

**VIABILIDADE AGRONÔMICA DO USO DE MICRORGANISMOS
SOLUBILIZADORES E DO PÓ DE ROCHA NEFELINA SIENITO COMO FONTE
DE POTÁSSIO NA CULTURA DA MANDIOCA**

por

FLAVIO LOPES CLAUDIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Bioenergia e Grãos.

Iporá-GO

Julho – 2026

**VIABILIDADE AGRONÔMICA DO USO DE MICRORGANISMOS
SOLUBILIZADORES E DO PÓ DE ROCHA NEFELINA SIENITO COMO FONTE
DE POTÁSSIO NA CULTURA DA MANDIOCA**

por

FLAVIO LOPES CLAUDIO

Comitê de Orientação:

Romano Roberto Valicheski, Prof. Dr. – IF Goiano

C615 Lopes Claudio, Flavio
Viabilidade agronômica do uso de microrganismos
solubilizadores e do pó de rocha nefelina sienito como fonte de
potássio na cultura da mandioca / Flavio Lopes Claudio. Rio
Verde 2026.

63f. il.

Orientador: Prof. Dr. Romano Roberto Valicheski.
Dissertação (Mestre) - Instituto Federal Goiano, curso de
0233154 - Mestrado Profissional em Bioenergia e Grãos -
Integral (Campus Rio Verde).
I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 18/2026 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

VIABILIDADE AGRONÔMICA DO USO DE MICRORGANISMOS
SOLUBILIZADORES E DO PÓ DE ROCHA NEFELINA SIENITO COMO FONTE
DE POTÁSSIO NA CULTURA DA MANDIOCA

Autor: Flavio Lopes Claudio
Orientador: Romano Roberto Valichski

TITULAÇÃO: Mestre em Bioenergia e Grãos - Área de Concentração Agroenergia

APROVADA em 10 de julho de 2026.

Assinado eletronicamente
Prof. Dr. Estenio Moreira Alves
Avaliador externo - IF Goiano Campus
Iporá

Assinado eletronicamente
Prof.ª Dr.ª Amanda Abdallah Chaibub
Avaliador interno - IF Goiano Campus
Iporá

Assinado eletronicamente
Prof. Dr. Romano Roberto Valichski
Presidente da Banca - IF Goiano Campus Iporá

Documento assinado eletronicamente por:

- Romano Roberto Valichski, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 10/07/2026 10:15:46.
- Amanda Abdallah Chaibub, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 10/07/2026 10:42:06.
- Estenio Moreira Alves, ENGENHEIRO AGRÔNOMO, em 10/07/2026 15:04:28.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 09/07/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 838830
Código de Autenticação: 4578c02820



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 25/2026 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO

**ATA Nº 128 (CENTO E VINTE E OITO)
BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**

Aos dez dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e seis, às 08h12min (oito horas e doze minutos), reuniram-se os componentes da banca examinadora em sessão pública realizada na Sala 04 do Prédio da Mecanização do Campus Iporá do Instituto Federal Goiano, para procederem a avaliação da defesa de Dissertação, em nível de mestrado, de autoria de **FLAVIO LOPES CLAUDIO**, discente do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Romano Roberto Valichski, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida ao autor da Dissertação que, em 30 min, procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o examinado, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos, e procedida às correções recomendadas, a Dissertação foi **APROVADA**, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM BIOENERGIA E GRÃOS**, na área de concentração Agroenergia, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGBG da versão definitiva da Dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade, se não cumprida essa condição, em até **60 (sessenta) dias** da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Dissertação em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Dissertação de Mestrado, e para constar, foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada eletronicamente pelos membros da Banca Examinadora.

Membros da Banca Examinadora

Nome	Instituição	Situação no Programa
Romano Roberto Valichski	IF Goiano – Campus Iporá	Presidente
Amanda Abdallah Chaibub	IF Goiano – Campus Iporá	Membro interno
Estenio Moreira Alves	IF Goiano – Campus Iporá	Membro externo

Documento assinado eletronicamente por:

- Romano Roberto Valichski, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 10/07/2026 09:31:41.
- Estenio Moreira Alves, ENGENHEIRO AGRONOMO, em 10/07/2026 10:19:39.
- Amanda Abdallah Chaibub, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 10/07/2026 10:42:40.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 09/07/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 838818
Código de Autenticação: ddbf0cbo0e



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- ☒ Tese (doutorado)
☒ Dissertação (mestrado)
☐ Monografia (especialização)
☐ TCC (graduação)

- ☐ Artigo científico
☐ Capítulo de livro
☐ Livro
☐ Trabalho apresentado em evento

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Flavio Lopes Claudio

Título do trabalho:

VIABILIDADE AGRONÔMICA DO USO DE MICRORGANISMOS SOLUBILIZADORES E DO PÓ DE ROCHA NEFELINA SIENITO COMO FONTE DE POTÁSSIO NA CULTURA DA MANDIOCA

Matrícula:

2024202331540008

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 20 /07 /2026

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.



Documento assinado digitalmente
FLAVIO LOPES CLAUDIO
Data: 20/07/2026 16:24:05-0300
Verifique em <https://validar.if-goiano.gov.br>

Rio Verde, Go
Local

20 /07 /2026
Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



Documento assinado digitalmente
ROMANO ROBERTO VALCHESKI
Data: 20/07/2026 09:15:08-0300
Verifique em <https://validar.if-goiano.gov.br>

**VIABILIDADE AGRONÔMICA DO USO DE MICRORGANISMOS
SOLUBILIZADORES E DO PÓ DE ROCHA NEFELINA SIENITO COMO FONTE
DE POTÁSSIO NA CULTURA DA MANDIOCA**

por

FLAVIO LOPES CLAUDIO

Orientador : _____
Romano Roberto Valicheski, Prof. Dr. – IF Goiano

Examinadores: _____
Esterio Moreira Alves, Dr. – IF Goiano

Amanda Abdallah Chaibub, Dra. – IF Goiano

Iporá, 10 de julho de 2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por guiar meus passos e conduzir nesta jornada, proporcionando saúde, paz e sabedoria. A Ele toda a glória.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Romano Roberto Valichski, pelo incentivo, paciência, orientação, amizade e compartilhamento de conhecimentos. Sou imensamente grato por sua contribuição, você foi fundamental para o meu aperfeiçoamento acadêmico e profissional.

A minha família, obrigado pelo apoio incondicional e constante incentivo. Em especial à minha esposa Allana, ao meu filho Gael e aos meus pais. Vocês são a base que sustenta minha vida e a fonte de motivação para seguir em frente.

À chácara Recanto da Paz, em especial ao Prof. Dr. Paulo Alexandre e sua família, pela amizade, incentivo, apoio e pela disponibilização da área experimental e dos recursos necessários a execução deste mestrado.

Ao Instituto Federal Goiano-Campus Iporá, pela disponibilização de insumos e recursos essenciais para realização deste projeto.

A todos os alunos do IF Goiano-Campus Iporá, que tiveram envolvidos na execução das atividades de campo e contribuíram para a condução deste trabalho.

A FAPEG e ao CEBIO (Cento de Excelência em Bioinsumos) na pessoa do coordenador regional da UTT de Iporá, Dr. Estenio Moreira Alves, pela disponibilização dos microrganismos e pela concessão da bolsa de estudos.

A empresa Edem Agrominerais, pelo fornecimento do pó de rocha nefelina sienito utilizado na condução deste projeto.

A todos que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para a realização deste mestrado, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais.....	1
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 <i>Cultura da mandioca: Importância socioeconômica e desafios nutricionais</i>	<i>4</i>
2.2 <i>Fertilizantes químicos solúveis: Utilização, limitações e impactos na cultura da mandioca.....</i>	<i>6</i>
2.3 <i>Remineralizadores de solo e o potencial da nefelina sienito como fonte de potássio</i>	<i>7</i>
2.4 <i>Interação biológica e microrganismos solubilizadores de potássio (MSK) em associação com pós de rocha</i>	<i>11</i>
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
CAPÍTULO 2 – Viabilidade agronômica do uso de microrganismos solubilizadores e do pó de rocha nefelina sienito como fonte de potássio na cultura da mandioca	1
INTRODUÇÃO	3
MATERIAIS E MÉTODOS	5
RESULTADOS E DISCUSSÃO	8
CONCLUSÃO	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais

1. INTRODUÇÃO

A agricultura contemporânea enfrenta o desafio de conciliar o aumento da produtividade com a sustentabilidade ambiental e econômica dos sistemas de produção. No contexto da nutrição mineral de plantas, a dependência de fertilizantes minerais solúveis, especialmente os potássicos, tem gerado preocupações relacionadas às relações geopolíticas globais, à finitude das reservas de alta qualidade, à volatilidade dos preços internacionais e aos impactos ambientais associados à mineração e ao transporte desses insumos (Freire *et al.*, 2023; Valicheski *et al.*, 2024). Segundo dados da ANDA (Associação Nacional de Difusão de Adubos) de 2023, o Brasil importa mais de 95% dos fertilizantes potássicos consumidos, e essa grande dependência representa um risco estratégico para a segurança alimentar e para a competitividade do agronegócio nacional.

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma das culturas mais importantes no mundo. Representa a base alimentar de milhões de pessoas em regiões tropicais e subtropicais do globo. Sua adaptabilidade ambiental, rusticidade e diversidades de uso, coloca-a em destaque na conjuntura social e econômica mundial, desempenhando papel importante na segurança alimentar, especialmente nas populações de baixa renda. É considerada uma das culturas mais promissoras para atender à crescente demanda de alimentos no mundo (Freitas Fialho & Vieira, 2013; Immanuel *et al.*, 2024).

O potássio (K) cumpre papel essencial para o desenvolvimento das plantas, participando de diversas atividades e processos fisiológicos, bem como na regulação osmótica, ativação de enzimas, absorção de água do solo, formação de amido, síntese proteica, além de promover maior resistência a doenças e favorecer a formação e peso dos grãos (Taiz *et al.*, 2017). Na cultura da mandioca, o potássio é um dos nutrientes mais exigido, sendo amplamente

acumulado nas raízes tuberosas e removido em grandes quantidades com a colheita. Estudos indicam que a exportação de K pode atingir valores elevados em sistemas de alta produtividade, podendo ultrapassar 100 kg K₂O ha⁻¹, evidenciando a necessidade de manejo adequado desse nutriente para a sustentabilidade dos sistemas de produção (Fernandes *et al.*, 2017; Chua *et al.*, 2020; Carciochi *et al.*, 2025).

Neste contexto, a rochagem ou remineralização de solos, que consiste no uso agrícola de pós de rocha como fonte de nutrientes, emerge como estratégia promissora para o fornecimento sustentável de K, especialmente em regiões com disponibilidade de rochas silicáticas ricas em feldspatos e feldspatoides, que apresentam potencial como fontes alternativas desse nutriente, especialmente em sistemas agrícolas tropicais, contribuindo para a sustentabilidade da fertilidade do solo (Manning, 2017; Valicheski *et al.*, 2024). A nefelina sienito, rocha ígnea alcalina com elevado teor de K, tem sido avaliada como fonte alternativa de potássio para diversas culturas, apresentando liberação lenta e gradual do nutriente por meio do intemperismo mineral (Mohammed *et al.*, 2014; Nogueira *et al.*, 2021; Freire *et al.*, 2023; Medeiros *et al.*, 2024; Valicheski *et al.*, 2024).

Outra técnica para reduzir a demanda de fertilizantes importados atendendo o consumo interno é a aplicação de remineralizador ao solo associado ao uso de microrganismos solubilizadores, que podem maximizar a liberação e absorção dos nutrientes, principalmente fósforo e potássio (Oliveira-Paiva *et al.*, 2022). A combinação de pós de rocha com microrganismos solubilizadores de potássio (MSK) representa uma abordagem sinérgica que pode potencializar a eficiência agrônômica da rochagem (Chen *et al.*, 2020; Valicheski *et al.*, 2024).

Microrganismos como *Bacillus amyloliquefaciens* (Luo *et al.*, 2022), *Bacillus aryabhattai* (Chen *et al.*, 2020; Fuga *et al.*, 2023; Guo *et al.*, 2024) e *Cladosporium cladosporioides* (Chaibub *et al.*, 2020; Chaibub *et al.*, 2025) têm demonstrado potencial para

promover o crescimento vegetal, solubilizar nutrientes e suprimir fitopatógenos, tornando-os candidatos promissores para uso como biofertilizantes na cultura da mandioca.

Perante o exposto, objetivou-se avaliar a viabilidade agronômica do uso de microrganismos associado a aplicação do pó de rocha nefelina sienito como fonte de potássio na cultura da mandioca, a fim de verificar a eficiência da solubilidade desse remineralizador comparado ao fertilizante químico, e analisar os impactos da aplicação conjunta (coinoculação) e isolada dos microrganismos bem como os efeitos da associação com o pó de rocha no desenvolvimento e produtividade das plantas

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultura da mandioca: Importância socioeconômica e desafios nutricionais

Por muito tempo a mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) foi considerada uma cultura de subsistência, mas atualmente possui grande importância no mercado mundial por causa da adaptabilidade, versatilidade industrial, alta rentabilidade agrícola e promoção da segurança alimentar. É uma das culturas alimentares mais importantes do mundo, especialmente nas regiões tropicais e subtropicais. Cultivada em mais de 100 países, a mandioca constitui uma das principais fontes calóricas para a cerca de um bilhão de pessoas, desempenhando papel central na segurança alimentar de populações vulneráveis (Ezui *et al.*, 2016; Embrapa, 2024). Segundo a FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) em 2024 a produção mundial de mandioca foi de aproximadamente 341 milhões de toneladas, com a África respondendo pela maior parcela da produção, seguida pela Ásia e pela América Latina.

No Brasil, a mandioca ocupa posição de destaque tanto na agricultura familiar quanto no agronegócio, sendo cultivada em 86% dos municípios brasileiros em condições edafoclimáticas diversas. O país é o quinto maior produtor do mundo, atrás da Nigéria, República Democrática do Congo, Tailândia e Gana. A produção anual nacional é de aproximadamente 20 milhões de toneladas de raízes frescas, cultivada a cerca de 1,2 milhão de hectares (Gazola *et al.*, 2022; Embrapa, 2024; FAO, 2024).

A versatilidade da mandioca constitui uma das principais características agronômicas, uma vez que a cultura apresenta elevada adaptação a solos de baixa fertilidade, tolerância a períodos prolongados de estiagem, podendo permanecer no campo e ser colhida em diferentes estádios de maturação, conforme a demanda do mercado e a necessidade do produtor (Uwah *et al.*, 2013; Ezui *et al.*, 2016; Aguiar *et al.*, 2021). Contudo, essa capacidade de adaptação a condições adversas não significa que a mandioca seja indiferente ao manejo nutricional; ao contrário, a resposta da cultura à adubação, especialmente à adubação potássica, é consistente

e bem documentada na literatura científica (Ezui *et al.*, 2016; Marzouk *et al.*, 2020; Gazola *et al.*, 2022; Esper Neto *et al.* 2026).

Devido à heterogeneidade dos sistemas de cultivo e ao nível tecnológico empregado por grande parte dos produtores, incluindo limitações no uso de corretivos, fertilizantes e cultivares adequados, a produtividade média nacional da mandioca foi de apenas 15,46 t ha⁻¹ na safra de 2024 (IBGE, 2024). Entretanto, quando submetida a condições adequadas de manejo nutricional e agrônomo, a cultura pode expressar elevado potencial produtivo, com rendimentos superiores a 70 t ha ano⁻¹ (Freitas Fialho & Vieira, 2013; Uchôa *et al.* 2020).

A mandioca é uma cultura que possui exigências nutricionais, especialmente em relação ao potássio, que é o macronutriente mais exportado nas raízes tuberosas (Marzouk *et al.*, 2020; Gazola *et al.*, 2022). A extração de potássio pela cultura pode variar de 100 a 400 kg K₂O ha⁻¹ por ciclo, dependendo da produtividade, do genótipo e das condições edafoclimáticas (Uwah *et al.*, 2013; Fernandes *et al.*, 2017; Chua *et al.*, 2020; Gazola *et al.*, 2022; Carciocchi *et al.*, 2025). Em solos tropicais altamente intemperizados, como os Latossolos e Argissolos predominantes no Brasil, a disponibilidade natural de potássio frequentemente é baixa. Dessa forma, a adubação potássica torna-se indispensável para suprir a elevada exigência nutricional da cultura e garantir produtividades satisfatórias (Howeler, 2014; Fernandes *et al.*, 2017).

