



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS II LAGOA SECA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS**

FRANKLIN SALES DE ARAÚJO

**BIOINTEMPERISMO MICROBIANO DE REJEITOS DE XISTO: POTENCIAL DE
FERTILIZAÇÃO AGRÍCOLA E SUSTENTABILIDADE NO SEMIÁRIDO**

LAGOA SECA

2024

FRANKLIN SALES DE ARAÚJO

**BIOINTEMPERISMO MICROBIANO DE REJEITOS DE XISTO: POTENCIAL DE
FERTILIZAÇÃO DE SOLOS E SUSTENTABILIDADE NO SEMIÁRIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo)
apresentado à Coordenação do Curso de
Bacharelado em Agroecologia da Universidade
Estadual da Paraíba, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Agroecologia.

Orientadora: Prof. Dra. Élide Barbosa Corrêa
Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Santana Macedo

LAGOA SECA

2024

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

A663b Araujo, Franklin Sales de.

Biointemperismo microbiano de rejeitos de xisto: potencial de fertilização de solos e sustentabilidade no semiárido [manuscrito] / Franklin Sales de Araujo. - 2024.

14 f.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agroecologia) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Agrárias e Ambientais, 2024.

"Orientação: Prof. Dra. Élide Barbosa Corrêa, Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais - CCAA".

"Coorientação: Prof. Dr. Rodrigo Santana Macedo, UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE".

1. Rejeito mineral. 2. Solubilização microbiana. 3.

Reaproveitamento. I. Título

21. ed. CDD 631.4

FRANKLIN SALES DE ARAÚJO

BIOINTEMPERISMO MICROBIANO DE REJEITOS DE XISTO: POTENCIAL DE
FERTILIZAÇÃO DE SOLOS E SUSTENTABILIDADE NO SEMIÁRIDO

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo)
apresentado à Coordenação do Curso de
Bacharelado em Agroecologia da Universidade
Estadual da Paraíba, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Agroecologia.

Aprovado em 19/11/2024

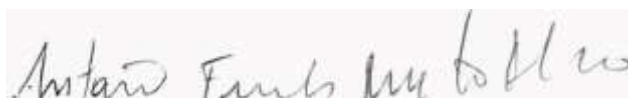
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Élide Barbosa Corrêa (Orientadora)
Universidade Estadual da Paraíba - UEPB



Prof. Dr. Antônio Augusto Pereira de Sousa
Universidade Estadual da Paraíba – UEPB



Dr. Antônio Fernandes Monteiro Filho
Universidade Estadual da Paraíba – UEPB

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	7
2.1. Local e Coleta das Amostras.....	7
2.2. Caracterização Mineralógica	8
2.3. Análise de Disponibilidade de Nutrientes.....	8
2.4. Tratamentos Aplicados	8
2.5. Detalhamento dos Tratamentos.....	9
2.6. Análise Estatística.....	9
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	9
3.1. Mineralogia das Amostras de Xisto.....	9
3.2. Disponibilidade de Fósforo (P).....	10
3.3. Disponibilidade de Potássio (K ⁺).....	10
3.4. Disponibilidade de Sódio (Na ⁺).....	11
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	12
5. REFERÊNCIAS	12

