

SOLUBILIZAÇÃO BIOLÓGICA DE POTÁSSIO POR *Burkholderia cepacia* A PARTIR DE RESÍDUOS DE ROCHAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

BIOLOGICAL SOLUBILIZATION OF POTASSIUM BY *Burkholderia cepacia* FROM ROCK RESIDUES FROM THE STATE OF RIO DE JANEIRO.

DOI: 10.24933/rep.v9i1.525

ROCHA, Daniele Leonel ¹; SOUZA, Karolayne dos Santos^{2,3}; CUNHA, Cláudia Duarte ¹;

¹ Pesquisadora do Centro de Tecnologia Mineral

² Bolsista de Iniciação Científica do Centro de Tecnologia Mineral

³ Graduanda Universidade Federal do Rio de Janeiro

dleonel@cetem.gov.br

RESUMO. A solubilização biológica de potássio na presença da estirpe bacteriana *Burkholderia cepacia* ATCC 25416 foi avaliada em ensaios *in vitro* a partir de resíduos de rochas oriundas do Estado do Rio de Janeiro. Primeiramente, foram realizados ensaios de teste de formação de halo em placa de Petri para identificação do potencial de biossolubilização de potássio por esta estirpe bacteriana. Posteriormente, com o objetivo principal de aprimorar a biodisponibilização do potássio, foi realizado um planejamento fatorial 2², tendo como variáveis a densidade de polpa e a agitação, durante o período de 20 dias. Foi possível observar a formação de halo nas placas contendo os diferentes resíduos de rocha, indicando a produção de ácidos orgânicos, sendo obtidos os índices de solubilização de 2,31 e 2,47 para os resíduos oriundos de Magé e Itaguaí, respectivamente. Nos ensaios de biossolubilização, foi obtida a extração média de 1155mg/kg para o resíduo oriundo de Magé e 1210 mg/kg para o resíduo oriundo de Itaguaí, ambos na condição de menor densidade de polpa (1% v/v) e maior agitação (150 rpm). Tais resultados foram confirmados pela análise estatística, onde a menor densidade de polpa e a maior agitação apresentaram maior significância estatística, influenciando positivamente na remoção do potássio contido nos resíduos.

Palavras Chave: Potássio, Biossolubilização, Microrganismos, Resíduos de Rochas.

ABSTRACT. The biological solubilization of potassium by the bacterial strain *Burkholderia cepacia* ATCC 25416 was investigated through *in vitro* assays using rock residues originating from the State of Rio de Janeiro. Initially, qualitative plate assays were performed to evaluate the potassium biosolubilization potential of the strain, based on halo formation. Subsequently, with the objective of optimizing potassium bioavailability, a 2² factorial design was conducted, considering pulp density and agitation as independent variables over a 20-day incubation period. Halo formation was observed on plates containing the different rock residues, indicating the production of organic acids, with solubilization indices of 2.31 and 2.47 for the Magé and Itaguaí residues, respectively. In the biosolubilization assays, mean potassium extractions of 1155 mg/kg (Magé) and 1210 mg/kg (Itaguaí) were obtained under the conditions of lower pulp density and higher agitation (150 rpm). Statistical analysis corroborated the experimental results, demonstrating that lower pulp density combined with higher agitation exerted a significant positive effect on potassium release from the rock residues.

Keywords: Potassium, Biosolubilization, Microorganisms, Rock Residues.

INTRODUÇÃO

O agronegócio contribui significativamente para o progresso econômico do país, uma vez que o Brasil apresenta grande diversidade decorrente de suas características e heterogeneidade, tanto de solo quanto de clima, além de possuir extensas áreas cultiváveis (PINHEIRO JUNIOR & BISPO, 2019). Por conseguinte, o Brasil é o quarto maior produtor mundial de alimentos, sendo responsável por 8% do consumo global de fertilizantes, ficando atrás apenas da China, Índia e Estados Unidos. Porém, a produção nacional não supre a demanda necessária para a agricultura, sendo necessária a importação de fertilizantes. De acordo com Cardoso *et al.* (2025), em 2024, o Brasil importou 90% dos fertilizantes consumidos (N, P, K), sendo a dependência ainda mais crítica no caso do, cuja produção interna atendeu apenas 3% da demanda nacional. Nesse contexto, o país importou aproximadamente 6,80 milhões de toneladas de KCl (K₂O contido), enquanto a produção nacional foi de apenas 250 mil toneladas (BRASIL, 2022).

Esse quadro de elevada dependência externa foi agravado pelo expressivo aumento dos preços dos fertilizantes em 2022, que alcançou 92,76% em relação ao primeiro semestre de 2021, em função da redução da oferta mundial, intensificada pelos impactos da guerra no Leste Europeu. A elevação dos custos dos insumos refletiu diretamente nos custos de produção agrícola, encarecendo o produto final (CASTRO, *et al.*, 2022; POSSAMAI & SERIGATI, 2022). Diante dessas vulnerabilidades, o Brasil instituiu o Grupo de Trabalho Interministerial responsável pela elaboração do Plano Nacional de Fertilizantes (GTI-PNF), com o objetivo de fortalecer políticas públicas voltadas à ampliação da competitividade da produção e da distribuição de fertilizantes no país (CALIGARIS, *et al.*, 2022).