O potássio desempenha funções essenciais no metabolismo da mandioca, incluindo a regulação osmótica, a ativação enzimática, o transporte de fotoassimilados, a síntese de amido e a resistência a estresses bióticos e abióticos (Taiz *et al.*, 2017; Marzouk *et al.*, 2020). A deficiência de K resulta em redução da área foliar, clorose e necrose das folhas mais velhas, redução da taxa fotossintética, menor acumulação de amido nas raízes tuberosas e maior suscetibilidade a doenças e pragas (Uwah *et al.*, 2013; Marzouk *et al.*, 2020). Em ensaios de campo, a aplicação de potássio em doses adequadas tem resultado em aumentos de produtividade de raízes tuberosas de 20 a 70%, dependendo, do material genético, do nível de

K disponível no solo e das condições climáticas (Ezui *et al.*, 2016; Fernandes *et al.*, 2017; Chua *et al.*, 2020; Birindwa *et al.*, 2023).

Para suprir a demanda nutricional no agronegócio brasileiro, as principais fontes utilizadas são o cloreto de potássio, o sulfato de potássio e o nitrato de potássio. Sendo, o Cloreto de potássio (KCl) o mais empregado, representando a cerca de 90% do volume aplicado (Nogueira, *et al.*, 2021; Gonçalves *et al.* 2022; Santiago & Rossetto, 2022).

2.2 Fertilizantes químicos solúveis: Utilização, limitações e impactos na cultura da mandioca

A predominância do cloreto de potássio (KCl) no manejo nutricional agrícola está associado ao elevado teor de K_2O (aproximadamente 60%) e à alta solubilidade em água, características que favorecem a rápida disponibilidade do nutriente para o sistema radicular das plantas. Entretanto, o uso intensivo dessa fonte em solos tropicais altamente intemperizados impõe desafios agronômicos e ambientais significativos que podem comprometer a sustentabilidade dos sistemas produtivos a longo prazo (Zörb *et al.*, 2014; Chua *et al.*, 2020)

Um dos principais problemas associados ao uso de fontes solúveis em solos tropicais, caracterizados por elevados índices pluviométricos, é a lixiviação de potássio. Devido à baixa Capacidade de Troca Catiônica (CTC), predominante nos Latossolos e Argissolos brasileiros, o íon K^+ apresenta alta mobilidade, favorecendo as perdas por lixiviação, o que pode comprometer a eficiência do uso do fertilizante e elevar os custos de produção (Rosalem *et al.*, 2010; Rosolem *et al.*, 2018; Nogueira *et al.*, 2021).

O cloreto de potássio possui na composição alto índice salino (116%) e elevada concentração de cloro (42%). O uso constante e excessivo desse fertilizante pode salinizar o solo e aumentar os teores de cloro a níveis tóxicos, podendo representar um sério problema para a produtividade agrícola e a saúde do solo. Na cultura da mandioca especificamente, a aplicação de doses elevadas pode causar efeitos fitotóxicos, prejudicando a brotação das manivas e o

desenvolvimento inicial das raízes (Uwah *et al.*, 2013; Howeler, 2014; Cruz *et al.*, 2017; Nogueira *et al.*, 2021; Gonçalves *et al.* 2022). Além disso, o excesso de cloro tem sido associado à redução do teor de matéria seca e de amido nas raízes tuberosas, afetando diretamente a qualidade industrial do produto (Carciochi *et al.*, 2025; Gonçalves *et al.* 2022; Marzouk *et al.*, 2020).

Segundo dados da Associação Nacional de Difusão de Adubos – ANDA, em 2025 o Brasil registrou recorde histórico nas entregas de fertilizantes para o consumo, somando 49,1 milhões de toneladas, uma alta de 7,7% em relação a 2024. No entanto, mais de 90% desses fertilizantes foram oriundos de importação, o total de 45,5 milhões de toneladas em 2025.

Do ponto de vista econômico e estratégico, o Brasil enfrenta vulnerabilidade crítica. Atualmente o país importa mais de 95% do potássio utilizado na agricultura (ANDA, 2023), ficando sujeito a oscilações de preços internacionais, conflitos geopolíticos e crises logísticas. Essa dependência pressiona a rentabilidade de pequenos e médios produtores de mandioca, que muitas vezes negligenciam a adubação potássica pelo alto custo do insumo, perpetuando baixas produtividades médias nacionais (SAE/PR, 2020; Freire *et al.*, 2023).

Nesse contexto, surge a necessidade eminente de investigar fontes alternativas de fertilizantes. A busca por insumos de liberação gradual e menor impacto ambiental, como os remineralizadores de solo, apresenta-se como alternativa promissora para otimizar a nutrição vegetal e reduzir a dependência externa.

2.3 Remineralizadores de solo e o potencial da nefelina sienito como fonte de potássio

A rochagem, também denominada remineralização de solos, consiste na aplicação agrícola de pós de rocha com potencial para o fornecimento de macro e micronutrientes para as plantas (Kleiv & Thornhill, 2007; Mohammed *et al.*, 2014; Ramos *et al.*, 2022; Swoboda *et al.*, 2022). Essa prática baseia-se no princípio de que os minerais primários das rochas constituem

a fonte original dos nutrientes presentes nos solos, de modo que a aplicação de remineralizadores pode contribuir para a recomposição das reservas minerais reduzidas pelo intemperismo intenso e pela exportação de nutrientes via colheita (Kleiv & Thornhill, 2007; Swoboda *et al.*, 2022; Freire *et al.*, 2023). A rochagem é considerada uma prática de baixo impacto ambiental, pois utiliza recursos minerais locais, reduz a dependência de fertilizantes industrializados e contribui para a ciclagem de nutrientes em sistemas agroecológicos (Ramos *et al.*, 2022; Benevides Filho *et al.*, 2023; Freire *et al.*, 2023; Valicheski *et al.*, 2024).

A eficiência agronômica dos pós de rocha depende de diversos fatores, incluindo a composição mineralógica do material, o tamanho de partícula, o grau de cristalinidade dos minerais, as condições edafoclimáticas e a atividade microbiana da rizosfera (Kleiv & Thornhill, 2007; Mohammed *et al.*, 2014; Ramos *et al.*, 2022; Swoboda *et al.*, 2022;). Rochas contendo minerais mais reativos, como os feldspatoides (nefelina, leucita) e os feldspatos alcalinos (ortoclásio, microclínio), apresentam maior potencial de liberação de potássio em comparação a minerais mais resistentes ao intemperismo, como quartzo e feldspatos cálcicos (Manning, 2017; Swoboda *et al.*, 2022). A moagem fina dos pós de rocha aumenta a superfície específica e a reatividade dos minerais, acelerando o intemperismo e a liberação de nutrientes (Kleiv & Thornhill, 2007; Ramos *et al.*, 2022; Benevides Filho *et al.*, 2023).

No Brasil, a busca por fontes alternativas de nutrientes, visando reduzir a dependência de fertilizantes químicos solúveis e importados, impulsionou a regulamentação dos remineralizadores, por meio da Lei nº 12.890/2013. Definidos como materiais de origem mineral que tenham sofrido apenas redução de tamanho por processos mecânicos, esses insumos, conhecidos tecnicamente como pós de rocha, visam alterar os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes, além de promover a melhoria das propriedades físicas e biológicas (BRASIL, 2013). Em 2022 os remineralizadores foram incluídos no Plano Nacional de Fertilizantes (dec. nº 10.991/22, alterado em 2023 pelo Dec. nº

11.518), na categoria de insumos emergentes, cotados para suprir parte da necessidade de insumos agrícolas no país, com meta de atingir em termos de capacidade instalada 7,5 milhões de toneladas por ano de remineralizadores, a partir de produtos e coprodutos até 2030 e 16,5 milhões até 2050 (MDIC, 2023).

Dentre as rochas silicáticas com potencial agrícola, a nefelina sienito destaca-se por ser uma rocha ígnea alcalina, caracterizada pela presença de nefelina como mineral feldspático dominante, associada a feldspatos alcalinos (ortoclásio, microclínio, albita), piroxênios e anfibólios (Freire *et al.*, 2023; Valicheski *et al.*, 2024). Sua importância reside no elevado teor de óxido de potássio (K_2O), que pode variar entre 5% e 12%, tornando-a fonte potencial de potássio para uso agrícola, além de fornecer cálcio, magnésio e silício (Mohammed *et al.*, 2014; Freire *et al.*, 2023; Valicheski *et al.*, 2024).

Diferente das fontes solúveis, a solubilização do K presente nos silicatos da nefelina ocorre de forma lenta e gradual, isso minimiza as perdas por lixiviação e permite o suprimento residual do nutriente ao longo dos ciclos de cultivo (Swoboda *et al.*, 2022). O potássio é liberado por meio do intemperismo químico, processo que envolve a dissolução dos minerais silicáticos pela ação de ácidos (carbônico, orgânicos) e água, com liberação de íons K^+ , Na^+ , Al^{3+} e Si^{4+} para a solução do solo. A taxa de intemperismo é influenciada pelo pH do solo, pela temperatura, pela atividade microbiana e pelo tamanho das partículas do pó de rocha (Kleiv & Thornhill, 2007; Mohammed *et al.*, 2014; Ramos *et al.*, 2022; Swoboda *et al.*, 2022). Em condições de solo ácido e com presença de microrganismos solubilizadores, a taxa de intemperismo pode ser significativamente acelerada, aumentando a disponibilidade de K para as plantas (Chen *et al.*, 2020; Valicheski *et al.*, 2024).

A eficiência agrônômica da nefelina sienito como fonte de potássio tem sido comprovada em diversas culturas de interesse econômico, apresentando resultados que em alguns cenários equivalem ou até superam as fontes solúveis tradicionais (Swoboda *et al.*, 2022). No cultivo da

soja (*Glycine max*), estudos conduzidos em solos de cerrado demonstraram que doses perto de 140 kg ha⁻¹ de K₂O via nefelina proporcionaram incrementos de produtividade de até 8%, com desempenho similar ao KCl (França *et al.*, 2026). Freire *et al.* (2023) também observou desempenhos semelhantes na cultura da soja entre o remineralizador e o KCl. Resultados positivos também foram observados no cultivo de milho (*Zea mays*), milheto (*Pennisetum glaucum*) e trigo (*Triticum aestivum* L), em que a aplicação do pó de rocha não apenas supriu a demanda nutricional da planta, proporcionado crescimento e acúmulos de biomassa satisfatório, mas promoveu incremento residual de potássio no solo, favorecendo a cultura subsequente (Nogueira *et al.*, 2021; Apori *et al.*, 2026; França *et al.*, 2026; Medeiros *et al.*, 2026). Melhorias nos atributos químicos do solo, como o aumento do pH, da saturação por bases e dos teores de Ca, Mg, K e Si, também tem sido associado à aplicação da nefelina sienito (Apori *et al.*, 2026; Valicheski *et al.*, 2024).

Apesar do potencial promissor, a utilização desse remineralizador exige cautela quanto à velocidade de disponibilização dos nutrientes. Por ser um material de baixa solubilidade, a eficiência a curto prazo é inferior ao fertilizante solúvel, e pode resultar em deficiências nutricionais em fases críticas de culturas de ciclo muito curto se não houver um planejamento de adubação antecipada (Nogueira *et al.*, 2021). Outro ponto de atenção refere-se à composição mineralógica; a presença em grande quantidade de alguns elementos potencialmente tóxicos, como Al, As, Sr, Rb e Ba podem ser prejudiciais ambientalmente, pelo acúmulo no solo ao longo dos anos (Apori *et al.*, 2026).

Neste contexto, a eficiência da nefelina sienito como remineralizador está intrinsecamente ligada à taxa de dissolução mineral. Portanto, o uso de microrganismos associado ao pó de rocha surge como estratégia, que pode maximizar a liberação e absorção de nutrientes (Oliveira-Paiva *et al.*, 2022). O emprego de microrganismos capazes de produzir ácidos orgânicos e enzimas específicas pode acelerar a solubilização dos silicatos presentes na

nefelina sienito, transformando o potássio estrutural em formas prontamente assimiláveis pelas plantas (Sattar *et al.*, 2019; Oliveira-Paiva *et al.*, 2022.). Essa sinergia entre o pó de rocha e a microbiota especializada pode representar o elo necessário para viabilizar o uso de fontes regionais de potássio com eficiência agronômica.

2.4 Interação biológica e microrganismos solubilizadores de potássio (MSK) em associação com pós de rocha

Estudos revelam que a população microbiota do solo é capaz de influenciar a fertilidade do solo por meio de processos como decomposição, mineralização e armazenamento/liberação de nutrientes (Etesami *et al.*, 2017). Os microrganismos são os motores biológicos do solo, desempenhando papel fundamental na nutrição vegetal e na sustentabilidade agrícola. Por meio de interações simbióticas e associativas com as plantas (filosfera, endosfera foliar, endosfera da raiz e rizosfera), fungos e bactérias transformam o solo em um sistema vivo e dinâmico, atuando na ciclagem de nutrientes, na solubilização de minerais, na promoção de crescimento vegetal e na manutenção da qualidade biológica do solo (Etesami *et al.*, 2017; Compant *et al.*, 2019; Trivedi *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a combinação de pós de rocha (remineralizadores) com microrganismos solubilizadores de nutrientes, principalmente de fósforo e potássio, representa uma estratégia sinérgica que integra os princípios da agrogeologia com os da biotecnologia agrícola (Chen *et al.*, 2020; Oliveira-Paiva *et al.*, 2022; Valicheski *et al.*, 2024). Como a liberação de potássio a partir de matrizes minerais como a nefelina sienito ocorre de forma lenta por processos físico-químicos naturais, a introdução do componente biológico surge como estratégia para potencializar a eficiência agronômica (Etesami *et al.*, 2017; Oliveira-Paiva *et al.*, 2022).

Os microrganismos solubilizadores de potássio (MSK) constituem um grupo funcional de bactérias e fungos capazes de mobilizar K a partir de minerais de baixa solubilidade, tornando-o disponível para absorção pelas plantas (Chen *et al.*, 2020; Tian *et al.*, 2024). Esses

microrganismos colonizam preferencialmente a região da rizosfera, estabelecendo interações complexas com as raízes e com outros organismos do solo, contribuindo para a ciclagem de nutrientes e para a promoção de crescimento vegetal (Hridya *et al.*, 2013; Etesami *et al.*, 2017; Sattar *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2020).

A solubilização de K é realizada por ampla gama de bactérias e fungos. Dentre os principais grupos de bactérias já foram descritas as espécies *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Bacillus edaphicus*, *B. amyloliquefaciens*, *B. aryabhattai*, *B. circulans*, *B. megaterium*, *Agrobacterium tumefaciens*, *Rhizobium pusense*, *Arthrobacter sp.*, *Enterobacter hormaechei*, *Paenibacillus mucilaginosus*, *P. frequentans*, *Aminobacter sp.*, *Sphingomonas sp.*, *Burkholderia sp.*, *Pseudomonas sp.* e *Paenibacillus glucanolyticus*. Entre os fungos, destacam-se os gêneros *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium* e os fungos micorrízicos do gênero *Glomus* (Etesami *et al.*, 2017; Sattar *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2022; Oliveira-Paiva *et al.*, 2022).

Os mecanismos bioquímicos pelos quais os MSK solubilizam K a partir de minerais incluem: (i) produção de ácidos orgânicos (cítrico, oxálico, málico, glucônico, tartárico), que reduzem o pH e atacam quimicamente a superfície dos minerais; (ii) produção de exopolissacarídeos (EPS), que formam complexos com cátions metálicos e promovem o intemperismo físico-químico dos minerais; (iii) produção de ácidos inorgânicos (carbônico, nítrico, sulfúrico), que também contribuem para a acidificação e a dissolução dos minerais; e (iv) produção de enzimas (fosfatases, fitases, proteases) que mobilizam nutrientes associados a compostos orgânicos do solo (Etesami *et al.*, 2017; Oliveira-Paiva *et al.*, 2022; Tian *et al.*, 2024).

A produção de ácidos orgânicos pelos MSK é o mecanismo mais amplamente estudado e documentado na literatura. Estudos com *Bacillus aryabhattai* demonstraram que a cepa produz ácidos málico, fórmico, acético e cítrico em meio de cultura contendo feldspato como única

fonte de K, resultando em redução do pH do meio e aumento significativo da concentração de K solúvel (Chen *et al.*, 2020). Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelaram que a inoculação de *B. aryabhatai* promove alterações morfológicas visíveis na superfície dos minerais potássicos, evidências diretas do intemperismo microbiano (Chen *et al.*, 2020). Essa espécie tem sido avaliada em condições e ambientes extremos e tem demonstrado capacidade de solubilizar potássio a partir de minerais silicáticos de baixa solubilidade, tornando-se objeto de crescente interesse como agente de biofertilização potássica (Guo *et al.*, 2024).

