

**EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DO PÓ DE GRANITO COMO REMINERALIZADOR
EM UM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO**

POR

SIDINEY MOREIRA FERNANDES

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.

Rio Verde – GO

Outubro – 2024

**EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DO PÓ DE GRANITO COMO REMINERALIZADOR
EM UM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO**

POR

SIDINEY MOREIRA FERNANDES

Comitê de Orientação:

Prof. Dr. GUSTAVO CASTOLDI - IF Goiano

Prof. Dr. ELCIO FERREIRA DOS SANTOS – IFMS

Rio Verde – GO

Outubro – 2024

**EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DO PÓ DE GRANITO COMO REMINERALIZADOR
EM UM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO**

POR

SIDINEY MOREIRA FERNANDES

Orientador:

Prof. Dr. GUSTAVO CASTOLDI
IF GOIANO

Prof. Dr. ELCIO FERREIRA DOS SANTOS
IFMS

Examinadores:

A ficha de catalogação é inserida no verso desta página.

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

FERNANDES, SIDINEY MOREIRA

EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DO PÓ DE GRANITO COMO REMINERALIZADOR
EM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO / FERNANDES, SIDINEY MOREIRA;
orientador Prof. Dr. GUSTAVO CASTOLDI; Prof. Dr. ELCIO FERREIRA DOS SANTOS --
Rio Verde, 2024.

Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos) --
Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2024.

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) | ☐ Artigo científico |
| ☒ Dissertação (mestrado) | ☐ Capítulo de livro |
| ☐ Monografia (especialização) | ☐ Livro |
| ☐ TCC (graduação) | ☐ Trabalho apresentado em evento |

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Sidney Moreira Fernandes

Matrícula:

2021202331540038

Título do trabalho:

EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DO PÓ DE GRANITO COMO REMINERALIZADOR EM UM NEOSSOLO
QUARTZARÊNICO

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 01 / 09 / 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.

Campo Grande

Local

31 / 08 / 2026

Data



Documento assinado digitalmente
SIDNEY MOREIRA FERNANDES
Data: 31/08/2026 12:00:23 -0300
Verifique em <https://validar.ifg.gov.br>

Assinatura ou autor errou ao declarar seus direitos autorais

Ciente e de acordo:



Assinado com Assinatura Eletrônica (Lei 14.063/2020 | Regulamento 910/2014/EC)
Hash SHA256 do original: b0aab5468cf3cdaff92dee0a7eae0159495dfc8cc3a954dbe5745eac6d1bbb33
Link de validação: <https://valida.ae/569e3919434d602127f06216f154550dbd2ecc87ae6681c0c>

SIGNATÁRIO





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

Documentos 67/2024 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DO PÓ DE GRANITO COMO REMINERALIZADOR EM UM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO

Autor: Sidiney Moreira Fernandes
Orientadores: Gustavo Castoldi
Elcio Ferreira dos Santos

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

APROVADA em 24 de outubro de 2024.

Assinado eletronicamente

Prof. Dr. Gutierres Nelson Silva
Avaliador externo - IFMS Campus Nova
Andradina

Assinado eletronicamente

Prof. Dr. Sihélio Júlio Silva Cruz
Avaliador interno - IF Goiano Campus
Iporá

Assinado eletronicamente

Prof. Dr. Elcio Ferreira dos Santos
Avaliador externo - IFMS Campus Nova
Andradina

Assinado eletronicamente

Prof. Dr. Gustavo Castoldi
Presidente da Banca - IF Goiano Polo de
Inovação

Documento assinado eletronicamente por:

- Gustavo Castoldi, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 24/10/2024 15:53:44.
- ELCIO FERREIRA DOS SANTOS, ELCIO FERREIRA DOS SANTOS - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Mato Grosso do Sul (1), em 24/10/2024 15:56:25.
- Sihelio Julio Silva Cruz, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 24/10/2024 15:57:55.
- Gutierres Nelson Silva, Gutierres Nelson Silva - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Mato Grosso do Sul (1), em 24/10/2024 16:07:19.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 23/10/2024. 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: 645457
Código de Autenticação: a04c786939



DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, com todo o meu carinho e gratidão, à minha querida família. À minha esposa, Vera Lúcia, cujo apoio e companheirismo incondicionais deram força em cada etapa desta jornada. Aos meus filhos, Antonio Carlos Moreira, Sara Moreira Caldeira e Elisa Moreira Caldeira, que são e sempre serão minha fonte de inspiração e motivo de orgulho. Vocês, com o amor e compreensão que sempre me ofereceram, motivando a seguir adiante e alcançar meus objetivos. Este trabalho é, em grande parte, fruto do que somos juntos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente à minha família, por todo o amor, paciência e incentivo ao longo desta jornada. Aos amigos do IFMS, pelo companheirismo e troca de experiências, que tornaram o processo mais leve e enriquecedor.

À Mineragro Pesquisa e Desenvolvimento Agrônômico Ltda e à Polimix Concreto LTDA, cujo apoio financeiro foi essencial para a realização deste projeto, e pelo fornecimento dos pós de granito, fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Expresso também minha gratidão à professora Naiara Joelma Bispo da Silva, por suas contribuições valiosas e apoio durante todo o percurso. Sua orientação foi um diferencial importante no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, aos meus orientadores, cuja paciência, dedicação e profissionalismo foram indispensáveis para a concretização deste trabalho. Suas orientações foram essenciais para que eu pudesse superar os desafios e alcançar este resultado.

Aos discentes do curso de Agronomia do IFMS Caroline Silva de Souza, Matheus Ferreira Kunz, Dilson Mateus Breve dos Santos e João Vítor Anjos Silva, pela colaboração durante o desenvolvimento da pesquisa.

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	3
1. INTRODUÇÃO	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1. Produção agrícola e fertilizantes minerais no Brasil	8
2.2. Técnica de Remineralização.....	101
2.3. Fertilizante alternativo e os cultivos de milho e feijão	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	168
3.1. Amostragem e análise do solo	168
3.2. Caracterização dos pós de granito utilizados.....	188
3.3. Teste de incubação.....	19
3.4. Teste agrônômico na cultura do feijão e milho	20
3.5. Colheita, avaliação do crescimento e produção de biomassa.....	21
3.6. Análises químicas do tecido vegetal.....	21
3.7. Análises químicas do solo	222
3.8. Delineamento experimental e análises estatísticas	22
4. RESULTADOS	23
4.1. Análise química após a incubação.....	24
4.2. Análise química do tecido vegetal.....	26
4.2.1. Cultura do feijão-comum.....	26
4.2.2. Cultura do milho.....	2929
5. DISCUSSÃO	322
6. CONCLUSÃO.....	400
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Chemical and physical attributes of soil samples used in the experiment.	17
Tabela 2 - Caracterização dos pós de granitos de acordo com a origem	18

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1** - Teor de fósforo (P) [A], teor potássio (K) [B], teor de cálcio (Ca) [Ca]; teor de magnésio (Mg) [D], soma de base (SB) [E]; e índice de saturação por base (V%) [F] obtidos em Neossolo Quartzarênico (NQ) e após 60 dias de incubação com cinco doses de pó de granito de quatro origens diferentes (JG-PE = Jaboaão do Guararapes-PE; DC-RJ = Duque de Caxias-RJ; BA-MA = Bacabeira-MA; e SP-SP = Santana do Paranaíba-SP). 255
- Gráfico 2** - Acúmulo de massa seca [A], concentração de boro (B) [B], concentração cobre (Cu) [C]; concentração de ferro (Fe) [D], concentração de manganês (Mn) [E]; e concentração de zinco (Zn) [F] de plantas de feijão cultivadas em Neossolo Quartzarênico (NQ) por 45 dias e submetidas por cinco doses de pó de granito de quatro origens diferentes (JG-PE = Jaboaão do Guararapes-PE; DC-RJ = Duque de Caxias-RJ; BA-MA = Bacabeira-MA; e SP-SP = Santana do Paranaíba-SP). 27
- Gráfico 3** - Concentração de nitrogênio (N) [A], concentração de fósforo (P) [B], concentração potássio (K) [C]; concentração de cálcio (Ca) [D], concentração de magnésio (Mg) [E]; e concentração de enxofre (S) [F] de plantas de feijão cultivadas em Neossolo Quartzarênico (NQ) por 45 dias e submetidas por cinco doses de pó de granito de quatro origens diferentes (JG-PE = Jaboaão do Guararapes-PE; DC-RJ = Duque de Caxias-RJ; BA-MA = Bacabeira-MA; e SP-SP = Santana do Paranaíba-SP). 28
- Gráfico 4** - Acúmulo de massa seca [A], concentração de boro (B) [B], concentração cobre (Cu) [C]; concentração de ferro (Fe) [D], concentração de manganês (Mn) [E]; e concentração de zinco (Zn) [F] de plantas de milho cultivadas em Neossolo Quartzarênico (NQ) por 45 dias e submetidas por cinco doses de pó de granito de quatro origens diferentes (JG-PE = Jaboaão do Guararapes-PE; DC-RJ = Duque de Caxias-RJ; BA-MA = Bacabeira-MA; e SP-SP = Santana do Paranaíba-SP). 300
- Gráfico 5** - Concentração de nitrogênio (N) [A], concentração de fósforo (P) [B], concentração potássio (K) [C]; concentração de cálcio (Ca) [D], concentração de magnésio (Mg) [E]; e concentração de enxofre (S) [F] de plantas de milho cultivadas em Neossolo Quartzarênico (NQ) por 45 dias e submetidas por cinco doses de pó de granito de quatro origens diferentes (JG-PE = Jaboaão do Guararapes-PE; DC-RJ = Duque de Caxias-RJ; BA-MA = Bacabeira-MA; e SP-SP = Santana do Paranaíba-SP). 311

LISTA DE ABREVIACÕES

ANDA - Associação Nacional para Difusão Nacional de Adubos.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração.

IFMS - Instituto Federal de Mato Grosso do Sul.