Devido à alta dependência externa do potássio, uma das diretrizes propostas no PNF, estabelece que o Brasil deve implementar políticas para viabilizar investimentos em PD&I e na produção em larga escala de remineralizadores e outras fontes alternativas de K₂O oriundas de rochas silicáticas (BRASIL, 2022). Entretanto, diversos fatores limitam a utilização do pó de rocha como fonte alternativa de nutrientes para o solo, entre eles, destacam-se a complexidade da composição mineralógica das rochas, a localização geográfica dos depósitos em relação às áreas de aplicação, bem como o comportamento dessas rochas na interação com o ambiente onde serão aplicadas (DALMORA, *et al.*, 2020), constituindo os principais desafios associados a essa técnica.

Diante desses desafios, uma alternativa promissora à aplicação direta de pó de rocha no solo é o desenvolvimento de processos de bioengenharia para a obtenção de potássio em solução a partir de diferentes tipos de rochas. Essa abordagem visa à obtenção de fertilizantes de forma ambientalmente segura, configurando uma estratégia sustentável e inovadora para a agricultura moderna (BABAR, *et al.*, 2024; BENEDUZI *et al.*, 2013; BRASIL, 2022; MEENA *et al.*, 2015; RIBEIRO, *et al.*, 2020). Nesse contexto, a biossolubilização de nutrientes, como o potássio presente nas rochas, desponta como uma solução. Esse processo biológico consiste no uso de microrganismos que produzem ácidos orgânicos ou metabólitos capazes de solubilizar o potássio presente nos minerais. Tais ácidos geram prótons que promovem a dissolução do potássio insolúvel presente em minerais como feldspato, biotita, muscovita e ortoclásio, convertendo-o em uma forma solúvel e, portanto, disponível para as plantas. Na literatura são reportados diferentes trabalhos que destacam a potencialidade de microrganismos capazes de solubilizar elementos presentes nas rochas por meio da liberação de subprodutos derivados do metabolismo microbiano (YEDAV, *et al.*, 2014; SCHUELER, *et al.*, 2021). Ao promoverem a dissolução do mineral e/ou degradação de rochas, esses

microrganismos aumentam a liberação dos elementos contidos em sua estrutura (SAMUELS, *et al.*, 2020).

Somando-se aos benefícios da disponibilização de potássio oriundo de pós de rocha como fertilizantes (CASTRO, 2011), podemos destacar ainda o potencial de reaproveitamento de resíduos da mineração, como os oriundos de pedreiras provenientes da produção de agregados. Dessa forma, estudos de bio-solubilização aplicados a resíduos minerais provenientes da mineração abrem possibilidades de reaproveitamento e valorização de material que seria descartado, impulsionando a economia circular e fortalecendo a resiliência dos sistemas produtivos ao diversificar fontes de matéria-prima e reduzir a dependência de recursos escassos (ODA, *et al.*, 2024).

Estudos que demonstrem a potencialidade de uso desses resíduos como remineralizadores ou de aplicação em processos biotecnológicos de disponibilização de potássio, podem gerar benefícios mútuos para o ambiente e para a agricultura. Assim, o presente estudo realizou ensaios de bio-solubilização *in vitro* na presença da estirpe *Burkholderia cepacia* ATCC 25416, com o objetivo de avaliar a potencialidade de diferentes resíduos de rochas oriundas de pedreiras do Estado do Rio de Janeiro, na bio-disponibilização de potássio.

METODOLOGIA

Rochas

Os resíduos utilizados no presente estudo foram gentilmente cedidos pela Empresa Magé Mineradora (Magé) e pela Mineradora Santa Luzia (Itaguaí) apresentando 3,7%, 3,4%, de K₂O contido, respectivamente.

Ensaios de difração de raios X, realizados pelo setor de Caracterização Tecnológica do CETEM, identificaram as fases minerais, apresentadas na Tabela 1. As composições mineralógicas das amostras Magé e Itaguaí são bastante semelhantes, sendo constituídas principalmente por quartzo, biotita, ortoclásio, albita, caulinita, hornblenda (BERTOLINO, 2023):

Tabela 1. Composição mineralógica das amostras.

Amostra	Mineralogia
Magé	Quartzo, biotita, ortoclásio, albita, caulinita, hornblenda
Itaguaí	Quartzo, biotita, ortoclásio, albita, caulinita, hornblenda

Para o preparo das amostras, o material foi submetido à moagem em moinho de rolo, seguido por moinho de discos. Posteriormente foi realizada a distribuição granulométrica por peneiramento em um agitador de peneira RoTap, com o objetivo de confirmar o enquadramento na faixa granulométrica de 0,3 a 2,0 mm, atendendo a quantidade mínima estabelecida pela Instrução Normativa nº 5 do MAPA, de 10 de março de 2016, para fins comparativos em ensaios futuros com o uso da rochagem (Tabela 2).

Tabela 2. Especificações de natureza física do remineralizadores.

Peneira	Partículas passantes (peso/peso)
2,0 mm (ABNT nº 10)	100%
0,84 mm (ABNT nº 20)	70% mínimo
0,3 mm (ABNT nº 50)	50% mínimo

Fonte: MAPA, 2016 (adaptado).

