte tendência atual é a possibilidade de aumentar a liberação de K das rochas silicáticas mediante processos de biossolubilização. Inúmeros estudos, principalmente em países da Ásia, têm demonstrado que diversos grupos de microrganismos, como bactérias e fungos, têm a capacidade de solubilizar o K

retido em minerais silicáticos, por meio de sua decomposição. Microrganismos solubilizadores de potássio (MSK) têm sido amplamente utilizados como inoculantes e como biofertilizantes na Índia (Tabela 1), Coreia e China, países que possuem extensas áreas de solos deficientes em K (Sattar et al., 2019).

Diversos grupos de microrganismos como bactérias, fungos/fungos micorrízicos arbusculares, leveduras e actinobactérias solubilizadoras de K já foram isolados de solo rizosférico de diferentes plantas (Kour et al., 2020), minerais ricos em K (Sheng et al., 2008; Zhang et al., 2013; Bahadur et al., 2019), solo alagado (Bakhshandeh et al., 2017), solo com elevada salinidade (Bhattacharya et al., 2016), indústria de cerâmica (Prajapati et al., 2012), etc. Estes microrganismos apresentam maior concentração na região rizosférica em comparação com solos não rizosféricos, por causa da influência da exsudação de compostos orgânicos pelas raízes das plantas nesta região. De modo geral, a influência de microrganismos sobre a disponibilidade e o aproveitamento de K pelas plantas varia em função da rocha e da estirpe microbiana, o que torna necessária a seleção de microrganismos para cada classe ou tipo de mineral.

As bactérias solubilizadoras de potássio (BSK) desempenham um papel central na solubilização de minerais potássicos. Embora ainda existam poucas informações, Sattar et al. (2019) apresentam uma extensa revisão dos mecanismos de solubilização de K usados por bactérias. A produção de ácidos orgânicos fortes, como ácidos oxálico, tartárico e cítrico, e íons H^+ é um mecanismo importante de solubilização de minerais potássicos, como mica, biotita, muscovita, feldspato, ilita e ortoclásio (Kour et al., 2020). Outros ácidos orgânicos, como ácidos acético, glicólico, glicônico, láctico, propiônico, malônico e fumárico, também foram relatados como envolvidos na solubilização de minerais potássicos (Etesami et al., 2017). Estudos indicam que a produção de ácidos orgânicos é um dos principais mecanismos de solubilização de K em diferentes espécies de *Bacillus* (Badr et al., 2006; Sheng et al., 2008; Liu et al., 2012; Meena et al., 2016). A acidólise da rizosfera e de minerais; o intemperismo químico mediado por ácido carbônico; a quelação dos cátions ligados a silicatos por reações de troca e por fixação direta de MSK em superfícies minerais são outros mecanismos citados na literatura (Sattar et al., 2019).

Com relação aos fungos, seu papel na solubilização de K é mais pronunciado pela produção de ácidos orgânicos, especialmente ácido oxálico, cítrico e glucônico, o que leva à dissolução de minerais silicáticos, mica e feldspato (Vassileva et al., 2000). Além disso, fungos filamentosos podem exercer forças biofísicas que podem levar à ruptura dos minerais, reduzindo o tamanho das partículas e criando superfícies reativas mais acessíveis à ação dos outros microrganismos (Xiao et al., 2012).

A eficiência de uso de K na agricultura pode ser efetivamente melhorada pela inoculação de MSK, e vários estudos têm avaliado o impacto da inoculação desses microrganismos em diferentes culturas. A inoculação de sementes e plântulas com MSK resulta geralmente em aumento da produção da cultura, da porcentagem de germinação da semente, do vigor e crescimento da planta, além da absorção de K, em experimentos de casa de vegetação e de campo (Singh et al., 2010; Zhang et al., 2013; Zhang; Kong, 2014; Khani et al., 2019). Incremento na concentração de K no solo, assim como na absorção desse nutriente, já foi descrito em culturas economicamente importantes, como milho, trigo, algodão, sorgo, colza, batata, tabaco, tomate, pimenta preta, abóbora, amendoim, etc (Ashley et al., 2006), mas quase nenhum estudo tem sido realizado com soja.

Dentre os principais grupos de BSK já foram descritas as espécies *Acidothiobacillus ferrooxidans*, *Paenibacillus* spp., *Bacillus mucilaginosus*, *B. edaphicus*, *B. circulans*, *Arthrobacter* sp., *Enterobacter hormaechei*, *Paenibacillus mucilaginosus*, *P. frequentans*, *Cladosporium* sp., *Aminobacter* sp., *Sphingomonas* sp., *Burkholderia* sp., e *Paenibacillus glucanolyticus*. Entre os fungos, destacam-se os gêneros *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium* e os fungos micorrízicos do gênero *Glomus*. Estes microrganismos são ubíquos, e sua disponibilidade depende de estrutura, textura do solo, teor de matéria orgânica e outras propriedades relacionadas do solo (Meena et al., 2016).