FAO – *FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.*

LSPA - Levantamento Sistemático da Produção Agrícola.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

PNF - Plano Nacional de Fertilizantes

EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DO PÓ DE GRANITO COMO REMINERALIZADOR EM UM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO

POR

SIDINEY MOREIRA FERNANDES

Comitê de Orientação:

Prof. Dr. GUSTAVO CASTOLDI - IF Goiano

Prof. Dr. ELCIO FERREIRA DOS SANTOS – IFMS

RESUMO

O uso do pó de rocha como remineralizador de solos agrícolas vem popularizando nos últimos anos, criando a necessidade da busca constante de novas fontes para atender à crescente demanda. Com este trabalho objetivou-se avaliar a eficiência agronômica de pó de granito de quatro origens diferentes (Bacabeira-MA; Duque de Caxias-RJ; Jaboatão do Guararapes-PE; e Santana do Paranaíba-SP) como remineralizador de solos, por meio de experimentos em ambiente controlado. Na primeira etapa, foi desenvolvido um experimento (em esquema fatorial 4 (origens do pó de granito) x 5 (doses: 0, 5, 10, 20 e 40 t ha⁻¹)) de incubação por 60 dias dos pós de granito em um solo de textura arenosa (Neossolo Quartzarênico), com posterior análise dos atributos químicos desse solo. Após essa etapa, o mesmo solo foi utilizado para o cultivo de milho e feijão em sistemas de vasos. Por meio da análise da parte aérea das plantas, coletadas

aos 55 dias após a emergência, foram avaliados a produção de biomassa, o teor e as quantidades acumuladas de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn). Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância, seguido de análise de regressão. Este estudo mostrou que o pó de granito melhora significativamente as propriedades químicas do solo, aumentando os níveis de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), além de aumentar o pH do solo e reduzir a toxicidade do alumínio. O seu uso também afetou positivamente o crescimento e a absorção de nutrientes das plantas de milho e feijão, evidenciando a possibilidade de uso de pós de granito como fontes de adubação, desde que se tenha a devida validação para tal.

Palavras-chave: fertilidade do solo; remineralização; nutrição de plantas; *Zea mays* L.; *Phaseolus vulgaris* L.

EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DO PÓ DE GRANITO COMO REMINERALIZADOR EM UM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO

POR

SIDINEY MOREIRA FERNANDES

Comitê de Orientação:

Prof. Dr. GUSTAVO CASTOLDI - IF Goiano

Prof. Dr. ELCIO FERREIRA DOS SANTOS – IFMS

ABSTRACT

The use of rock dust as a remineralizer for agricultural soils has become popular in recent years, creating the need of new sources available to meet growing demand. This work aimed to evaluate the agronomic efficiency of granite dust from four different origins (Bacabeira-MA; Duque de Caxias-RJ; Jaboatão do Guararapes-PE; and Santana do Paranaíba-SP) as a soil remineralizer, through experiments in a controlled environment. In the first stage, an incubation experiment was carried out with the four granite powders in soil with a sandy texture (Quartzarenic Neosol) using the factorial 4 (origins of the granite powder) x 5 (doses: 0, 5, 10, 20 and 40 t ha⁻¹) with four replications for 60 days with subsequent analysis of the soil's chemical attributes. After this stage, the same soil was used to grow corn and beans in pot systems (5 kg) with the same soil used in the first stage with four replications. By analyzing the aerial part of the plants, collected 55 days after emergence, biomass production, the content and

accumulated amounts of macronutrients (N, P, K, Ca, Mg and S) and micronutrients (B, Cu, Fe, Mn and Zn) were analyzed. The results obtained were subjected to analysis of variance, followed by regression analysis. This study demonstrated that granite powder significantly improves the chemical properties of the soil, including higher levels of phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), and magnesium (Mg). It also increases soil pH and reduces aluminum toxicity. Additionally, it positively influenced the growth and nutrient absorption of maize and bean plants, leading to greater biomass production and improved nutritional status.

Keywords: Granite dust; soil fertility; remineralization; crop nutrition; sustainable agriculture; nutrient absorption; corn; common bean; greenhouse experiment.

1. INTRODUÇÃO

A produtividade brasileira de grãos apresentou de 1970 a 2020 o aumento de 133%, representando a taxa de crescimento anual média de 1,71% (FAO – *Food and Agriculture Organization of The United Nations*, 2022). Por meio da trajetória da agricultura brasileira o país tornou-se o maior produtor de grãos do mundo, com safra estimada em 308,5 milhões de toneladas para 2024 (IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023), garantindo segurança alimentar da população interna e prospectando crescimento econômico com a conquista de contratos internacionais para a comercialização dos grãos produzidos em diferentes partes do país, de modo que a evolução tanto quantitativa quanto qualitativa tem sido pauta de discussões em distintas áreas do conhecimento.

Partindo deste pressuposto, investigar a eficiência agronômica do pó de granito como remineralizador de solos e a relação com o incremento de produtividade agrícola das culturas do milho (*Zea mays* L.) e do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é relevante e justifica este estudo. No que tange as estimativas das produções de milho e feijão-comum, para 2024 houve redução de 9,5% em relação à safra colhida em 2023; considerando-se as três últimas safras, no entanto, houve crescimento de 3,8%. Explorar a questão dos fertilizantes alternativos como o pó de granito para implementar a produção agrícola atuando como remineralizador é necessário, a dependência da importação de fertilizantes minerais pode ser analisada como sendo um gargalo na produção brasileira, diante da oscilação dos preços no mercado internacional que acaba onerando excessivamente os custos de produção no mercado interno.

Um diferencial relevante para a utilização eficiente de fertilizantes alternativos, como os pós de rochas é o conhecimento específico quanto às propriedades do material e sua composição,

pois com experimentos detalhados é possível delimitar o potencial e especificidades da composição, assim como, a capacidade potencial de cada rocha de fornecer nutrientes essenciais, tais como o cálcio, magnésio, potássio, fósforo e alguns micronutrientes; já a identificação dos constituintes minerais permite inferir sobre a maior ou menor resistência à dissolução pelos processos de intemperismo após a adição aos solos (Ribeiro, 2022).

A capacidade produtiva de fertilizantes minerais no Brasil é considerada baixa em relação a demanda, e a utilização de fertilizantes é imprescindível, sem seu uso não há como aumentar a produção em uma mesma área (Beckman e Riche, 2015), o que contribui para a necessidade da importação desses insumos.

Desde a década de 1990/80 o governo brasileiro vem estimulando pesquisas para o possível aproveitamento de rochas silicáticas para produção e/ou aplicação como fertilizante, numa tentativa de reduzir a carência de fertilizantes e a dependência externa brasileira (Ribeiro, 2018). O recente aumento de preço de fertilizantes solúveis vem estimulando ainda mais esses esforços em todo o país (Bleken *et al.* 2008, Guarçoni; Fanton 2011, Silva *et al.* 2011, Guelfi-Silva *et al.* 2013, Nogueira *et al.* 2021). A preocupação do governo brasileiro diante da dependência internacional da importação de fertilizantes tem sido tão grande que foi instaurado um PNF - Plano Nacional de Fertilizantes, cujo objetivo é aumentar a competitividade e o fornecimento de fertilizantes (Brasil, 2021).

Além da sanidade vegetal e melhoramento genético, a otimização do manejo nutricional é um dos caminhos para o aumento da produtividade. Novas recomendações de adubação para maiores produtividades têm criado dificuldades para a indústria nacional de fertilizantes em acompanhar o ritmo de crescimento da demanda. Anualmente ocorre incremento nas importações de fertilizantes, tornando o país um dos maiores consumidores mundiais desses insumos. Levanta-se então a necessidade de buscar fontes alternativas, preferencialmente nacionais, de nutriente como o pó de rochas silicáticas (Silva *et al.* 2011, Guelfi-Silva *et al.* 2012,

2013, 2014).

A maior eficiência dos fertilizantes solúveis resultou ao longo dos anos no menor uso de remineralizadores na agricultura brasileira (Berthelin & Leyval 1982, Bakken *et al.* 1997). Contudo, a origem do pó de rocha impacta o potencial do seu uso na agricultura. Entre os diversos pós de rochas silicáticas, destaca-se o potencial do pó de granito. A utilização do pó de granito para o fornecimento de nutrientes traz algumas vantagens em relação às fontes solúveis de fertilizantes, como disponibilização mais gradual dos nutrientes, fazendo com que processos de perdas por lixiviação sejam minimizados. A aplicação de pó de granito pode reduzir custos de produção, principalmente para os pequenos produtores, uma vez que, são fontes mais acessíveis e de menor custo (Souza *et al.* 2013).

Para Costa *et al.* (2010), o uso de pó de granito é muito interessante, esse tipo de fonte tem o potencial de fornecer ao solo grande variedade de macro e micronutrientes em comparação com fertilizantes solúveis comercialmente disponíveis. Estes mesmos autores ressaltam o excelente potencial de pó de granito com fonte de K, Ca e Mg. As diferentes composições do pó de granito exigem que pós de granitos de diferentes origens sejam testados e a eficiência agronômica avaliada. Diante dessa problemática surge o questionamento que norteia este estudo: em que medida a implementação de pós de granito como remineralizador de solos pode impactar na produção de milho e feijão?

Nesta pesquisa, considerou-se a hipótese de que os pós de granito são uma alternativa para melhoria da fertilidade do solo e nutrição de culturas agrícolas. Porém, a origem do pó de granito certamente tem relação com a eficiência dele. Desta maneira, objetivou-se avaliar a eficiência agronômica de pós de granito de quatro origens diferentes (Bacabeira-MA; Duque de Caxias-RJ; Jaboatão do Guararapes-PE; e Santana do Paranaíba-SP) como remineralizadores de solos, por meio de experimentos em ambiente controlado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Produção agrícola e fertilizantes minerais no Brasil

Embora o Brasil seja o maior produtor de grãos do mundo na atualidade, é preciso pontuar que o desenvolvimento da produção agrícola no país ocorreu de forma gradativa com a expansão da área cultivada no primeiro momento. Por conseguinte, o processo produtivo foi implementado com a inserção de maquinários, adubos e defensivos químicos, que visavam prospectar o aumento da produção, sendo que os cultivos comerciais consolidaram-se a partir da década de sessenta. Em 2023, foram produzidos 300 milhões de toneladas de grãos, em uma área de 77 milhões de hectares. Além do aumento quantitativo da produção, também houve aumento da diversidade de espécies vegetais cultivadas (EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2023).