Microorganismo

Para a realização dos ensaios de biossolubilização de potássio foi utilizada a estirpe bacteriana *Burkholderia cepacia* ATCC 25416, oriunda do banco de coleção de culturas do Laboratório de Biotecnologia (LABIOTEC) do CETEM. A seleção dessa estirpe baseou-se em uma revisão da literatura que destaca a capacidade de determinados microrganismos de produzir ácidos orgânicos e substâncias poliméricas extracelulares, favorecendo a solubilização de nutrientes presentes em minerais (MEENA *et al.*, 2015, PADHAN *et al.*, 2019, BASAK *et al.*, 2020).

Teste de formação de halo

Buscando evidenciar a capacidade de produção de ácido pela estirpe bacteriana *Burkholderia cepacia* ATCC 25416, foi realizado um teste de formação de halo, como descrito por Rajawat *et al.* (2016). Para isso, foi adicionado ao meio de cultivo *Bushnell Haas* modificado solidificado com agar ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,2 g/L; CaCl_2 0,02 g/L; NaNO_3 0,88 g/L; Na_2HPO_4 1,35 g/L; NaH_2PO_4 0,88 g/L; Agar 15g/L; pH 7) acrescido de 30 g/L de glicose, o corante azul de bromotimol na concentração de 0,25% (v/v). Placas de *Petri* contendo aproximadamente 20ml desse meio de cultivo foram preparadas, às quais foram adicionados, individualmente, 2g/L dos pós de rocha de Itaguaí e Magé, como única fonte de potássio no sistema. Em seguida, cerca de 20 μL da suspensão bacteriana preparada a partir de um pré inóculo de 24h foi adicionada às placas de *Petri* que foram incubadas a 30°C por 48h. Os ensaios foram realizados em triplicata e após o período de incubação, as placas foram avaliadas visualmente e foram mensurados os diâmetros das colônias e dos halos formados. A capacidade de solubilização foi determinada por meio do cálculo do índice de solubilização (IS), obtido pela razão entre o diâmetro do halo e o diâmetro da colônia. Dessa forma, a capacidade de solubilização foi caracterizada como baixa ($\text{IS} < 2,00$), intermediária ($2,00 \leq \text{IS} < 4,00$) e alta ($\text{IS} \geq 4,00$) (PÉREZ-PÉREZ *et al.*, 2021; GUIEIRO, 2022).

Ensaios de Biossolubilização

Os ensaios foram conduzidos em frascos Erlenmeyer de 250 mL contendo 100 mL de meio *Bushnell Haas* modificado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,2 g/L; CaCl_2 0,02 g/L; NaNO_3 0,88 g/L; Na_2HPO_4 1,35 g/L; NaH_2PO_4 0,88 g/L; pH 7) acrescido de 30 g/L de glicose, utilizando o resíduo das rochas supracitadas como a única fonte de potássio no sistema. Para isso, foi realizado um planejamento experimental completo 2^2 , contendo duas variáveis, dois níveis e dois pontos centrais, totalizando 10 ensaios. Com o objetivo de selecionar as variáveis significativas para a remoção de potássio nos ensaios de biossolubilização, foram consideradas como variáveis independentes X_1 = agitação (estático e 150rpm) e X_2 = densidade de polpa (1% e 10% m/v). A matriz expandida do planejamento fatorial empregado está apresentada na Tabela 3. Como controle abiótico, foram realizados ensaios em duplicata para cada tratamento na ausência do microrganismo.

Tabela 3. Matriz expandida do planejamento experimental 2².

Ensaio	X ₁	X ₂
	Agitação (rpm)	Densidade de Polpa (% m/V)
1	0 (-1)	1 (-1)
2	0 (-1)	10 (+1)
3	150 (+1)	1 (-1)
4	150 (+1)	10(+1)
5	75 (PC)	5,5(PC)
6	0 (-1)	1 (-1)
7	0 (-1)	10 (+1)
8	150 (+1)	1 (-1)
9	150 (+1)	10(+1)
10	75 (PC)	5,5(PC)

O inóculo foi adicionado a 10% (v/v) a partir de um cultivo prévio de 24h no mesmo meio. Para tanto, os frascos foram incubados nas condições estabelecidas no planejamento e, após 20 dias de incubação a 30°C, as amostras foram coletadas para determinação do pH e quantificação de K por espectrometria de absorção atômica. O período de incubação de 20 dias foi definido com base na literatura, que indica que ensaios de biossolubilização de K são comumente conduzidos entre 7 e 28 dias, intervalo considerado suficiente para adaptação microbiana, produção de metabólitos e estabilização da liberação de K a partir de minerais silicáticos (BISWAS & BASAK, 2014; MEENA *et al.*, 2015; MURSYIDA *et al.*, 2015; SCHUELER, *et al.*, 2021).