O grupo de pesquisa da Embrapa Milho e Sorgo avaliou *in vitro* o potencial de 13 estirpes de microrganismos (três bactérias e dez fungos), pertencentes à coleção de Microrganismos Multifuncionais da Unidade, quanto à biossolubilização de K em meio de cultura líquido contendo o pó da rocha fonolito como fonte de K (Silva et al., 2015). Os resultados mostraram que a bactéria estirpe B30, identificada como *Burkholderia* sp., foi a mais eficiente na solubilização de K, com incremento de 70% de solubilização em relação ao controle não inoculado. Além disso, observou-se correlação entre a diminuição do pH e o aumento da solubilização de K. O fungo F76-*Aspergillus* também incrementou o teor de K cerca de 30% em relação ao controle contendo somente rocha. De modo similar, resultados de outros trabalhos envolvendo 40 isolados de fungos e rochas biotita xisto e brecha alcalina mostraram diferenças entre isolados para liberação de K *in vitro* e permitiram a seleção de microrganismos promissores para agregação de valor às rochas silicáticas como fontes de nutrientes. O potencial de solubilização de K depende do tipo de rocha e do microrganismo utilizado (Guimarães et al., 2006; Marriel et al., 2006).

Lopes-Assad et al. (2010) investigaram a capacidade de duas estirpes do fungo *A. niger* na solubilização de pó de rocha ultramáfica alcalina e relataram que ambas as estirpes aumentaram a acidez titulável do meio de cultura e reduziram o pH. As estirpes solubilizaram, aproximadamente, 62% a 70% da rocha, após 35 dias de crescimento em frascos sob agitação, porém, à medida que a escala do volume de fermentação foi aumentada, a eficiência de solubilização reduziu. Os autores concluíram que as estirpes são recomendadas para solubilização de rochas ultramáficas, mas que é necessário otimizar a transferência de oxigênio que parece afetar a solubilização da rocha em volumes maiores.

Resultados com fungos filamentosos solubilizadores de K foram reportados por Biswas (2011), que avaliou o efeito de um composto formado por resíduos agrícolas enriquecido com mica, fosfato de rocha e o fungo *Aspergillus awamori*, em um experimento de campo com rotação entre soja e batata. Os resultados indicaram que a aplicação do composto enriquecido e adicionado com diferentes concentrações de fertilizantes sintéticos resultou em maior produção e absorção de nutrientes pelos tubérculos de batata. Um aumento significativo na produção de grãos e no conteúdo de N, P e K foi observado na soja cultivada no mesmo solo com fertilidade residual. As análises no solo pós-colheita indicaram um aumento no carbono e de N, P e K disponíveis, por causa da aplicação do composto enriquecido, em comparação com o fertilizante sintético.

Singh et al. (2010) conduziram um experimento em hidroponia para avaliar o efeito da inoculação de *B. mucilaginosus*, *Rhizobium* spp., e *A. chroococcum* na capacidade de mobilizar K a partir de resíduos de mica, usando trigo e milho, como culturas teste. A capacidade de assimilação de K foi traduzida em

maior acúmulo de biomassa, conteúdo e aquisição de K pelas plantas, assim como conteúdo de proteína e de clorofila.

Algumas leveduras também apresentam a capacidade de solubilização de K pela liberação de ácidos orgânicos, porém, existem poucos estudos neste sentido. Mohamed et al. (2017) conduziram um experimento em que as leveduras *Pichia anomala* e *Rhodotorula glutinis* apresentaram elevada capacidade de solubilização de mica, em meio de cultura. A inoculação de milho, cultivado com diferentes doses de K, com estas leveduras, resultou em aumento significativo na altura das plantas, peso seco da raiz e parte aérea, assim como absorção de K pela planta. Os resultados dos parâmetros de crescimento e da absorção de K foram mais proeminentes em baixos níveis de fertilização (50% da dose recomendada) indicando a viabilidade de redução de custos de aplicação de K nestas condições.

Considerações finais

O uso de inoculantes microbianos pode ser considerado uma tecnologia que aumenta o componente biológico nos sistemas de produção da soja, garantindo a saúde do solo, tanto pela diminuição do uso de fertilizantes sintéticos quanto pela adição de microrganismos benéficos. Isto garante a esta prática um importante destaque dentro do manejo integrado de fertilizantes, alcançando visibilidade em programas importantes do governo, como o Plano ABC, de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono, e mais recentemente no Programa Nacional de Bioinsumos, que visa aproveitar o potencial da biodiversidade brasileira para reduzir a dependência em relação aos insumos importados.

A utilização de microrganismos solubilizadores de P e K é uma tendência que tem apresentado resultados promissores em diversos países para diferentes culturas, com vários produtos comerciais no mercado global. Entretanto, não existe no Brasil inoculante comercial registrado para solubilização de K. Para solubilização do nutriente P existem comercialmente os produtos BiomaPhos, Biofree e PastoMax.