Paralelamente, o *Bacillus amyloliquefaciens* atua de forma expressiva, tanto na solubilização mineral quanto na promoção do crescimento e sanidade vegetal. Esse microrganismo secreta fitormônios reguladores do crescimento, com destaque para o ácido indolacético (AIA), estimulando o alongamento celular, o desenvolvimento radicular e a formação de raízes laterais (Li *et al.*, 2023; Corrêa *et al.*, 2025). Além disso, a associação com pós de rocha pode favorecer melhorias nas propriedades químicas do solo e otimizar a disponibilidade de nutrientes para as plantas (Corrêa *et al.*, 2025). A espécie apresenta ampla distribuição no solo, na rizosfera e na filosfera de diversas culturas, sendo sua elevada capacidade de colonização um fator determinante para a expressão de efeitos benéficos relacionados à promoção do crescimento vegetal e ao biocontrole de fitopatógenos (Yuan *et al.*, 2013; Matsumura *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2023).

No âmbito dos microrganismos fúngicos, os fungos endofíticos presentes nos tecidos internos das plantas, desempenham papel importante na promoção do crescimento vegetal e na redução dos efeitos de estresses bióticos e abióticos, por meio da regulação de vários hormônios de defesa e pela liberação de substâncias antimicrobiana (Taheri *et al.*, 2022). Dentre esses fungos, espécies do gênero *Cladosporium* apresentam potencial para promoção do crescimento vegetal e mobilização de nutrientes minerais, atuando por meio da produção de metabólitos

bioativos, fitormônios e compostos orgânicos capazes de intensificar processos de intemperismo e disponibilidade nutricional na rizosfera (Sattar *et al.*, 2019; Răut *et al.*, 2021; Taheri *et al.*, 2022). O *C. cladosporioides* é um fungo filamentosso hifomiceto, amplamente distribuído no solo, no ar e em tecidos vegetais de diversas culturas. Essa espécie tem sido estudada principalmente pelas propriedades de biocontrole de fitopatógenos e de promoção do crescimento vegetal, com resultados promissores em diversas culturas, incluindo arroz, tabaco, maçã e hortaliças (Paul & Seok, 2013; Köhl *et al.*, 2015; Chaibub *et al.*, 2020; Taheri *et al.*, 2022).

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, E.B., E.D. Schleder, V.H.S. Brito & F.A.F. Agüena. 2021.** Plantio Direto na Cultura da Mandioca. V. 25: 02–09. <https://doi.org/10.17921/1415-5141.2020v25n1p02-09>.
- ANDA-Associação Nacional para Difusão de Adubos. 2023.** Disponível em: <https://anda.org.br/acervos/>. Acesso em: abril de 2026.
- Apori, S.O., S. Flynn, D.A.C. Manning, G. Stewart, M.E. Wakefield, M. Edwards, L. Collins & K.J. McInnes. 2026.** Influence of Enhanced Rock Weathering of Nepheline-Syenite Tailings on Major and Trace Elements Accumulation in Wheat. *European Journal of Soil Science*. V. 77. <https://doi.org/10.1111/ejss.70282>
- Benevides Filho, P.R.R., A.E. Blaskowski, M.N. Ramos, L.G.F. Lessa, A.N. Zamunér Filho, C.H. Abreu-Junior, A.D. Jani, G.F. Capra & T.A.R. Nogueira. 2023.** Potential Soil Remineralizers from Silicate Rock Powders (SRP) as Alternative Sources of Nutrients for Agricultural Production (Amazon Region). *Minerals*, v.13. <https://doi.org/10.3390/min13101255>.
- Birindwa, D.R., J.V. Laere, W. Munyahali, P. Bauw, G. Dercon, K. Kintche & R. Merckx. 2023.** Early planting of cassava enhanced the response of improved cultivars to potassium fertilization in South Kivu, Democratic Republic of Congo. *Field Crops Research*. V.296: 1-13. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108903>.
- BRASIL, 2013.** Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. Altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como categoria de insumo. *In.*: Diário Oficial da União, Brasília, DF, 11 dez. 2013.
- Carciochi, W.D., A. Dobermann, N.C. la Menza, S.M. Brouder, C.R. Donough, C. D.J. Heuschele, T. Oberthür, P. Sandaña, B.M. Shehu, J.T.S. Pereira, R.P. Soratto, J.J. Volenec, R. Wandri, Y. Wang, S.S. Win, P. He & P. Grassini. 2025.** Quantifying potassium requirement and removal across crop species. *Field Crops Research*. v. 322. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109717>.
- Chaibub, A.A., J.A.B. Gundim, L.G. Araújo & M.C.C. Filippi. 2025.** *Cladosporium cladosporioides* for disease control and defense response induction in upland rice grown under an agroecological system. *Agroecology and Sustainable Food Systems*. v. 49: 773-791. <https://doi.org/10.1080/21683565.2025.2456914>.
- Chaibub, A.A., T.P. Sousa, M.I.S. Oliveira, M.T. Arriel-Elias, L.G. Araújo & M.C.C. Filippi. 2020.** Efficacy of *Cladosporium cladosporioides* C24G as a Multifunctional Agent in Upland Rice in Agroecological Systems. *International Journal of Plant Production*, v.14: 463–474. <https://doi.org/10.1007/s42106-020-00097-2>
- Chen Y, H. Yang, Z. Shen & J. Ye. 2022.** Whole-Genome Sequencing and Potassium-Solubilizing Mechanism of *Bacillus aryabhattai* SK1-7. *Front. Microbiol.* 12:722379. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.722379>

- Chen, Y., J. Ye & Q. Kong. 2020.** Potassium-solubilizing activity of *Bacillus aryabhattai* SK1-7 and its growth-promoting effect on *Populus alba* l. *Forests*. v.11:1–9.
<https://doi.org/10.3390/f11121348>
- Chua, M.F., L. Youbee, S. Oudthachit, P. Khanthavong, E.J. Veneklaas & A.L. Malik. 2020.** Potassium fertilisation is required to sustain cassava yield and soil fertility. *Agronomy*. V. 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081103>
- Compant, S., A. Samad, H. Faist & A. Sessitsch. 2019.** A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application. In *Journal of Advanced Research*. V. 19: 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>
- Corrêa, J.D.S., D.A.O. Araújo, A.C.P.S. Rodrigues, O.G. Brito, G.R. Gusmão Júnior & T.T.M.S. Rodrigues. 2025.** Rock powder application combined with bacterial inoculation enhances the early growth of coffee plants. *Ciência e Agrotecnologia*.v. 49. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202549024124>
- Cruz, J.L., M.A. Coelho Filho, E.F. Coelho & A.A. Santos. 2017.** Salinity reduces carbon assimilation and the harvest index of cassava plants (*Manihot esculenta* Crantz). *Acta Scientiarum – Agronomy*.v. 39: 545–555.
<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i4.32952>
- Embrapa- (Empresa brasileira de pesquisa agropecuária). 2024.**Disponível em:
<https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/cultivos/mandioca#:~:text=Origin%C3%A1ria%20da%20Am%C3%A9rica%20do%20Sul,principalmente%20nos%20pa%C3%ADses%20em%20desenvolvimento>
o. Acesso em 06 maio de 2026
- Esper Neto, M., F.j. Bocon, C.R. Macon & M.S. Oliveira. 2026.** Effects of potassium doses and application timing on cassava (*Manihot Esculenta* Crantz) yield and nutritional composition in sandy soil of southern Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. v. 57: 703-713.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2026.2654419>.
- Etesami, H., S. Emami & H.A. Alikhani. 2017.** Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects-a review. In *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*.v. 17: 897-911.
- Ezui, K.S., A.C. Franke, A. Mando, B.D.K. Ahiabor, F.M. Tetteh, J. Sogbedji, B.H. Janssen & K.E. Giller. 2016.** Fertiliser requirements for balanced nutrition of cassava across eight locations in West Africa. *Field Crops Research*.v. 185: 69-78.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.005>.
- FAO- (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura). 2024.** Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Acesso em: 06 de maio de 2026.
- Fernandes, A.M., B. Gazola, J.G.S. Nunes, E.L Garcia, E & M. Leonel. 2017.** Yield and nutritional requirements of cassava in response to potassium fertilizer in the second

- cycle. Journal of Plant Nutrition. v. 40: 2785-2796.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1382520>.
- França, D.M., L.F. Santos, L.G. Bavaresco, N.C. Marcante, G. Marchi & E.S. Martins. 2026.** Agronomic evaluation of Nepheline Syenite as a potassium source for soybean and maize grown in a Red Latosol. Revista de Gestão Social e Ambiental, 20: 1-18.
<https://doi.org/10.24857/rgsa.v20n2-018>.
- Freire, Y.B.D., I.S. Fonseca, R.A. Santos, R.R. Valicheski, S.S.C. Oliveira & S.L.K. Stürmer, S. 2023.** Uso do pó de rocha nefelina-sienito como fonte alternativa de potássio no cultivo da soja. Revista e Agronegócio e Meio Ambiente-RAMA. V.16.
<https://doi.org/10.17765/2176-9168.2023v16n4e11565>.
- Freitas Fialho, J., & E.A.Vieira. 2013.** Mandioca no Cerrado: orientações técnicas. Brasília, DF, Embrapa Cerrados. 2 ed., 203 p. ISBN: 978-85-7035-203-4.
- Fuga, C.A.G., G.A.N.Caixeta, C.F. Caixeta & I.S. Melo 2023.** Growth promotion in maize (*Zea mays* L.) by *Bacillus aryabhattai* strain CMAA 1363. Revista Brasileira de Ciências Agrárias. v.18. <https://doi.org/10.5039/agraria.v18i3a3340>.
- Gazola B., A.M. Fernandes, G. Hellmeister, L.S. Abrami, R.M. Silva, R.P. Soratto. 2022.** Potassium management effects on yield and quality of cassava varieties in tropical sandy soils. Crop & Pasture Science.v.73: 285-299. <https://doi.org/10.1071/CP21229>.
- Gonçalves, Y. S., M.S.M. Freitas, A.J.C. Carvalho, M.E. Vieira, D.A. Peçanha, J.M. Cunha & P.C. Santos. 2022.** Potassium sources impact on cassava plant productivity, quality and mineral composition. Journal of Plant Nutrition. v. 45: 86-94.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1949465>.
- Guo, X., N. Zhan, Z. Wang, F. Ding, Z. Yang & X. Cui, 2024.** Effects of the combination of *Bacillus aryabhattai* and calcium peroxide on soil silicon and potassium contents, the yield and quality of facility tomato. Archives of Agronomy and Soil Science.v.70: 1-12. <https://doi.org/10.1080/03650340.2024.2427072>
- Howeler, R. 2014.** Sustainable soil and crop management of cassava in asia - a reference manual, 280 p.
- Hridya, A.C., G. Byju & R.S. Misra. 2013.** Effects of microbial inoculations on soil chemical, biochemical and microbial biomass carbon of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) growing Vertisols. Archives of Agronomy and Soil Science. v.60: 239-249.
<https://doi.org/10.1080/03650340.2013.791023>.
- IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2024.** Disponível em:
<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>. Acesso em maio de 2026.
- Immanuel, S., D. Jaganathan, P. Prakash, & P.S. Sivakumar. 2024.** Cassava for Food Security, Poverty Reduction and Climate Resilience: A Review. Indian Journal of Ecology. v. 51: 21-31. <https://doi.org/10.55362/ije/2024/4191>.

- Kleiv, R.A. & M. Thornhill. 2007.** Production of mechanically activated rock flour fertilizer by high intensive ultrafine grinding. *Minerals Engineering*. v. 20: 334-341. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.08.017>
- Köhl, J., C. Scheer, I.J. Holb, S. Masny & W. Molhoek. 2015.** Toward an integrated use of biological control by *Cladosporium cladosporioides* H39 in apple scab (*Venturia inaequalis*) management. *Plant Disease*. v. 99: 535-543. <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-14-0836-RE>.
- Li, H., C Li, X. Song, J. Li, P. Zhang, F. Sun, Z Geng & X Liu. 2023.** Isolation and identification of antagonistic *Bacillus amyloliquefaciens* HSE-12 and its effects on peanut growth and rhizosphere microbial community. *Frontiers in Microbiology*.v. 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1274346>.
- Luo, L., C. Zhao, E. Wang, A. Raza & C. Yin. 2022.** *Bacillus amyloliquefaciens* as an excellent agent for biofertilizer and biocontrol in agriculture: An overview for its mechanisms. In *Microbiological Research*. v. 259. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127016>.
- Manning, D.A.C. 2017.** Innovation in Resourcing Geological Materials as Crop Nutrients. *Natural Resources Research*. v. 27: 217-227. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9347-2>.
- Marzouk, N.M., N.M.K. Hassan, Z.F. Fawzy & H.R. El-Ramandy. 2020.** Cassava cultivars response to different levels of potassium fertilization under drip irrigation and sandy soil conditions. *Egyptian Journal of Soil Science*. v. 60: 317-334. <https://doi.org/10.21608/ejss.2020.34054.1367>.
- Matsumura, A.T.S., I.C.P. Paz, A.M. Guimarães, M.E. Silva, A.P. Ott, & V. Duarte. 2016.** Efeito de três formulações de *Bacillus amyloliquefaciens* ICBB200 sobre o crescimento de plantas de alface (*Lactuca sativa* L.) em cinco condições edafoclimáticas. *Scientia Agraria Paranaensis*. v.15: 146-152. <https://doi.org/10.18188/1983-1471/sap.v15n2p146-152>.
- MDIC (Ministério do Desenvolvimento, Industria, Comercio e Serviços). 2023.** Plano nacional de fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil. Brasília. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/sdic/confert/pnf>. Acesso: maio de 2026.
- Medeiros, F.P., A.M.X. Carvalho, C. Gindri Ramos, G.L. Dotto, I.M. Cardoso & S.H. Theodoro. 2024.** Rock Powder Enhances Soil Nutrition and Coffee Quality in Agroforestry Systems. *Sustainability*. v. 16. <https://doi.org/10.3390/su16010354>.
- Medeiros, J.P.S., E.F.B. Neves, A.M. Reis, D.S. Sousa, K.A.S. Nascimento, D.S.C. Neves, V.B.F. Neves & O.S.C. Neves. 2026.** Eficiência agrônômica do pó de rocha nefelina sienito, avaliada em Latossolo Amarelo cultivado com milho. *Revista Agraria Academica*. v. 9: 43-54. <https://doi.org/10.32406/v9n1/2026/43-54/agrariacad>.
- Mohammed, S.M.O., K. Brandt, N.D. Gray, M.L. White & D.A.C. Manning. 2014,** Comparison of silicate minerals as sources of potassium for plant nutrition in sandy

- soil. Eur J Soil Sci. v. 65: 653-662. [https://doi-org.ez369.periodicos.capes.gov.br/10.1111/ejss.12172](https://doi.org.ez369.periodicos.capes.gov.br/10.1111/ejss.12172).
- Nogueira, T.A.R., B.G. Miranda, A. Jalal, L.G.F. Lessa, M.C.M. Teixeira Filho, N.C. Marcante, C.H. Abreu-Junior, A.D. Jani, G.F. Capra, A. Moreira & E.S. Martins. 2021.** Nepheline syenite and phonolite as alternative potassium sources for maize. Agronomy. v. 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071385>.
- Oliveira, T.J.A., S.H. Dorner & R.E.M. Almeida. 2023.** A dependência do agronegócio brasileiro em relação aos fertilizantes importados. Informe GEPEC. v. 27: 363-383. <https://doi.org/10.48075/igepec.v27i1.30129>.
- Oliveira-Paiva, C.A., V.M.C. Alves, E.A. Gomes, S.M. Sousa, U.G.P. Lana, & I.E. Marriel. 2022.** Microrganismos solubilizadores de fósforo e potássio na cultura da soja. IN: Meyer, Mauricio Conrado. Bioinsumos na cultura da soja. Embrapa. Brasília-DF.
- Paul, D., & Park, K.S. 2013.** Identification of volatiles produced by *Cladosporium cladosporioides* CL-1, a fungal biocontrol agent that promotes plant growth. Sensors (Switzerland). v. 13: 13969-13977. <https://doi.org/10.3390/s131013969>.
- Ramos, C.G., J.C. Hower, E. Blanco, M.L.S. Oliveira & S.H. Theodoro. 2022.** Possibilities of using silicate rock powder: An overview. Geoscience Frontiers. v.13. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185>.
- Răut, I., M. Călin, L. Capră, A.M. Gurban, M. Doni, N. Radu & L. Jecu. 2021.** *Cladosporium* sp. Isolate as Fungal Plant Growth Promoting Agent. Agronomy.v. 11. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agronomy11020392>.
- Rosolem, C. A., D.S. Almeida, K.F. Rocha & G.H.M. Bacco. 2018.** Potassium fertilisation with humic acid coated KCl in a sandy clay loam tropical soil. Soil Research. v.56: 244-251. <https://doi.org/10.1071/SR17214>.
- Rosolem, C.A., T Sgariboldi, R.A. Garcia & J.C. Calonogo. 2010.** Potassium leaching as affected by soil texture and residual fertilization in tropical soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis. v. 41: 1934-1943. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.495804>.
- SAE/PR-Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. 2020.** Produção nacional de fertilizantes: estudo estratégico. Brasília. Disponível em: https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf. Acesso em: jun. 2026.
- Santiago A.D. & R. Rossetto. 2022.** Adubação Mineral. Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana-de-acucar/producao/correcao-e-adubacao/diagnose-das-necessidades-nutricionais/recomendacao-de-correcao-e-adubacao/adubacao-mineral>
Acessado em maio de 2026.
- Sattar, A., M. Naveed, M. Ali, Z.A. Zahir, S.M. Nadeem, M. Yaseen, V.S. Meena, M. Farooq, R. Singh, M. Rahman & H.N. Meena. 2019.** Perspectives of potassium

