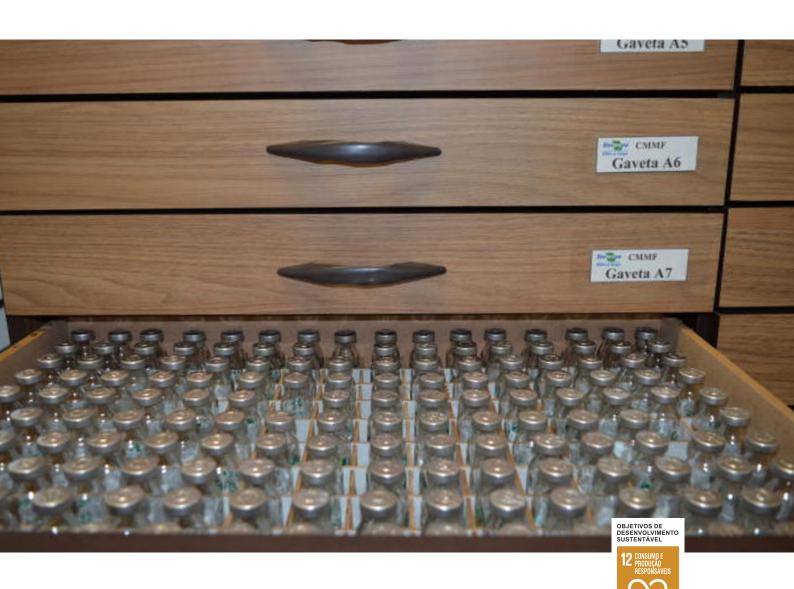
Solubilização de potássio presente em minerais por microrganismos e efeitos no desenvolvimento de culturas agrícolas





Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Milho e Sorgo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

DOCUMENTOS 264

Solubilização de potássio presente em minerais por microrganismos e efeitos no desenvolvimento de culturas agrícolas

Vera Maria Carvalho Alves Eliane Aparecida Gomes Álvaro Vilela de Resende Christiane Abreu de Oliveira-Paiva Ivanildo Evódio Marriel Sylvia Morais de Sousa Ubiraci Gomes de Paula Lana

Esta publicação está disponível no endereço:

https://www.embrapa.br/milho-e-sorgo/publicacoes

Embrapa Milho e Sorgo

Rod. MG 424 Km 45 Caixa Postal 151

CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG

Fone: (31) 3027-1100 Fax: (31) 3027-1188

www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações da Unidade Responsável

Presidente

Maria Marta Pastina

Secretário-Executivo Elena Charlotte Landau

Membros

Cláudia Teixeira Guimarães, Mônica Matoso Campanha, Roberto dos Santos Trindade e Maria Cristina Dias Paes

Revisão de texto

Antonio Claudio da Silva Barros

Normalização bibliográfica Rosângela Lacerda de Castro (CRB 6/2749)

Tratamento das ilustrações

Mônica Aparecida de Castro

Projeto gráfico da coleção Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica Mônica Aparecida de Castro

Foto da capa

Sandra Maria Brito (Coleção de Microrganismos Multifuncionais e Fitopatógenos da Embrapa Milho e Sorgo)

1ª edição

Publicação digital (2021)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) Embrapa Milho e Sorgo

Solubilização de potássio presente em minerais por microrganismos e efeitos no desenvolvimento de culturas agrícolas / Vera Maria Carvalho Alves ... [et al.]. — Sete Lagoas : Embrapa Milho e Sorgo, 2021. 20 p. : il. — (Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1518-4277; 264).

1. Microbiologia do solo. 2. Bactéria. 3. Inoculação. 4. Biofertilizante. I. Alves, Vera Maria Carvalho. II. Gomes, Eliane Aparecida. III. Resende, Álvaro Vilela de. IV. Oliveira-Paiva, Christiane Abreu de. V. Marriel, Ivanildo Evódio. VI. Sousa, Sylvia Morais de. VII. Lana, Ubiraci Gomes de Paula. VIII. Série.

CDD (21. ed.) 631.46

Autores

Vera Maria Carvalho Alves

Engenheira-agrônoma, Doutora em Fisiologia, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas-MG.

Eliane Aparecida Gomes

Bióloga, Doutora em Genética e Melhoramento, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas-MG.

Álvaro Vilela de Resende

Engenheiro-agrônomo, Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas-MG.

Christiane Abreu de Oliveira Paiva

Engenheira-agrônoma, Doutora em Interação Planta-Microrganismos, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas-MG.

Ivanildo Evódio Marriel

Engenheiro-agrônomo, Doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas-MG.

Sylvia Morais de Sousa

Bióloga, Doutora em Genética e Biologia Molecular, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas-MG.

Ubiraci Gomes de Paula Lana

Químico, Doutor em Genética com ênfase em Biotecnologia, analista da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas-MG.