BIOINTEMPERISMO MICROBIANO DE REJEITOS DE XISTO: POTENCIAL DE FERTILIZAÇÃO DE SOLOS E SUSTENTABILIDADE NO SEMIÁRIDO

MICROBIAL BIOWEATHERING OF SHALE TAILINGS: POTENTIAL FOR SOIL FERTILIZATION AND SUSTAINABILITY IN THE SEMI-ARID

Franklin Sales de Araújo¹

RESUMO

A Província Pegmatítica da Borborema (PPB), localizada no semiárido dos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, apresenta uma geologia rica em recursos minerais de valiosa importância econômica para região. Durante a atividade de mineração de rochas ornamentais nessa região são gerados resíduos que apresentam potencial para liberação de nutrientes. Entretanto, a baixa solubilidade de minerais presentes nesses materiais representa um desafio ao aproveitamento agrícola na região. O objetivo desse estudo foi avaliar a viabilidade do biointemperismo microbiano para aumentar a disponibilidade de potássio (K^+) e fósforo (P) de rochas xistosas da PPB. O experimento foi conduzido no Laboratório de Fitopatologia da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Os microrganismos utilizados foram *Aspergillus* sp. e *Pseudomonas* sp. Foram avaliados os seguintes tratamentos: (i) Xisto + água (X + A); (ii) Xisto + meio de cultura (X + MC); (iii) X + MC + *Pseudomonas* sp. (X+MC+B); (iv) X + MC + *Aspergillus* sp. (X+MC+F); (v) X + MC + *Pseudomonas* sp. + *Aspergillus* sp. Os minerais foram identificados por Difratometria de Raio X (DRX). Os principais minerais identificados foram quartzo, mica, ortoclásio e plagioclásio. Os tratamentos com os microrganismos não promoveram a solubilização de K^+ ($p < 0,05$) e de P ($p > 0,05$). O teor de Na^+ foi elevado nos tratamentos com *Pseudomonas* sp., o que levanta a necessidade de monitoramento para evitar efeitos adversos como a salinização do solo. Apesar disso, o biointemperismo microbiano apresenta potencial promissor para aproveitamento dos rejeitos, com ajustes necessários nos protocolos para maximizar a liberação de nutrientes essenciais. Este estudo reforça a possibilidade de reutilizar rejeitos minerais de forma sustentável, contribuindo para a fertilidade do solo e a redução do passivo ambiental no semiárido brasileiro.

Palavras-chaves: rejeito mineral; solubilização microbiana; reaproveitamento.

ABSTRACT

The Borborema Pegmatite Province (BPP), located in the semi-arid regions of the states of Paraíba and Rio Grande do Norte, features geology rich in mineral resources of significant economic importance to the region. During ornamental rock mining in this area, waste materials are generated with potential for nutrient release. However, the low solubility of minerals in these materials presents a challenge for agricultural use in the region. The aim of this study was to evaluate the feasibility of microbial bioweathering to increase the availability of potassium (K^+) and phosphorus (P) from schist rocks of the BPP. The experiment was conducted at the Phytopathology Laboratory of the State University of Paraíba (UEPB). The microorganisms used were *Aspergillus* sp. and *Pseudomonas* sp. The following treatments were evaluated: (i) Schist + water (X + A); (ii) Schist + culture medium (X + CM); (iii) Schist + CM +

¹ Estudante de Bacharelado em Agroecologia pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB).

Pseudomonas sp. (X + CM + B); (iv) Schist + CM + *Aspergillus* sp. (X + CM + F); (v) Schist + CM + *Pseudomonas* sp. + *Aspergillus* sp. Minerals were identified through X-ray Diffraction (XRD). The main minerals identified were quartz, mica, orthoclase, and plagioclase. Treatments with microorganisms did not promote the solubilization of K⁺ (p < 0.05) or P (p > 0.05). Sodium (Na⁺) levels increased in treatments with *Pseudomonas* sp., raising the need for monitoring to avoid adverse effects such as soil salinization. Nevertheless, microbial bioweathering shows promising potential for waste utilization, with necessary adjustments in protocols to maximize the release of essential nutrients. This study reinforces the possibility of sustainably reusing mineral waste, contributing to soil fertility and reducing the environmental liability in Brazil's semi-arid regions.

Keywords: mineral waste; microbial solubilization; reuse.

1. INTRODUÇÃO

A Província Pegmatítica da Borborema, situada no semiárido dos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, é uma região geológica de destaque, rica em recursos minerais e caracterizada pela presença de várias rochas ornamentais com potencial de exploração, como o xisto. Apesar da importância econômica significativa devido à sua riqueza mineral, essa região enfrenta desafios ambientais relacionados à geração de rejeitos de mineração, uma vez que os resíduos gerados ao longo da atividade de mineração representam um preocupante e crescente passivo ambiental, bem como, pode acarretar em sanções jurídicas para as empresas em atividade na região. Tal fato é devido ao processo de extração e beneficiamento dessas rochas gerar elevados volumes de rejeitos, o que equivale a aproximadamente 70% dos materiais extraídos.