- solubilizing microbes in sustainable food production system: A review. In *Applied Soil Ecology*. v. 133: 146-159. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.09.012>.
- Swoboda, P., T.F. Döring & M. Hamer. 2022.** Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. In *Science of the Total Environment*. v. 807. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>.
- Taiz, L., E. Zeiger, I.M. Møller & A. Murphy. 2017.** Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6th. ed. Porto Alegre, Artmed. ISBN 978-85-8271-367-9.
- Taheri, P., R. Kaida, K.M.G. Dastogeer, K.S. Appiah, M. Yasuda, K. Tanaka, H.M. Korrani, M. Azizi, S. Okazaki & Y. Fujii. 2022.** Isolation and Functional Characterization of Culture-Dependent Endophytes Associated with *Vicia villosa* Roth. *Agronomy*. v. 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102417>.
- Tian, Y., Y. Liu, L. Yue, X. Zhao, Q. Zhou, C. Uwaremwe, Y Wang, G. Chen, Y. Sha, Y. Zhang & R. Wang. 2024.** Multi-omics analysis reveals the effects of three application modes of plant growth promoting microbes biofertilizer on potato (*Solanum tuberosum* L.) growth under alkaline loess conditions. *Microbiological Research*. v. 287. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127855>.
- Trivedi, P., J.E. Leach, S.G. Tringe, T. Sa & B.K. Singh. 2020.** Plant–microbiome interactions: from community assembly to plant health. In *Nature Reviews Microbiology*. v. 18: 607-621. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1>.
- Uchôa, S.C.P., F.R. Nascimento, J.M.A. Alves, V.F. Melo, D.C.O. Silva, A.J. Silva, K.D. Batista, K.S Matos & J.A.A. Albuquerque. 2020.** Adubação fosfatada na produtividade e qualidade de raízes tuberosas de cultivares de mandioca na savana amazônica, Brasil. *Revista de Ciências Agrárias*. v. 40: 381-389. <https://doi.org/10.19084/rca.20746>.
- Uwah, D.F., E.B. Effa, L.E. Ekpenyong & I.E. Akpan. 2013.** Cassava (*Manihot esculenta* crantz) performance as influenced by nitrogen and potassium fertilizers in Uyo, Nigeria. *Journal of Animal and Plant Sciences*. v. 23: 550-555. Disponível em: <https://scispace.com/pdf/cassava-manihot-esculenta-crantz-performance-as-influenced-2d8no8avy1.pdf>.
- Valicheski, R.R., R.A. Santos, Y.B.D. Freire, S.J.S. Cruz, S.S.C. Oliveira, S.L.K. Stürmer, C.D. Silva & N.S. Oliveira. 2024.** Uso do pó de rocha nefelina-sienito como fonte de potássio na soja – efeitos nos atributos químicos do solo. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*. v. 17: 01-22. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.8-268>.
- Yuan, J., Y. Ruan, B. Wang, J. Zhang, R. Waseem, Q. Huang & Q. Shen. 2013.** Plant growth-promoting rhizobacteria strain *Bacillus amyloliquefaciens* njn-6-enriched bio-organic fertilizer suppressed *Fusarium* wilt and promoted the growth of banana plants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. v. 61: 3774-3780. <https://doi.org/10.1021/jf400038z>.

Zörb, C., M. Senbyram & E. Peiter. 2014. Potassium in agriculture – status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*. v. 171: 656-669. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008>.

CAPÍTULO 2 – Viabilidade agronômica do uso de microrganismos solubilizadores e do pó de rocha nefelina sienito como fonte de potássio na cultura da mandioca

Agronomic viability of using solubilizing microorganisms and nepheline syenite rock powder as a potassium source in cassava cultivation

Viabilidad agronómica del uso de microorganismos solubilizadores y polvo de roca de sienita nefelínica como fuente de potasio en el cultivo de yuca

RESUMO: No contexto da nutrição mineral de plantas, a dependência de fertilizantes solúveis, especialmente os potássicos, tem gerado preocupações relacionadas às relações geopolíticas, à finitude das reservas, à volatilidade dos preços e aos impactos ambientais. Neste contexto, objetivou-se avaliar a eficiência agronômica do uso de microrganismos solubilizadores e do pó de rocha nefelina sienito como fonte de potássio na cultura da mandioca. O trabalho foi realizado a campo na zona rural de Iporá-GO, no período de junho de 2024 a junho de 2025. Os tratamentos foram distribuídos no delineamento em blocos ao acaso (DBC) com parcelas subdivididas, em esquema fatorial 3 x 8, com quatro repetições. Foram avaliadas três fontes de potássio: 100% de pó de rocha (100% PR); 100% cloreto de potássio (100% KCl); e 50% pó de rocha + 50% KCl (50%PR + 50%KCl). E oito tratamentos com microrganismos: Testemunha; *Bacillus amyloliquefaciens* (Amy); *Bacillus aryabhattai* (Ary); *Cladosporium cladosporioides* (Cla); e as combinações Amy + Ary; Amy + Cla; Ary + Cla e Amy + Ary + Cla. Os tratamentos contendo pó de rocha nefelina sienito proporcionaram maior número e peso de raízes por planta e maior produtividade de amido e raízes comparados ao fertilizante KCl. As coinoculações Amy +Ary e Amy + Cla contribuíram para o aumento dos teores de matéria seca e amido nas raízes. A nefelina sienito demonstrou potencial para substituir parcialmente ou totalmente o KCl como fonte de potássio na cultura da mandioca. Os microrganismos avaliados contribuíram na melhoria da qualidade industrial das raízes.

Palavras-Chave: *Manihot esculenta*; biofertilizantes; remineralizadores de solo; bioinsumos; rochagem; adubação potássica.

ABSTRACT: In the context of plant mineral nutrition, the reliance on soluble fertilizers, especially potassium fertilizers, has generated concerns related to geopolitical relations, finite reserves, price volatility, and environmental impacts. Considering this, the objective was to evaluate the agronomic efficiency of using solubilizing microorganisms and nepheline syenite rock powder as a potassium source in cassava cultivation. The study was carried out in field in the rural area of Iporá-GO, from June 2024 to June 2025. The treatments were distributed in a randomized complete block design (RCBD) with split plots, in a 3 x 8 factorial scheme, with four replications. Three potassium sources were evaluated: 100% rock dust (100% PR); 100% potassium chloride (100% KCl); and 50% rock dust + 50% KCl (50% PR + 50% KCl). And eight treatments with microorganisms: Control; *Bacillus amyloliquefaciens* (Amy); *Bacillus aryabhattai* (Ary); *Cladosporium cladosporioides* (Cla); and the combinations Amy + Ary, Amy + Cla, Ary + Cla, and Amy + Ary + Cla. Treatments containing nepheline syenite rock powder resulted in a greater number and weight of roots per plant, as well as higher starch and root productivity,

compared to KCl fertilizer. The Amy + Ary and Amy + Cla co-inoculations contributed to increased dry matter and starch content in the roots. Nepheline syenite has shown potential to partially or completely replace KCl as a potassium source in cassava cultivation. The evaluated microorganisms contributed to improving the industrial quality of the roots.

Key words: *Manihot esculenta*; biofertilizers; soil remineralizers; bio-inputs; rock dust application; potassium fertilization.

RESUMEN: En el contexto de la nutrición mineral de las plantas, la dependencia de fertilizantes solubles, especialmente fertilizantes de potasio, ha generado preocupaciones relacionadas con las relaciones geopolíticas, la finitud de las reservas, la volatilidad de los precios y los impactos ambientales. En este contexto, el objetivo fue evaluar la eficiencia agronómica del uso de microorganismos solubilizantes y polvo de roca de sienita nefelínica como fuente de potasio en el cultivo de yuca. El trabajo se llevó a cabo en el campo en el área rural de Iporá-GO, de junio de 2024 a junio de 2025. Los tratamientos se distribuyeron en un diseño de bloques completos aleatorizados (DBCA) con parcelas divididas, en un esquema factorial 3 x 8, con cuatro repeticiones. Se evaluaron tres fuentes de potasio: polvo de roca al 100% (100% PR); 100% cloruro de potasio (100% KCl); y 50% de polvo de roca + 50% de KCl (50%PR + 50%KCl). Se evaluaron ocho tratamientos con microorganismos: Control; *Bacillus amyloliquefaciens* (Amy); *Bacillus aryabhattai* (Ary); *Cladosporium cladosporioides* (Cla); y las combinaciones Amy + Ary; Amy + Cla; Ary + Cla y Amy + Ary + Cla. Los tratamientos que contenían polvo de roca de sienita nefelínica dieron como resultado un mayor número y peso de raíces por planta y una mayor productividad de almidón y raíces en comparación con el fertilizante de KCl. Las coinoculaciones de Amy + Ary y Amy + Cla contribuyeron a un mayor contenido de materia seca y almidón en las raíces. La sienita nefelínica demostró potencial para reemplazar parcial o totalmente el KCl como fuente de potasio en el cultivo de yuca. Los microorganismos evaluados contribuyeron a mejorar la calidad industrial de las raíces.

Palabras clave: *Manihot esculenta*, biofertilizantes, remineralizadores de suelo, bioinsumos, aplicación de polvo de roca, fertilización potásica.

INTRODUÇÃO

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) destaca-se mundialmente como uma das culturas mais importantes para a segurança alimentar e o desenvolvimento econômico, especialmente em regiões tropicais e subtropicais (Freitas Fialho & Vieira, 2013; Immanuel *et al.*, 2024). Em virtude de sua rusticidade, adaptabilidade, versatilidade industrial e elevado potencial de retorno econômico, a cultura é cultivada em mais de 100 países, sendo uma das principais fontes de carboidratos para milhões de pessoas, principalmente em países subdesenvolvidos (Ezui *et al.*, 2016; Embrapa, 2024). No Brasil, a mandioca possui alta relevância social e econômica, sendo cultivada em aproximadamente 86% dos municípios brasileiros. O país é o quinto maior produtor do mundo, atrás da Nigéria, República Democrática do Congo, Tailândia e Gana (Gazola *et al.*, 2022; Embrapa, 2024; FAO, 2024). No entanto, apresenta baixos índices produtivos, com produtividade média de 15,46 t ha⁻¹ na safra de 2024 (IBGE, 2024), reflexo, em grande parte, do baixo nível tecnológico adotado por parte dos produtores, incluindo limitações no uso de corretivos, fertilizantes e cultivares.

Devido à sua rusticidade e versatilidade agronômica, adaptando-se a diferentes tipos de solos, condições de baixa fertilidade e longos períodos de estiagem, o manejo nutricional da mandioca é frequentemente negligenciado. No entanto, essa capacidade de adaptação não a torna indiferente à nutrição mineral. Pelo contrário, diversos estudos demonstram que a cultura responde significativamente à adubação, necessitando de adequado manejo nutricional para expressar o máximo potencial produtivo (Ezui *et al.*, 2016; Marzouk *et al.*, 2020; Gazola *et al.*, 2022; Esper Neto *et al.* 2026).

Dentre as exigências nutricionais da cultura, o potássio (K) destaca-se como o macronutriente absorvido e exportado em maiores quantidade. (Marzouk *et al.*, 2020; Gazola *et al.*, 2022). A extração desse nutriente pode variar de 100 a 400 kg K₂O ha⁻¹ por ciclo, dependendo da produtividade, do genótipo e das condições edafoclimáticas (Uwah *et al.*, 2013; Fernandes *et al.*, 2017; Chua *et al.*, 2020; Gazola *et al.*, 2022; Carciochi *et al.*, 2025). Segundo Mattos & Bezerra (2003) para cada 25 toneladas de raízes e parte aérea de mandioca produzidas por hectare são extraídos, em média 146 kg de potássio.

O potássio desempenha funções essenciais na planta, atuando na regulação osmótica, ativação enzimática, transporte de fotoassimilados, síntese de amido e tolerância a estresses bióticos e abióticos (Taiz *et al.*, 2017; Marzouk *et al.*, 2020). Para suprir a demanda nutricional da agricultura brasileira, são utilizados predominantemente

fertilizantes químicos solúveis. As principais fontes potássicas utilizadas são o cloreto de potássio, o sulfato de potássio e o nitrato de potássio. Dentre essas, o Cloreto de potássio (KCl) é amplamente predominante, representando aproximadamente de 90% do volume aplicado no país (Nogueira, *et al.*, 2021; Gonçalves *et al.* 2022; Santiago & Rossetto, 2022).

Embora eficiente no fornecimento imediato de K, o uso contínuo e excessivo de fertilizantes altamente solúveis como o KCl, pode impor desafios agrônômicos, ambientais e estratégicos. Em solos tropicais, destacam-se as perdas por lixiviação, a salinização do solo e o acúmulo de cloro em níveis potencialmente tóxicos, fatores que podem comprometer a produtividade agrícola e a saúde biológica do solo. Além disso, o Brasil apresenta elevada dependência externa desse insumo, importando a cerca de 95% do potássio consumido pela agricultura nacional (ANDA, 2023), o que torna o setor vulnerável às oscilações de preços internacionais, conflitos geopolíticos e crises logísticas (SAE/PR, 2020; Freire *et al.*, 2023).

A necessidade de fortalecer a segurança alimentar nacional e reduzir a dependência de fertilizantes importados, tem impulsionado a busca por fontes alternativas de nutrientes. Nesse contexto, os remineralizadores de solo popularmente conhecidos como pó de rocha, surgem como alternativa promissora para otimizar a nutrição de plantas e promover maior sustentabilidade agrícola. A rochagem é considerado uma prática de baixo impacto ambiental, pois utiliza recursos minerais locais, reduz a dependência de fertilizantes industrializados e contribui para a ciclagem de nutrientes (Ramos *et al.*, 2022; Benevides Filho *et al.*, 2023; Freire *et al.*, 2023; Valicheski *et al.*, 2024).

A rocha nefelina sienito tem apresentado grande potencial agrícola, destacando-se por ser uma rocha ígnea alcalina, caracterizada pela presença de nefelina como mineral feldspáticoide dominante, associada a feldspatos alcalinos (ortoclásio, microclínio, albita), piroxênios e anfibólios. Seu diferencial reside no alto teor de óxido de potássio (K₂O), que pode variar entre 5% e 12%, tornando-a uma fonte potencial de potássio para uso agrícola, além de fornecer cálcio, magnésio e silício (Mohammed *et al.*, 2014; Freire *et al.*, 2023; Valicheski *et al.*, 2024).

Contudo, a utilização de rochas moídas na agricultura exige cautela quanto à velocidade de disponibilização dos nutrientes. Devido à baixa solubilidade, sua eficiência a curto prazo é inferior ao fertilizante solúvel, podendo resultar em deficiência nutricional, principalmente em culturas de ciclos curtos (Nogueira *et al.*, 2021). Neste

contexto, o uso de microrganismos associado ao pó de rocha surge como uma estratégia, que pode maximizar a liberação e absorção de nutrientes (Oliveira-Paiva *et al.*, 2022).

Por meio de processos como decomposição, mineralização, armazenamento e liberação de nutrientes, os microrganismos presentes no solo têm a capacidade de influenciar a fertilidade do solo, desempenhando papel fundamental na nutrição vegetal. Mediante interações simbióticas e associativas com as plantas, fungos e bactérias atuam na solubilização de minerais por processos bioquímicos, como a produção de ácidos orgânicos, exopolissacarídeos (EPS), ácidos inorgânicos e enzimas (fosfatases, fitases, proteases). Essa sinergia entre plantas, pó de rocha e microrganismos pode representar o elo necessário para viabilizar o uso de fontes regionais de potássio com eficiência agronômica. (Etesami *et al.*, 2017; Compant *et al.*, 2019; Trivedi *et al.*, 2020; Oliveira-Paiva *et al.*, 2022; Tian *et al.*, 2024).