Apresentação

A segurança alimentar e nutricional e a expansão da agricultura no mundo, notadamente em áreas tropicais, colocam o Brasil com grande potencial para produção e exportação de grãos, e dependente de disponibilidade, eficiência e uso de recursos, incluindo de nutrientes potássicos em escala. O potássio é um nutriente essencial mais absorvido pelos vegetais e é o cátion mais abundante nas plantas. Ele é responsável pela ativação de enzimas, regulação osmótica e atua, promove e regula importantes processos de transporte. Para suprir a demanda nacional, o País importa atualmente 96% dos fertilizantes potássicos consumidos pela agricultura. Esta dependência, além de elevar os custos de produção, deixa a agricultura vulnerável às oscilações do mercado externo, reduzindo a competitividade do agronegócio brasileiro, interna e externamente. Neste campo, um desafio para a obtenção de resultados significativos sobre a ação de microrganismos na disponibilização de potássio (MSK) e outros nutrientes às culturas está na dificuldade de se discriminar os efeitos na solubilização de minerais propriamente dita daqueles relacionados à promoção do crescimento das plantas. Quando a presença de um microrganismo exerce efeitos hormonais estimulando o crescimento radicular, ocorrendo aumento da capacidade de absorção e acúmulo de nutrientes pela planta, pode induzir a uma interpretação equivocada de que o microrganismo atuou diretamente na solubilização de potássio de formas que seriam indisponíveis. Embora tanto a solubilização de minerais quanto a promoção do crescimento radicular sejam aspectos desejáveis, a prevalência de um ou de outro processo tem implicações distintas na possibilidade de se reduzir a aplicação de fertilizantes. No caso de a inoculação levar a planta a absorver/acumular mais nutrientes, pode haver esgotamento mais rápido das reservas do solo, o que aumentaria a demanda por adubações de manutenção. Os estudos envolvendo a prospecção e aplicação de MSK podem ser considerados ainda não conclusivos no Brasil, e há um grande potencial tecnológico a ser explorado a partir de avanços do conhecimento. Além disso, muito há que se avançar na determinação de parâmetros de manejo otimizados, para melhor expressão dos benefícios potenciais desses microrganismos em diferentes ambientes e sistemas de produção, assim como na quantificação dos impactos .

Sumário

Introdução	07
O potássio na planta e no solo	07
Principais fontes e reservas de potássio	08
Solubilização de potássio por microrganismos	11
Diversidade de microrganismos solubilizadores de potássio	11
Mecanismos de solubilização de potássio por microrganismos	12
Fatores que afetam a atividade de microrganismos solubilizadores de potássio	13
Efeito dos microrganismos solubilizadores de potássio em diferentes culturas	13
Considerações finais	15
Referências	16

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. A agricultura brasileira 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 que o dobro da taxa global (Contini; Aragão, 2020).

O País é atualmente o quarto maior consumidor mundial de fertilizantes, atrás apenas da China, da Índia e dos Estados Unidos, com uma participação de 8,2% no mercado. Em relação ao potássio (K), o Brasil é o segundo maior consumidor e o principal importador, por causa da baixa produção interna desse nutriente, importando atualmente 96% dos fertilizantes potássicos consumidos pela agricultura (Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2019). Em 2020, do total de 29,4 milhões de toneladas de fertilizantes importadas, 11,4 milhões de toneladas foram de cloreto de potássio (KCI), um aumento de 12% em relação ao ano anterior. Isso representa 39% do volume total importado, colocando a agricultura brasileira numa posição de forte dependência do mercado externo (GlobalFert, 2021). Atualmente, os países que exportam cloreto de potássio para o Brasil são Canadá (32%), Rússia (26%), Bielorrússia (18%) e Israel (11%) (Saga Consultoria, 2021).

A alta dependência de importação de fertilizantes potássicos, além de elevar os custos de produção, deixa a agricultura vulnerável às oscilações do mercado externo, reduzindo a competitividade do agronegócio brasileiro, interna e externamente. Este forte obstáculo para a agricultura levou o governo brasileiro a instituir, em 22 de janeiro de 2021, por meio do Decreto nº 10.605, um Grupo de Trabalho Interministerial com a finalidade de desenvolver o Plano Nacional de Fertilizantes. Ele tem por objetivo fortalecer políticas de incremento da competitividade da produção e da distribuição de insumos e de tecnologias para fertilizantes no País, de forma sustentável, abrangendo adubos, corretivos, condicionadores e novas tecnologias, para diminuir a dependência externa e ampliar a competitividade do agronegócio no mercado internacional.

Assim, são consideradas estratégicas inovações tecnológicas que propiciem a redução da dependência brasileira da importação de fertilizantes, tanto no sentido de descobrir e explorar novas reservas de fontes tradicionais de produção de fertilizantes potássicos, quanto no aproveitamento de fontes alternativas. A busca de microrganismos eficientes na disponibilização biológica de potássio ainda é pouco explorada no Brasil, e o desenvolvimento de bioinoculantes abre uma nova perspectiva para aumento da produtividade e da fertilidade dos solos, com potencial para substituição parcial ou total de fertilizantes sintéticos. Representa também uma contribuição para atingir a meta ODS 12 "Assegurar padrões de produção e consumo sustentáveis", que visa garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e pressupõe o uso de tecnologias limpas e renováveis, que ajudem a manter os ecossistemas e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo.

O potássio na planta e no solo

Segundo nutriente essencial mais absorvido pelos vegetais, com teores variando de 1% a 5% da massa seca, o potássio é o cátion mais abundante nas plantas e responsável pela ativação de mais de 60 enzimas (sintetases, oxirredutases, desidrogenases, transferases, cinases). Caracterizado pela sua alta mobilidade nas plantas, absorvido e transportado como cátion (K⁺), não tem função estrutural, mas desempenha funções importantes em diversos processos do crescimento, como controle de atividade enzimática em vários processos fisiológicos e metabólicos da planta, incluindo

fotossíntese (Wang et al., 2012); 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), dentre outros. A importância da nutrição adequada de potássio para a qualidade de frutos e a resistência a doenças é também bem documentada na literatura (Zörb et al., 2014).