O desenvolvimento da produção agrícola passou por diversas fases em áreas distintas do país com condições naturais que favoreceram o cultivo de produtos variados ao longo do tempo, como o período focado na produção da cana-de-açúcar, café, algodão, soja e milho que aos poucos foram expandindo até atingir o cultivo em larga escala atual. A ocupação de terras com o fluxo migratório impactou os avanços do setor agrícola, e o Estado precisou buscar mecanismos que pudessem auxiliar no desenvolvimento da produção e do território. A partir disso, o governo passou a investir em pesquisa agropecuária pública, sendo possível salientar a criação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, na década de setenta, com o intuito de elaborar políticas de pesquisa agrícola de âmbito nacional (Embrapa, 2014; Ferreira, 1993; Guidotti *et al.* 2015).

Como os dados da Embrapa são apresentados para justificar seus investimentos, é necessário manter cautela na análise dos dados. Entretanto, acredita-se que a implementação das

pesquisas públicas é um avanço que impactou todo o processo produtivo ao longo da história da agricultura brasileira. As primeiras tratativas que visavam melhorias no setor agrícola partiram do governo, mas impulsionaram investimentos por parte iniciativa privada, na medida que o aumento na produtividade tem sido cada vez mais significativo.

Para tanto, o investimento na utilização de insumos como os fertilizantes minerais são o diferencial na produtividade. Com a alta demanda o país estabeleceu uma legislação específica quanto ao uso de fertilizantes, essa o caracteriza como sendo um “produto de natureza fundamentalmente mineral, natural ou sintético, obtido por processo físico, químico ou físico-químico, fornecedor de um ou mais nutrientes de plantas” (Brasil, 2004, art. 2o , inciso III, alínea a), haja vista que o uso indiscriminado pode acarretar problemas ambientais.

Todavia, o país não consegue atender as demandas internas quanto ao consumo desses insumos, requerendo a importação dos produtos, normalmente, a altos custos, pois o Brasil é o quarto maior consumidor de fertilizantes do mundo, mas participa com apenas 2% da produção mundial, configurando-se, portanto, como grande importador de insumos agrícolas (IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração, 2018). A produção interna de fertilizantes minerais é insuficiente para abastecer a forte demanda dos produtores agrícolas, fazendo com que o país importe a cerca de 70% de nitrogênio (N), 50% de fósforo (P_2O_5) e mais de 90% de potássio (K_2O) do total consumido (ANDA - Associação Nacional para Difusão Nacional de Adubos, 2017).

Os solos brasileiros na maioria precisam de fertilização, por apresentar baixa fertilidade natural. Essas áreas precisam de tratamento que possa contribuir para nutrição com um manejo simples, mas que exige a aquisição dos produtos que estão sujeitos a disponibilidade e altos custos, fator que compromete significativamente os custos de produção. Um exemplo nesse sentido é a questão da guerra da Rússia com a Ucrânia que é um dos principais produtores e exportadores de fertilizantes nitrogenados e potássicos no mundo, com essa situação a

disponibilidade e custos dos fertilizantes pode ser impactado.

De modo geral, o Brasil desenvolveu pesquisas relevantes que mudaram o manejo e otimizaram os resultados quanto ao uso de insumos agrícolas na produção de grãos, mas no que tange à produção de fertilizantes o país não avançou, de modo que estabeleceu uma dependência da importação de fertilizantes minerais (Brasil, 2021).

Ainda que seja possível utilizar outros tipos de fertilizante, os minerais são os preferidos tanto pelos resultados apresentados quanto pela facilidade de manejo. Por outro lado, os pós de rochas são encontrados na maioria das regiões do país e a utilização como remineralizador é regulamentada pela Lei 12.890/2013 (Brasil, 2013) e pelas Instruções Normativas 5 e 6 de 2016 pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil 2016a, 2016b).

É importante também salientar que no Brasil o uso de remineralizador conta com legislação específica, assim, quanto às diretrizes para utilização do remineralizador, enquanto material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos e que altere os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova a melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo (Brasil 2013, Lei 12.890, art.3º), a avaliação de produtos específicos com base na eficiência ainda requer estudos.

2.2. Técnica de remineralização

A remineralização do solo vem sendo impulsionada pela necessidade de aproveitamento de grandes quantidades de rejeitos de pedreiras e mineradoras; e pelo aumento de sistemas agroecológicos com restrições ao uso de fertilizantes químicos (Barshad 1954, Fyfe *et al.* 2006, Silverol & Machado-Filho 2007, Bleken *et al.* 2008, Guelfi Silva *et al.* 2013). Estima-se hoje que são utilizadas rochas silicáticas moídas em pelo menos 2 milhões de hectares (Canal Rural, 2019), impulsionando o crescimento das pesquisas relacionadas às fontes alternativas.

Nos estudos de Theodoro *et al.* (2006), quanto às experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes, foram encontrados resultados de produção acima do esperado em todas as unidades demonstrativas implantadas, de modo que os produtores receberam os apontamentos como estímulo a novas tecnologias no manejo, principalmente, no que tange aos custos potencialmente mais baixos e a disponibilidade para aquisição do pó de rocha, enfatizando a relevância da busca por fertilizantes sustentáveis e acessíveis no mercado interno com qualidade comprovada, atualmente o material utilizado é na maioria importado, sendo que o país um dos maiores consumidores de fertilizantes do mundo (Swoboda *et. al.*, 2022).

Oliveira (2021) cita outros benefícios associados às técnicas de remineralização, tais como o aumento da imunidade dos solos contra doenças e erradicação de pragas no plantio, devolvendo o equilíbrio e possibilitando uma prática de manejo sustentável que produz alimentos saudáveis/orgânicos. Tais práticas contribuem diretamente para a sustentabilidade que aprimorada pode solucionar problemas de fertilização com baixo custo enquanto insumo na agricultura (Oliveira, 2021).

Ainda que os efeitos dos remineralizadores demorem um pouco mais para aparecer quando comparado com os fertilizantes solúveis industrializados, as misturas adequadas de rochas moídas têm o potencial de fornecer aos solos vários macronutrientes, micronutrientes e elementos benéficos, e o pó de rocha pode contribuir com o efeito residual por longo período, salientando a viabilidade da utilização (Souza *et al.* 2017).

Para o registro de remineralizadores segue-se Instrução Normativa como forma de complementar a legislação (Brasil 2016, Instrução Normativa no 5, de 10 de março de 2016, art. 9º; Instrução Normativa no 53, de 23 de outubro de 2013, Capítulo VII). Munidos das normatizações e conceitos prévios, é necessário discutir e contextualizar os materiais investigados com os experimentos desenvolvidos. Neste mesmo sentido, devem ser considerados requisitos mínimos para avaliação da viabilidade e eficiência agrônômica. Posto

isto, considera-se aqui, a técnica de remineralização.

A remineralização de solos é uma prática agrícola que consiste na aplicação do pó de rocha, buscando a melhoria nos atributos físico-químicos do solo. Quanto aos aspectos positivos podem ser citados: (1) fornecimento de elementos essenciais e benéficos às plantas; (2) liberação lenta e gradual desses elementos por períodos de médio a longo prazo, reduzindo perdas do sistema; (3) baixo custo do produto; (4) melhoria da qualidade química, física e biológica do solo (Bakken *et al.* 1997, Berthelin & Leyval 1982, Knapik & Angelo 2007, Norouzi & Khademi 2010, Prates *et al.* 2012).

Desta maneira, a remineralização consiste na aplicação de pós de rochas silicáticas (PRS) no solo, que por sua vez liberam gradativamente os nutrientes e elementos benéficos às culturas (Livi & Castamann 2016). Cabe salientar que as rochas silicáticas, submetidas no âmbito da rochagem, precisam atender ao disposto na legislação (Lei nº 12.890/2013 e a Instrução Normativa 05/2016 – MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), posto que, a rochagem é uma prática na qual ocorre a incorporação de material geológico, pó de rocha ou sedimento para requalificar positivamente os parâmetros de fertilidade do solo (Theodoro *et al.* 2006).

No contexto da rochagem é imprescindível apontar as questões econômicas, o emprego da rochagem contribui de modo progressivo para a diminuição dos custos de produção, dada a empregabilidade de insumos alternativos. A técnica de remineralização, também conhecida como rochagem, tem como principal objetivo melhorar os atributos químicos do solo, por meio do incremento na quantidade de nutrientes e elementos essenciais na solução do solo, bem como reduzir a acidez do solo (Oliveira, 2019). A metodologia do emprego da rochagem não é algo novo, mas requer estudos diante do emprego de novos materiais no processo.

As possibilidades de utilização de pós de rocha em solos destinados à agricultura são consideradas promissoras, com potencial de incrementar a fertilidade dos solos de forma

continua (Silva 2007, Melamed *et al.* 2019). Um ponto importante a ser ressaltado no uso de pó de rocha, é que a baixa solubilidade em comparação aos fertilizantes comerciais, permite a liberação de nutrientes para plantas cultivadas durante longos períodos. Desta maneira, a remineralização do solo constitui em alternativa viável em termos econômicos e ecológicos, por causa do baixo custo do processo de beneficiamento que envolve apenas moagem das rochas usadas na composição do produto, estima-se a economia em 60 a 70% que insumos convencionais (Theodoro *et al.* 2009).

Ainda que o baixo custo seja um diferencial efetivo e relevante na implementação das técnicas associadas a remineralização na agricultura, cabe pontuar que a prevalência desse processo esbarra também em fatores vinculados a falta de incentivo de políticas públicas direcionadas, principalmente no cenário da agricultura familiar que já desenvolve ações quanto ao barateamento de insumos na produção. Neste sentido, estudos apontam as políticas públicas do país para uso de formas alternativas de fertilização, desinformação por parte dos produtores, pesquisas incipientes e falta de crédito para aquisição e transporte de remineralizadores (Assis *et al.* 2013) podem comprometer a prevalência.

A liberação gradual dos nutrientes em velocidade compatível com a demanda das plantas diminui as perdas por lixiviação, evita a salinização e favorecendo a ação de longo prazo do insumo aplicado (Borges *et al.* 2010, Melamed *et al.* 2019). Outro benefício em relação ao uso de fertilizantes minerais é a possibilidade do uso de pó de rocha na produção orgânica (Dettmer, 2019). Dentre os PRS que apresentam resultados positivos como remineralizadores na agricultura destaca-se o pó de granito (Erhart 2009, Costa *et al.* 2010, Guarçoni *et al.* 2011, Duarte *et al.* 2013, Mello 2020).