Portanto, objetivou-se avaliar a eficiência agronômica do uso de microrganismos solubilizadores e do pó de rocha nefelina sienito como fonte de potássio na cultura da mandioca.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido a campo na UEPE Chácara Recanto da Paz (Unidade de Ensino Pesquisa e Extensão do IF Goiano-Campus Iporá), localizada na zona rural de Iporá-GO, no período de junho de 2024 a junho de 2025. Conforme laudo da análise química de amostras coletadas na camada de 0,0-0,20 m, o solo da área experimental apresentou pH em CaCl_2 de 5,3; teores de $1,6 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ de Ca^{2+} e $0,6 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ de Mg^{2+} , $68 \text{ mg}/\text{dm}^3$ de K^+ , $1,2 \text{ mg}/\text{dm}^3$ de P, $6,0 \text{ mg}/\text{dm}^3$ de S, $0,26 \text{ mg}/\text{dm}^3$ de B, $0,3 \text{ mg}/\text{dm}^3$ Cu, $52 \text{ mg}/\text{dm}^3$ de Fe, $12 \text{ mg}/\text{dm}^3$ de Mn, $0,8 \text{ mg}/\text{dm}^3$ de Zn, $0,0 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ de Al^{3+} , 16 g kg^{-1} de matéria orgânica e CTC total de $4,37 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$.

Historicamente, a área foi ocupada por pastagem de *Brachiaria* sp. até julho de 2023, sendo posteriormente convertida para o cultivo de mandioca. Portanto, a instalação deste experimento correspondeu ao segundo ano consecutivo de cultivo da mandioca na área.

O preparo do solo constituiu na aplicação de $1,5 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário dolomítico, incorporado por meio de aração a 0,25 m de profundidade. Posteriormente, realizou-se o enleiramento com implemento adaptado acoplado ao trator para a formação de camalhões, sobre os quais as covas foram abertas manualmente. O plantio das manivas

adotou o espaçamento de 1,2 m entre linhas e 0,9 m entre plantas, resultando em um estande de 9.250 plantas ha⁻¹.

Durante a implantação do experimento, os tratamentos foram distribuídos no delineamento em blocos ao acaso (DBC), com parcelas subdivididas, em esquema fatorial 3 x 8, com quatro repetições. Foram avaliadas três fontes de potássio: 100% de pó de rocha (100% PR) (nefelina sienito, produto comercial KMC®); 100% cloreto de potássio (100% KCl); e 50% pó de rocha + 50% KCl (50%PR + 50%KCl). Com dose equivalente a 100 kg de K₂O ha⁻¹. E oito tratamentos com microrganismos solubilizadores: Testemunha; *Bacillus amyloliquefaciens* (Amy); *Bacillus aryabhattai* (Ary); *Cladosporium cladosporioides* (Cla); e as combinações (coinoculação) Amy + Ary; Amy + Cla; Ary + Cla e Amy + Ary + Cla.

O plantio foi realizado no dia 06 de junho de 2024. Utilizou-se manivas-sementes do cultivar IAC Vassourinha Branca. As manivas foram previamente padronizadas quanto ao diâmetro e comprimento. Visando atender o manejo padrão da propriedade, realizou-se um anelamento de aproximadamente 0,5 cm no terço inicial de cada maniva. Posteriormente, estas foram imergidas por cinco minutos em uma solução composta por enraizador à base de ácido indol-butírico e bioestimulante (Agressivo Desperta®), na dosagem de 180 mL ha⁻¹. Foram cultivadas 32 plantas por tratamento, sendo 8 plantas por parcela. O cultivo foi conduzido sob sistema de irrigação por gotejamento com fitas gotejadoras de vazão de 1,5 L h⁻¹ e espaçamento de 0,5 m entre gotejadores.

A adubação de base foi realizada com 250 kg ha⁻¹ de fosfato monoamônico (MAP), distribuindo uniformemente entre as covas de plantio. Simultaneamente, foram aplicados o pó de rocha (nefelina sienito) e o Cloreto de potássio (KCl) em doses equivalentes a 100 kg ha⁻¹ de K₂O, conforme cada tratamento. Sendo os tratamentos: 1) 100% PR - 1.000 kg ha⁻¹ de pó de rocha; 2) 50% PR + 50% KCl - 500 kg ha⁻¹ de pó de rocha + 83,3 kg ha⁻¹ de KCl; e 3) 100% KCl - 166,6 kg ha⁻¹ de KCl.

O pó de rocha nefelina sienito (KMC®) utilizado no experimento é oriundo de uma mina localizada no município de Montes Claros de Goiás, cidade circunvizinha de Iporá-GO. Conforme laudo mineralógico realizado pelo Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação - CRTI, apresentou em sua composição química 11,0% de K₂O, 0,79% de CaO, 0,5% de MgO, 0,05% de P₂O₅, 0,3% de MnO, 56,2% de SiO₂, 22,6% de Al₂O₃, 2,8% de Fe₂O₃, 0,5% de Na₂O e 0,4% de TiO₂. Em relação a composição granulométrica,

nas peneiras com malha de 50, 60, 80, 100, 150, 270 e 325 Mesh, ficou retido respectivamente 5,76; 11,7; 31,7; 23,15; 13,68; 13,26 e 0,75% de suas partículas.

Os microrganismos foram fornecidos pelo CEBIO (Centro de Excelência em Bioinsumos) – Unidade de Iporá, parceiro desta pesquisa. Todos os inoculantes apresentavam concentração de 1×10^9 UFC mL⁻¹. A aplicação ocorreu diretamente sobre as manivas no plantio, utilizando-se seringas para a deposição do inoculante na cova (dose equivalente a 3 L ha⁻¹), conforme cada tratamento. Nos casos de coinoculação utilizou-se a mesma dose para cada microrganismo componente.

A adubação nitrogenada foi realizada em cobertura, na dose de 120 Kg ha⁻¹ de N, parcelada aos 60 e 90 dias após plantio (DAP). Como fontes de N, foram utilizadas a ureia (175 kg ha⁻¹) e o sulfato de amônio (200 kg ha⁻¹). O controle de plantas daninhas foi efetuado por meio de duas capinas manuais.

Durante o ciclo da cultura, observou-se a incidência mosca-branca (*Bemisia tabaci*), fusariose, antracnose e bacteriose. Para o controle fitossanitário, realizaram-se quatro aplicações (14/08, 29/08, 06/09 e 07/11/24) de hidróxido de cobre (Kocide® WDG Bioactive) na dose de 1,2 kg ha⁻¹. Adicionalmente, aplicou-se fungicida à base de tebuconazol (Folicur® 200 EC) na dose de 1,0 L ha⁻¹ em 20/08/24. O controle de insetos contou com duas aplicações: a primeira (14/08/24) à base de Tiametoxam + Lambda-cialotrina (Engeo pleno® S) na dose de 100 mL ha⁻¹, e a segunda (23/11/24) à base de Acetamiprido + Piriproxifem (Privilege®) na dose de 300 mL ha⁻¹.

A colheita foi realizada no dia 19 junho de 2025 (aproximadamente 12 meses após o plantio) mediante o arranquio manual das plantas. Foram avaliadas 12 plantas por tratamento (três por repetição), totalizando 288 unidades amostradas. Na ocasião, contabilizou-se o número de raízes de padrão comercial por planta. Após a retirada das raízes, utilizou-se uma balança digital de gancho para a pesagem das plantas (incluindo cepa) para determinação do peso da parte aérea. O peso médio de raízes por planta foi obtido pela média aritmética simples da massa total de raízes de cada repetição. A altura das plantas foi aferida com o auxílio de uma trena, medindo-se do nível do solo ao topo do dossel.

Após a colheita, as raízes foram acondicionadas em sacos de ráfia, separadas por tratamento e repetição e transportadas para indústria de processamento da fazenda, e passaram por um processo de lavagem. Posteriormente determinou-se o teor matéria seca e de amido das raízes pelo método da balança hidrostática (Grossman & Freitas,

1950) e a produtividade de amido. Em seguida as raízes foram descascadas manualmente e pesadas. A determinação do peso médio de mandioca processada e de casca por planta foi determinado pela média aritmética simples da massa total de raízes descascadas e de resíduo (casca juntamente com as partes lenhosas e danificadas) por repetição. O rendimento industrial (mandioca descascada) foi dado pela porcentagem de mandioca obtida após o processamento (descascamento). A receita bruta representa o valor total gerado pela venda da mandioca processada (descascada e embalada), considerando o preço de R\$ 4,20 por quilo.

Após tabulação e organização dos dados, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com aplicação do Teste F a 5% de probabilidade. Quando detectado efeito significativo dos tratamentos, as médias foram comparadas pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, utilizando-se o programa SASM-Agri.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As fontes de potássio exerceram efeito isolado significativo ($p < 0,01$) sobre a maioria das variáveis analisadas (Tabela 1), abrangendo tanto características agronômicas como altura de plantas (ALP), número de raízes por planta (NMR), peso médio de raízes por planta (PMRP) e produtividade (PROD), quanto componentes de rendimento industrial e econômico, como produtividade de amido (PRA), peso médio de mandioca processada por planta (PMPP), peso médio de casca por planta (PMCP), rendimento industrial (RID) e Receita Bruta (RB).

Tabela 1. Valores de F e nível de significância para altura das plantas (ALP.), peso médio da parte aérea das plantas (PMPA.), número de raízes por planta (NMR.), peso médio de raiz por planta (PMRP.), teor de matéria seca na raiz (TMSR.), teor de amido na raiz (TAR.), produtividade de amido (PRA.), peso médio de mandioca processada por planta (PMPP.), peso médio de casca por planta (PMCP.); rendimento industrial em % (RID.%), produtividade de mandioca industrializada (PMI kg ha⁻¹), receita bruta (RB. R\$ ha⁻¹) e produtividade de raízes por hectare (PROD.). Iporá-GO, 2025.

Variável	FK	MIC	FK. x MIC.	C.V.
ALP.	13,3**	4,18**	2,56**	3,9
PMPA.	0,91 ^{ns}	2,41*	1,26 ^{ns}	18,8
NMR.	6,81**	1,66 ^{ns}	1,57 ^{ns}	15,8
PMRP.	7,59**	2,51*	0,69 ^{ns}	18,2
TMSR.	0,43 ^{ns}	2,21*	1,00 ^{ns}	6,58
TAR.	0,43 ^{ns}	2,22*	1,00 ^{ns}	7,48

PRA.	7,74**	2,59*	0,77 ^{ns}	19,1
PMPP.	7,62**	2,08*	0,82 ^{ns}	19,5
PMCP.	6,21**	1,82 ^{ns}	0,66 ^{ns}	21,2
RID.%	9,25**	1,61	2,32*	5,3
PMI. Kg ha⁻¹	9,01**	2,51*	0,86	19,4
RB.R\$ ha⁻¹	9,02**	2,50*	0,86	19,4
PROD.	7,58**	2,51*	0,69 ^{ns}	18,2

271 FK - Fontes de Potássio; MIC - Microrganismos. CV.: coeficiente de variação** significativo a 1,0%,
272 *significativo a 5,0%. Fonte: elaborado pelos autores.

273 Já para o efeito isolado dos microrganismos, exceção feita para as variáveis número
274 de raízes por planta (NMR.) e peso médio de raízes por planta (PMRP), as demais foram
275 afetadas de forma significativa ($p < 0,05$), ou altamente significativa ($p < 0,01$) pelos
276 microrganismos utilizados (Tabela 1). Esses resultados demonstram que a mandioca
277 apresenta elevada interação com os microrganismos, seja na forma isolada ou combinada
278 (coinoculado), pode proporcionar alterações significativas nas características
279 biométricas e agronômicas da cultura. Quanto a interação entre os fatores, observou-se
280 efeito significativo ($p < 0,05$) no rendimento industrial (RID) e altamente significativo
281 ($p < 0,01$) para altura das plantas (ALP).

282 Os tratamentos compostos por pó de rocha nefelina sienito (100% PR e 50% PR +
283 50% PR) resultaram em altura de plantas significativamente inferiores, quando
284 comparado com as plantas adubadas somente cloreto de potássio (100% KCl). No entanto,
285 o peso médio da parte aérea (PMPA) não diferiu entre as fontes (Tabela 2), evidenciando
286 uma produção de biomassa aérea estatisticamente equivalente, independentemente das
287 variações na altura das plantas.

288

289 **Tabela 2.** Efeito isolado das fontes de potássio para as variáveis altura das plantas (ALP.), peso médio da
290 parte aérea das plantas (PMPA.), número de raízes por planta (NMR.), peso médio de raiz por planta
291 (PMRP.), teor de matéria seca na raiz (TMSR.), teor de amido na raiz (TAR.), produtividade de amido (PRA.),
292 rendimento industrial (RID), peso médio de mandioca processada por planta (PMPP.), peso médio de casca
293 por planta (PMCP.). Iporá-GO, 2025.

Variável	100%PR	50%PR+50%KCl	100%KCl
ALP. (m)	2,66 b	2,67 b	2,78 a
PMPA. (kg planta⁻¹)	3,48	3,52	3,69
NMR.	10,7 a	9,6 b	9,4 b
PMRP. (kg planta⁻¹)	6,8 a	6,7 a	5,8 b

TMSR.(%)	38,9	38,5	38,3
TAR (%)	34,3	33,8	33,7
PRA (t ha⁻¹)	21,7 a	20,8 a	18,0 b
RID (%)	72,2 b	75,3 a	70,8 b
PMMP. (kg planta⁻¹)	4,91 a	5,04 a	4,1 b
PMCP. (kg planta⁻¹)	2,01 a	1,65 b	1,64 b

Médias seguidas da mesma letra minúscula (linha) não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5,0% de probabilidade. Ausência de letras indica não haver diferença significativa entre os tratamentos. Fonte: elaborado pelos autores.

Freire *et al.* (2023) ao avaliarem o uso do pó de rocha nefelina sienito como fonte de potássio na cultura da soja, obtiveram produções de biomassa da parte aérea estatisticamente semelhantes entre o remineralizador e o KCl, corroborando os achados da presente pesquisa. Em contrapartida, Nogueira *et al.* (2021), em estudo com a cultura do milho, constataram produtividade de biomassa superior no tratamento com KCl. Essas divergências na literatura podem estar associadas à falta de padronização mineralógica dos materiais e às exigências nutricionais intrínsecas de cada espécie. A baixa solubilidade dos remineralizados, caracterizada pela liberação gradual de nutrientes, pode ser insuficiente para suprir a demanda imediata de culturas com metabolismo fotossintético C4, as quais apresentam taxas de crescimento e acúmulo de biomassa mais aceleradas (Nogueira *et al.*, 2021).

Na Tabela 2 observa-se que o número de raízes por planta (NMR) no tratamento 100% PR foi significativamente superior aos demais (10,7 raízes planta⁻¹), superando o tratamento com 100 % KCl em 13,8 %, no qual as plantas apresentaram 9,4 raízes planta⁻¹. Observou-se que as plantas adubadas somente com KCl como fonte de potássio (100% KCl), quando comparado com as adubadas somente com pó de rocha (100 PR), ou pela combinação das fontes de potássio (50% PR + 50% KCl) apresentaram redução do peso médio de raízes por planta (PMRP), da produtividade de amido (PRA), do rendimento industrial (RID), do peso médio de mandioca processada por planta (PMMP.) e do peso médio de casca por planta (PMCP.).