A absorção do potássio depende principalmente do processo de difusão na solução do solo e, em proporção menor, do fluxo de massa (Malavolta, 2005). Zörb et al. (2014) classificam o potássio do solo em quatro grupos, dependendo de sua disponibilidade para as plantas: A) potássio solúvel em água: é o potássio na solução do solo, sendo prontamente disponível para as plantas e os microrganismos e potencialmente sujeito à lixiviação. É mantido principalmente pelo potássio trocável, em um rápido equilíbrio; B) potássio trocável: é o potássio adsorvido na superfície dos argilominerais e de coloides orgânicos do solo. Estas duas primeiras formas correspondem apenas a 0,1% - 0,2% e 1% a 2% do potássio total do solo, respectivamente; C) potássio não trocável: é o mais fortemente retido por ligações de alta energia nos sítios de troca, nas entrecamadas dos argilominerais ou em minerais primários; e D) potássio estrutural: é o potássio incorporado às estruturas cristalinas de minerais, como os feldspatos e as micas. Esta última forma é considerada lentamente disponível ou não disponível para as plantas, contribuindo para o suprimento de potássio em longo prazo.

Por sua alta reatividade e afinidade com outros elementos químicos, o potássio não se encontra em sua forma elementar. É o oitavo elemento mais abundante na terra, compreendendo por volta de 2,1% da crosta terrestre (Sattar et al., 2019). Entretanto, deste total, cerca de 98% está presente na forma não trocável e estrutural, e ela está indisponível para as plantas (minerais silicáticos como micas e feldspatos), sendo frequente a deficiência de potássio, principalmente em sistemas de produção intensificados. Os teores de potássio total nos solos do Brasil variam de 0,05% a 2,5% (Lopes, 1982), ocorrendo maiores teores desse nutriente em solos menos intemperizados.

Principais fontes e reservas de potássio

As principais fontes de potássio para produção de fertilizantes são os sais encontrados em depósitos de evaporitos, pois são muito solúveis em água e podem ser explorados e processados mais facilmente (Cara et al., 2012). Estes depósitos são formados pela evaporação da água do mar em condições favoráveis à precipitação dos minerais, podendo ser em ambientes marinhos rasos subtropicais, regiões desérticas, polares, e até mesmo em aquíferos subterrâneos. Também podem se formar em ambientes continentais, a partir de água superficial que, ao entrar em contato com as rochas, solubilizam íons, e, ao serem drenadas para depressões, lagos, lagunas, playas ou sabakhas, precipitam esses íons na forma de minerais (Motta, 2020). As principais rochas potássicas de origem sedimentar, encontradas em depósitos evaporíticos, estão listadas na Tabela 1. São sulfatos e/ou cloretos de potássio que apresentam teores significativos de K2O em sua constituição, variando de 15,6% a 63,0%. Segundo Oliveira (2009), em virtude do alto teor de potássio, o mineral mais importante da lista é a silvita, embora a carnalita, a cainita e a langbeinita sejam também exploradas comercialmente como fonte de potássio. Nos depósitos evaporíticos ocorre, frequentemente, a mistura silvita e halita, denominada de silvinita (KCI+NaCI), constituindo-se no principal minério de potássio.

Tabela 1. Principais minerais potássicos de origem sedimentar.

Mineral	Estrutura química	Teor de K ₂ O (%)
Silvita	KCI	63,0
Carnalita	KCI.MgCI2.6H2O	17,0
Cainita	KCI.MgSO4.3H2O	19,0
Langbeinita	K2SO4.2MgSO4	23,0
Polialita	K2SO4.MgSO.2CaSO4.2H2O	15,6
Schoenita	K2SO4.MgSO4.6H2O	23,4
Singernita	K2SO4.CaSO4.H2O	28,0

Fonte: Oliveira (2009).

No entanto, esses depósitos não estão igualmente difundidos pelo planeta. Segundo a Saga Consultoria (2021), o ranking global de reservas de potássio é liderado por Canadá (23,5%), Rússia (20,2%) e Bielorrússia (17,6%), sendo também os maiores produtores mundiais (Tabela 2). O Brasil ocupa a 11ª colocação em termos de reserva lavrável e a 10ª posição em relação à produção mundial. Assim, atualmente o Brasil é o maior importador global de potássio, comprando, em 2020, cerca de 11,4 milhões de toneladas de cloreto de potássio.

Tabela 2. Participação dos principais países detentores das reservas e produção mundial de potássio.

País	Reservas Mundiais de K (%)	Produção Mundial de K (%)
Canadá	23,50	25,90
Rússia	20,20	16,90
Bielorrússia	17,60	16,60
China	8,40	16,10
Estados Unidos	6,30	1,40
Alemanha	3,50	8,00
Brasil	0,03	0,80
Outros países	20,47	14,30

Adaptado de Saga Consultoria (2021).

As reservas brasileiras conhecidas de potássio de origem sedimentar estão restritas aos estados de Sergipe e do Amazonas. Em Sergipe, nas regiões de Taquari/Vassouras e Santa Rosa de Lima, as reservas de silvinita (KCI + NaCI) totalizam 62,92 milhões de toneladas, e as reservas de carnalita (KCI.MgCI2.6H2O) alcançam cerca de 14,4 bilhões de toneladas. No Amazonas, nas regiões de Autazes, Nova Olinda do Norte e Itacoatiara, as reservas medidas de sais de potássio são da ordem de 860 milhões de toneladas (Brasil, 2018).