A pedra de granito é originada a partir do resfriamento e solidificação do magma, sendo considerada um tipo de rocha magmática, composta de vários minerais, entre eles quartzo, feldspato e a mica, tendo uso muito comum na construção (Aguiar 2012). Nesse contexto, os

elementos que fazem parte da composição mineralógica do pó de rocha nem sempre estão na forma diretamente disponível para as plantas (Luchese *et al.* 2002, Ker *et al.* 2012). Assim, para a recomendação de materiais que podem ser utilizados como remineralizadores, faz-se necessário trabalhos que avaliem a composição química e mineralógica da rocha, bem como o efeito na modificação de atributos do solo e das plantas cultivadas (Osterroht 2003).

Quanto à caracterização das rochas silicáticas como remineralizadores de solos segue a Lei 12.890/2013 (Brasil, 2013), que definiu este novo tipo de insumo mineral para a agricultura, e a regulamentação pela Instrução Normativa 5 de 2016 do MAPA, em que estão determinadas as especificações e garantias dos produtos, além dos critérios mínimos, os produtores de remineralizadores precisam declarar o pH de abrasão e a granulometria, entre os tipos farelado, pó ou filler (Brasil, 2016).

A IN 5/2016 do MAPA (Brasil, 2016) obriga que o remineralizador de solos tenha as seguintes garantias mínimas, definidas em cinco critérios: soma de bases totais ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$) mínima de 9%; teor mínimo de K_2O total de 1%; conteúdo máximo de 25% de quartzo (sílica livre); concentrações máximas de elementos potencialmente tóxicos (arsênio - As, 1); teste agronômico que demonstre a eficiência da rocha em modificar as propriedades de fertilidade do solo e no desenvolvimento de plantas.

2.3. Uso de remineralizadores nos cultivos de milho e feijão

Estratégias de manejo para o cultivo de milho tendo o auxílio de fertilizantes alternativos como o pó de rocha tem sido relevante e requer cada vez mais estudos de modo a diminuir os custos de produção e aumentar a rentabilidade do processo produtivo, sendo a produção maior e melhor. O milho é o segundo grão mais cultivado e exportado mundialmente, ficando atrás apenas da soja, contudo, a variabilidade nas condições produtivas no país, sobretudo quanto às

condições climáticas que interferem no balanço hídrico, na temperatura e a umidade do ar, têm tido grande influência na produtividade da cultura (CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento, 2019; Farias, 2013).

Como forma de melhoria no manejo tem sido investigado o emprego da rochagem como fertilizante alternativo, de modo a fornecer nutrientes para o desenvolvimento da planta, além de promover o aumento da capacidade de troca de cátions, em razão da formação de novos minerais de argila durante o processo de alteração do material (Melamed e Gaspar, 2005; Theodoro e Leonardos, 2006), sendo comumente um procedimento com custos mais baixos e com bons resultados. Dessa forma, aprimorar os estudos já divulgados é uma forma de implementar o barateamento do processo produtivo.

O feijão-comum, devido ao ciclo biológico relativamente curto, é uma planta com grande exigência nutricional, que apresenta maior acúmulo de nutrientes principalmente na etapa da floração (Smith *et al.* 2022). No Brasil, o feijoeiro tem apresentado baixa produtividade média ($<1000 \text{ kg ha}^{-1}$) por vários motivos, desde efeitos climáticos e sanidade da cultura, até problemas econômicos dos agricultores, sendo a fertilização um fator decisivo para mudar esse quadro. O baixo aproveitamento do crescimento radicular e o ciclo curto do feijoeiro requerem cuidados extras com o manejo nutricional.

Buscando o aumento da produtividade utilizando fontes alternativas foram desenvolvidos experimentos utilizando pó de rocha basáltica, e os resultados destacam o potencial do pó de basalto para sistemas de cultivo de feijão. Tal afirmação decorre da manutenção das propriedades químicas melhoradas do solo, após o cultivo do feijão adubado com pó de basalto. Dentre esses atributos químicos, destacam-se o aumento dos teores de P, Ca e Mg, bem como a redução da acidez e da neutralização do Al em ambos os solos. Tal efeito pode ser potencializado quando associado a outras práticas, como rotação de culturas, adubação verde e plantio direto (Conceição *et al.* 2022). Considerando que a composição química do pó de basalto (SiO_2 ,

Al_2O_3 , $\text{FeO/Fe}_2\text{O}_3$, K_2O , Na_2O , CaO , MgO) é muito semelhante aos pós de granito, os resultados da sua utilização também poderão ser.

Trabalhos com o cultivo de feijão-comum utilizando pó de basalto relataram que o estágio de pleno florescimento das plantas e a produção da massa seca da parte aérea é afetada positivamente (Silva *et al.* 2020). Nesse trabalho, a produção de grãos apresentou tendência positiva em relação ao aumento das doses de pó de basalto, com valores variando 989 a 2111 kg ha^{-1} . Doses entre 5 e 60 t ha^{-1} apresentam produtividade de feijão semelhante a fertilização química com NPK (Silva *et al.* 2020).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Amostragem e análise do solo

O experimento foi conduzido em ambiente protegido (casa de vegetação) no Instituto Federal de Mato Grosso do Sul (IFMS), em Nova Andradina, Mato Grosso do Sul, Brasil. Amostras da camada superficial (de 0 a 20 cm de profundidade) de um Neossolo Quartzarênico (NQ), textura areia franca/arenoso foram coletadas na Fazenda Santa Bárbara – campus do IFMS; no município de Nova Andradina, MS. Na tabela 1 segue a análise do solo.

Tabela 1 – Atributos químicos e físico do solo utilizado no experimento.

Attributes	Units	TQ
pH (CaCl ₂)	-	3.91
SOM	g kg ⁻¹	9.57
P	mg kg ⁻¹	2.64
B	mg kg ⁻¹	0.12
Cu	mg kg ⁻¹	0.58
Fe	mg kg ⁻¹	16.21
Mn	mg kg ⁻¹	5.40
Zn	mg kg ⁻¹	0.88
K ⁺	cmol _c dm ⁻³	0.01
Ca ²⁺	cmol _c dm ⁻³	0.15
Mg ²⁺	cmol _c dm ⁻³	0.05
Al ³⁺	cmol _c dm ⁻³	0.63
H+Al	cmol _c dm ⁻³	3.22
CEC	cmol _c dm ⁻³	3.45
m	%	75.00
BS	%	7.30
Sand	%	82.70
Silt	%	2.60
Clay	%	14.72

TQ = Typic Quartzipsamment. SOM = soil organic matter; CEC = cation-exchange capacity; m, aluminum saturation = [Al/(Al+K+Ca+Mg)]; BS, base saturation = [(K+Ca+Mg)/(CEC)].

As subamostras, denominadas de terra fina seca ao ar (TFSA), foram coletadas e passadas em peneira de 2 mm de abertura de malha, homogeneizadas e caracterizadas quanto aos aspectos físico-químicos. Antes da instalação dos experimentos, as amostras de solo foram secas ao ar,

passadas em peneira de 4 mm de abertura de malha, identificadas e armazenadas para posterior utilização nos experimentos. Foram usados vasos com capacidade para 6 L, preenchidos com solo arenoso Neossolo Quartzarênico (NQ). Este solo foi utilizado primeiramente no teste de incubação e, posteriormente, no teste agrônômico nas culturas de milho e de feijão.

3.2. Caracterização dos pós de granito

As amostras de pó de granito foram coletadas em quatro locais diferentes (Bacabeira-MA; Duque de Caxias-RJ; Jaboatão do Guararapes-PE; e Santana do Paranaíba-SP) em minas operadas pela Polimix Concreto LTDA no Brasil. Subamostras dos pó de granito, cada uma pesando 500 g, foram utilizadas para caracterização geoquímica e mineralógica quantitativa para determinar a composição química total dos principais elementos na forma de óxidos no laboratório de mineralogia do Universidade Federal de Goiás (Tabela 2). Os pós de granito utilizados apresentaram baixas concentrações de elementos potencialmente tóxicos, em conformidade com a legislação brasileira IN 5/2016 (Brasil, 2016), e os resíduos em média apresentaram pH de abrasão de 8,76 e uma mineralogia consistente com a composição típica do granito. A análise de tamanho de grão mostrou que 100,00% ($\pm 0,1$) das amostras dos pós de granito passaram por uma peneira de malha de 2,00 mm, 90,31% ($\pm 0,9$) passaram por uma peneira de malha de 0,840 mm e 82,50% ($\pm 0,7$) passaram por uma peneira de malha de 0,300 mm.

Tabela 2 - Caracterização dos pós de granitos de acordo com a origem.

ID	Local de Origem	Composição mineralógica (%)	Caracterização química dos elementos maiores (%)
JG-PE	Jaboatão do Guararapes-PE	Oligoclásio (46,96%); Microclínio (14,27%); Biotita (13,77%); Apatita (0,74%); e	SiO ₂ (60,98%); Al ₂ O ₃ (15,11%); Fe ₂ O ₃ (6,85%); CaO (3,97%); MgO (2,26%);

		Quartzo (23,09%)	Na ₂ O (3,39%); K ₂ O (4,33%);); e TiO ₂ (1,42%)
DC- RJ	Duque de Caxias-RJ	Albita (40,00%); Biotita (18,00%); Microclínio (14,00%); Quartzo (25,00%); e Anfibólio (3,00%)	SiO ₂ (66,47%); Al ₂ O ₃ (14,81%); Fe ₂ O ₃ (5,01%); CaO (3,31%); MgO (2,08%); Na ₂ O (3,16%); K ₂ O (3,74%); P ₂ O ₅ (0,22%); e TiO ₂ (0,69%).
B- MA	Bacabeira- MA	Oligoclásio (34,34%); Muscovita (15,13%); Actinolita (11,89%); Microclínio (4,04%); Clorita (7,20%); Ortoclásio (1,68%); Dolomita (0,60%); Calcita (0,51%); Quartzo (22,25%); e Apatita (0,47%)	SiO ₂ (65,24%); Al ₂ O ₃ (14,51%); Fe ₂ O ₃ (4,92%); CaO (4,19%); MgO (2,51%); Na ₂ O (4,03%); K ₂ O (2,44%); P ₂ O ₅ (0,23%); e TiO ₂ (0,60%).
SP- SP	Santana do Paranaíba- SP	Plagioclásio (45,55 %); Feldspato-K (26,30%); Anfibólio (3,50%); Biotita (7,84%); Dolomita (0,50%); Quartzo (15,42%); Apatita (0,57%); e Ilmenita (1,27%)	SiO ₂ (64,30%); Al ₂ O ₃ (16,04%); Fe ₂ O ₃ (4,28%); CaO (3,38%); MgO (1,70%); Na ₂ O (3,74%); K ₂ O (5,02%); P ₂ O ₅ (0,26%); e TiO ₂ (0,67%).