De acordo com Martins *et al.* (2023), uma das respostas biológicas mais expressivas ao uso de remineralizadores é o aumento de raízes nos estádios iniciais da cultura. Segundo os autores, com a aplicação de pó de rocha ao solo eleva a superfície específica de contato, ampliando os nichos para a interação entre minerais e microrganismos na rizosfera, resultando em maior expansão radicular. Em contrapartida, a utilização

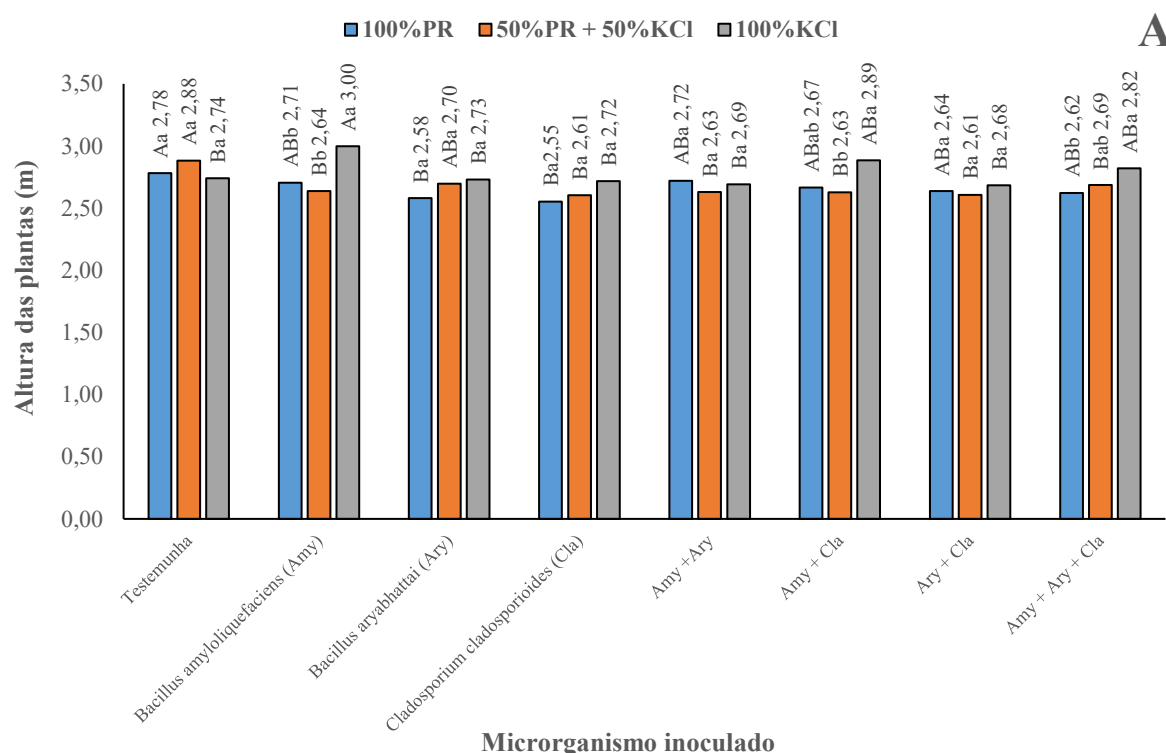
322 contínua ou o uso de doses elevadas de KCl podem causar salinização no solo e fitotoxidez,
323 em função do elevado índice salino e da alta concentração de cloro. Esse processo de
324 salinização restringe a absorção de água pelas raízes por meio da redução do potencial
325 osmótico do solo, prejudicando a brotação das manivas e o desenvolvimento inicial das
326 raízes (Uwah *et al.*, 2013; Howeler, 2014; Cruz *et al.*, 2017; Nogueira *et al.*, 2021; Gonçalves
327 *et al.* 2022). Paralelamente, o cloro em altas concentrações atua como agente nocivo à
328 saúde biológica do solo, reduzindo a população de bactérias e fungos benéficos.
329 Adicionalmente, o excesso desse íon pode causar danos ao sistema radicular e prejudicar
330 a absorção de nutrientes (Carciochi *et al.*, 2025; Gonçalves *et al.* 2022; Marzouk *et al.*,
331 2020).

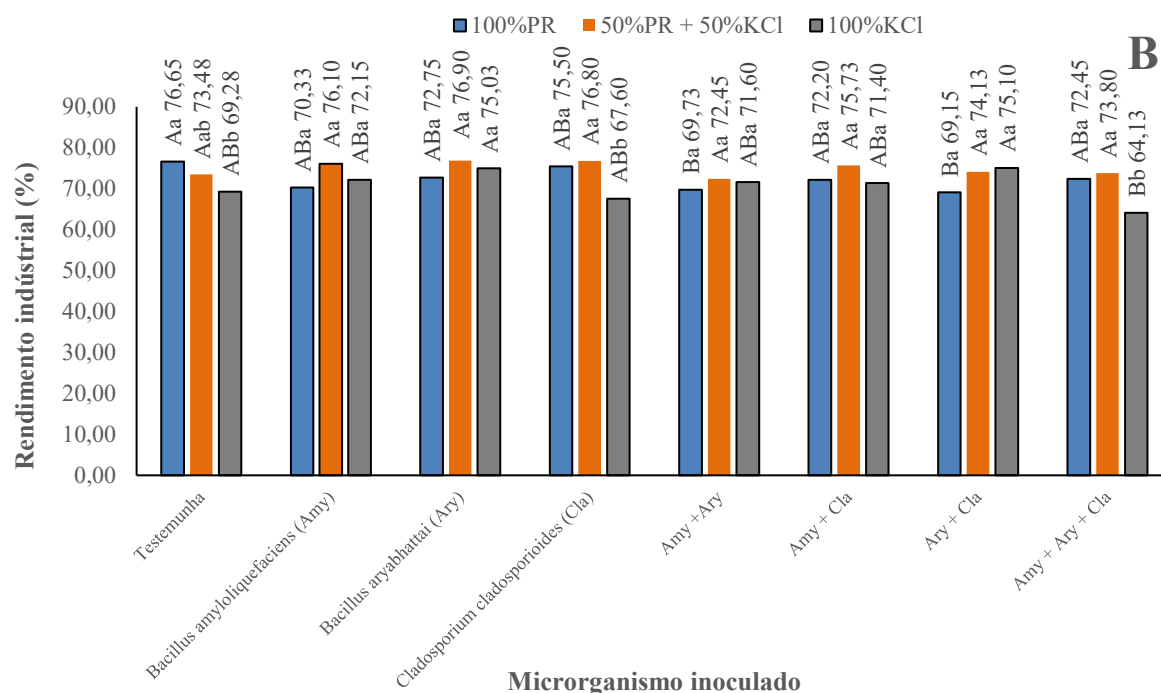
332 O maior rendimento industrial (RID), foi obtido com a fonte de potássio 50% PR +
333 50% KCl. Esse resultado pode ser reflexo do melhor equilíbrio nutricional ao longo do
334 ciclo da cultura. Enquanto o KCl disponibiliza potássio de forma imediata para o arranque
335 inicial da cultura, a nefelina sienito atua como fonte de liberação lenta, mantendo o
336 suprimento constante de potássio e outros nutrientes presentes na composição ao longo
337 do ciclo da cultura, característica já relatada pra rochas silicáticas utilizadas como
338 fertilizantes alternativos (Nogueira *et al.*, 2021). Esse sinergismo entre as fontes,
339 possivelmente contribuiu para o desenvolvimento de raízes com melhor conformidade,
340 apresentando maior diâmetro, comprimento e formato mais regular, resultando em
341 menor quantidade de resíduos (PMCP) durante o processo de descasque. Essa
342 conformidade pode explicar por que o tratamento 50% PR + 50% KCl, mesmo
343 apresentando menor número de raízes por planta (NMP), obteve peso de raízes (PMRP)
344 estatisticamente igual ao tratamento 100% PR, sugerindo que as plantas com esta fonte
345 de potássio compensaram o menor número de raízes por raízes de reserva mais robustas
346 e desenvolvidas.

347 Quanto à qualidade das raízes, verificou-se que as variáveis teor de matéria seca
348 (TMSR) e teor de amido na raiz (TAR) não foram influenciadas pelas fontes de potássio,
349 indicando que a substituição do KCl pela nefelina sienito não comprometeu os atributos
350 qualitativos do produto. O teor de amido é um dos principais indicadores de qualidade
351 industrial e valor comercial da mandioca visto que influencia diretamente o rendimento
352 de fécula farinha e derivados. Elevados teores de amido e matéria seca são comumente
353 associados a raízes com textura superior e maior eficiência de processamento industrial
354 (Oliveira *et al.*, 2023b).

A interação entre fontes de potássio e microrganismos demonstrou respostas divergentes em relação ao crescimento vegetativo e ao rendimento industrial (Figura 1). A combinação de KCl com microrganismos inoculados ou coinoculados, potencializou o crescimento vegetativo. O tratamento 100% KCl associado a inoculação isolada de *Bacillus amyloliquefaciens*, bem como quando coinoculado com *C. clamosporioides* (Amy+Cla) e com *C. clamosporioides* e *B. aryabhatai* (Amy+Ary+ Cla) proporcionou maior altura de plantas (Figura 1A). Este resultado decorre da rápida solubilização do KCl e da produção de fitormônio por *B. amyloliquefaciens*, fatores que podem ter contribuído para maior expansão celular e alongamento do caule, (Cuvaca *et al.*, 2017; Ribeiro *et al.*, 2020), resultando na maior altura das plantas.

Figura 1. Altura das plantas (A) e rendimento industrial de raízes processadas (B) em função da interação das fontes de potássio x microrganismos inoculados. Iporá, 2025. OBS: Letras maiúsculas comparam o efeito das fontes de potássio entre os microrganismos inoculados e letras minúsculas comparam o efeito das fontes de potássio dentro de cada microrganismo inoculado.





Fonte: elaborado pelos autores.

A redução da altura das plantas nos tratamentos com 100% PR e com 50% PR + 50% KCl associado a estes inoculantes (Figura 1A) também pode estar relacionada a imobilização temporária de nutrientes pela biomassa microbiana, ou competição entre microrganismos, fato que reduz a eficiência do intemperismo, e consequentemente a liberação dos nutrientes por fontes de baixa solubilidade como o pó de rocha KMC (Ribeiro *et al.*, 2020; Assunção *et al.*, 2024). Ribeiro *et al.* (2020) destacam que os efeitos de coinoculações de microrganismos com remineralizadores são altamente dependentes do contexto (cepas, proporções, mineralogia da rocha), explicando os resultados variáveis observados.

Esse resultado corrobora com estudos que demonstram que fontes de K prontamente solúveis, como o KCl, promovem respostas mais rápidas no crescimento da parte aérea em comparativos de fertilizantes minerais (Marzouk *et al.* 2020; Silveira *et al.* 2025). A ação sinérgica entre K solúvel e bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV), como *Bacillus* spp., pode ser explicada pela capacidade desses microrganismos de aumentar a absorção inicial de nutrientes e produzir fitormônios que medeiam o crescimento e vigor dos tecidos vegetativos, ampliando a resposta ao K disponível (Vejan *et al.* 2016; Sonnad *et al.* 2026; Al-Tammara & Khalifa 2022).

No entanto, esse aumento na altura não melhorou de forma equivalente a qualidade das raízes, conforme refletido no rendimento industrial (Figura 1B). Amarullah *et al.* (2017) observou que o excesso de crescimento vegetativo nem sempre resulta em rendimento de raízes, pois a produção depende do equilíbrio entre crescimento da parte aérea e alocação de assimilados para a raízes tuberosas. Essa divergência indica que o crescimento vegetativo excessivo pode desviar fotoassimilados para a parte aérea em detrimento das raízes (Chiewchankaset *et al.*, 2022; Magolbo *et al.*, 2024; Punyasu *et al.*, 2024). Além disso, o K solúvel do KCl está sujeito a lixiviação, e considerando que a mandioca é uma cultura de ciclo longo, sendo a colheita realizada 12 meses após o plantio, o uso desta fonte isolada de K, possivelmente, não sustentou a demanda das plantas em potássio durante o enchimento das raízes (Manning *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2023a).

De modo geral, observa-se na Figura 1B que os tratamentos em que as plantas foram adubadas com pó de rocha (100% PR e 50% PR + 50% KCl), na maioria das situações de uso dos microrganismos (inoculados e coinoculados), e nas plantas testemunhas, apresentaram maior rendimento industrial. A superioridade destes tratamentos pode estar associada à liberação lenta e sustentada de K e outros minerais, potencializada pelo intemperismo microbiano, que alinha o suprimento de nutrientes com a fase de desenvolvimento das raízes (Ribeiro *et al.*, 2020; Freire *et al.*, 2023). A estratégia combinada (50% PR + 50% KCl) é interessante, pois fornece K imediato para o estabelecimento inicial e K gradual durante o desenvolvimento das raízes, otimizando o rendimento industrial (Oliveira *et al.*, 2023a; Assunção *et al.*, 2024).

No que tange ao efeito isolado dos microrganismos, observou-se que a inoculação com *B. amyloliquefaciens* (Amy) favoreceu o maior acúmulo de biomassa aérea (4,04 kg planta⁻¹) e peso médio de raízes (6,83 kg planta⁻¹), embora não tenha diferido estatisticamente das coinoculações duplas (Tabela 3). Esse efeito pode estar relacionado à capacidade de *B. amyloliquefaciens* em produzir fitormônios especialmente auxinas, que estimulam a divisão celular e o desenvolvimento radicular. Além disso, essa bactéria pode mobilizar nutrientes na rizosfera por meio da produção de sideróforos e enzimas extracelulares aumentando a disponibilidade de ferro e de outros elementos essenciais para as plantas (Talboys *et al.*, 2014; Backer *et al.*, 2018). Adicionalmente, Miljakovic *et al.* (2020) em seu amplo estudo, demonstram que a inoculação com *Bacillus* spp. promove supressão de doenças radiculares e reduz a carga de patógenos, permitindo maior

alocação de carbono para os órgãos de reserva, resultando em aumento significativo na biomassa aérea e radicular.

Tabela 3. Efeito isolado dos microrganismos inoculados altura das plantas (ALP.), peso médio da parte aérea das plantas (PMPA.), peso médio de raiz por planta (PMRP.), teor de matéria seca na raiz (TMSR.), teor de amido na raiz (TAR.), produtividade de amido (PRA.), peso médio de mandioca processada por planta (PMPP.). Iporá-GO, 2025.

Variável	ALP.	PMPA	PMRP	PMPP	PRA.	TMSR	TAR
	--m--	-----Kg planta ⁻¹ -----				-----%-----	
Testemunha	2,80 a	3,72 ab	6,19 ab	4,53 ab	18,55 ab	37,12 b	32,47 b
<i>B. Amyloliquefaciens (Amy)</i>	2,78 a	4,04 a	6,83 a	4,99 a	20,31 ab	36,88 b	32,23 b
<i>B. Aryabhattai (Ary)</i>	2,67 ab	3,52 ab	6,23 ab	4,66 ab	19,53 ab	38,73 ab	34,08 ab
<i>C. Cladosporioides (Cla)</i>	2,63 b	3,61 ab	6,67 ab	4,94 a	21,19 ab	38,97 ab	34,32 ab
Amy. + Ary.	2,68 ab	3,78 ab	6,87 a	4,89 ab	22,33 a	39,80 a	35,15 a
Amy. + Cla.	2,73 ab	3,24 ab	6,84 a	5,01 a	22,16 a	39,74 a	35,09 a
Ary. + Cla.	2,64 b	3,54 ab	6,48 ab	4,70 ab	20,32 ab	38,35 ab	33,70 ab
Amy. + Ary. + Cla	2,71 ab	3,09 b	5,28 b	3,75 b	17,01 b	39,09 ab	34,44 ab

Médias seguidas da mesma letra minúscula (coluna) não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5,0% de probabilidade. Fonte: elaborado pelos autores.

No entanto, para as variáveis relacionadas a qualidade industrial (TMSR e TAR), as coinoculações duplas de Amy + Ary e Amy + Cla superaram significativamente a testemunha e o Amy isolado, crescendo em mais de 2,5% o teor de amido na raiz. Enquanto os resultados anteriores (Tabela 1) indicaram que o microrganismo isolado já influenciava a qualidade, os dados da Tabela 3 revelam que a diversidade microbiana na rizosfera (combinação de bactérias ou bactéria + fungo) potencializa a qualidade industrial das raízes, com destaque a associação com pó de rocha nefelina sienito como observado na Figura 1. Neste contexto, o uso da coinoculação de Amy + Ary e Amy + Cla pode ser uma alternativa viável para melhoria da produção e qualidade das raízes de mandioca.