A produção de potássio no Brasil, iniciada em 1985, está restrita ao Complexo Mina/Usina Taquari/Vassouras, no estado de Sergipe, operado atualmente pelo grupo americano Mosaic Fertilizantes. Como única fonte doméstica de potássio fertilizante, a unidade produtora de Taquari/Vassouras, mesmo produzindo acima da capacidade nominal, prevista no projeto base (500 mil t/ano de KCI), está distante de suprir a demanda interna pelo produto (Motta, 2020). Com o déficit crescente e a proximidade de exaustão da única mina brasileira, o governo iniciou o processo de leilão das jazidas de silvinita localizadas no estado do Amazonas, que apresentam enorme potencial explorató-

rio, em razão da sua similaridade com bacias de classe mundial de KCI, a exemplo das bacias de Saskatchewan, no Canadá, e Urais, na Rússia.

Apesar da escassez de jazidas de minérios de potássio tradicionais, existem reservas de minerais primários com teores relativamente elevados de potássio, encontradas em quase todas as regiões do País. Entretanto, a maioria dos minerais que possuem potássio em sua estrutura é insolúvel ou pouco solúvel, havendo certa dificuldade na obtenção do elemento, e o processo de dissolução só é viável a partir de forte ataque químico, acompanhado de tratamento térmico (Nascimento; Loureiro, 2004).

Diversas rochas ricas em potássio de ocorrência no território nacional vêm sendo estudadas como opção de fontes alternativas do nutriente às plantas ou em novas rotas para obtenção de fertilizantes, tais como biotita, leucita, nefelina sienito, mica xisto, feldspato potássico, clorita xisto, muscovita e glauconita-verdete (Martins et al., 2010). Esses autores, analisando diversos trabalhos sobre o potencial agronômico desses minerais e rochas para fornecimento de potássio, concluíram que, na maioria das vezes, a eficiência agronômica dependeu da origem e da composição, de fatores de solo, do tempo de incubação, do tratamento químico ou térmico aplicado e das culturas utilizadas. Muitas vezes, os resultados insatisfatórios com o uso de rochas como fonte de nutrientes estavam relacionados ao desconhecimento das características mineralógicas do material utilizado, que é um fator extremamente importante na escolha de rochas para aplicação direta ao solo. Na Tabela 3 são apresentados os principais minerais potássicos de origem ígnea.

Tabela 3. Principais minerais potássicos de origem ígnea.

Mineral	Estrutura Química	Teor de K ₂ O (%)		
Feldspatos				
Ortoclásio	KAISi ₃ O ₈	16,90		
Microlínio	KAISi ₃ O ₈	16,90		
Sanidina	KSiAI ₄ O ₈	12,88		
Feldspatoides				
Leucita	KAISi ₂ O ₆	21,50		
Nefelina	KAISiO ₄	8,06		
Micas				
Muscovita	$(KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2)$	11,81		
Flogopita	$(KMg_3(AISi_3O_{10})(OH)_2)$	11,23		
Biotita	$K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	10,86		

Fonte: Lodi (2020).

Silicatos relativamente ricos em potássio, como os feldspatos potássicos, muscovita e leucita, não se constituem importantes fontes desse nutriente, pois além de pouco solúveis em água, suas estruturas são rompidas apenas com dificuldade, por meios artificiais (Martins et al., 2010).

Uma estratégia bastante discutida nos últimos anos refere-se ao uso dos chamados remineralizadores de solo, que envolve a aplicação de pó de rochas (rochagem), que contenham quantidades consideráveis de nutrientes de interesse em sua estrutura. Alguns representantes do grupo das micas, como a flogopita, glauconita, vermiculita e muscovita, vêm ganhando especial atenção, pois apresentam teores um pouco mais elevados de potássio. Entretanto, por serem de dissolução lenta e complexa, a utilização de remineralizadores depende de diversos fatores, como granulometria, composição química e mineralógica da rocha, pH e atividade biológica do solo (Dettmer et al., 2019). Estudos na área de rochagem geralmente preconizam maximizar a liberação dos elementos químicos presentes nas rochas a partir da utilização de tratamentos físicos, químicos ou biológicos que promovam a sua solubilização, para acelerar a disponibilização dos nutrientes no sistema solo-planta.

Solubilização de potássio por microrganismos

Uma forte tendência atual é a possibilidade de aumentar a liberação de potássio das rochas silicáticas mediante processos de biossolubilização. Muitos estudos, principalmente em países da Ásia, têm demonstrado que diversos grupos de microrganismos, como bactérias e fungos, têm a capacidade de solubilizar o potássio retido em minerais silicáticos, por meio de sua decomposição. Microrganismos solubilizadores de potássio (MSK) têm sido amplamente utilizados como inoculantes ou na composição de biofertilizantes na Índia, Coreia e China, países que possuem extensas áreas de solos deficientes em potássio (Sattar et al., 2019).

Diversidade de microrganismos solubilizadores de potássio

MSK são capazes de solubilizar minerais contendo formas insolúveis de potássio e converter em formas disponíveis e facilmente absorvidas pelas plantas (Etesami et al., 2017). Diversos grupos de microrganismos, como bactérias, fungos/fungos micorrízicos arbusculares, leveduras e actinobactérias solubilizadoras de potássio já foram isolados de solo rizosférico de diferentes plantas (Kour et al., 2020), minerais potássicos (Sheng et al., 2008; Parmar; Sindhu, 2013; Zhang et al., 2013; Bahadur et al., 2019), solo alagado (Bakhshandeh et al., 2017), solo com elevada salinidade (Bhattacharya et al., 2016) e indústria de cerâmica (Prajapati et al., 2012). 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 (Padma; Sukumar, 2015).