Fonte: o autor (2024).

3.3. Teste de incubação

Cada unidade experimental foi constituída por sacos plásticos de polietileno preenchidos com 5,5 kg do NQ. Antes de serem pesados e colocados nos sacos plásticos, as amostras de solo foram secas ao ar e passadas em peneira de 4 mm de abertura de malha. Após a identificação dos sacos plásticos, procedeu-se à aplicação dos tratamentos. Para tal, as doses de pó de granito foram aplicadas, considerando o volume de solo, sendo: 0; 5; 10; 20; 40 t ha⁻¹ para o NQ. Com base nessas doses, o volume de solo por vaso foi padronizado para o volume de solo em área (ha). A partir disso, as doses foram calculadas e aplicadas vaso a vaso.

Após adição das doses do pó de granito e mistura ao solo, as unidades experimentais foram mantidas nos sacos plásticos por 60 dias. Os sacos plásticos foram dispostos em bancadas e o teor de umidade nas amostras de solo foi mantido a 70% da capacidade de retenção de água. Semanalmente todos os sacos foram revirados para a homogeneização. Ao final do período de

incubação, os sacos foram abertos a fim de iniciar o processo de secagem do solo. Após secas, as amostras foram passadas em peneira de 2 mm de abertura de malha, identificadas e armazenadas até o momento das análises físico-químicas.

3.4. Teste de eficiência agrônômica nas culturas do feijão e milho

Dois experimentos foram realizados simultaneamente sob condições de casa de vegetação no Instituto Federal de Mato Grosso do Sul (IFMS), em Nova Andradina, MS. Como plantas-teste, cultivou-se milho e feijão-comum, respectivamente, o híbrido Feroz VIP 3 e o cultivar Pérola. Conforme especificações das empresas produtoras das sementes, os genótipos utilizados são adaptados ao clima da região e indicado para lavouras de alto investimento em tecnologia, podendo ser usado tanto na semeadura de verão como em 2ª ou 3ª safra.

Cada unidade experimental foi constituída por um vaso de polietileno preenchido com 5 kg do NQ, resultado da coleta dos 500 g para o teste de incubação. Após o período de incubação, o solo foi seco ao ar e destorroado, para permitir a semeadura do milho e feijão. Antes da semeadura, foram aplicados em todos os vasos, sulfato de amônio e monoamônio fosfato (MAP) como fonte de N e P, respectivamente, nas doses de 100 mg dm⁻³ e 25 mg dm⁻³, e para complementação da adubação nitrogenada foi utilizado ureia. Foi realizado também o fornecimento de fertilizante potássico na dose de 25 mg dm⁻³ de K (via KCl).

Na semeadura foram utilizadas dez sementes por vaso, sendo, em seguida, realizado o desbaste deixando duas plantas por vaso. A data de emergência foi considerada quando 90% dos vasos apresentavam plantas germinadas. Aos 10 dias, após a emergência das plantas (DAE), foi aplicada uma solução contendo micronutrientes (0,5 mg dm⁻³ de B na forma de ácido bórico; 2,0 mg kg⁻¹ de Cu na forma de sulfato de cobre; 3,0 mg kg⁻¹ de Mn na forma de sulfato de manganês e 4,0 mg kg⁻¹ de Zn na forma de sulfato de zinco).

Aos 20 DAE, foi realizada uma adubação de cobertura em solução para todos os vasos,

aplicando-se a dose de 25 mg kg⁻¹ de N, via sulfato de amônio e 50 mg kg⁻¹ de K, via cloreto de potássio. As plantas foram monitoradas o longo do experimento e os vasos regados diariamente com água, mantendo a umidade do solo em aproximadamente 70% de capacidade de campo.

3.5. Avaliação do crescimento e produção de biomassa das plantas

Aos 55 DAE, determinou-se a altura das plantas (cm) e o diâmetro do colmo (mm) a 10 cm em relação ao nível do solo, com o auxílio de régua e paquímetro, respectivamente. Em seguida as plantas foram cortadas rentes à superfície do solo, lavadas em água corrente, acondicionadas em sacos de papel e colocadas em estufa com circulação forçada de ar, mantida a 60°C por 72 h. Após seco, todo o material foi pesado, para obtenção da massa seca, moído em moinho tipo Willey, dotado de peneira de 40 mesh, homogeneizado e, posteriormente, acondicionado em sacos de polietileno, devidamente identificados e armazenado em câmara seca até o momento das análises. Além da parte aérea, foram coletadas as raízes de cada unidade experimental com posterior determinação de massa seca das raízes.

3.6. Análises químicas do tecido vegetal

O material vegetal moído foi analisado para a determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn (Malavolta *et al.* 1997). Com base nesses dados e da massa seca, foram calculadas as quantidades acumuladas desses elementos na parte aérea, pela seguinte fórmula: $A = C \times MS$, em que: A é a quantidade acumulada em mg e µg por planta; C é o teor do elemento na parte aérea, em g ou mg kg⁻¹; e MS é a massa da matéria seca da parte aérea, em g por planta.

3.7. Análise químicas do solo

Amostras de solo foram coletadas em cada saco plástico, após o período de incubação e em cada vaso, após a retirada da parte aérea das plantas, que foram secas ao ar, passadas em peneira de 2 mm de abertura de malha, acondicionadas em sacos de polietileno, identificados, e armazenadas até o momento das análises. Nessas amostras, coletadas nos dois experimentos (incubação e teste com plantas), foram avaliados os atributos químicos do solo, conforme protocolos analíticos descritos por (Raij *et al.* 2017).

Em laboratório foram avaliados os valores de pH, matéria orgânica, teores de alumínio trocável (Al^{+3}), cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}) trocável, potássio (K^{+}) trocável e o fósforo (P). A acidez potencial ($H^{+}+Al^{+3}$) foi estimada pelo método do pH SMP. Com esses resultados, foram calculadas a soma de base (SB); capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (T); capacidade de troca de cátions efetiva (t); a saturação por alumínio (m%); e a saturação por bases (V%).

3.8. Delineamento experimental e análises estatísticas

Para o teste de incubação foi adotado o delineamento inteiramente ao acaso em esquema fatorial 4 (pós de granito: Bacabeira-MA; Duque de Caxias-RJ; Jaboatão do Guararapes-PE; e Santana do Paranaíba-SP) $\times$ 5 (doses 0,5,10,20,40 t/ha) com oito repetições, totalizando 160 unidades experimentais. Já para o teste agrônômico, foi adotado o delineamento experimental em blocos ao acaso em esquema fatorial 4 (pós de granito: Bacabeira-MA; Duque de Caxias-RJ; Jaboatão do Guararapes-PE; e Santana do Paranaíba-SP) $\times$ 5 (doses: 0, 5, 10, 20 e 40 t/ha) com quatro repetições, totalizando 80 unidades experimentais para cada espécie avaliada (milho e feijão-comum). Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), seguido de estudos de regressão polinomial para avaliar o efeito das doses entre parâmetros avaliados no

solo e nas plantas. Para a escolha do modelo de regressão, baseou-se no coeficiente de determinação, significância dos coeficientes e no fenômeno biológico. Independentemente de a interação ser ou não significativa, optou-se pelo desdobramento, pelo interesse específico do estudo. As análises foram realizadas utilizando o programa estatístico SAS (SAS INSTITUTE, 2000) ao nível de significância de 5%.

4. RESULTADOS

4.1. Análise química após a incubação

Observou-se diferença significativa entre os tipos de pó de granito ($F_{3,12}=x$; $P < 0,05$), e entre as doses ($F_{4,12}=x$; $P < 0,05$). Observou-se também interação significativa entre os tipos de granito e doses ($F_{3,12}=x$; $P < 0,05$).

Os resultados da incubação do solo com diferentes doses de pó de granito indicam mudanças significativas nas propriedades químicas do neossolo quartzarênico (NQ) após 60 dias de incubação (Gráfico 1). Foi observado aumento linear nas concentrações de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), soma de bases (SB) e índice de saturação de bases (V%) em função do aumento das doses de pó de granito aplicadas. As doses mais altas de pó de granito (40 t ha^{-1}) resultaram em aumentos nos níveis de P, K, Ca e Mg em até cinco, três, quatro e duas vezes, respectivamente, em comparação com as amostras de controle. A saturação de base (V%) aumentou em até 200% nas amostras tratadas com a dose mais alta de pó de granito em comparação com as amostras não tratadas. Esses resultados indicam que o pó de granito pode atuar como remineralizador eficaz do solo, proporcionando liberação lenta e contínua de nutrientes essenciais e aumentando a fertilidade do solo ao longo do tempo.