Assim, para ampliar e consolidar a oferta de bioinoculantes no mercado brasileiro, há necessidade de pesquisas futuras visando (i) identificar e caracterizar novos microrganismos mais eficientes na solubilização de P e K; (ii) caracterizar mecanismos de ação para melhor entendimento dos processos e seleção de cepas; (iii) definir condições ótimas para a atividade dos inoculantes, inclusive de interações entre diferentes microrganismos nativos do solo e outros bioinoculantes amplamente utilizados, especialmente fixadores de N, no caso da soja; (iv) ampliar os estudos em condições de campo para definição de doses e melhorar o entendimento das respostas à inoculação em diferentes condições edafoclimáticas; (v) ampliar estudos com diferentes culturas para definição da afinidade e doses; (vi) conduzir experimentos de campo de longa duração para entendimento do comportamento de inoculantes em longo prazo e impactos na saúde microbiológica do solo, inclusive em rotação de culturas.

Referências

ABREU, C. S.; FIGUEIREDO, J. E. F.; OLIVEIRA, C. A.; SANTOS, V. L.; GOMES, E. A.; RIBEIRO, V. P.; BARROS, B. A.; LANA, U. G. P.; MARRIEL, I. E. Maize endophytic bacteria as mineral phosphate solubilizers. *Genetics and Molecular Research*, v. 16, n. 1, p. 1-13, 2017. DOI: 10.4238/gmr16019294.

- AFZAL, A.; BANO, A.; FATIMA, M. Higher soybean yield by inoculation with N-fixing and P-solubilizing bacteria. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 30, p. 487-495, 2010. DOI: 10.1051/agro/2009041.
- ARAÚJO, F. F.; BONIFÁCIO, A.; BAVARESCO, L. G.; MENDES, L. W.; ARAÚJO, A. S. F. *Bacillus subtilis* changes the root architecture of soybean grown on nutrient-poor substrate. **Rhizosphere**, v. 18, article 100348, 2021. DOI: 10.1016/j.rhisph.2021.100348.
- ASHLEY, M. K.; GRANT, M.; GRABOV, A. Plant responses to potassium deficiencies: a role for potassium transport proteins. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 2, p. 425-436, 2006. DOI: 10.1093/jxb/erj034.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**. São Paulo, 2019.
- ASSUMPTIÃO, L. C.; LACAVA, P. T.; DIAS, A. C. F.; AZEVEDO, J. L.; MENTEN, J. O. M. Diversidade e potencial biotecnológico da comunidade bacteriana endofítica de sementes de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 5, p. 503-510, 2009. DOI: 10.1590/S0100-204X2009000500010.
- BACKER, R.; ROKEM, J. S.; ILANGUMARAN, G.; LAMONT, J.; PRASLICKOVA, D.; RICCI, E.; SUBRAMANIAN, S.; 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, article 1473, 2018. DOI: 10.3389/fpls.2018.01473.
- BADR, M. A.; SHAFEI, A. M.; SHARAF EL-DEEN, S. H. The dissolution of K and P-bearing minerals by silicate dissolving bacteria and their effect on sorghum growth. **Research Journal of Agriculture and Biological Sciences**, v. 2, n. 1, p. 5-11, 2006.
- BAHADIR, P. S.; LIAQAT, F.; ELTEM, R. Plant growth promoting properties of phosphate solubilizing *Bacillus* species isolated from the Aegean Region of Turkey. **Turkish Journal of Botany**, v.42, p.183-196, 2018. DOI: 10.3906/bot-1706-51.
- BAHADUR, I.; MAURYA, R.; ROY, P.; KUMAR, A. Potassium-solubilizing bacteria (KSB): a microbial tool for K-solubility, cycling, and availability to plants. In: KUMAR, A.; MEENA, V. (Eds.). **Plant growth promoting rhizobacteria for agricultural sustainability**. Singapore: Springer, 2019. p. 257-265. DOI: 10.1007/978-981-13-7553-8_13.