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

Silva et al. (2015) avaliaram *in vitro* o potencial de 13 estirpes de microrganismos (três bactérias e dez fungos), pertencentes à coleção de Microrganismos Multifuncionais da Embrapa Milho e Sorgo, quanto à biossolubilização de potássio em meio de cultura líquido contendo o pó da rocha fonolito como fonte de potássio. Os resultados mostraram que a bactéria estirpe B30, identificada como *Burkholderia* sp., foi a mais eficiente na solubilização de potássio, 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 potássio. O fungo F76 - *Aspergillus sp* também incrementou o teor de potássio em cerca de 30% em relação ao controle contendo somente a rocha fonolito.

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% do potássio presente na 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.

Mecanismos de solubilização de potássio por microrganismos

As BSK desempenham 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 potássio por bactérias, que classificam em a) solubilização direta, b) solubilização indireta, c) complexação pela secreção de polissacarídeos extracelulares, e d) formação de biofilme. No mecanismo de solubilização direta, os microrganismos solubilizam potássio por meio da produção de ácidos orgânicos fortes, como ácidos oxálico, tartárico e cítrico e íons H⁺; pela acidólise da rizosfera e de minerais; e pelo intemperismo químico mediado por ácido carbônico. A exsudação de ácidos orgânicos é um mecanismo importante de solubilização de minerais potássicos, como mica, biotita, muscovita, feldspato, ilita e ortoclase (Kour et al., 2020). Outros ácidos orgânicos, como ácidos acético, glicólico, glicônico, lático, 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 uma das principais vias de solubilização de potássio por *Bacillus mucilaginosus*, *B. edaphicus*, *B. megaterium*, *Pseudomonas sp.*, *Paenibacillus glucanolyticus*, *P. mucilaginosus*, *Enterobacter hormaechei*, *Penicillium frequentans* (Badr et al., 2006; Han et al., 2006; Sheng; He, 2006; Sheng et al., 2008; Sangeeth et al., 2012; Liu et al., 2012; Prajapati et al., 2013; Meena et al., 2016). No mecanismo indireto de solubilização, os microrganismos solubilizam minerais potássicos por quelação dos cátions ligados a silicatos, por reações de troca e por fixação direta dos MSK em superfícies minerais (Sattar et al., 2019).

Algumas leveduras também apresentam a capacidade de solubilização de potássio pela liberação de ácidos orgânicos, porém existem poucos estudos sobre este assunto.

Os exopolissacarídeos capsulares (EPS) produzidos por microrganismos têm alta capacidade de adsorver ácidos orgânicos, resultando em sua alta concentração ao redor dos minerais, favorecendo sua dissolução e aumentando a liberação de potássio (Lian et al., 2002).

A formação de biofilme é um mecanismo potencial, mas menos estudado, de mobilização de potássio. Ele é uma etapa muito inicial na interação planta-microrganismo, pelo qual as células bacterianas se prendem a superfícies abióticas/bióticas. No biofilme, as células são fixadas dentro de uma matriz de polímeros extracelulares autoproduzidos, que são proteínas lixo, DNA e polissacarídeos, favorecendo uma maior população microbiana. Certas cepas de microrganismos formam um biofilme nas superfícies minerais rizosféricas e liberam ácidos orgânicos, metabólitos e diminuem o pH, o que auxilia na solubilização e absorção de potássio pelas plantas (Sattar et al., 2019).

Com relação aos fungos, seu papel na solubilização de potássio 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 exercem 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 associação entre acidez do meio e taxa de solubilização de potássio foi evidenciada por

Lopes-Assad et al. (2010), que verificaram que a acidificação do meio promovida por *Aspergillus niger* (CCT-4355) favoreceu a solubilidade das rochas potássicas ultramáfica alcalina e flogopitito. Resultados semelhantes foram obtidos por Cara et al. (2015), que observaram que a solubilização de feldspato por *A. niger* em cultura submersa foi diretamente ligada ao aumento da acidez final do meio e consequente redução do pH.

Fatores que afetam a atividade de microrganismos solubilizadores de potássio

Diferentes fatores afetam a sobrevivência e a taxa de solubilização de MSKs em meios de cultura e no solo, tais como fonte de carbono, pH, temperatura, concentração de oxigênio, e período de incubação, além da granulometria e natureza dos minerais potássicos (Sattar et al., 2019).

Lodi (2020), trabalhando com *Aspergillus niger* na dissolução da rocha potássica feldspato, em cultivo submerso, observou que o glicerol não se mostrou uma fonte de carbono eficiente e que os maiores percentuais de potássio solubilizado foram obtidos nas concentrações de 5% e 10% de glicose. Nos estudos de cinética, a máxima solubilização de potássio ocorreu aos três dias de cultivo, e o consumo de glicose adicionada ao meio (5%) ocorreu de forma rápida, já no primeiro dia. Também verificou que, nos ensaios com etapa de pré-cultivo, a ordem de solubilização de potássio em relação à acidez do meio foi pHincial 7 > pHincial 4 > pHincial 2. Resultados semelhantes foram obtidos em ensaios realizados por Parmar e Sindhu (2013), com seis cepas pré-selecionadas de rizobactérias, para otimização das condições de liberação de potássio de mica, em meio Aleksandrov. Eles verificaram que a solubilização máxima ocorreu com glicose como fonte de carbono, em comparação com galactose, xilose e arabidose, temperatura de incubação de 25 °C e pH do meio igual a 7,0.

No solo, maior solubilização de potássio tem sido obtida em temperaturas variando entre 25 °C e 30 °C e pH entre 6,5 e 8,0 (Badr et al., 2006; Meena et al., 2016; Sheng; Huang, 2002).

A disponibilidade de oxigênio é outro fator importante, haja vista que MSKs são aeróbicos por natureza. Diversos investigadores relataram um claro declínio no crescimento e na atividade microbiana em ambientes com limitação de oxigênio (Verma et al., 2015; Saha et al., 2016; Sharma et al., 2016).