Nesse sentido, surge a possibilidade de beneficiamento desse rejeito, principalmente para o setor agrícola, reforçando o setor da bioeconomia na região, uma vez que os resíduos dessas rochas apresentam uma ampla variedade de minerais com potencial para liberação de nutrientes às plantas, notadamente micas e feldspatos (Nunes *et al.*, 2018). Em adição, a liberação de potássio (K) e fósforo (P) dessas fontes sustentáveis pode contribuir para reduzir a demanda de importação de fertilizantes, o que constitui atualmente em um dos maiores desafios da agricultura brasileira, uma vez que a importação é amplamente dependente da variação dos mercados econômicos e da demanda internacional. A necessidade de obtenção de insumos agrícolas sustentáveis também tem sido estimulada, uma vez que a utilização de fertilizantes comerciais tem acarretado a eutrofização dos solos (superdosagens) e dos corpos hídricos.

Apesar do exposto, a baixa solubilidade natural dessas rochas representa um desafio para sua utilização direta como fertilizante. A liberação eficiente dos nutrientes, como K e P, requer intervenções adequadas, uma vez que os níveis de solubilidade natural são geralmente insuficientes para atender às necessidades nutricionais das plantas. Nesse contexto, o biointemperismo microbiano surge como uma alternativa promissora para a fertilização agrícola sustentável. Esse processo envolve a ação de microrganismos, como bactérias e fungos, que promovem o intemperismo dos minerais presentes nas rochas, facilitando a liberação de nutrientes essenciais para as culturas (Harris, 2008).

Pesquisas demonstram que microrganismos como o fungo *Aspergillus niger* e a bactéria *Bacillus subtilis* têm a capacidade de solubilizar potássio e fósforo a partir de rochas de baixa solubilidade, como o xisto, tornando esses nutrientes mais disponíveis às plantas (Stille *et al.*, 2013). A aplicação do biointemperismo na Província Pegmatítica da Borborema representa não apenas uma estratégia para a recuperação de nutrientes dos rejeitos minerais, mas também uma abordagem sustentável para a gestão agrícola.

Esse cenário levanta uma questão crucial: *Como reaproveitar os rejeitos de pegmatitos de forma eficiente e sustentável, aproveitando seu potencial mineral para fertilizar solos agrícolas, ao mesmo tempo em que se mitiga o impacto ambiental da mineração?* Esse problema de pesquisa encontra no biointemperismo microbiano uma possível solução, pois o uso de microrganismos como *Aspergillus spp.* e *Pseudomonas spp.*, tem se mostrado promissores para solubilizar nutrientes essenciais, como potássio e fósforo, a partir de rochas com baixa solubilidade. Estudo tem mostrado que a coinoculação de *Paenibacillus polymyxa*, *Paenibacillus polymyxa* e *Cromobacterium violaceum* aumentaram significativamente a liberação de K e P de das rochas apatita e biotita (Silva *et al.*, 2017).

Portanto, objetivou-se avaliar o potencial do biointemperismo para melhorar a disponibilidade de K e P de rejeitos minerais na Província Pegmatítica da Borborema por meio de *Aspergillus* sp. e *Pseudomonas* sp.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local e Coleta das Amostras

O experimento foi realizado no Laboratório de Fitopatologia da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Campus II, em Lagoa Seca-PB. As amostras de xisto foram coletadas em lavras de pegmatitos situadas no município de Parelhas, no estado do Rio Grande do Norte. Após a coleta, as amostras foram trituradas e peneiradas em malha de 300 μm para uniformização do tamanho das partículas.

Microrganismos utilizados e cultivo

A avaliação do biointemperismo foi realizada com *Aspergillus* sp. 010 e *Pseudomonas* sp. 004 pertence a coleção de microrganismos do Laboratório de Fitopatologia localizado no Campus II/UEPB.

Aspergillus sp. foi cultivado em meio de cultura Ágar Batata Dextrose (BDA) e incubado durante sete dias a 30°C.

Para obtenção dos esporos, foi utilizada água destilada esterilizada com quantidade suficiente para cobrir a placa. Após raspagem dos esporos, foi retirado 1 mL da suspensão e diluído com 6 mL de água destilada esterilizada. A contagem foi realizada em câmara de Neubauer, contando um total de 5 quadrantes (4 extremidades e o central).