- BAKSHSHANDEH, E.; GHOLAMHOSSEINI, M.; YAGHOUBIAN, Y.; PIRDASHTI, H. Plant growth promoting microorganisms can improve germination, seedling growth and potassium uptake of soybean under drought and salt stress. **Plant Growth Regulation**, v. 90, p. 123-136, 2020. DOI: 10.1007/s10725-019-00556-5.
- BAKSHSHANDEH, E.; PIRDASHTI, H.; LENDEH, K. S. Phosphate and potassium-solubilizing bacteria effect on the growth of rice. **Ecological Engineering**, v. 103, pt. A, p. 164-169, 2017. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.03.008.
- BEHIE, S. W.; ZELISKO, P. M.; BIDOCHKA, M. J. Endophytic insect-parasitic fungi translocate nitrogen directly from insects to plants. **Science**, v.336, p. 1576-1577, 2012. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2015.03.010.
- BHATTACHARYA, S.; BACHANI, P.; JAIN, D.; PATIDAR, S. K.; MISHRA, S. Extraction of potassium from K-feldspar through potassium solubilization in the halophilic *Acinetobacter soli* (MTCC 5918) isolated from the experimental salt farm. **International Journal of Mineral Processing**, v. 152, p. 53-57, 2016. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.05.003.
- BISWAS, D. R. Nutrient recycling potential of rock phosphate and waste mica enriched compost on crop productivity and changes in soil fertility under potato-soybean cropping sequence in an Inceptisol of IndoGangetic Plains of India. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 89, p. 15-30, 2011. DOI: 10.1007/s10705-010-9372-6.
- BONONI, L.; CHIARAMONTE, J. B.; PANSÁ, C. C.; MOITINHO, M. A.; MELO, I. S. Phosphorus-solubilizing *Trichoderma* spp. from Amazon soils improve soybean plant growth. **Scientific Reports**, v. 10, article 2858, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-59793-8.
- CARA, D. V. C.; ROCHA, D. L.; CUNHA, C. D.; RIZZO, A. C. L.; SERVULO, E. F. C. **Solubilização biológica de potássio**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2012. 42 p. (Série Tecnologia Ambiental, 66).
- CHEN, Y. P.; REKHA, P. D.; ARUN, A. B.; SHEN, F. T.; LAI, W. A.; YOUNG, C. C. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. **Applied Soil Ecology**, v. 34, n. 1, p. 33-41, 2006. DOI: 10.1016/j.apsoil.2005.12.002.
- CONTINI, E.; ARAGÃO, A. **O agro brasileiro alimenta 800 milhões de pessoas**. Disponível em: www.gov.br/pt-br/noticias/agricultura-e-pecuaria/2021/03/participacao-brasileira-saltou-de-us-20-6-bilhoes-para-us-100-bilhoes/populacao-alimentada-pelo-brasil.pdf. Acesso em: 10 dez. 2020.
- DETTMER, C. A.; ABREU, U. G. P.; GUILHERME, D. O.; DETTMER, T. L.; MOL, D.; SANTOS, M. H. R. Agricultura e inovação: estudo sobre a viabilidade de uso do 'pó de rocha' em sistemas de produção agrícola. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE GESTÃO DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO, 3., 2019, Naviraí. **Anais... Naviraí: UFMS**, 2019. p. 1-10.
- DREYER, I.; GOMEZ-PORRAS, J. L.; RIEDELSBERGER, J. The potassium battery: a mobile energy source for transport processes in plant vascular tissues. **New Phytologist**, v. 216, n. 4, p. 1049-1053, 2017. DOI: 10.1111/nph.14667.