Efeito dos microrganismos solubilizadores de potássio 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 potássio, em experimentos de casa de vegetação e de campo (Singh et al., 2010; Zhang et al., 2013; Zhang; Kong, 2014; Subhashini; Kumar, 2014; Khani et al., 2019). Este processo possibilita um incremento na concentração de potássio no solo, assim como na absorção desse nutriente em diferentes culturas economicamente importantes, como soja, algodão, colza, pimenta, abóbora, amendoim, milho, tomate, batata, arroz, sorgo e trigo (Ashley et al., 2006).

A eficiência de uso de potássio na agricultura pode ser efetivamente melhorada pela inoculação de BSK, e vários estudos avaliaram o impacto da inoculação desses microrganismos em culturas produtoras de grãos. Por exemplo, Singh et al. (2010) conduziram um experimento em hidroponia para avaliar o efeito da inoculação de *Bacillus mucilaginosus*, *Rhizobium* spp., e *Azotobacter chroococcum* na capacidade de mobilizar potássio a partir de resíduos de mica, usando trigo e milho, como culturas-teste. A capacidade de assimilação de potássio resultou em maior acúmulo de biomassa, conteúdo e aquisição de potássio pelas plantas, assim como conteúdo de proteína e de clorofila.

Entre os microrganismos, *B. mucilaginosus* apresentou a maior mobilização de potássio em comparação com as outras espécies avaliadas.

Recentemente, 42 estirpes de BSK foram isoladas de solos com elevada salinidade cultivados com arroz. Dessas estirpes, 13 foram selecionadas como eficientes na solubilização de potássio e avaliadas em solos sob estresse salino contendo diferentes concentrações de NaCl. As cinco melhores estirpes selecionadas (duas estirpes de *Acinetobacter pittii*, *Rhizobium pusense*, *Cupriavidus oxalaticus* e *Ochrobactrum ciceri*) foram capazes de aumentar a altura, o peso seco, peso fresco e o conteúdo de clorofila de plantas de arroz irrigado por inundação, cultivado sob condições de elevada salinidade (Ashfaq et al., 2020).

Em outro estudo, Khani et al. (2019) investigaram o efeito de BSK em trigo. Foram avaliadas as bactérias *Enterobacter cloacae* e *Pseudomonas* sp., um consórcio dessas duas espécies e duas doses de potássio. Os resultados indicaram que a inoculação com *E. cloacae* resultou em aumento da produção de grãos, sendo observada correlação significativa e positiva entre a produção e o conteúdo de potássio nos grãos, parte aérea e raiz da planta. Além disso, o solo tratado com essa bactéria apresentou elevadas concentrações de potássio trocável e solúvel em água ao final do experimento. Similarmente, Badr et al. (2006) reportaram que a aplicação de minerais ricos em fósforo e potássio com adição de BSK em sorgo cultivado em solos argilosos, arenosos e calcário aumentou a produção de massa seca e absorção de fósforo e de potássio pelas plantas.

Experimento de campo foi conduzido em dois anos agrícolas objetivando avaliar o efeito da inoculação da BSK *Bacillus cereus* no crescimento e absorção de nitrogênio, fósforo e potássio em plantas de batata (*Solanum tuber*) fertilizada com feldspato. A inoculação resultou em aumento significativo da altura das plantas, do número de ramos e do peso seco da parte aérea, em comparação com o controle não inoculado. A disponibilidade de potássio no solo, além das concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio nas folhas, também aumentou como resultado da inoculação. Os autores concluíram que a biofertilização com *B. cereus* e a aplicação de feldspato às plantas resultaram em uma maior produção total e aumento do peso dos tubérculos em comparação com as plantas não inoculadas (Ali et al., 2021).

Resultados com fungos filamentosos 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. A aplicação do composto enriquecido e adicionado de 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 nitrogênio, fósforo e potássio também foi observado na soja cultivada no mesmo solo com fertilidade residual. As análises no solo pós-colheita indicaram um aumento no carbono e nitrogênio, fósforo e potássio disponíveis, por causa da aplicação do composto enriquecido, em comparação com o fertilizante sintético isolado.

Outro estudo com fungo avaliou o efeito da inoculação de *Penicillium pinophilumem* sobre a disponibilidade de fósforo e potássio, estado nutricional da planta e qualidade do fruto de romã (*Punica granatum*) em condições de campo (Maity et al., 2019). Foi observado aumento da produção em 35%, com perceptível melhoria na qualidade do fruto (peso médio, conteúdo de suco, ácido ascórbico, conteúdo de açúcar redutor e aumento do teor de fenol). Foi também observada maior atividade das enzimas fosfatase ácida e alcalina e aumento da concentração de fósforo e potássio nas folhas e frutos, respectivamente. Prajapati et al. (2013) isolaram e estudaram o efeito da inoculação da BSK *Enterobacter hormaechei* e de uma cepa do fungo *A. terreus* no crescimento e absorção de nutrientes de plantas de quiabo (*Abelmoschus esculentus*), com aplicação de feldspato em um solo

deficiente em potássio, em experimentos de vaso. A inoculação de *E. hormaechei* aumentou o crescimento da raiz e da parte aérea da planta e ambos os microrganismos foram capazes de mobilizar potássio, aumentando seu conteúdo na planta quando o feldspato foi incorporado no solo.

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 destas leveduras em milho, cultivado com diferentes doses de potássio, resultou em aumento significativo na altura das plantas, no peso seco da raiz e na parte aérea, assim como na absorção de potássio pela planta. Os resultados dos parâmetros de crescimento e da absorção de potássio foram mais proeminentes em baixos níveis de fertilização (50% da dose recomendada, indicando a viabilidade de redução de custos de fertilização com potássio nestas condições).