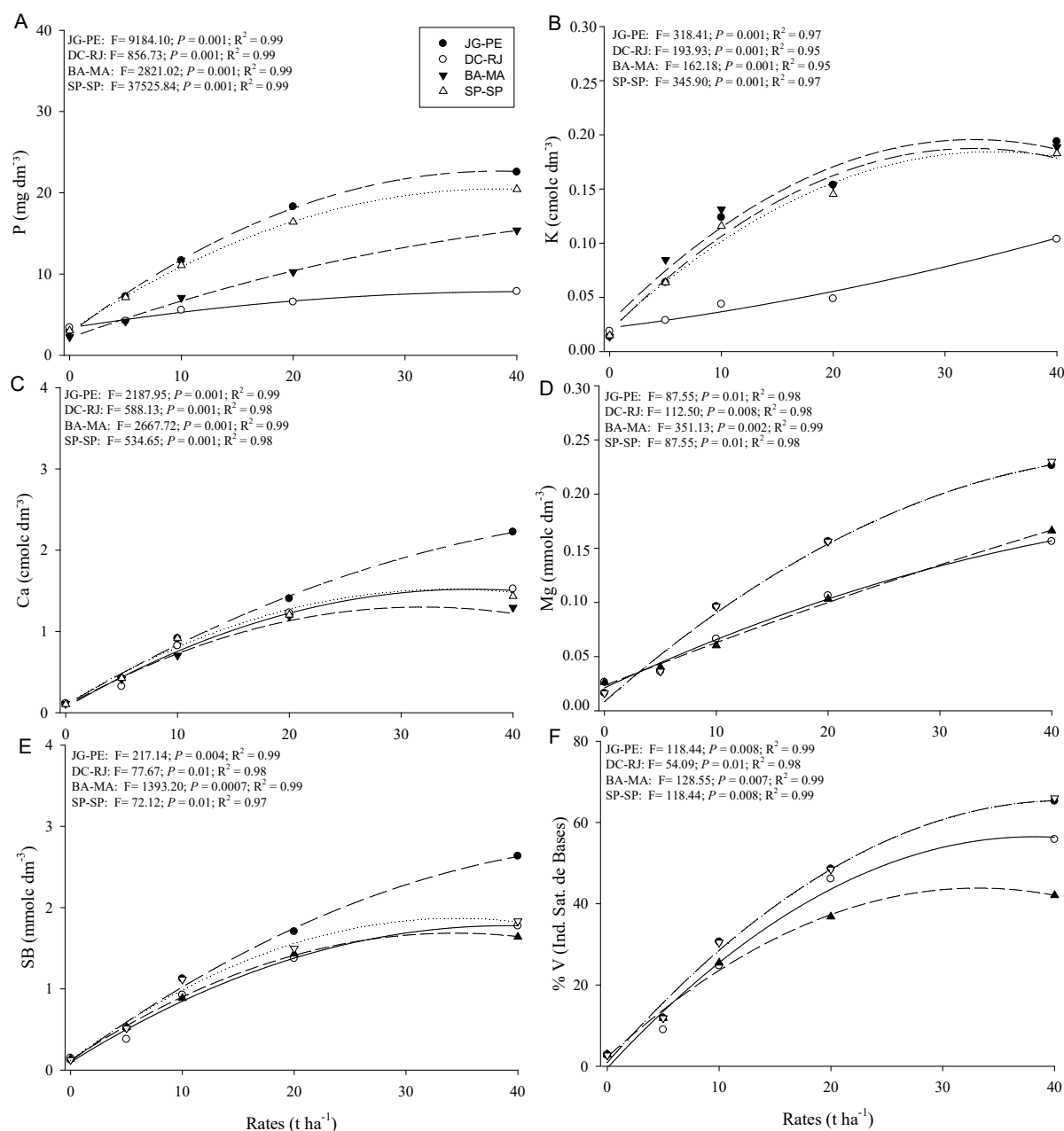


Gráfico 1 - Teor de fósforo (P) [A], teor potássio (K) [B], teor de cálcio (Ca) [Ca]; teor de magnésio (Mg) [D], soma de base (SB) [E]; e índice de saturação por base (V%) [F] obtidos em Neossolo Quartzarênico (NQ) e após 60 dias de incubação com cinco doses de pó de granito de quatro origens diferentes (JG-PE = Jaboatão do Guararapes-PE; DC-RJ = Duque de Caxias-RJ; BA-MA = Bacabeira-MA; e SP-SP = Santana do Paranaíba-SP).

4.2. Análise química do tecido vegetal

4.2.1. Cultura do feijão-comum

As plantas de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris*) também responderam positivamente à aplicação de pó de granito, mostrando aumentos quadráticos na massa seca de brotos, altura e diâmetro do caule em resposta a doses crescentes de pó de granito (Gráfico 2). A dose mais alta de pó de granito resultou em aumento de 300% na massa seca dos brotos em comparação com as plantas não tratadas. A aplicação de pó de granito promoveu significativamente o acúmulo de micronutrientes, como boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) nas folhas das plantas de feijão-comum, especialmente em doses mais altas. O acúmulo de cobre, ferro e manganês nas folhas foi até três, duas e quatro vezes maior, respectivamente, nas plantas tratadas com a dose mais alta de pó de granito em comparação com as plantas de controle. Esses resultados destacam o potencial do pó de granito como fonte suplementar de nutrientes, melhorando a fertilidade do solo e a nutrição das plantas.

Em relação ao acúmulo de macronutrientes (Gráfico 3), houve aumentos significativos de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) em plantas de feijão cultivadas com doses crescentes de pó de granito. A dose mais alta de pó de granito resultou em aumento de até três vezes em N e P, o aumento de quatro vezes em K e S, e aumento de cinco vezes em Ca e Mg, em comparação com as plantas de controle. Essas descobertas sugerem que o pó de granito não apenas melhora o conteúdo de micronutrientes nas plantas, mas também aumenta a absorção de macronutrientes, apoiando o crescimento e a produtividade geral das plantas.

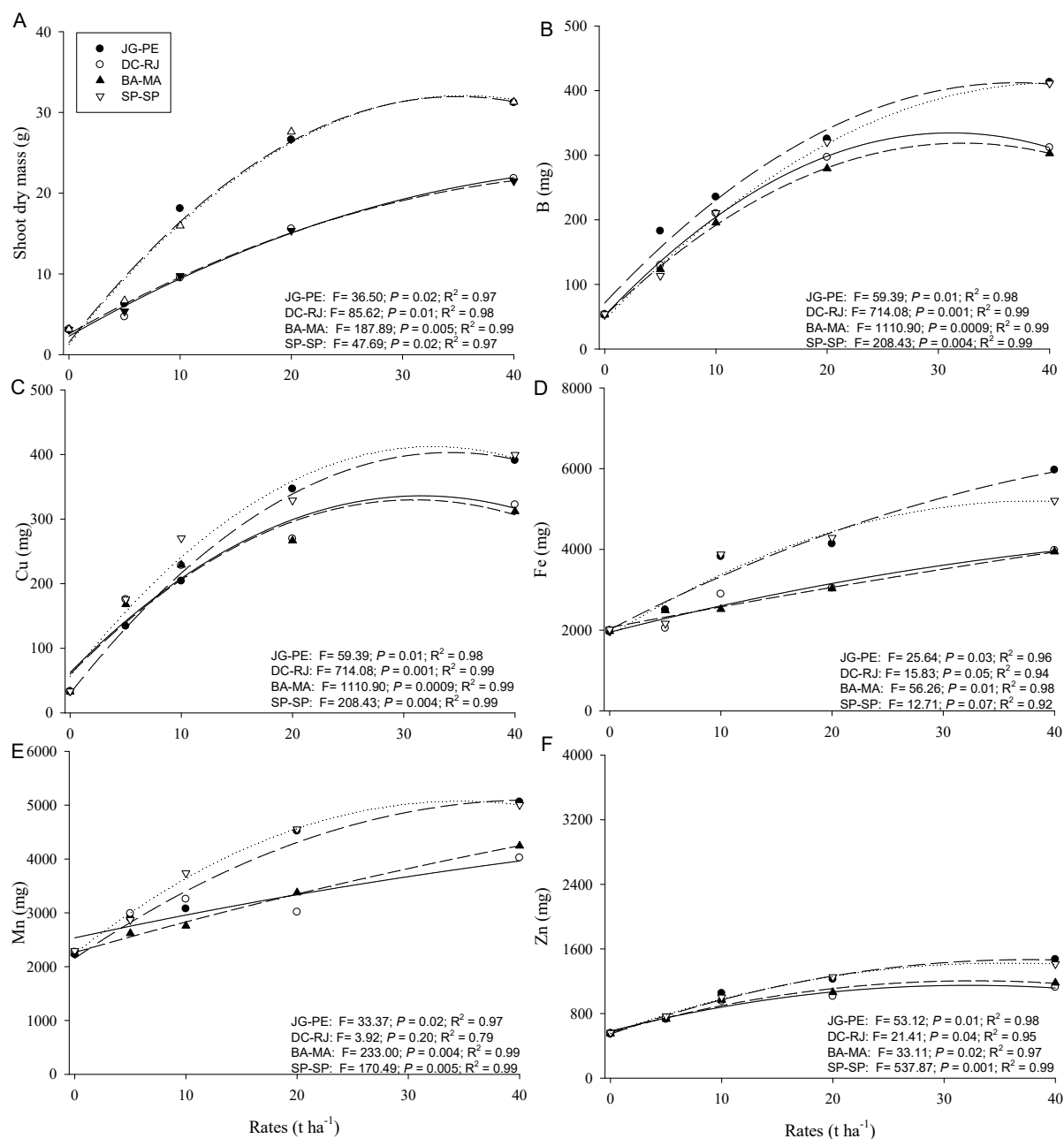


Gráfico 2 - Acúmulo de massa seca [A], concentração de boro (B) [B], concentração cobre (Cu) [C]; concentração de ferro (Fe) [D], concentração de manganês (Mn) [E]; e concentração de zinco (Zn) [F] de plantas de feijão cultivadas em Neossolo Quartzarênico (NQ) por 45 dias e submetidas por cinco doses de pó de granito de quatro origens diferentes (JG-PE = Jaboatão do Guararapes-PE; DC-RJ = Duque de Caxias-RJ; BA-MA = Bacabeira-MA; e SP-SP = Santana do Paranaíba-SP).