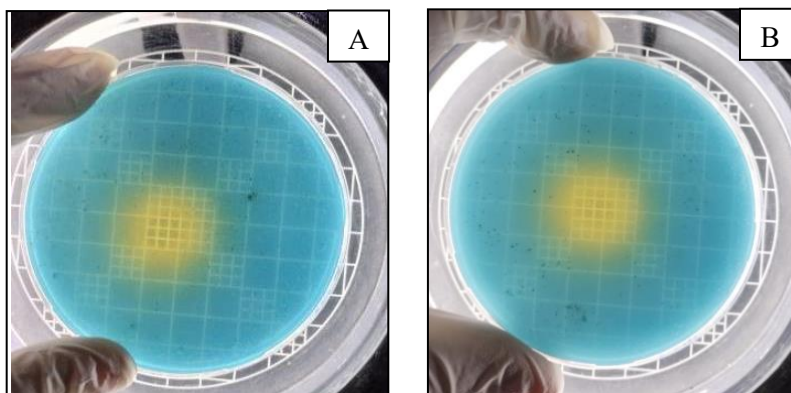
Para o preparo das amostras destinadas à análise química, foi realizada uma etapa prévia com adição de 4 mL de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) nos frascos que continham microrganismos, seguida de aquecimento por 20 minutos, para liberação do K retido nas substâncias poliméricas extracelulares presentes (LIU *et al.*, 2006). Em seguida, todas as amostras foram centrifugadas a 7000 rpm, a 4 °C, por 20 minutos, e os sobrenadantes filtrados em membranas de 0.22 µm. A quantificação de potássio foi realizada no Laboratório de Análises Químicas (COAMI/CETEM), utilizando a técnica de espectrometria de absorção atômica com chama de ar-acetileno.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teste de formação de halo

Após o período de 48h foram avaliados os halos formados pela estirpe bacteriana *Burkholderia cepacia* ATCC 25416 em placas de Petri contendo meio de cultivo e o corante azul de bromotimol, utilizando os pós das rochas de Magé e Itaguaí como única fonte de potássio. Como resultado, foi possível observar a mudança de coloração e a formação de halo em todas as placas (Figura 1), indicando a produção de ácidos pelo microrganismo.

Figura 1 – Teste de formação de halo para *Burkholderia cepacia* ATCC 25416 em Placas de Petri contendo os pós de rocha de Magé (A) e Itaguaí (B).



Fonte: Próprio autor.

Após a medição dos diâmetros das colônias e dos halos formados, foram calculados os índices de solubilização, que estão apresentados na Tabela 4. Os valores obtidos se encontraram dentro da faixa de classificação intermediária ($2,00 \leq IS \leq 4,00$). Entre as amostras avaliadas, o resíduo oriundo de Itaguaí apresentou o maior índice, alcançando o valor de 2,47. De forma semelhante, Pérez- Pérez *et al.* (2021) realizaram ensaios de formação de halo e cálculo do índice de solubilização, e relataram que os maiores valores de IS ocorreram na presença de rocha feldspática quando comparado com rocha de muscovita. Assim, testes de formação de halo podem ser utilizados como critério para seleção de microrganismos isolados para ensaios de biossolubilização, além de permitirem confirmar a capacidade dos microrganismos de produzir ácidos que auxiliam na biodisponibilização do potássio presente nas rochas (PAULA *et al.*, 2013; NASCIMENTO *et al.*, 2023).

No presente trabalho, conforme descrito anteriormente, foi possível observar a formação de halos em todas as placas contendo os diferentes pós de rocha, indicando a produção de ácidos orgânicos pela estirpe. Dessa forma, pode-se considerar a estirpe *Burkholderia cepacia* ATCC 25416 como potencial biossolubilizadora de potássio em ensaios *in vitro*, uma vez que um dos mecanismos de solubilização ocorre por troca iônica entre os íons (H^+) liberados pelos ácidos e o potássio presente nos minerais (K^+) (AKASAH & CHOU, 2023).

Tabela 4. Diâmetros das colônias e halos formados por *Burkholderia cepacia* ATCC 25416 em placas de Petri contendo os pós de rocha de Magé e Itaguaí, após o período de 48h e o índice de solubilização calculado.

Microorganismo	Pó de rocha	Triplicata	Diâmetro Colônias (cm)	Média diâmetro da colônia	Diâmetro Halo (cm)	Média halo	IS
<i>B. cepacia</i>	Magé	1	1,00	1,02	2,30	2,35	2,30
		2	1,10		2,50		
		3	0,95		2,25		
	Itaguaí	1	1,00	0,95	2,40	2,35	2,47
		2	1,10		2,70		
		3	0,75		1,95		

Ensaio de biossolubilização

Foram obtidos resultados positivos de remoção de potássio em todos os ensaios realizados com densidades de polpa de 1% e 10%, tanto nas condições sob agitação quanto estática, na presença da bactéria *Burkholderia cepacia*. Vale destacar que o pH de todos os ensaios apresentou queda ao final do experimento, permanecendo abaixo 5, o que indica a produção de ácidos pelo microrganismo.

As maiores médias de remoção de potássio foram observadas na condição de agitação a 150 rpm e densidade de polpa de 1%, alcançando 1155mg/kg para o resíduo de Magé e 1210 mg/kg para o resíduo de Itaguaí. Para os ensaios contendo 10% de densidade de polpa, as maiores médias foram de 439 mg/kg e 251mg/kg, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5. Remoção de potássio em mg/kg e em porcentagem para os resíduos de Magé e Itaguaí, na presença da bactéria *B.cepacia*, nas diferentes condições aplicadas no planejamento fatorial.