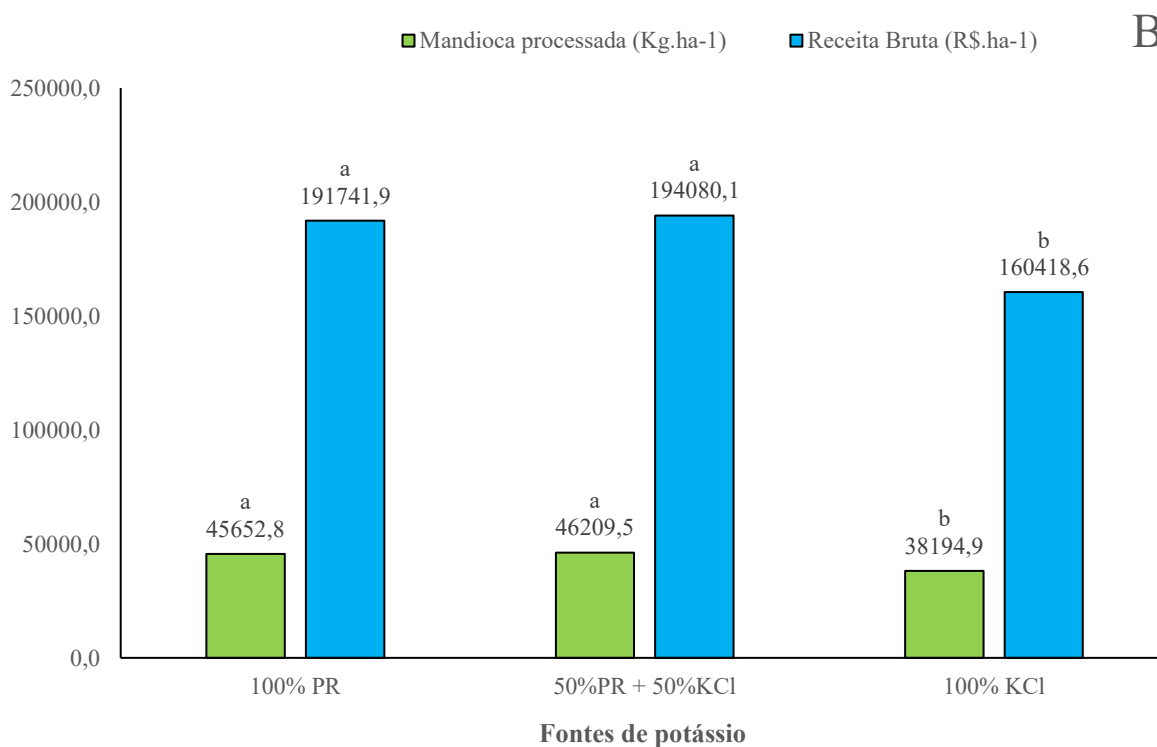
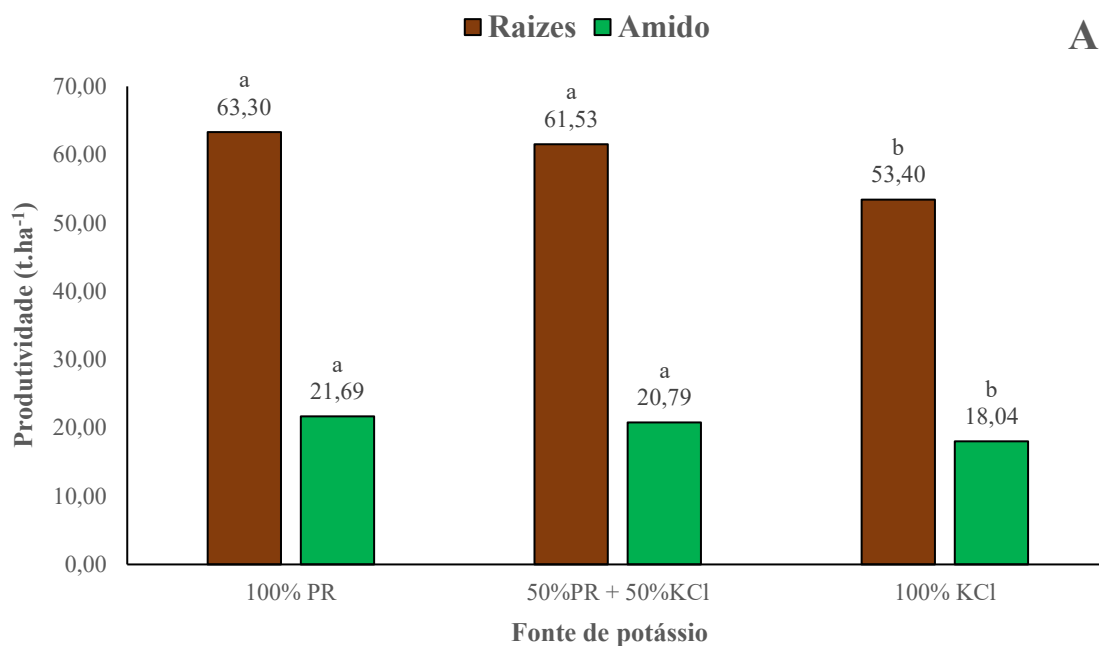
Essa superioridade das coinoculações duplas (Amy + Ary e Amy + Cla) sugere a ocorrência de sinergismo metabólico entre os microrganismos. Esse sinergismo ocorre quando microrganismos complementares fornecem funções distintas que se potencializam mutuamente: enquanto uma bactéria pode solubilizar ou mobilizar nutrientes (potássio, fosforo entre outros) e produzir fitormônios, o fungo pode ampliar

a exploração do solo e a captação de nutrientes por meio de suas hifas, favorecendo o desenvolvimento produtivo das plantas (Severo *et al.*, 2025; Zeng *et al.*, 2025).

Em contraste, a coinoculação tripla (Amy + Ary + Cla) resultou em decréscimos significativos em todos os componentes de rendimento de peso (Tabela 3), indicando possível efeito antagônico entre os microrganismos. Esse baixo desempenho da coinoculação tripla corrobora com estudos que apontam que o excesso de inóculos pode gerar competição por nichos e recursos na rizosfera, prejudicando o balanço energético da planta hospedeira. Renu *et al.* (2016) demonstram que a compatibilidade entre microrganismos é essencial para o sucesso da coinoculação e que misturas excessivas podem resultar em antagonismo devido a competição. Além disso algumas cepas de *Bacillus* podem produzir lipopeptídeos e antibióticos que inibem fungos e outras bactérias coinoculadas, reduzindo a funcionalidade do consórcio (Sun *et al.*, 2025). Portanto, a seleção de microrganismos para a coinoculação deve priorizar a complementariedade funcional e a compatibilidade entre cepas, evitando misturas excessivas que possam resultar em efeitos antagônicos e redução de produtividade e qualidade das raízes.

Analisando a Figura 2A, observa-se que a utilização de pó de rocha nefelina sienito, de forma isolada (100% PR) ou combinada com o KCl (50% PR + 50% KCl), também proporcionou incrementos significativos na produtividade de raízes e de amido.

Figura 2. Produtividade de raízes comerciais e produtividade de amido (A), produtividade de mandioca processada (Kg ha^{-1}) e Receita bruta ($\text{R\$ ha}^{-1}$) do cultivar de mandioca IAC Vassourinha branca 12 meses, após o plantio em função das fontes de potássio utilizadas. Iporá-GO, 2025. Em cada Figura e para cada variável, médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5,0% de probabilidade.



Fonte: elaborado pelos autores.

Para estas variáveis, estes tratamentos, quando comparado com os valores obtidos exclusivamente com o uso de KCl (100% KCl), foram respectivamente 18,54 e 15,22% superior para produção de raízes e 20,23 e 15,24 % superior para produção de amido. Este resultado é extremamente relevante quando comparado a produtividade de raízes média nacional, estimada a cerca de 15,5 t.ha⁻¹ (IBGE, 2024), e a média mundial de

aproximadamente 12,8 t ha⁻¹ (FAO, 2022). Os índices alcançados neste experimento situam-se significativamente acima dessas médias, demonstrando o alto potencial produtivo da cultura da mandioca e do sistema de produção adotado pela fazenda, combinado a utilização de remineralizadores associados com microrganismos.

Os dados indicam que nas condições do experimento, a nefelina sienito demonstrou ser excelente opção como fonte de potássio para a cultura da mandioca, seja de forma isolada ou combinada com KCl, pois sustentou excelente produtividade de raiz, que resultou em maior produção de amido, superando os resultados obtidos pelo fertilizante químico. Esse desempenho produtivo pode estar relacionado a nutrição mais equilibrada fornecida pelo pó de rocha, pois diferente dos fertilizantes químicos, os remineralizadores possuem na composição macros (Ca, Mg, P, K) e micronutrientes (Claudio *et al.* 2026), além de silício. Esse elemento tem sido associado ao aumento da eficiência nutricional e à maior tolerância a estresses bióticos e abióticos (Brito *et al.*, 2019; Coskun *et al.*, 2019).

A produtividade de mandioca processada pronta para o comércio (Figura 2B), acompanhou a produtividade de raízes, resultando em receita bruta (RB) superior nos tratamentos com nefelina sienito (100% PR) e a combinação com KCl (50%PR + 50% KCl). A receita bruta obtida nestes tratamentos foi respectivamente 19,5% e 20,9% superior ao tratamento 100% KCl. Embora estatisticamente equivalentes, o tratamento 50% PR + 50% KCl gerou R\$ 2.338,30 a mais comparado ao 100% PR, resultado do maior rendimento industrial (Tabela 2).

A receita bruta, representa o valor total gerado pela venda da mandioca minimamente processada (descascada, embalada e congelada) produzida em um hectare, considerando o preço de R\$ 4,20 por quilo, valor médio praticado na região. Neste cenário, as fontes contendo remineralizador superam o fertilizante químico em mais de R\$ 30.000,00 por hectare, resultado da maior produtividade. Esse valor é extremamente expressivo, pois essa diferença pode custear a implantação de mais de um hectare de lavoura, levando em consideração o custo total médio entre R\$ 9.000,00 a R\$ 26.000,00 segundo a série histórica de custo de produção de mandioca no Brasil na safra 2024/2025 (Conab, 2025). Segundo Silveira *et al.* (2023), a viabilidade econômica da mandioca de mesa está diretamente relacionada à produtividade e aos custos de produção, especialmente aqueles associados à adubação. O aumento no uso dos fertilizantes pode elevar os custos, porém, quando acompanhado por incrementos produtivos, resulta em

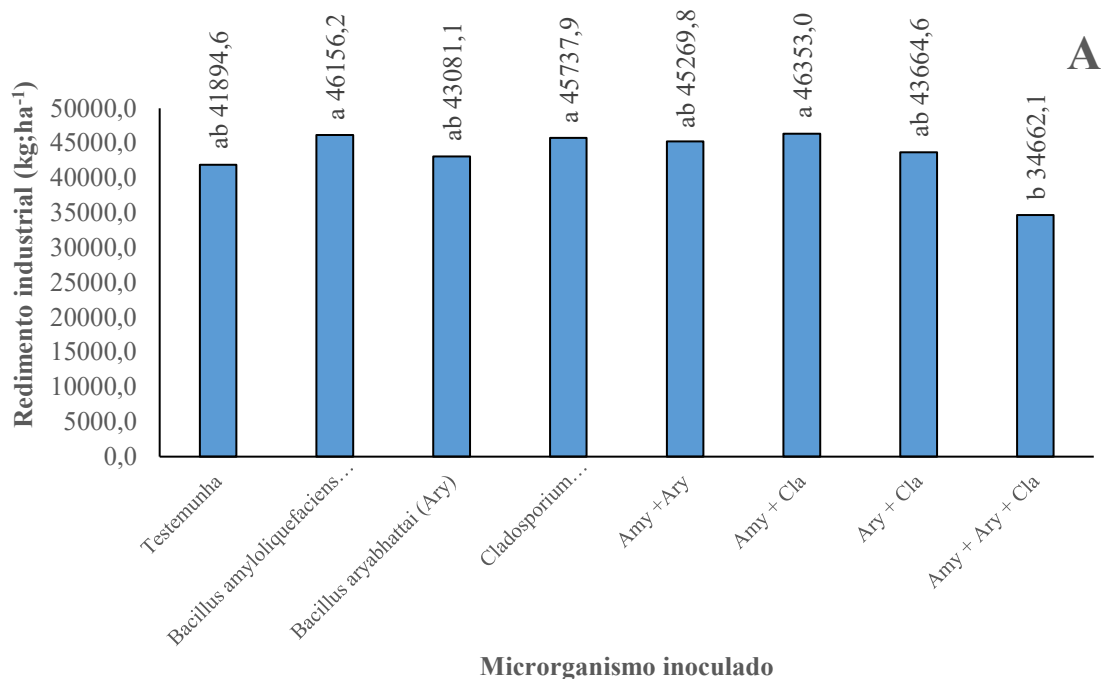
maior receita líquida, uma vez que a receita está diretamente ligada à quantidade de raízes comercializáveis.

Além disso, a mandioca apresenta elevado valor econômico no mercado, especialmente quando destinada ao processamento mínimo, reforçando a importância de sistemas produtivos eficientes e com adequado manejo nutricional (Barata *et al.*, 2021). Estudos econômicos em mandioca demonstram que investimentos em nutrição de plantas podem alcançar relações custo-benefício superior a 2:1 (dois para um), evidenciando a alta viabilidade econômica (Merumba *et al.*, 2022; Babu CS & Isaac, 2023; Silveira *et al.*, 2023). Dessa forma, estratégias que promovam a maior eficiência nutricional podem contribuir diretamente para a sustentabilidade econômica da cultura. Neste contexto, o uso da nefelina sienito apresenta-se não apenas como estratégia de sustentabilidade ambiental, mas como alternativa de alta viabilidade econômica, principalmente frente a instabilidade de preços dos fertilizantes importados.

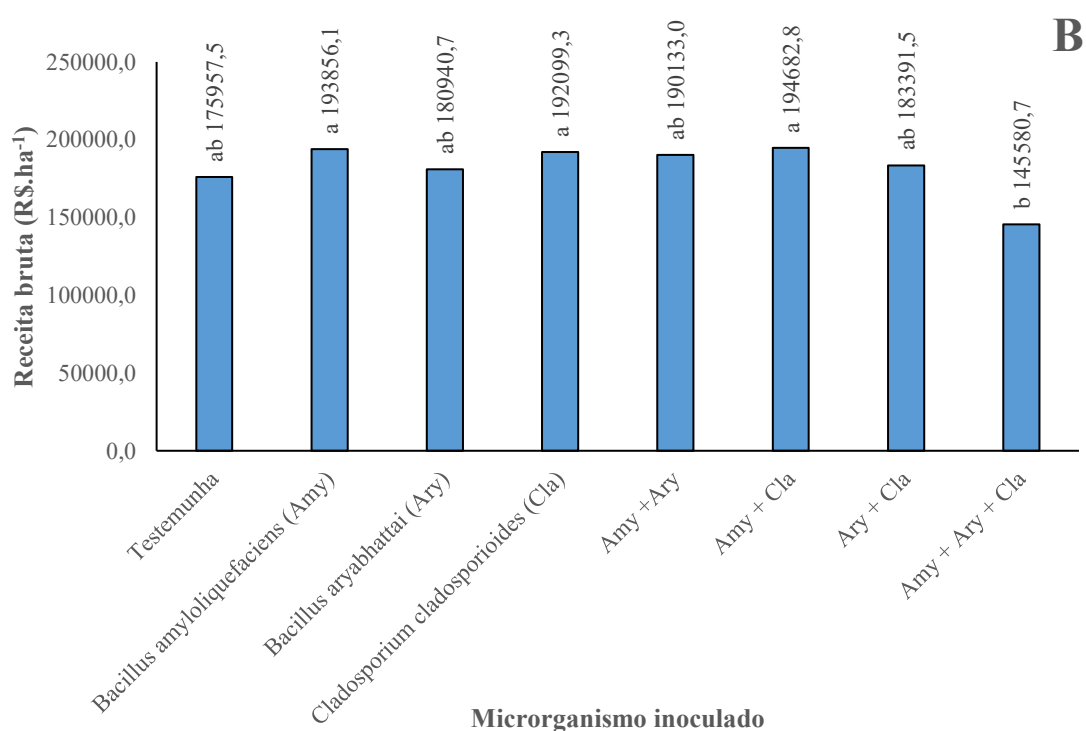
O uso do remineralizador reduz a dependência de insumos dolarizados (KCl) oriundos de importação. Embora o volume de aplicação do pó de rocha seja maior, o custo por unidade de nutriente (R\$/kg de K₂O) costuma ser menor, especialmente em regiões próximas a jazidas. A combinação de alta produtividade, menor custo e agregação de preço de venda (processamento) maximiza a margem de lucro, tornando a nefelina sienito altamente competitiva para o produtor regional de Iporá-GO.

Avaliando o impacto biológico no rendimento industrial e na receita bruta (Figura 3), verificou-se que a inoculação com *B. amyloliquefaciens* (Amy), *C. cladosporioides* (Cla) e a coinoculação Amy + Cla embora sem diferença estatisticamente significativa, apresentaram tendência de melhor desempenho quando comparado à testemunha. Esses microrganismos proporcionaram aumento no rendimento industrial, que se converteu em acréscimo médio aproximado de 10% na receita bruta quando comparado com a testemunha, que caso comercializado a R\$ 4,20 Kg, geraria o adicional de mais de R\$ 17.500,00 por hectare.

Figura 3. Rendimento industrial de mandioca descascada (A) e receita bruta (B) do cultivar de mandioca IAC Vassourinha branca 12 meses após o plantio em função dos microrganismos inoculados. Iporá-GO, 2025. Em cada Figura e para cada variável, médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5,0% de probabilidade.



543



544

545

Fonte: elaborado pelos autores.