Considerações finais

Como pode ser constatado em diversos dos trabalhos citados, um obstáculo para a obtenção de resultados conclusivos sobre a ação de microrganismos na disponibilização de potássio e outros nutrientes às culturas está na dificuldade de se discriminar os efeitos na solubilização de minerais propriamente dita daqueles relacionados à promoção do crescimento das plantas. Quando a presença de um microrganismo exerce efeitos hormonais estimulando o crescimento radicular, por exemplo, ocorre aumento da capacidade de absorção e acúmulo de nutrientes pela planta, o que pode induzir a uma interpretação equivocada de que o microrganismo atuou diretamente na solubilização de potássio de formas que seriam indisponíveis. Embora tanto a solubilização de minerais quanto a promoção do crescimento radicular sejam aspectos desejáveis, a prevalência de um ou de outro processo tem implicações distintas na possibilidade de se reduzir a aplicação de fertilizantes. No caso de a inoculação levar a planta a absorver/acumular mais nutrientes, pode haver esgotamento mais rápido das reservas do solo, o que aumentaria a demanda por adubações de manutenção.

Os estudos envolvendo a prospecção e aplicação de MSK podem ser considerados ainda incipientes no Brasil e há um grande potencial tecnológico a ser explorado a partir de avanços do conhecimento nessa temática. Dentre os desafios para a aplicação de tecnologias microbiológicas de nutrição de plantas, destaca-se a necessidade de detecção/identificação dos mecanismos de ação sobre a disponibilidade de nutrientes no solo e sobre a nutrição/desenvolvimento das culturas em sistemas abertos (lavouras). Além disso, muito ainda há que se avançar na determinação de parâmetros de manejo otimizados, para melhor expressão dos benefícios potenciais desses microrganismos em diferentes ambientes e sistemas de produção, assim como na quantificação dos impactos de longo prazo.

O cenário futuro da agropecuária brasileira aponta para uma enorme e crescente demanda por fontes de potássio, expondo atualmente uma grande fragilidade, por causa da dependência quase total da importação de fertilizantes potássicos. Assim, pelo exposto nesta publicação, verifica-se a oportunidade e conveniência de o Brasil investir em pesquisas para a seleção de microrganismos capazes de solubilizar o potássio presente nos minerais em formas indisponíveis às plantas. Em etapas subsequentes, tem-se a demanda de pesquisas para o desenvolvimento de processos de produção de inoculantes contendo esses microrganismos, bem como de ajustes tecnológicos e de otimização para sua aplicação direta nos sistemas de produção agropecuários ou na composição de rotas alternativas para obtenção de fertilizantes.

Referências

ALI, A. M.; AWAD, M. Y. M.; HEGAB, S. A.; EL GAWAD, A. M. A.; EISSA, M. A. Effect of potassium solubilizing bacteria (*Bacillus cereus*) on growth and yield of potato. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 3, p. 411-420, 2021. DOI: https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1822399.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**. São Paulo, 2019.

ASHFAQ, M.; HASSAN, H. M.; GHAZALI, A. H. A.; AHMAD, M. Halotolerant potassium solubilizing plant growth promoting rhizobacteria may improve potassium availability under saline conditions. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 11, article 697, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s10661-020-08655-x.

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: https://doi.org/10.1093/jxb/erj034.

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.

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. (ed.). **Plant growth promoting rhizobacteria for agricultural sustainability**. Singapore: Springer, 2019. p. 257-265. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-7553-8 13.

BAKHSHANDEH, 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: https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.008.

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: https://doi.org/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: https://doi.org/10.1007/s10705-010-9372-6.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Mineração. **Sumário mineral 2017**. Brasília, DF, 2018. v. 37, 211 p. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumariomineral_2017. Acesso em: 10 ago. 2021.

CARA, D. V. C.; RIZZO, A. C. L.; CUNHA, C. D.; ROCHA, D. L.; LEONEL, R. S.; SÉRVULO, E. F. C. Isolation of bacterial cultures from *Helianthus* annuus L. rhizosphere and assessment of bioweathering of verdete (Glauconitic Sandstone). **International Journal of Engineering & Technology**, v. 15, n. 6, p. 11-18, 2015.

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).

CONTINI, E.; ARAGÃO, A. **O** agro brasileiro alimenta 800 milhões de pessoas. Disponível em: https://www.beefpoint.com.br/o-agro-brasileiro-alimenta-800-milhoes-de-pessoas/. 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: https://doi.org/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: https://doi.org/10.4067/S0718-95162017000400005.

GLOBALFERT. **Importação de fertilizantes bate recorde em 2020**. Análises. Disponível em: https://www.globalfert.com.br/analises/importacao-de-fertilizantes-bate-recorde-em-2020/. Acesso em: 9 mar. 2021.

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: https://doi.org/10.1002/jpln.201200287.

HAN, H. S.; SUPANJANI; LEE, K. D. Effect of co-inoculation with phosphate and potassium solubilizing bacteria on mineral uptake and growth of pepper and cucumber. **Plant, Soil and Environment**, v. 52, n. 3, p. 130-136, 2006. DOI: https://doi.org/10.17221/3356-PSE.

HEDRICH, R. Ion channels in plants. **Physiological Reviews**, v. 92, n. 4, p. 1777-1811, 2012. DOI: https://doi.org/10.1152/physrev.00038.2011.

KHANI, A. G.; ENAYATIZAMIR, 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: https://doi.org/10.1111/lam.13132.