Ensaio	Condições		Remoção de K - Magé			Remoção de K - Itaguaí		
	Agitação (rpm)	Densidade de Polpa (% m/v)	mg/kg	%	pH final	mg/kg	%	pH final
1	0	1	790,0	2,6	2,5	670,0	2,4	2,5
2	0	10	212,0	0,7	3,0	221,0	0,8	3,0
3	150	1	1200,0	3,9	2,5	1270,0	4,5	3,0
4	150	10	372,0	1,2	3,0	248,0	0,9	4,0
5	75	5,5	903,6	2,9	3,0	402,7	1,4	3,5
6	0	1	790,0	2,6	3,0	840,0	3,0	3,0
7	0	10	188,0	0,6	3,0	201,0	0,7	3,0
8	150	1	1110,0	3,6	3,0	1150,0	4,1	4,0
9	150	10	506,0	1,6	3,0	254,0	0,9	4,0
10	75	5,5	1065,0	3,5	3,0	422,7	1,5	3,8

Dados:

Remoção de K para o controle abiótico – (Magé): 1% m/v+ estático= 425mg/kg; 10% m/v+ estático= 238mg/kg; PC= 207,3 mg/kg; 1% m/v+ 150rpm= 730mg/kg; 10% m/v+ 150rpm= 117mg/kg. (Itaguaí): 1% m/v+ estático= 520mg/kg; 10% m/v+ estático=135mg/kg; PC= 241mg/kg; 1% m/v+150rpm= 520mg/kg; 10% m/v+150rpm= 210mg/kg.

De acordo com Sharma *et. al* (2024) e Jini *et al.* (2024), os microrganismos são capazes de disponibilizar o potássio através de diferentes mecanismos, incluindo a produção de ácidos orgânicos, a produção de substâncias poliméricas extracelulares e por reações de oxirredução. No presente estudo, a queda do pH observada ao final dos ensaios sugere que a acidólise foi um dos principais mecanismos de solubilização. Tal resultado é ratificado pelo teste de formação de halo, no qual *B. cepacia* demonstrou capacidade de produzir ácidos orgânicos.

De acordo com a literatura, *B. cepacia* é conhecida também como produtora de substâncias poliméricas extracelulares (EPS) (MEENA *et al.*, 2015, PADHAN *et al.*, 2019, BASAK *et al.*, 2020). Conforme destacado por Dong *et al.* (2022), o EPS estabelece uma interface entre as células e os minerais, permitindo maior aderência e promovendo a formação de um complexo bactéria-mineral. Esse complexo altera o microambiente próximo a superfície da rocha, podendo gerar um ambiente mais ácido, e consequentemente, deslocar o equilíbrio químico em favor da dissolução do mineral.

Sun *et al.* (2020) relataram a remoção de 17,5 mg/kg de potássio a partir de uma rocha feldspática contendo 8% de K₂O, utilizando *B.cepacia* em ensaios de 7 dias, com 5g de pó de rocha (0,15mm), incubados em 50mL de meio de cultivo sob agitação a 150rpm. Esses valores são significativamente menores que os obtidos no presente estudo sob condições

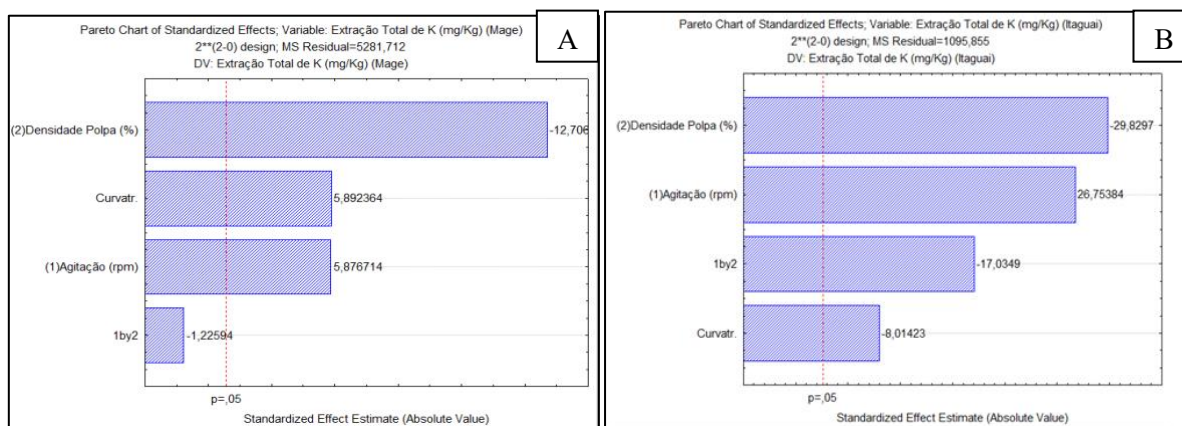
equivalentes de densidade de polpa (10%) e agitação (150 rpm). Entretanto, deve-se considerar que o tempo de tratamento foi bem menor, o que possivelmente contribuiu para a menor eficiência de extração observada.

Outros fatores experimentais, como a granulometria, área superficial disponível e pré-tratamentos também influenciam fortemente a eficiência da biossolubilização. Lodi, *et al* (2021) demonstraram remoção de 15,87% de potássio de uma rocha feldspática (8,35% de K_2O contido) utilizando *Aspergillus niger* e empregando partículas menores que 1 μm . Os autores atribuíram altos valores obtidos à maior área de reação após cisalhamento mecânico, o que aumentou a acessibilidade aos ácidos orgânicos e potencializou a interação da biomassa com o mineral.