Equação 1: Cálculo da concentração de esporos por mL.

$$Ce(\text{esporos/mL}) = \sum_{1}^{5} n \cdot 5 \times 10^4 \cdot fd$$

Onde:

Ce = Concentração de esporos (esporos/mL);

Σn = soma algébrica do número de esporos contados na câmara de Neubauer (quatro extremidades e o centro);

5 = fator para expandir para os 25 quadrantes da câmara;

10^4 = constante para a conversão de mm^3 para cm^3 número total de quadrículos na câmara;

fd = fator de diluição utilizado.

Para inocular o meio de cultura foi calculado o volume necessário para ter uma concentração de 10^7 esporos por mL de meio de cultivo.

Equação 2: Cálculo do volume necessário para ter uma concentração de 10^7 .

$$V_i = \frac{C_f \left(\frac{\text{esporos}}{\text{mL}} \right) \cdot v_f \text{ (mL)}}{C_i \left(\frac{\text{Esporos}}{\text{mL}} \right)}$$

Onde:

V_i = volume inicial de inóculo (mL);

V_f = volume final de inóculo (mL);

C_f = concentração de inóculo desejada (esporos/mL) = 10^5 ;

C_i = concentração de esporos da suspensão (esporos/mL).

Pseudomonas sp. 004 foi cultivado em meio de cultura Ágar Nutriente (NA), mantido em placas de Petri incubadas por 48 horas a 30°C. Para a obtenção das células bacterianas, utilizou-se solução salina estéril (0,85% NaCl) em volume suficiente para cobrir a superfície da placa. As colônias bacterianas foram raspadas cuidadosamente, e a suspensão foi homogeneizada para garantir a distribuição uniforme das células. A calibração da suspensão bacteriana foi realizada por método colorimétrico, utilizando um espectrofotômetro ajustado para leitura a 600nm.

Para a inoculação, foi adicionado 1 mL de *Pseudomonas* sp. na concentração ajustada para 1×10^7 UFC por mL de meio, onde as culturas foram submetidas à incubação por 10 dias com agitação constante de 120 rpm.

2.2. Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica das amostras foi realizada por difratometria de raios-X (DRX) para identificar as fases minerais presentes. Foi utilizado equipamento modelo XRD6000 da Shimizu. A radiação utilizada foi $K\alpha$ do Cu (40kV/30mA); a velocidade do goniômetro de 2°/min e passo de 0,02°. A interpretação foi efetuada por comparação com padrões contidos no PDF 02 (ICDD, 2003).

2.3. Análise de Disponibilidade de Nutrientes

A disponibilidade dos nutrientes potássio (K^+), sódio (Na^+) e fósforo (P) foi avaliada utilizando a solução ácida de Mehlich 1 como extrator. As quantificações de K^+ e Na^+ foram realizadas por fotometria de chama, enquanto a concentração de P foi determinada por colorimetria (Teixeira et al., 2017).

2.4. Tratamentos Aplicados

Foram estabelecidos cinco tratamentos distintos com cinco repetições, conduzidos durante um período de dez dias: **T1**: Xisto + água (Controle com aplicação apenas de água). **T2**: Xisto + Meio de cultura (Meio de cultura sem inoculação microbiana). **T3**: Xisto + Meio de cultura + *Pseudomonas* sp. (Meio de cultura inoculado com bactéria). **T4**: Xisto + Meio de cultura + *Aspergillus* sp. (Meio de cultura inoculado com fungo). **T5**: Xisto + Meio de cultura + *Pseudomonas* sp. + *Aspergillus* sp. O meio de cultura utilizado foi o NBRIP (10 g L⁻¹ de glicose, 0,15 g L⁻¹ de (NH₄)₂ SO₄, 0,2 g L⁻¹ de KCl, 5 g L⁻¹ de MgCl₂.6H₂O e 0,25 g L⁻¹ de MgSO₄.7H₂O) (Nautiyal, 1999).