KOUR, D.; RANAA, K. L.; KAURA, T.; YADAVB, 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. (ed.). **New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering**. Amsterdam: Elsevier, 2020. p. 177-202. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820526-6.00012-9.

LIAN, B.; FU, P. Q.; MO, D. M.; LIU, C. Q. A comprehensive review of the mechanism of potassium release by silicate bacteria. **Acta Mineralogica Sinica**, v. 22, n. 2, p. 179-183, 2002.

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: https://doi.org/10.1080/01490451.2011.576602.

LODI, L. A. **Solubilização biológica de rocha potássica para aplicação como biofertilizante**. 2020. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

LOPES, A. S. Mineralogia do potássio em solos do Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1982, Londrina. **Anais**... Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato: Instituto Internacional da Potassa, 1982. p. 51-65.

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: https://doi.org/10.1139/w10-044.

MAITY, A.; SHARMA, J.; PAL, R. K. Novel potassium solubilizing bio-formulation improves nutrient availability, fruit yield and quality of pomegranate (*Punica granatum L.*) in semi-arid ecosystem. **Scientia Horticulturae**, v. 255, p. 14-20, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.009.

MALAVOLTA, E. Potássio: absorção, transporte e redistribuição na planta. In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2., 2004, São Pedro, SP. **Potássio na agricultura brasileira**: anais. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p. 179-238.

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: https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2 1.

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: https://doi.org/10.1080/01490451.2016.1186762.

MOTTA. M. B. (org.). **Avaliação do potencial de potássio no Brasil**: área Bacia do Amazonas, setor centro-oeste, estados do Amazonas e Pará. Manaus: CPRM, 2020. 124 p. (Insumos Minerais para Agricultura, 23). Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/21740. Acesso em: 10 ago. 2021.

NASCIMENTO, M.; LOUREIRO, F. E. L. **Fertilizantes e sustentabilidade**: o potássio na agricultura brasileira, fontes e rotas alternativas. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2004. 66 p. (Série Estudos e Documentos, 61).

OLIVEIRA, L. A. M. Potássio. In: BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Mineração. **Sumário mineral 2008**. Brasília, DF, 2009. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-

PADMA, S. D.; SUKUMAR, J. Response of mulberry to inoculation of potash mobilizing bacterial isolate and other bio-inoculants. **Global Journal of Bio-Science and Biotechnology**, v. 4, n. 1, p. 50-53, 2015.

PARMAR, P.; SINDHU, S. S. Potassium solubilization by rhizosphere bacteria: influence of nutritional and environmental conditions. **Journal of Microbiology Research**, v. 3, n. 1, p. 25-31, 2013. DOI: https://doi.org/10.5923/j.microbiology.20130301.04.

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.

PRAJAPATI, K.; SHARMA, M. C.; MODI, H. A. Growth promoting effect of potassium solubilizing microorganisms on *Abelmoscus esculantus*. **International Journal of Agricultural Science**, v. 3, p. 181-188, 2013.

SAGA CONSULTORIA. **Potássio**: reservas, mercado e produção. Disponível em: https://sagaconsultoria.com/potassio-reservas-mercado-e-producao/. Acesso em: 9 ago. 2021.

SAHA, M.; MAURYA, B. R.; MEENA, V. S.; BAHADUR, I.; KUMAR, A. Identification and characterization of potassium solubilizing bacteria (KSB) from Indo-Gangetic Plains of India. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 7, p. 202-209, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.06.007.

SANGEETH, K. P.; BHAI, R. S.; SRINIVASAN, V. *Paenibacillus glucanolyticus*, a promising potassium solubilizing bacterium isolated from black pepper (*Piper nigrum L.*) rhizosphere. **Journal of Spices and Aromatic Crops**, v. 21, n. 2, p. 118-124, 2012.

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: https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.09.012.

SHARMA, A.; SHANKHDHAR, D.; SHANKHDHAR, S. C. Potassium-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in potassium solubilization and uptake. In: MEENA, V. S.; MAURYA, B. R.; VERMA, J. P.; MEENA, R. S. (ed.). **Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture**. New Delhi: Springer, 2016. p. 203-219.

SHENG, X. F.; HE, L. Y. Solubilization of potassium bearing minerals by a wild type strain of *Bacillus edaphicus* and its mutants and increased potassium uptake by wheat. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 52, n. 1, p. 66-72, 2006. DOI: https://doi.org/10.1139/w05-117.

SHENG, X. F.; HUANG, W. Y. Study on the conditions of potassium release by strain NBT of silicate bacteria. **Scientia Agricultura Sinica**, v. 35, n. 6, p. 673-677, 2002.

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: https://doi.org/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 aesti-vum L.*): a hydroponics study under phytotron growth chamber. **Journal of Plant Nutrition**, v. 33, p. 1236-1251, 2010. DOI: https://doi.org/10.1080/01904161003765760.

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.

SUBHASHINI, D. V.; KUMAR, A. Phosphate solubilising *Streptomyces spp* obtained from the rhizosphere of Ceriops decandra of Corangi mangroves. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 84, n. 5, p. 12-16, 2014.

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: https://doi.org/10.1016/S0032-9592(99)00132-6.

VERMA, J. P.; JAISWA, D. K.; MEENA, V. S.; MEENA, R. S. Current need of organic farming for enhancing sustainable agriculture. **Journal of Cleaner Production**, v. 102, p. 545-547, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.035.

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 (*Gossyoium hirsutum*). **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 110, p. 1-8, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j. jphotobiol.2012.02.002.

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: https://doi.org/10.1080/01490451.2011.581333.

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: https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.05.002.

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: https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008.