Esses resultados reforçam que a eficiência da biossolubilização depende de múltiplos fatores físico-químicos e biológicos, devendo ser ajustada conforme o tipo de rocha e microrganismo utilizado.

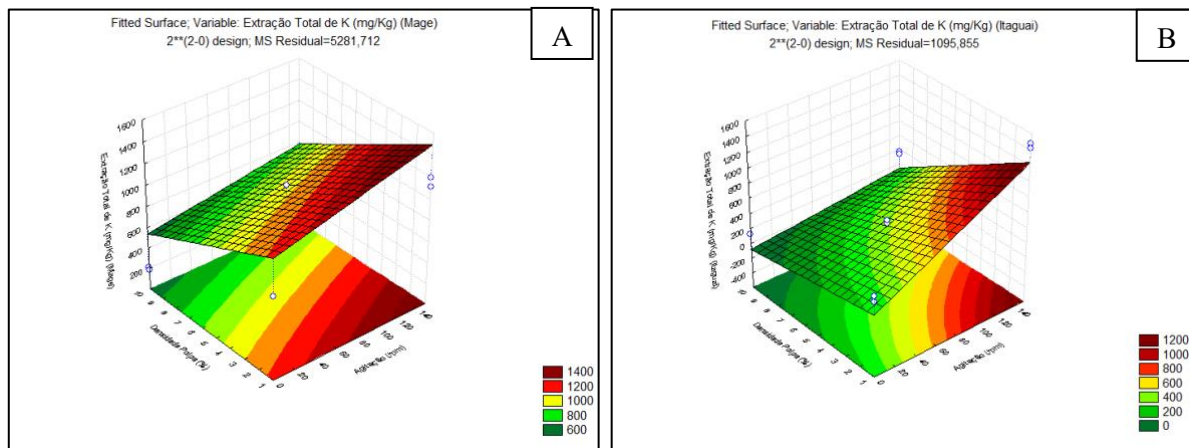
A análise estatística do planejamento experimental revelou que ambas as variáveis avaliadas, densidade de polpa e agitação, apresentaram significância estatística. A densidade de polpa apresentou efeito negativo, enquanto a agitação apresentou efeito positivo na remoção de potássio, conforme demonstrado no diagrama de Pareto (Figura 2). Esses resultados reforçam que, com a redução da densidade de polpa e aumento da agitação, há um aumento na eficiência do processo de biossolubilização de potássio.

Figura 2- Diagrama de Pareto dos efeitos estimados da remoção de K das rochas de Magé (A) e Itaguaí (B) por *Burkholderia cepacia*.



Essa tendência é confirmada pelas superfícies de resposta geradas, que evidenciam a predominância de maiores valores de extração nos ensaios com menor relação sólido/líquido e maior agitação (Figura 3). Tais resultados indicam que densidades de polpa mais elevadas podem dificultar a biossolubilização, seja por barreira física à interação célula-mineral, seja por alterações químicas no sistema.

Figura 3- Gráfico de superfície de resposta para as variáveis agitação e densidade de polpa, obtido pelo planejamento experimental completo 2^2 , para os dois tipos de pós de rocha, na presença do microrganismo *B. cepacia*. (A) resíduo proveniente de Magé, (B) resíduo proveniente de Itaguaí.



Fonte: Próprio autor.

A solubilização biológica é um processo dinâmico e multifatorial, que pode ser influenciado por diferentes parâmetros operacionais, característica do resíduo e pelo metabolismo microbiano. Os resultados deste estudo demonstram que *B. cepacia* apresenta potencial para atuar como agente biossolubilizador de potássio, sendo favorecida pela baixa densidade de polpa, pelas condições de agitação, pela capacidade de produzir ácidos orgânicos e pela possível contribuição na produção de EPS que favorece a interação com os minerais. Apesar do desempenho promissor, estudos adicionais são necessários, especialmente aqueles que avaliem diferentes granulometrias, estratégias de pré-tratamento mineral, otimização da produção de EPS e o escalonamento do processo para sistemas contínuos. Tais abordagens poderão contribuir para o desenvolvimento de processos biotecnológicos mais eficientes na disponibilização de potássio a partir de resíduos de rocha, fortalecendo alternativas sustentáveis para a produção de fertilizantes.

CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que a estirpe *Burkholderia cepacia* ATCC 25416 apresenta capacidade de biossolubilizar potássio a partir de resíduos de rocha, e que as condições de menor densidade de polpa (1%) e agitação de 150 rpm foram as mais eficientes segundo o planejamento experimental, tanto para o resíduo proveniente de Itaguaí (remoção de 1155 mg/kg) quanto para o de Magé (1210 mg/kg). Esses resultados reforçam o potencial do uso de microrganismos como alternativa sustentável para a disponibilização de potássio, evidenciando a viabilidade de agregar valor a resíduos minerais por rotas biotecnológicas. Além disso, o estudo contribui para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis voltadas à produção nacional de fertilizantes, alinhadas aos princípios da economia circular. Apesar dos resultados promissores, novos estudos são recomendados, especialmente aqueles voltados a otimização dos principais fatores que afetam o processo de biossolubilização, como granulometria, relação sólido/líquido, tempo de tratamento e otimização da produção de EPS, para melhorar a eficiência e avançar no escalonamento do processo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM - MCTI) pela infraestrutura disponibilizada, à COAMI/CETEM pela execução das análises e ao pesquisador Luiz Carlos Bertolino pela caracterização das rochas. Agradecem também à Empresa Magé Mineradora (Magé) e a Mineradora Santa Luzia (Itaguaí) pelo fornecimento das amostras, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação do Ministério da Ciência e Tecnologia (SETEC/MCTI), pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