2.5. Detalhamento dos Tratamentos

T1 - Controle (Xisto + água):

Neste tratamento, utilizou-se apenas o xisto, sem a adição de microrganismos ou qualquer outro insumo. O objetivo foi determinar a solubilização natural dos nutrientes presentes no xisto sem intervenções.

T2 – Xisto + Meio de Cultura:

Este tratamento combinou o xisto com o meio de cultura, mas sem a presença de microrganismos. O objetivo foi avaliar o efeito do meio de cultura na solubilização de nutrientes, verificando se ele sozinho contribui para a liberação dos elementos minerais. Essa análise é importante para separar os efeitos do meio químico dos efeitos microbianos.

T3 - Xisto + Meio de Cultura + *Pseudomonas* sp.:

Aqui, apenas bactérias foram adicionadas ao xisto. O objetivo foi investigar o potencial das bactérias na liberação dos nutrientes e seu comportamento como agentes solubilizadores.

T4 - Xisto + Meio de Cultura + *Aspergillus* sp.:

Neste tratamento, foi aplicado apenas fungos no xisto. Para avaliar o papel exclusivo dos fungos na solubilização de potássio (K), sódio (Na) e fósforo (P).

T5 - Xisto + Meio de Cultura + *Pseudomonas* sp. + *Aspergillus* sp.:

Este tratamento envolveu a combinação de fungos e bactérias no xisto. Buscou-se avaliar possíveis efeitos sinérgicos entre os dois grupos microbianos na solubilização mineral, já que algumas interações entre fungos e bactérias podem potencializar o processo.

Para avaliação da biodisponibilização *in vitro* dos nutrientes a partir do xisto, cada unidade experimental constou de um erlenmeyer de 250 mL contendo 50 mL de meio de cultura adicionado de 5 g de xisto. Os materiais foram autoclavados e posteriormente foi adicionado 1 mL da solução contendo os microrganismos na concentração descrita.

2.6. Análise Estatística

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com o teste F, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, considerando um nível de significância de 5%. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Mineralogia das Amostras de Xisto

A análise mineralógica das amostras de xisto revelou a presença de quartzo, mica, ortoclásio e plagioclásio (Tabela 1). Os picos característicos obtidos pela difratometria de raios-X (DRX) foram comparados com a literatura e confirmam a similaridade das amostras com rochas de outros estados do Brasil, como Amazonas, Minas Gerais e Rio Grande do Norte

(Soares, 2004; Assumpção, 2015; Paludo et al., 2018). A presença de mica e plagioclásio indica que as amostras contêm minerais de intemperismo moderado, capazes de liberar potássio e, outros nutrientes.

Tabela 1. Identificação mineralógica de xisto da Província Pegmatítica da Borborema.

Rocha	Mineral	Padrão
Xisto	Mica	JCPDF 42-1339
	Quartzo	JCPDF 46-1045
	Albita	JCPDF 10-0393

Essa mineralogia confirma a viabilidade de aplicação agrícola desses xistos, pois minerais como albita e mica são fontes potenciais de potássio (K^+), um macronutriente primário de plantas. Contudo, a baixa presença de minerais fosfáticos indica que esses xistos apresentam pouca quantidade de minerais fosfáticos, o que pode indicar baixa potencialidade para liberação de P às plantas.

3.2. Disponibilidade de Fósforo (P)

Os resultados da solubilização de fósforo por meio de diferentes tratamentos biológicos são apresentados na Tabela 2. As análises indicaram que não houve diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos com *Aspergillus* sp. e *Pseudomonas* sp. em relação à solubilização de P ($p > 0,05$), sugerindo que esses microrganismos têm uma capacidade limitada de liberar P dos xistos. Isso pode ser atribuído à ausência de minerais ricos em P nas amostras, diferindo de rochas fosfáticas que apresentam compostos de fácil intemperização.

Estudos comparativos com outras rochas ricas em fósforo, como as avaliadas por Silva *et al.* (2017), revelaram maior liberação de P em períodos de incubação mais longos e em rochas contendo até 12% de fósforo, o que destaca a especificidade mineralógica dos xistos da Borborema e sugere limitações em sua aplicação para fornecimento de P na agricultura.