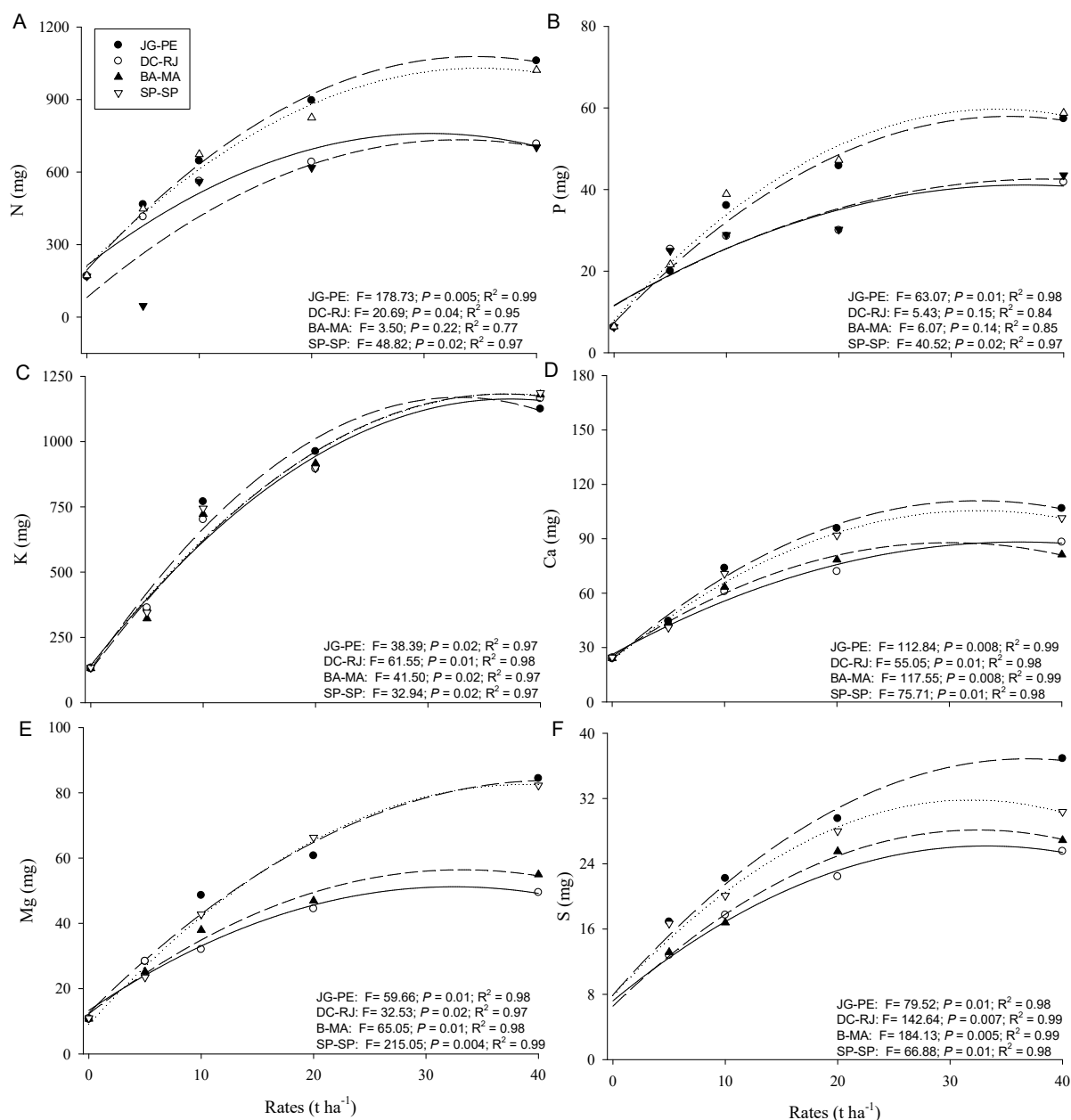


Gráfico 3 - Concentração de nitrogênio (N) [A], concentração de fósforo (P) [B], concentração potássio (K) [C]; concentração de cálcio (Ca) [D], concentração de magnésio (Mg) [E]; e concentração de enxofre (S) [F] de plantas de feijão cultivadas em Neossolo Quartzarênico (NQ) por 45 dias e submetidas por cinco doses de pó de granito de quatro origens diferentes (JG-PE = Jaboaão do Guararapes-PE; DC-RJ = Duque de Caxias-RJ; BA-MA = Bacabeira-MA; e SP-SP = Santana do Paranaíba-SP).

4.2.2. Cultura do milho

O crescimento das plantas de milho (*Zea mays*) foi significativamente influenciado pela aplicação de diferentes doses de pó de granito. Foi observado aumento quadrático na massa seca da parte aérea, na altura e no diâmetro do caule com o aumento das doses de pó de granito. Na dose mais alta de pó de granito (40 t ha^{-1}), a massa seca da parte aérea das plantas de milho foi aproximadamente 250% maior do que a das plantas cultivadas sem pó de granito (Gráfico 4).

Em termos de acúmulo de nutrientes, as plantas de milho cultivadas com a dose mais alta de pó de granito apresentaram aumentos significativos no teor de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) nas folhas, com aumentos de até cinco, quatro, seis, três e duas vezes, respectivamente, em comparação com as plantas de controle. Além disso, a absorção de micronutrientes (Gráfico 5) apresentou aumentos acentuados, com as concentrações de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) nas folhas aumentando em até seis, quinze, nove, quatro e oito vezes, respectivamente, em comparação com as plantas de controle (Gráfico 4).

Esses resultados sugerem que o pó de granito não apenas aumenta a disponibilidade de macronutrientes e micronutrientes no solo, mas também promove maior absorção e acúmulo de nutrientes pelas plantas, levando a maior crescimento e, potencialmente a melhores rendimentos.

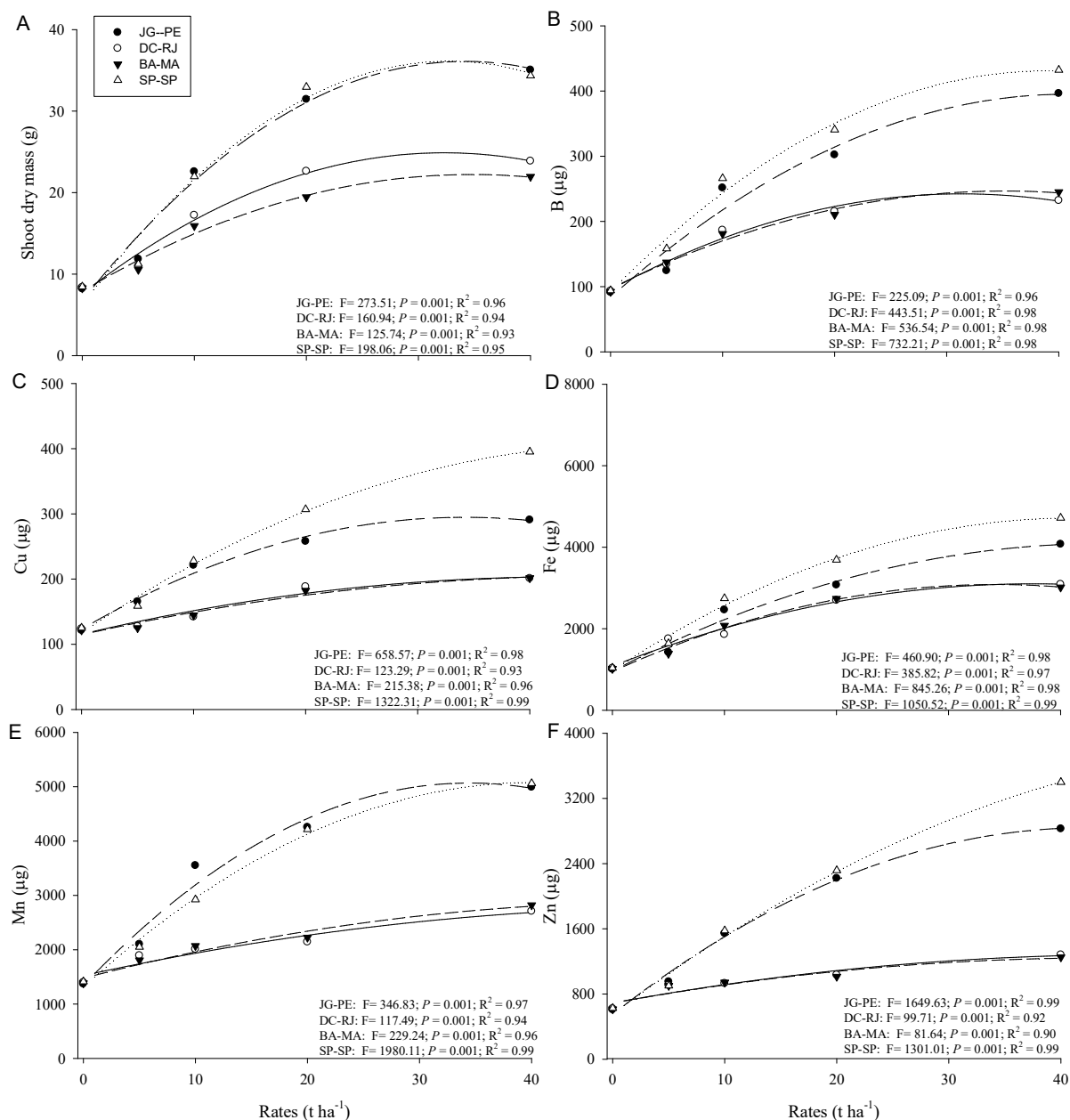


Gráfico 4 - Acúmulo de massa seca [A], concentração de boro (B) [B], concentração cobre (Cu) [C]; concentração de ferro (Fe) [D], concentração de manganês (Mn) [E]; e concentração de zinco (Zn) [F] de plantas de milho cultivadas em Neossolo Quartzarênico (NQ) por 45 dias e submetidas por cinco doses de pó de granito de quatro origens diferentes (JG-PE = Jaboatão do Guararapes-PE; DC-RJ = Duque de Caxias-RJ; BA-MA = Bacabeira-MA; e SP-SP = Santana do Paranaíba-SP).