- ETESAMI, H.; EMAMI, S.; ALIKHANI, H. A. Potassium solubilizing bacteria (KSB): mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects: a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 17, n. 4, p. 897-911, 2017. DOI: 10.4067/S0718-95162017000400005.
- ETESAMI, H.; MAHESHWARI, D. K. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: action mechanisms and future prospects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 156, p. 225-246, 2018. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.03.013.
- FERNÁNDEZ, L. A.; ZALBA, P.; GÓMEZ, M. A.; SAGARDOY, M. A. Phosphate-solubilization activity of bacterial strains in soil and their effect on soybean growth under greenhouse conditions. *Biology and Fertility of Soils*, v. 43, p. 805-809, 2007. DOI: 10.1007/s00374-007-0172-3.
- GLOBALFERT. **Importação de fertilizantes bate recorde em 2020**. Análises. Disponível em: www.globalfert.com.br/analises/importacao-de-fertilizantes-bate-recorde-em-2020/. Acesso em: 9 mar. 2021.
- GOMES, E.; SILVA, U.; MARRIEL, I.; OLIVEIRA, C.; LANA, U. Rock phosphate solubilizing microorganisms isolated from maize rhizosphere soil. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 13, n. 1, p. 69-81, 2014. DOI: 10.18512/1980-6477/rbms.v13n1p69-81.
- GRZEBISZ, W.; GRANSEE, A.; SZCZEPANIAK, W.; DIATTA, J. The effects of potassium fertilization on water-use efficiency in crop plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 176, n. 3, p. 355-374, 2013. DOI: 10.1002/jpln.201200287.
- GUIMARÃES, P. S.; LUCIO, C. H.; SOARES, E. M.; NONATO, L. V.; COELHO, A. M.; ALVES, V. M. C.; MARRIEL, I. E. Liberação de potássio de rocha silicática brecha alcalina influenciada pelo genótipo de fungo, in Vitro. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 26; SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE A LAGARTA-DO-CARTUCHO, *SPODOPTERA FRUGIPERDA*, 2; SIMPÓSIO SOBRE *COLLETOTRICHUM GRAMINICOLA*, 1, 2006, Belo Horizonte. **Inovação para sistemas integrados de produção**: trabalhos apresentados. [Sete Lagoas]: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2006.
- HAMMOND, J. P.; WHITE, P. J. Sucrose transport in the phloem: integrating root responses to phosphorus starvation. *Journal of Experimental Botany*, v. 59, n. 1, p. 93-109, 2008. DOI: 10.1093/jxb/ern221.
- HAVLIN, J.; BEATON, J.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.
- HEDRICH, R. Ion channels in plants. *Physiological Reviews*, v. 92, n. 4, p. 1777-1811, 2012. DOI: 10.1152/physrev.00038.2011.
- JABER, L. R. Grapevine leaf tissue colonization by the fungal entomopathogen *Beauveria bassiana* s.l. and its effect against downy mildew. *BioControl*, v. 60, p. 103-112, 2015. DOI: 10.1007/s10526-014-9618-3
- JABER, L. R.; SALEM, N. M. Endophytic colonisation of squash by the fungal entomopathogen *Beauveria bassiana* (Ascomycota: Hypocreales) for managing Zucchini yellow mosaic virus in cucurbits. *Biocontrol Science and Technology*, v. 24, p. 1096-1109, 2014. DOI: 10.1080/09583157.2014.923379
- JIRAKKAKUL, J.; CHEEVADHANARAK, S.; PUNYA, J.; CHUTRAKUL, C.; SENACHAK, J.; BUJAREREN, T.; TANTICHARON, M.; AMNUAYKANJANASIN, A. Tenellin acts as an iron chelator to prevent iron-generated reactive oxygen species toxicity in the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana*. *FEMS Microbiology Letters*, v. 362, p. 1-8, 2015. DOI: 10.1093/femsle/fnu032.
- KOWALSKA, J.; TYBURSKI, J.; MATYSIAK, K.; TYLKOWSKI, B.; MALUSA, E. Field Exploitation of Multiple Functions of Beneficial Microorganisms for Plant Nutrition and Protection: Real Possibility or Just a Hope? *Frontiers in Microbiology*, v. 11, article 1904, 2020. DOI: 10.3389/fmicb.2020.01904
- KALAYU, G. Phosphate solubilizing microorganisms: promising approach as biofertilizers. *International Journal of Agronomy*, v. 2019, article ID 4917256, 2019. DOI: 10.1155/2019/4917256.
- KHAN, A. L.; HAMAYUN, M.; KHAN, S. A.; KANG, S.-M.; SHINWARI, Z. K.; KAMRAN, M.; REHMAN, S.U.; KIM, J-G K; LEE, I.J. Pure culture of *Metathizium anisopliae* LHL07 reprograms soybean to higher growth and mitigates salt stress. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 28, p. 1483-1494, 2012. DOI: 10.1007/s11274-011-0950-9.
- KHANI, A. G.; ENAYATZAMIR, N.; MASIR, M. N. Impact of plant growth promoting rhizobacteria on different forms of soil potassium under wheat cultivation. *Letters in Applied Microbiology*, v. 68, n. 6, p. 514-521, 2019. DOI: 10.1111/lam.13132.
- KOUR, D.; RANAA, K. L.; KAURA, T.; YADAV, N.; HALDERC, S. K.; YADAVA, A. N.; SACHAND, S. G.; SAXENA, A. K. Potassium solubilizing and mobilizing microbes: biodiversity, mechanisms of solubilization, and biotechnological implication for alleviations of abiotic stress. In: RASTEGARI, A. A.; YADAV, A. N.; YADAV, N. (Eds.). **New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering**. Amsterdam: Elsevier, 2020. p. 177-202. DOI: 10.1016/B978-0-12-820526-6.00012-9.
- KUDASHEV, I. S. The effect of phosphobacterin on the yield and protein content in grains of Autumn wheat, maize and soybean. *Doki Akad Skh Nauk*, v. 8, p. 20-23, 1956.