AKASAH, W; CHOU, L. S. Visual screening of potassium solubilizing bacteria for increasing the solubilization of potassium minerals. The 6th International Conference on Agriculture, Environment and Food Security. IOP Conf. Series: **Earth and Environmental Science**. v. 1241, 6 p., 2023.

BABAR, S.; BALOCH, A.; QASIM, M.; WANG, J.; WANG, X.; LI, Y.; KHALID, S.; JIANG, C. Unearthing the Soil-Bacteria Nexus to Enhance Potassium Bioavailability for Global Sustainable Agriculture: A Mechanistic Preview. **Microbiol. Res.** v. 288, p.127885, 2024.

BASAK, B. B.; MAITY, A.; RAY, P.; BISWAS, D. R.; ROY, S. Potassium supply in agriculture through biological potassium fertilizer: A promising and sustainable option for developing countries. **Archives of Agronomy and Soil Science**. v. 68, p. 101-114, 2020.

BENEDUZI, A.; MOREIRA, F.; COSTA, P. B.; VARGAS, L.K.; LISBOA, B.B.; FAVRETO, R.; BALDANI, J.I.; PASSAGLIA, L.M.P. Diversity and plant growth promoting evaluation abilities of bacteria isolated from sugarcane cultivated in the South of Brazil. **Appl. Soil Ecol.** v. 4, p. 94-104, 2013.

BERTOLINO, L. C.; LICURSI, E. A. Caracterização Mineralógica de Amostras de Rochas do Rio de Janeiro - Relatório Interno de Projeto. Rio de Janeiro, [s.n.], maio 2023

BISWAS, D. R.; BASAK, B. B. Mobilization of potassium from waste mica by potassium-solubilizing bacteria (*Bacillus mucilaginosus*) as influenced by temperature and incubation period under in vitro laboratory conditions. **Agrochimica**, v. LVIII - n. 4, 2014.

BRASIL. Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. Brasília: CNA, 2022. Disponível em: <https://cnabrasil.org.br/cna/panorama-do-agro>. Acesso em: 26/10/2022.

CALIGARIS, B. S. A.; RANGEL, L. E. P.; POLIDORO, J. C.; FARIAS, P. I. A importância do Plano Nacional de Fertilizantes para o futuro do agronegócio e do Brasil. **Revista de Política Agrícola**. Ano XXXI – n.1, 2022.

CARDOSO, V. M; PFEIFER, A, KENNEDY, H. J.; CHIODI, L.; JANK, M.S.; GOMES, G. C. Geopolítica Global dos Fertilizantes: Impactos sobre o agronegócio brasileiro. Comércio Internacional. **Agro Global**. n.7, 2025.

CASTRO, J. P. L.; LEANDRO, W. M.; BRIL, E. P. F.; FERREIRA, K. R. S; OLIVEIRA, C. B. A.; PASSOS, P. B. Eficiência Agronômica de Remineralizador do Solo de Micaxisto na Sucessão Milheto-Soja. Research, **Society and Development**. v. 11, n. 14, 2022.

DONG, H.; HUANG, L.; ZHAO, L.; ZENG, Q.; XIAOLEI, L.; SHENG, Y.; SHI, L.; WU, G.; JIANG, H.; LI, F.; ZHANG, L.; GUO, D.; LI, G.; HOU, W.; CHEN, H. A critical review of mineral–microbe interaction and co-evolution: mechanisms and applications. **Nacional Science Review**. v.9, nwac 128, 2022.

DALMORA, A. C.; RAMOS, C. G.; PLATA, L. G.; DA COSTA, M. L.; KAUTZMANN, R. M.; OLIVEIRA, L. F. S. Understanding the mobility of potential nutrients in rock mining by-products: An opportunity for more sustainable agriculture and mining. **Science of The Total Environment**, v.710, p. 136240. 2020.

GUIEIRO, C.S.M. **Eficiência de microrganismos para biossolubilização de agrominerais silicáticos *in vitro***. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias. Universidade Federal de São João Del-Rei. 70p. 2022.

JINI, D.; GANGA, V.S.; GREESHMA, M.B.; SIVASHANKAR, R.; THIRUNAVUKKARASU, A. Sustainable agricultural practices using potassium-solubilizing microorganisms (KSMs) in coastal regions: a critical review on the challenges and opportunities. **Environment Development and Sustainability**. v.26, p.13641–13664, 2024.

LIU, W.; XU, X.; WU, X.; YANG, Q.; LUO, Y.; CHRISTIE, P. Decomposition of silicate minerals by *Bacillus mucilaginosus* in liquid culture. **Environmental Geochemistry and Health**. v. 28, n. 1, p. 133–140, 2006.