3.3. Disponibilidade de Potássio (K^+)

Para avaliar se os microrganismos realmente contribuíram para a solubilização do potássio, podemos comparar os resultados entre os tratamentos com microrganismos (T3, T4 e T5) e os tratamentos sem microrganismos (T1 e T2). A interpretação dos resultados dependerá dos níveis de potássio obtidos em cada tratamento e das diferenças estatísticas observadas no teste de Tukey (Tabela 2).

O tratamento controle (T1 - Xisto + Água) apresentou a menor média de potássio (23,68 mg/L), atuando como um controle negativo. A ausência de meio de cultura e microrganismos mostra que a solubilização natural do K do xisto em água é baixa (Tabela 2). O tratamento com meio de cultura, mas sem inoculação de microrganismos, resultou em uma média de 154,90 mg/L de potássio, valor significativamente mais alto que o controle. Esse aumento sugere que o meio de cultura possui componentes que auxiliam na solubilização do K sem necessidade de microrganismos. Pode haver a presença de nutrientes ou pH que facilitam a dissolução de K do xisto (Tabela 2).

A presença de microrganismos (T3, T4 e T5) não aumentou a solubilização do K em comparação ao meio de cultura sem microrganismos (T2) (Tabela 2).

3.4. Disponibilidade de Sódio (Na⁺)

Observa-se que o tratamento com *Pseudomonas* sp. apresentou o maior teor de Na⁺, atingindo 601 mg kg⁻¹, significativamente superior aos demais tratamentos ($p < 0,05$) (Tabela 2). Esse resultado sugere que as bactérias utilizadas possuem alta capacidade de solubilizar Na⁺ de minerais como albita, presente nas amostras de xisto. A ação das bactérias pode estar associada à liberação de exsudatos ácidos que promovem o intemperismo de plagioclásios, aumentando a disponibilidade de Na⁺.

O tratamento combinado com *Pseudomonas* sp. e *Aspergillus* sp. também mostrou um teor elevado de Na⁺ (450 mg kg⁻¹), embora inferior ao tratamento exclusivo com *Pseudomonas* sp. Esse comportamento pode ser explicado pela possível competição entre fungos e bactérias pelos nutrientes liberados ou pela absorção de Na⁺ por alguns microorganismos, resultando em um teor final intermediário de Na⁺ no tratamento misto.

A presença elevada de Na⁺ no solo apresenta implicações agronômicas e ambientais importantes. Em contato com carbonatos, o Na⁺ pode reduzir a acidez do solo, mas o acúmulo excessivo desse íon pode elevar a pressão osmótica do solo, gerando déficits hídricos nas plantas devido à competição osmótica. Além disso, o excesso de Na⁺ pode intensificar o processo de sodificação, onde o Na⁺ ocupa os sítios de troca de cátions, diminuindo a capacidade de retenção de nutrientes. Assim, o uso de xistos em sistemas agrícolas deve ser cuidadosamente controlado para evitar os riscos de salinização e suas consequências negativas para a saúde do solo e das plantas.

Tabela 2. Teores de P, K⁺ e Na⁺ de xistos da Província Pegmatítica da Borborema submetidos a diferentes tratamentos de solubilização biológica.

Tratamento	P (mg kg ⁻¹)	K ⁺ (mg kg ⁻¹)	Na ⁺ (mg kg ⁻¹)
T1 -Xisto + água	0,16 a	23 c	54 c
T2 - Xisto + Meio de cultura	0,08 b	154 a	63 c
T3 - Xisto + Meio de cultura + <i>Pseudomonas</i> sp.	0,18 a	116 b	601 a
T4 - Xisto + Meio de cultura + <i>Aspergillus</i> sp.	0,21 a	127 ab	84 c
T5 - Xisto + Meio de cultura + <i>Pseudomonas</i> sp. + <i>Aspergillus</i> sp.	0,22 a	141 ab	450 b

Tratamentos com letras diferentes diferem estatisticamente ao nível de 5% pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização mineralógica das amostras de xisto evidenciou a presença de minerais como mica, ortoclásio e plagioclásio, que são fontes potenciais de potássio (K⁺). Contudo, a baixa concentração de minerais ricos em fósforo (P) indica que esses rejeitos não são adequados para fornecer P de maneira eficaz à curto prazo.