- LIAO, X.; LOVETT, B.; FANG, W.; ST. LEGER, R. J. *Metarhizium robertsii* produces indole-3-acetic acid, which promotes root growth in *Arabidopsis* and enhances virulence to insects. **Microbiology**, v.163, p. 980-991, 2017. DOI: 10.1099/mic.0.000494.
- LIAO, X.; O'BRIEN, T. R.; FANG, W.; ST. LEGER, R. J. The plant beneficial effects of *Metarhizium* species correlate with their association with roots. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 98, p. 7089-7096, 2014. DOI: 10.1007/s00253-014-5788-2.
- LIU, D.; LIAN, B.; DONG, H. Isolation of *Paenibacillus* sp. and assessment of its potential for enhancing mineral weathering. **Geomicrobiology Journal**, v. 29, n. 5, p. 413-421, 2012. DOI: 10.1080/01490451.2011.576602.
- LOPES-ASSAD, M. L.; AVANSINI, S. H.; ROSA, M. M.; CARVALHO, J. R. P.; CECCATO-ANTONINI, S. R. The solubilization of potassium-bearing rock powder by *Aspergillus niger* in small-scale batch fermentations. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 56, n. 7, p. 598-605, 2010. DOI: 10.1139/w10-044.
- LOPEZ, D. C.; SWORD, G. A. The endophytic fungal entomopathogens *Beauveria bassiana* and *Purpureocillium lilacinum* enhance the growth of cultivated cotton (*Gossypium hirsutum*) and negatively affect survival of the cotton bollworm (*Helicoverpa zea*). **Biological Control**, v. 89, p. 53-60, 2015. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2015.03.010.
- MANIANIA, N. K.; SITHANANTHAM, S.; EKESI, S.; AMPONG-NYARKO, K.; BAUMGÄRTNER, J.; LÖHR, B.; MATOKA, C.M. A field trial of the entomogenous fungus *Metarhizium anisopliae* for control of onion thrips, *Thrips tabaci*. **Crop Protection**, v. 22, n. 3, p. 553-559, 2003. DOI: 10.1016/S0261-2194(02)00221-1
- MARRIEL, I. E.; COELHO, A. M.; GUIMARÃES, P. S.; SOARES, E. M.; NONATO, L. F. V.; OLIVEIRA, C. A.; ALVES, V. M. C. Seleção de isolados de fungos biossolubilizadores de rochas silicáticas in vitro. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 27; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 11; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 9; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 6., 2006, Bonito. **Fertbio 2006**: a busca das raízes: anais. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. (Embrapa Agropecuária Oeste. Documentos, 82).
- MARTINS, E. S.; RESENDE, A. V.; OLIVEIRA, C. G.; FURTINI NETO, A. E. Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B. da; CASTILHOS, Z. C. (Org.). **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2010. p. 89-104.
- MEENA, V. S.; BAHADUR, I.; MAURYA, B. R.; KUMAR, A.; MEENA, R. K.; MEENA, S. K.; VERMA, J. P. Potassium-solubilizing microorganism in evergreen agriculture: an overview. In: MEENA, V. S.; MAURYA, B. R.; PRAKASH VERMA, J.; MEENA, R. S. (ed.). **Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture**. New Delhi: Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-81-322-2776-2_1.
- 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. 267-268, 1981. DOI: 10.1016/0016-7061(81)90024-0.
- MOHAMED, H. M.; EL-HOMOSY, R. F.; ABD-ELLATEF, A. H.; SALH, F. M.; HUSSEIN, M. Y. Identification of yeast strains isolated from agricultural soils for releasing potassium bearing minerals. **Geomicrobiology Journal**, v. 34, n. 3, p. 261-266, 2017. DOI: 10.1080/01490451.2016.1186762.
- MOHAMED, H. M.; EL-HOMOSY, R. F.; ABD-ELLATEF, A. H.; SALH, F. M.; HUSSEIN, M. Y. Identification of yeast strains isolated from agricultural soils for releasing potassium bearing minerals. **Geomicrobiology Journal**, v. 34, n. 3, p. 261-266, 2017. DOI: 10.1080/01490451.2016.1186762.
- NAZIR, N.; KAMILI, A. N.; SHAH, D. Mechanism of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in enhancing plant growth: a review. **International Journal of Management, Technology and Engineering**, v. 8, p. 709-721, 2018.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.
- OLIVEIRA JÚNIOR, A.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A. de; KLEPKER, D. Fertilidade do solo e avaliação do estado nutricional da soja. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JÚNIOR, A. A.; KRZYŻANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. C. (Eds.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. p. 133-184. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).
- OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; ALVES, V. M. C.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; SCOTTI, M. R.; CARNEIRO, N. P.; GUIMARÃES, C. T.; SCHAFFERT, R. E.; SÁ, N. M. H. Phosphate solubilizing microorganisms isolated from rhizosphere of maize cultivated in an oxisol of the Brazilian Cerrado Biome. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 9, p. 1782-1787, 2009. DOI: 10.1016/j.soilbio.2008.01.012.
- OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; COTA, L. V.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; SOUSA, S. M. de; LANA, U. G. de P.; SANTOS, F. C. dos; PINTO JÚNIOR, A. S.; ALVES, V. M. C. **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, 2020a. 20 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 210).
- OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; COTA, L. V.; SANTOS, F. C. dos; SOUSA, S. M. de; LANA, U. G. de P.; OLIVEIRA, M. C.; MATTOS, B. B.; ALVES, V. M. C.; RIBEIRO, V. P.; VASCO JÚNIOR, R. **Recomendação agrônômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020b. 18 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 260).

- OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; COTA, L. V.; MARIEL, I. E.; ALVES, V. M. C. GOMES, E. A.; SOUSA, S. M. de; SANTOS F. C. dos; SOUZA, F. F. de; LANDAU, E. C.; PINTO JUNIOR, A. S.; LANA, U. G. de P. **Validação da recomendação para o uso do inoculante BiomaPhos® (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) na cultura de soja**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2021. 18p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 279)
- PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; SOLTANGHEIS, A.; ROCHA, G. C.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, article 15615, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-72302-1.
- PRAJAPATI, K.; MODI, H. A. The importance of potassium in plant growth: a review. **Indian Journal of Plant Sciences**, v. 1, n. 1/2, p. 177-186, 2012.
- PRAJAPATI, K.; SHARMA, M.; MODI, H. Isolation of two potassium solubilizing fungi from ceramic industry soils. **Life Sciences Leaflets**, v. 5, p. 71-75, 2012.
- RAMESH, A.; SHARMA, S. K.; SHARMA, M. P. Isolation and characterization of phytate-mineralizing and phosphate-solubilizing *Bacillus aryabhatai* strains associated with rhizosphere of soybean cultivated in Vertisols of Central India. **International Journal of Basic and Applied Agricultural Research**, v. 13, p. 263-282, 2015. Special issue.
- RAYMOND, N. S.; GÓMEZ-MUÑOZ, B.; VAN DER BOM, F. J. T.; NYBROE, O.; JENSEN, L. S.; MÜLLER-STÖVER, D. S.; OBERSON, A.; RICHARDSON, A. E. Phosphate-solubilising microorganisms for improved crop productivity: a critical assessment. **New Phytologist**, v. 229, n. 3, p. 1268-1277, 2021. DOI: 10.1111/nph.16924.
- RENGEL, Z.; MARSCHNER, P. Nutrient availability and management in the rhizosphere: exploiting genotypic differences. **New Phytologist**, v. 168, n. 2, p. 305-312, 2005. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01558.x.
- RICHARDSON, A. E. Soil microorganisms and phosphorus availability. In: PANKHURST, C. E.; DOUBEAND, B. M.; GUPTA, V. V. S. R. (Eds.). **Soil biota: management in sustainable farming systems**. Victoria: CSIRO, 1994. p. 50-62.
- RODRÍGUEZ, H.; FRAGA, R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. **Biotechnology Advances**, v. 17, n. 4/5, p. 319-339, 1999. DOI: 10.1016/s0734-9750(99)00014-2.
- SANCHEZ, P.; LOGAN, T. Myths and science about the chemistry and fertility of soils in the tropics. In: LAL, R.; SANCHEZ, P. (ed.). **Myths and science of soils of the tropics**. Madison: Soil Science Society of America, 1992. p. 35-46.
- SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, A. R.; DEL CAMPILLO, M. C.; QUESADA-MORAGA, E. *Beauveria bassiana*: an entomopathogenic fungus alleviates Fe chlorosis symptoms in plants grown on calcareous substrates. **Scientia Horticulturae**, v. 197, p. 193-202, 2015. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.029.
- SASAN, R. K.; BIDOCHKA, M. J. (2013). Antagonism of the endophytic insect pathogenic fungus *Metarhizium robertsii* against the bean plant pathogen *Fusarium solani* f. sp. *phaseoli*. **Canadian Journal of Plant Pathology**, v. 35, p. 288-293, 2013. DOI: 10.1080/07060661.2013.823114.
- SATTAR, A.; NAVEEDA, M.; ALIA, M.; ZAHIRA, Z.; NADEEMB, S.; YASEENA, M.; MEENAC, V. S.; FAROOQD, M.; SINGHE, R.; RAHMANF, M.; MEENA, H. N. Perspectives of potassium solubilizing microbes in sustainable food production system: a review. **Applied Soil Ecology**, v. 133, p. 146-159, 2019. DOI: 10.1016/j.apsoil.2018.09.012.
- SHARMA, S. B.; SAYYED, R. Z.; TRIVEDI, M. H.; GOBI, T. A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. **SpringerPlus**, v. 2, article 587, 2013. DOI: 10.1186/2193-1801-2-587.
- SHENG, X. F.; ZHAO, F.; HE, L. Y.; QIU, G.; CHEN, L. Isolation and characterization of silicate mineral-solubilizing *Bacillus globisporus* Q12 from the surfaces of weathered feldspar. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 54, n. 12, p. 1064-1068, 2008. DOI: 10.1139/W08-089.
- SILVA, U. C.; MARRIEL, I. E.; OLIVEIRA, C. A.; GOMES, E. A.; RESENDE, A. V.; LANA, U. G. P. **Biossolubilização de potássio in vitro a partir da rocha fonolito por microrganismos do solo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. 28 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 177).
- SINGH, G.; BISWAS, D. R.; MARWAHA, T. S. Mobilization of potassium from waste mica by plant growth promoting rhizobacteria and its assimilation by maize (*Zea mays*) and wheat (*Triticum aestivum* L.): a hydroponics study under phytotron growth chamber. **Journal of Plant Nutrition**, v. 33, p. 1236-1251, 2010. DOI: 10.1080/01904161003765760.
- SON, H.; PARK, G.; CHA, M.; HEO, M. Solubilization of insoluble inorganic phosphates by a novel salt- and pH-tolerant *Pantoea agglomerans* R-42 isolated from soybean rhizosphere. **Bioresourch Technology**, v. 97, n. 2, p. 204-210, 2006. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.02.021.
- SOUSA, S. M.; OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; ANDRADE, D. L.; CARVALHO, C. G.; RIBEIRO, V. P.; PASTINA, M. M.; MARRIEL, I. E.; LANA, U. G. P.; GOMES, E. A. Tropical *Bacillus* strains inoculation enhances maize root surface area, dry weight, nutrient uptake and grain yield. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 40, p. 867-877, 2021. DOI: 10.1007/s00344-020-10146-9.
- SPARKS, D. L.; HUANG, P. M. Physical chemistry of soil potassium. In: MUNSON, R. D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1985. p. 201-276.
- VASSILEVA, M.; AZCON, R.; BAREA, J.; VASSILEV, N. Rock phosphate solubilization by free and encapsulated cells of *Yarrowia lipolytica*. **Process**