546

547

548

549

550

Estudos demonstram que consórcios de microrganismos promotores de crescimento podem aumentar a produtividade da mandioca e melhorar a relação custo-benefício quando combinados com estratégias de nutrição balanceada (Babu CS & Isaac, 2023). Em contrapartida, a coinoculação tripla apresentou o menor desempenho produtivo e financeiro, sendo estatisticamente inferior à testemunha. Esse resultado

551 confirma a tendência observada anteriormente, indicando que a inclusão do *Baryabhattai*
552 (Ary) no consórcio triplo parece gerar competição por nicho ou antagonismos
553 microbianos que limita o desempenho da planta, ao invés de potencializá-lo.

554 De modo geral, os resultados obtidos demonstram o elevado potencial do pó de
555 rocha nefelina sienito (produto comercial KMC®) como fonte alternativa de potássio para
556 a cultura da mandioca, seja de forma isolada ou em associação com KCl e microrganismos
557 solubilizadores. A utilização do remineralizador proporcionou ganhos produtivos
558 agronômicos, industriais e econômicos, iguais ou superiores ao fertilizante químico
559 solúvel. Além dos benefícios produtivos observados, o uso da nefelina sienito e dos
560 microrganismos pode contribuir para a redução da dependência de fertilizantes
561 potássicos importados, favorecendo sistemas de produção mais resilientes, sustentáveis
562 e economicamente viáveis. Nesse contexto, essa tecnologia pode apresentar importante
563 alternativa para pequenos produtores e para a agricultura familiar, por possibilitar a
564 utilização de recursos minerais disponíveis regionalmente, associando ganhos de
565 produtividade, redução de custos e maior estabilidade econômica da atividade. No
566 entanto, é aconselhável a realização de novos estudos para avaliar os efeitos a longo prazo
567 desse remineralizador, bem como a dinâmica e o impacto da interação microbiana em
568 diferentes materiais genéticos de mandioca e em outras culturas.

CONCLUSÃO

1. Nas condições do experimento, a nefelina sienito (KMC) demonstrou potencial para substituir parcialmente ou totalmente o KCl como fonte de potássio para a cultura da mandioca, proporcionando produtividades de raízes e de amido iguais ou superiores ao fertilizante convencional.
2. A combinação 50% PR + 50% KCl proporcionou maior rendimento industrial.
3. As coinoculações de *B. amyloliquefaciens* + *B. aryabhattai* e *B. amyloliquefaciens* + *C. cladosporioides* contribuíram para o aumento dos teores de matéria seca e amido nas raízes, contribuindo para a melhoria da qualidade industrial da mandioca.
4. A coinoculação tripla (Amy + Ary + Cla) proporcionou menor produtividade de raízes, produção de amido, rendimento industrial e receita bruta, devendo ter cautela no uso em cultura da mandioca, pois torna-se necessário a realização de mais estudos para melhor entender a interação entre estes microrganismos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-TAMMAR, F. K.; KHALIFA, A. Y. Z. Plant growth promoting bacteria drive food security. **Brazilian Journal of Biology**, [s. l.], vol. 82, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.267257>
- AMARULLAH, A. *et al.* Correlation of Growth Parameters with Yield of Two Cassava Varieties. **Ilmu Pertanian (Agricultural Science)**, [s. l.], vol. 1, no. 3, p. 100, 2017. DOI: <https://doi.org/10.22146/ipas.10706>.
- ANDA-Associação Nacional para Difusão de Adubos. 2023. Disponível em: <https://anda.org.br/acervos/>. Acesso em: abril de 2026.
- ASSUNÇÃO, R. D. V. *et al.* Microbial-inoculated remineralizers as source of potassium and other nutrients. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], vol. 28, n. 2, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n2e275193>
- BABU CS, A.; ISAAC, S. R. Consortium Biofertilizers to Economise Nutrient use and Sustain Productivity in Cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Indian Journal of Ecology**, [s. l.], 2023. DOI: <https://doi.org/10.55362/IJE/2023/3856>
- BACKER, R. *et al.* Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], vol. 9, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- BARATA, H. S. *et al.* The importance of agro-economic characteristics for minimal cassava processing: A review. **Research, Society and Development**, [s. l.], vol. 10, n. 7, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16904>.
- BENEVIDES FILHO, P. R. R. *et al.* Potential Soil Remineralizers from Silicate Rock Powders (SRP) as Alternative Sources of Nutrients for Agricultural Production (Amazon Region). **Minerals**, [s. l.], vol. 13, no. 10, p. 1255, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13101255>.
- BRITO, R. S. *et al.* Rochagem na agricultura: importância e vantagens para adubação suplementar. **South American Journal**, [s. l.], vol. 6, n. 1, pp. 528–540, 2019. ISSN: 2446-4821.
- CARCIOCHI, W. D. *et al.* Quantifying potassium requirement and removal across crop species. **Field Crops Research**, [s. l.], vol. 322, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109717>.
- CHIEWCHANKASET, P. *et al.* Effective Metabolic Carbon Utilization and Shoot-to-Root Partitioning Modulate Distinctive Yield in High Yielding Cassava Variety. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], vol. 13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.832304>.
- CLAUDIO, F. L. *et al.* Macronutrientes primários e produtividade da mandioca cultivada com pó de rocha nefelina-sienito e microrganismos bio-solubilizadores. **Cadernos Cajuína**, [s. l.], vol. 11, no. 2, p. e1760, 2026. DOI: <https://doi.org/10.52641/cadcajuv11i2.1760>.

CHUA, M. F. *et al.* Potassium fertilisation is required to sustain cassava yield and soil fertility. **Agronomy**, [s. l.], vol. 10, no. 8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10081103>.

COMPANT, S. *et al.* A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application. In **Journal of Advanced Research**. V. 19: 29-37. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>.

CONAB-Companhia Nacional de Abastecimento.2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/custos-de-producao/arquivos-custo-de-producao/agricolas>. Acesso em março de 2026.

COSKUN, D. *et al.* The controversies of silicon's role in plant biology. **New Phytologist**, [s. l.], vol. 221, no. 1, pp. 67–85, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.15343>

CRUZ, J. L. *et al.* Salinity reduces carbon assimilation and the harvest index of cassava plants (*Manihot esculenta* Crantz). **Acta Scientiarum. Agronomy**, vol. 39, no. 4, p. 545, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i4.32952>.

CUVACA, I. B. *et al.* Nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer effects on cassava tuber yield in the coastal district of Dondo, Mozambique. **African Journal of Agricultural Research**, [s. l.], vol. 12, no. 42, pp. 3112–3119, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5897/ajar2017.12619>.

EMBRAPA- (Empresa brasileira de pesquisa agropecuária). 2024.Disponível em: <https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/cultivos/mandioca#:~:text=Origin%C3%A1ria%20da%20Am%C3%A9rica%20do%20Sul,principalmente%20nos%20pa%C3%ADses%20em%20desenvolvimento>. Acesso em 06 maio de 2026.

ESPER NETO, M. *et al.* Effects of Potassium Doses and Application Timing on Cassava (*Manihot Esculenta* Crantz) Yield and Nutritional Composition in Sandy Soil of Southern Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 57, p.703–713. 2026. <https://doi.org/10.1080/00103624.2026.2654419>.

ETESAMI, H., EMAMI, S & ALIKHANI, H.A. 2017. Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects-a review. In **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**.v. 17: 897-911.

EZUI, K. S. *et al.* Fertiliser requirements for balanced nutrition of cassava across eight locations in West Africa. **Field Crops Research**, [s. l.], vol. 185, pp. 69–78, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.005>.

FAO- (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura). 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Acesso em: 06 de maio de 2026.

- FERNANDES, A. M. *et al.* Yield and nutritional requirements of cassava in response to potassium fertilizer in the second cycle. **Journal of Plant Nutrition**, [s. l.], vol. 40, no. 20, pp. 2785–2796, 2017. <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1382520>.
- FREIRE, Y. B. D. *et al.* Use of nepheline-syenite rock dust as an alternative source of potassium in soybean cultivation. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, [s. l.], vol. 16, no. 4, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2023v16n4e11565>.
- FREITAS FIALHO, J.; VIEIRA, E. A. **Mandioca no Cerrado: orientações técnicas**. DF, Embrapa Cerrados. 2 ed., 203 p. ISBN: 978-85-7035-203-4. 2013.
- GAZOLA B, FERNANDES AM, HELLMEISTER G, ABRAMI LS, SILVA RM, SORATTO RP. (2022). Potassium management effects on yield and quality of cassava varieties in tropical sandy soils. *Crop & Pasture Science* 73, 285–299. <https://doi.org/10.1071/CP21229>.
- GONÇALVES, Y. S. Potassium sources impact on cassava plant productivity, quality and mineral composition. *Journal of Plant Nutrition*, v.45, p. 86–94. 2022. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1949465>.
- HOWELER, R. Sustainable soil and crop management of cassava in asia - a reference manual, 280 p, 2014.
- IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>. Acesso em maio de 2026.
- IMMANUEL, S. *et al.* Cassava for Food Security, Poverty Reduction and Climate Resilience: A Review. **Indian Journal of Ecology**, [s. l.], vol. 51, pp. 21–31, 2024. <https://doi.org/10.55362/ije/2024/4191>.
- MAGOLBO, L. A. de S. *et al.* Accumulation and distribution dynamics of biomass, phosphorus, and starch in cassava fertilized with or without phosphorus during long growth cycles. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [s. l.], vol. 48, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20240047>.
- MARTINS, E. S; HARDOIM, P. R.; MARTINS, E. S. Efeito da aplicação dos remineralizadores no solo. *In: Informe Agropecuário: remineralizadores e a fertilidade do solo*, [S. l.]: [s. d.], vol. 44, n. 321 pp. 49–56, 2023. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1156814/1/Eder-efeito-da-aplicacao-dos-remineralizadores-no-solo.pdf>.
- MARZOUK, N. M. *et al.* Cassava Cultivars Response to Different Levels of Potassium Fertilization under Drip Irrigation and Sandy Soil Conditions. **Egyptian Journal of Soil Science**, [s. l.], vol. 60, pp. 317–334, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21608/ejss.2020.34054.1367>.
- MERUMBA, M. S. *et al.* Profitability of Using Different Rates of Farmyard Manure and Potassium Fertilizer for Cassava Production in Bukoba, Missenyi and Biharamulo Districts,

Tanzania. **Journal of Experimental Agriculture International**, [s. l.], vol. 44, pp. 132–149, 2022. DOI: <https://doi.org/10.9734/jeai/2022/v44i1030887>

MILJAKOVIĆ, D.; MARINKOVIĆ, J.; BALEŠEVIĆ-TUBIĆ, S. The Significance of *Bacillus* spp. in Disease Suppression and Growth Promotion of Field and Vegetable Crops. **Microorganisms**, [s. l.], vol. 8, no. 7, p. 1037, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms8071037>.

MOHAMMED, S.M.O. *et al.* Comparison of silicate minerals as sources of potassium for plant nutrition in sandy soil. *Eur J Soil Sci.* v. 65, p. 653-662. 2014. <https://doi-org.ez369.periodicos.capes.gov.br/10.1111/ejss.12172>.

NOGUEIRA, T. A. R. *et al.* Nepheline Syenite and Phonolite as Alternative Potassium Sources for Maize. **Agronomy**, [s. l.], vol. 11, n. 7, p. 1385, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11071385>.

OLIVEIRA, C. B. A. de *et al.* Evaluation of Agronomic Efficiency with Regional Source of Natural Potassium in the Brazilian Midwest. **Journal of Sustainable Development**, [s. l.], vol. 16, n. 5, p. 20, 2023a. DOI: <https://doi.org/10.5539/jsd.v16n5p20>

OLIVEIRA, L. A. *et al.* Teor e Caracterização do Amido de Genótipos de Mandioca em Diferentes Idades de Colheita. **Boletim de pesquisa e Desenvolvimento 148/ Embrapa**, [s. l.], p. 38, 2023b. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1158317/teor-e-caracterizacao-do-amido-de-genotipos-de-mandioca-em-diferentes-idades-de-colheita>.

Oliveira-Paiva, C.A. *et al.* Microrganismos solubilizadores de fósforo e potássio na cultura da soja. IN: Meyer, Mauricio Conrado. Bioinsumos na cultura da soja. Embrapa. Brasília-DF.2022.

PUNYASU, N. *et al.* Modeling cassava root system architecture and the underlying dynamics in shoot–root carbon allocation during the early storage root bulking stage. **Plant and Soil**, [s. l.], vol. 507, n. 1, pp. 863–880, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06771-y>.

QUEIRÓS, L. S. S. de *et al.* Aspectos biométricos e produção de etanol em cultivares de mandioca com inoculantes biológicos. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [s. l.], vol. 18, p. e11763, 2025. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2025v18e11763>.

RAMOS, C. G. *et al.* Possibilities of using silicate rock powder: An overview. **Geoscience Frontiers**, [s. l.], vol. 13, no. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185>.

RENU, R. *et al.* Ecological Success of Compatible Microbes in Consortia Isolated from Rice Rhizosphere for Growth and Yield of Mung Bean (*Vigna radiata* L.). **Journal of Pure and Applied Microbiology**, [s. l.], vol. 10, n. 4, pp. 3231–3239, 2016. DOI: <https://doi.org/10.22207/JPAM.10.4.101>.

RIBEIRO, I. D. A. *et al.* Use of Mineral Weathering Bacteria to Enhance Nutrient Availability in Crops: A Review. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], vol. 11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.590774>.

SAE/PR-Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Produção nacional de fertilizantes: estudo estratégico. Brasília. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf. Acesso em: jun. 2026.

SANTIAGO A.D. & ROSSETTO R. Adubação Mineral. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana-de-acucar/producao/correcao-e-adubacao/diagnose-das-necessidades-nutricionais/recomendacao-de-correcao-e-adubacao/adubacao-mineral>. Acessado em maio de 2026.

SEVERO, H. C. de A. R. *et al.* Co-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus subtilis* enhances morphological traits, growth, and nutrient uptake in maize under limited phosphorus availability. **Scientific Reports**, [s. l.], vol. 15, no. 1, p. 25448, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10038-6>.

SILVEIRA, C. P. *et al.* Blending Potassium Rocks with KCl Fertilizer to Enhance Crop Biomass and Reduce K Leaching in Sandy Soil. **Soil Systems**, [s. l.], vol. 9, n. 3, p. 83, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems9030083>.

SILVEIRA, F. P. da M. *et al.* Economic viability of irrigated cultivation of table cassava cultivars under phosphate fertilization. **Revista de Ciencias Agroveterinarias**, [s. l.], vol. 22, n. 2, pp. 173–185, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10038-6>.

SONNAD, P. *et al.* Potassium solubilizing bacteria (KSB): Framework, stimulation of plant growth and future outlook: A review. **International Journal of Research in Agronomy**, [s. l.], vol. 9, no. 2S, pp. 57–65, 2026. DIO: <https://doi.org/10.33545/2618060X.2026.v9.i2Sa.4882>.

SUN, X. *et al.* Cooperative Interactions Between *Bacillus* and *Lysobacter* Enhance Consortium Stability and Fusarium Wilt Suppression in Cucumber. **Microbial Ecology**, [s. l.], vol. 88, no. 1, p. 92, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-025-02592-3>.

TAIZ, L. *et al.* 2017. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6th. edn. Porto Alegre, Artmed. ISBN 978-85-8271-367-9.

TALBOYS, P. J. *et al.* Auxin secretion by *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 both stimulates root exudation and limits phosphorus uptake in *Triticum aestivum*. **BMC Plant Biology**, [s. l.], vol. 14, no. 1, p. 51, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2229-14-5>.

TIAN, Y. *et al.* Multi-omics analysis reveals the effects of three application modes of plant growth promoting microbes biofertilizer on potato (*Solanum tuberosum* L.) growth under alkaline loess conditions. **Microbiological Research**. v. 287. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127855>.

TRIVEDI, P. *et al.* Plant–microbiome interactions: from community assembly to plant health. In **Nature Reviews Microbiology**. v. 18: 607-621. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1>.

UWAH, D. F. *et al.* CASSAVA (*Manihot esculenta* Crantz) PERFORMANCE AS INFLUENCED BY NITROGEN AND POTASSIUM FERTILIZERS IN UYO, NIGERIA. **Journal of Animal and Plant Sciences**, [s. l.], vol. 23, no. 2, pp. 550–555, 2013.

VALICHESKI, R. R. *et al.* Uso do pó de rocha nefelina-sienito como fonte de potássio na soja – efeitos nos atributos químicos do solo. **contribuciones a las ciencias sociales**, [s. l.], vol. 17, no. 8, p. e9558, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.8-268>.

VEJAN, P. *et al.* Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Agricultural Sustainability—A Review. **Molecules**, [s. l.], vol. 21, no. 5, p. 573, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules21050573>.

ZENG, W. *et al.* Effects of combined inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizosphere bacteria on seedling growth and rhizosphere microecology. **Frontiers in Microbiology**, [s. l.], vol. 15, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules21050573>.