LODI, L.A.; KLAIC, R.; BORTOLETTO-SANTOS, R. et al. Unveiling the Solubilization of Potassium Mineral Rocks in Organic Acids for Application as K-Fertilizer. **Appl Biochem Biotechnol**. v. 194, p. 2431–2447, 2021.

MEENA, V. S.; MAURYA, B. R.; VERMAC, J. P.; AEROND, A.; KUMARA, A.; KIM, K.; BAJPAIF, V. K. Potassium solubilizing rhizobacteria (KSR): isolation, identification, and K-release dynamics from wastewaters. **Ecological Engineering**. v. 81, p. 340-347, 2015.

MURSYIDA, E.; MUBARIK, N.R.; TIAHJOLEKS, A. Selection and identification of phosphate-potassium solubilizing bacteria from the area around the Limestone Mining in Cirebon Quarry. **Res. J. Microbiol**. v.10, p. 270–279, 2015.

NASCIMENTO, M.R.F.; ROCHA, D. L.; VIDEIRA, S. S.; SOUZA, I. M.; CUNHA, C. D. Biossolubilização de rochas e resíduos de rochas como fontes alternativas de fertilizantes para a agricultura. **Revista Ensaios Pioneiros**, v. 7, n. 2, 2023.

ODA, S.; ABREU, V.H.S.; SÁ FERNANDEZ, S.D., et al., Utilização de rejeitos de mineração na construção de pavimentos rodoviários. **Revista Matéria**, v.29, n.2, 2024.

PADHAN, D.; SEN, A.; KUNDU, R.; YADAV, V. K. Potassium solubilisation in soils: mechanisms, effect on plant growth and future prospects. **Current Research in Soil Fertility. AkiNikPublications.** Chapter 3, p. 37-59, 2019.

PAULA, A.M.; BECKER, A.S.; SILVA, E.J.; VENDRUSCOLO, E.C.G.; SANTOS, M.F. Potencial de solubilização de potássio em rochas moídas por bactérias isoladas de área de mata. **In: XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo.** Florianópolis, SC. Agosto de 2013.

PÉREZ-PÉREZ, R.; FORTE, I.H.; ; ÁLVAREZ, Y.O.Z.; BENÍTEZ, J. C.S.; CASTILLO, D. S.; MARTINEZ, S.P. Characterization of potassium solubilizing bacteria isolated from corn rhizoplane. **Agronomía Colombiana.** v. 39, n. 3, p. 415-425. 2021.

PINHEIRO JUNIOR, J.L.; BISPO, L.G. O agronegócio no brasil: uma análise sobre a relevância do agronegócio para o cenário econômico do país (2011 a 2016). **Revista de Administração de Roraima-UFRR, Boa Vista.** v. 9, n.2, p.265-286, 2019.

POSSAMAI, R.; SERIGATI, F. Como a relação comercial entre Brasil e Rússia foi afetada. **Mercado & Negócios, Agroanalysis.** v.42, n. 5, p. 14-15, 2022.

RAJAWAT, M. V. S.; SINGH, S.; TYAGI, S. P.; SAXENA, K. A Modified Plate Assay for Rapid Screening of Potassium-Solubilizing Bacteria. **Pedosphere.** v. 26, n. 5, p. 768-773, 2016.

RIBEIRO, I.D.A; VOLPIANO, C.G.; VARGAS, L.K.; GRANADA, C.E.; LISBOA, B.B.; PASSAGLIA, L.M.P. Use of Mineral Weathering Bacteria to Enhance Nutrient Availability in Crops: A Review. **Front Plant Sci.** v.11, 2020.

SAMUELS, T.; BRYCE, C.; LANDENMARK, H.; MARIE-LOUDON, C.; NICHOLSON, N.; STEVENS, A. H.; COCKELL, C. Microbial Weathering of Minerals and Rocks in Natural Environments. **Geophysical Monograph Series.** p. 59-79, 2020.

SCHUELER, T.A.; DOURADO, M.L.; VIDEIRA, S.S.; CUNHA, C.D.; RIZZO, A. C. L. Biosolubilization of verdete: An alternative potassium source for agriculture fertilizer. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology.** v. 34, p. 1-6, 2021.

SHARMA, R., SINDHU, S.S. & GLICK, B.R. Potassium Solubilizing Microorganisms as Potential Biofertilizer: A Sustainable Climate-Resilient Approach to Improve Soil Fertility and Crop Production in Agriculture. **J. Plant Growth Regul.** v.43, p. 2503–2535, 2024.

SUN, F.; OU, Q.; WANG, N.; GUO, Z. X.; OU, Y.; LI, N.; PENG, C. Isolation and identification of potassium solubilizing bacteria from Mikania micrantharhizospheric soil and their effect on M. micranthaplants. **Global Ecology and Conservation.** v. 23, p. 1-9, 2020.

YADAV, B.K.; AKHTAR, M.S.; PANWAR, J. Interações rizosféricas entre plantas e micróbios: Fatores-chave para a fertilidade do solo e nutrição das plantas. **Plant Microbes Symbiosis: Applied Facets.** p. 127–145, 2014.

Submetido em: 08/12/2025

Publicado em: 15/12/2025