Biochemistry, v. 35, n. 7, p. 693-697, 2000. DOI: 10.1016/S0032-9592(99)00132-6.

VELLOSO, C. C. V.; OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; GOMES, E. A.; LANA, U. G. P.; CARVALHO, C. G.; GUIMARÃES, L. J. M.; PASTINA, M. M.; SOUSA, S. M. de. Genome-guided insights of tropical *Bacillus* strains efficient in maize growth promotion. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 96, n. 9, f1aa157, 2020. DOI: 10.1093/femsec/f1aa157.

WANG, N.; HUA, H.; ENEJI, A. E.; LI, Z.; DUAN, L.; TIAN, X. Genotypic variation in photosynthetic and physiological adjustment to potassium deficiency in cotton (*Gossypium hirsutum*). **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 110, p. 1-8, 2012. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2012.02.002.

WANG, W.; SARPONG, C. K.; SONG, C.; ZHANG, X.; GAN, Y.; WANG, X.; YONG, T.; CHANG, X.; WANG, Y.; YANG, W. Screening, identification and growth promotion ability of phosphate solubilizing bacteria from soybean rhizosphere under maize-soybean intercropping systems. **bioRxiv**, 2020. DOI: 1101/2020.12.15.422997.

WASULE, D. L.; WADYALKAR, S. R.; BULDEO, A. N. Effect of phosphate solubilizing bacteria on role of *Rhizobium* on nodulation by soybean. In: INTERNATIONAL MEETING ON MICROBIAL PHOSPHATE SOLUBILIZATION, 1., Salamanca, 2007. **Plant and soil**. Dordrecht: Springer, 2007. p. 139-142. (Developments in Plant and Soil Sciences, 102).

XIAO, B.; LIAN, B.; SHAO, W. Do bacterial secreted proteins play a role in the weathering of potassium-bearing rock powder? **Geomicrobiology Journal**, v. 29, n. 6, p. 497-505, 2012. DOI: 10.1080/01490451.2011.581333.

ZAIDI, A.; KHAN, M. S.; AHMED, M.; OVES, M.; WANI, P. A. Recent advances in plant growth promotion by phosphate-solubilizing microbes. In: KHAN, M. S.; ZAIDI, A.; MUSARRAT, J. (Ed.). **Microbial strategies for crop improvement**. Berlin: Springer-Verlag, 2009. p. 23-50.

ZHANG, A.; ZHAO, G.; GAO, T.; WANG, W.; LI, J.; ZHANG, S.; ZHU, B. Solubilization of insoluble potassium and phosphate by *Paenibacillus kribensis* CX-7: a soil microorganism with biological control potential. **African Journal of Microbiological Research**, v. 7, p. 41-47, 2013.

ZHANG, C.; KONG, F. Isolation and identification of potassium-solubilizing bacteria from tobacco rhizospheric soil and their effect on tobacco plants. **Applied Soil Ecology**, v. 82, p. 18-25, 2014. DOI: 10.1016/j.apsoil.2014.05.002.

ZHOU, K.; BINKLEY, D.; DOXTADER, K. G. A new method for estimating gross phosphorus mineralization and immobilization rates in soils. **Plant and Soil**, v. 147, p. 243-250, 1992. DOI: 10.1007/BF00029076.

ZÖRB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture: status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, n. 9, p. 656-669, 2014. DOI: 10.1016/j.jplph.2013.08.008.