O estudo mostrou que, apesar da aplicação de *Aspergillus* sp. e *Pseudomonas* sp., não houve aumento na solubilização de potássio a partir dos rejeitos de xisto da Província Pegmatítica da Borborema.

O tratamento com *Pseudomonas* sp. apresentou o maior teor de Na⁺, sugerindo que essas bactérias possuem alta capacidade de solubilizar sódio a partir de minerais como albita. No entanto, o elevado teor de Na⁺ pode apresentar desafios agronômicos, como o aumento da salinidade e da sodificação do solo, o que pode comprometer a absorção de água pelas plantas e a retenção de outros nutrientes essenciais. Por isso, o uso desses rejeitos em solos agrícolas deve ser cuidadosamente monitorado para evitar os riscos de salinização e seus efeitos adversos.

Futuras pesquisas devem explorar diferentes combinações de microrganismos ou ajustes no meio de cultivo, bem como avaliar outros tipos de rochas com maior teor de potássio, para aprimorar o processo de solubilização e viabilizar o uso de rejeitos como fonte agrícola de potássio.

O presente estudo contribui para a valorização dos rejeitos de mineração na Província Pegmatítica da Borborema, propondo uma abordagem que integra a sustentabilidade ambiental com o manejo agroecológico dos solos, pois a implementação de técnicas de biointemperismo microbiano poderá promover a fertilidade do solo, reduzir os impactos ambientais da mineração e gerar benefícios econômicos para a agricultura local, destacando-se como uma estratégia viável para a sustentabilidade no semiárido brasileiro.

5. REFERÊNCIAS

ASSUMPÇÃO, J. P. **Estudo de caracterização de minerais de rochas ornamentais para aproveitamento sustentável**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

HARRIS, J. L. **A ação dos micro-organismos na solubilização de minerais**. Soil Science Society of America Journal, v. 72, n. 1, p. 12-20, 2008.

ICDD – International Centre for Diffraction Data. **PDF-2 Database**. Versão 2003. Newtown Square: International Centre for Diffraction Data, 2003.

NAUTIYAL, C. S. **A new method for selecting efficient phosphate solubilizing microorganisms**. Current Microbiology, v. 39, n. 6, p. 317–320, 1999.

NUNES, J. A. et al. **Geração e caracterização de rejeitos de rochas ornamentais na Província Pegmatítica da Borborema**. Engenharia Agrícola, v. 38, n. 2, p. 319-327, 2018.

PALUDO, F. et al. **Análise mineralógica e ambiental de rejeitos de rochas na região da Borborema**. Journal of Environmental Management, v. 214, p. 450-458, 2018.

- SILVA, A. R. et al. **Aplicação de rochas fosfáticas para aumento de disponibilidade de P em solos. Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 7, p. 523-532, 2017.
- SILVA, V. N. et al. **Solubility curve of rock powder inoculated with microorganisms in the production of biofertilizers. Agriculture and Natural Resources**, v. 51, p. 142-147, 2017.
- SOARES, M. F. **O aproveitamento de resíduos minerais como fonte de nutrientes para a agricultura no Brasil. Revista de Ciência Agrícola**, v. 31, n. 4, p. 412-419, 2004.
- STILLE, P. et al. **Microbial weathering and its application in agricultural fertilization. European Journal of Soil Science**, v. 64, n. 5, p. 647-660, 2013.
- TEIXEIRA, P. C.; et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Agradecemos especialmente à equipe técnica Cristiano Sousa, Josely Dantas e Amanda Melo pelo apoio durante os experimentos, aos colegas pelo estímulo e troca de ideias e aos professores orientadores Prof. Dra. Élide Barbosa Corrêa e Prof. Dr. Rodrigo Santana Macedo pelas valiosas orientações. Nossa gratidão se estende à Universidade Estadual da Paraíba - UEPB que ofereceu infraestrutura e suporte, bem como ao órgão de fomento Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro da Chamada CNPq/CT-Mineral/CT-Energ N° 27/2022 - PD&I para o desenvolvimento integral das cadeias produtivas de Minerais Estratégicos que possibilitaram a execução deste estudo. A cada um, nosso muito obrigado.