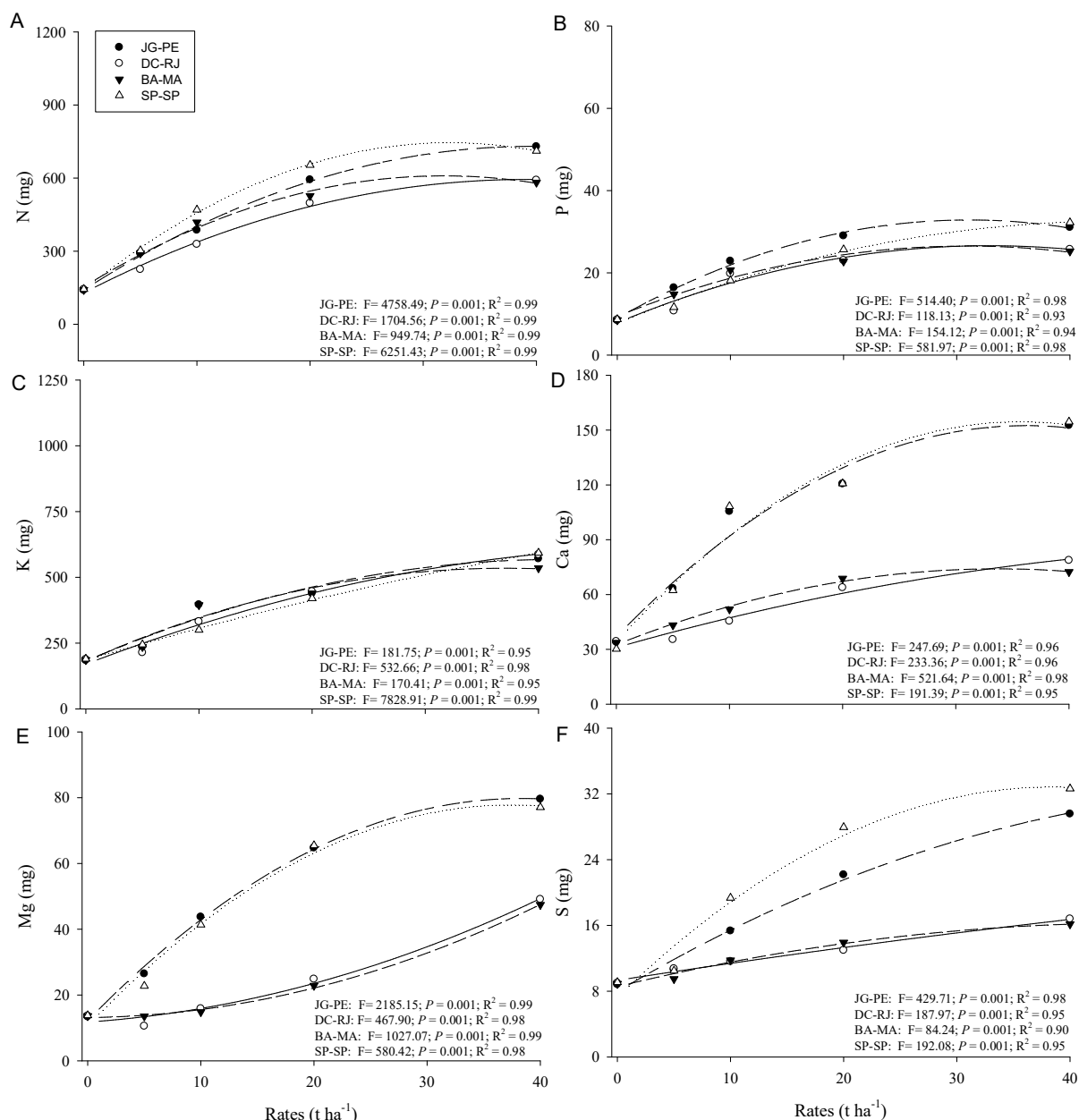


Gráfico 5 - Concentração de nitrogênio (N) [A], concentração de fósforo (P) [B], concentração potássio (K) [C]; concentração de cálcio (Ca) [D], concentração de magnésio (Mg) [E]; e concentração de enxofre (S) [F] de plantas de milho cultivadas em Neossolo Quartzarênico (NQ) por 45 dias e submetidas por cinco doses de pó de granito de quatro origens diferentes (JG-PE = Jaboaão do Guararapes-PE; DC-RJ = Duque de Caxias-RJ; BA-MA = Bacabeira-MA; e SP-SP = Santana do Paranaíba-SP).

5. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com a aplicação de pó de granito em Neossolo Quartzarênico (NQ) demonstram melhora significativa nas propriedades químicas do solo e aumento na produtividade das culturas, como milho e feijão. Essas descobertas são consistentes com estudos recentes que destacam o potencial dos resíduos de rocha, como o pó de granito, para melhorar a fertilidade do solo e a nutrição das plantas (Rayne & Aula, 2020; Lu *et al.*, 2015). A aplicação do pó de granito como remineralizador do solo e seus efeitos sobre a fertilidade do solo e o crescimento das plantas fornecem informações valiosas sobre práticas agrícolas sustentáveis. Os resultados deste estudo demonstram que o pó de granito tem potencial significativo para melhorar as propriedades do solo, aumentar a disponibilidade de nutrientes e promover o crescimento de culturas como o milho (*Zea mays*) e o feijão-comum (*Phaseolus vulgaris*). Esta discussão explora as implicações dessas descobertas, examina os benefícios e as limitações do uso do pó de granito e situa o estudo no contexto mais amplo da agricultura sustentável e do manejo do solo.

O aumento das concentrações de P, K, Ca e Mg no solo, após a aplicação do pó de granito com destaque para os pós de JG-PE e SP-SP, está alinhado com estudos que demonstram que o uso de silicatos de rocha pode liberar nutrientes de forma gradual e contínua, aumentando a fertilidade do solo sem os efeitos negativos associados aos fertilizantes químicos convencionais (Swartjes, 2011; Strzeboska *et al.*, 2017). A liberação lenta de nutrientes, como Ca e Mg, também ajuda a neutralizar a acidez do solo, aumentando o pH e reduzindo a toxicidade do alumínio, um problema comum em solos ácidos (Rayne & Aula, 2020).

Estudos recentes, como o de Heckman *et al.* (2019), indicam que a adição de pó de rocha pode melhorar a estrutura do solo, aumentar a retenção de água e fornecer uma fonte sustentável de nutrientes essenciais. No entanto, a eficácia do pó de granito pode variar dependendo das

características do solo, como textura e pH inicial, conforme observado por Strzeboska *et al.* (2017), que relataram que a resposta ao pó de granito pode ser mais limitada em solos com características específicas.

Uma das descobertas mais proeminentes deste estudo é o impacto positivo do pó de granito nas propriedades químicas do solo. Foi observado aumento linear nas concentrações de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) do solo com o aumento das doses de pó de granito. Esses resultados estão alinhados com pesquisas anteriores, que sugerem que os pós de rocha de silicato, incluindo o granito, podem atuar como fonte de liberação lenta de nutrientes essenciais (Rayne & Aula, 2020). A composição mineral do granito, rica em feldspato, mica e outros minerais, fornece diversificação de nutrientes, contribuindo para a fertilidade do solo ao longo do tempo.

As melhorias observadas na saturação de bases (V%) e na soma de bases (SB) indicam que o pó de granito pode aumentar efetivamente a capacidade de troca de cátions do solo (CTC). Isso é particularmente importante em solos arenosos, como o do Neosolo Quartzzerênico típico usado neste estudo, que normalmente tem baixo teor de matéria orgânica e capacidade limitada de retenção de nutrientes. Ao aumentar a disponibilidade dos principais nutrientes e elevar o pH do solo, o pó de granito contribui para criar um ambiente mais favorável ao crescimento das plantas, promovendo a absorção de nutrientes e melhorando a fertilidade do solo.

O aumento significativo da biomassa e do acúmulo de nutrientes no milho e no feijão observado neste estudo também foi relatado em pesquisas recentes. Lu *et al.* (2015) demonstraram que o pó de granito pode aumentar significativamente o crescimento das plantas e a absorção de nutrientes, especialmente em solos pobres em nutrientes. Isso sugere que o pó de granito não apenas melhora a disponibilidade de nutrientes no solo, mas também facilita a maior absorção de nutrientes pelas plantas, resultando em crescimento mais robusto e produtivo.

No entanto, a eficácia do pó de granito pode ser condicionada pela composição mineral e

presença de outros elementos no solo. Por exemplo, estudos realizados por Swartjes (2011) e Rayne & Aula (2020) mostraram que, embora o pó de granito possa aumentar a disponibilidade de alguns nutrientes, ele pode não ser tão eficaz no fornecimento de outros, como o nitrogênio, que geralmente é limitado em ambientes de baixa fertilidade.

Em comparação com outros estudos que utilizaram resíduos de granito na agricultura, Heckman *et al.* (2019) observaram que o pó de granito foi eficaz para melhorar a produtividade de culturas de grãos, como o trigo, especialmente em solos com baixos níveis de potássio. No entanto, os autores também relataram que a resposta do solo poderia variar dependendo do tamanho da partícula do pó de granito aplicado e das condições específicas do solo. Da mesma forma, Strzeboska *et al.* (2017) descobriram que, em solos com alto teor de matéria orgânica, o pó de granito pode não ser tão necessário, pois esses solos já têm alta capacidade de retenção de nutrientes.

Ao contrário dos fertilizantes sintéticos, que podem causar problemas ambientais, como a lixiviação de nutrientes e a eutrofização de corpos d'água, o pó de granito proporciona liberação lenta de nutrientes que pode aumentar a fertilidade do solo a longo prazo, promovendo uma agricultura mais sustentável (Rayne & Aula, 2020). Além disso, as constatações do estudo de que a aplicação do pó de granito, com destaque para os de JG-PE e SP-SP, melhorou significativamente a absorção de nutrientes em plantas de milho e feijão-comum ressaltando o potencial para reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos.

Considerando os atuais desafios globais nas cadeias de suprimento de fertilizantes, especialmente após eventos geopolíticos como o conflito Rússia-Ucrânia (Daniell & van Tonder, 2023), a exploração de fontes minerais locais e naturais, como o granito, torna-se cada vez mais relevante. O pó de granito, como subproduto do setor de mineração, representa uma fonte de nutrientes sustentável e econômica. Seu uso não apenas contribui para a fertilidade do solo, mas também alinha-se aos princípios da economia circular ao utilizar o que, de outra forma,

seria um material residual.

A aplicação de pó de granito provou ser eficaz na melhoria das propriedades químicas do solo e na promoção do crescimento de culturas agrícolas. Esses resultados reforçam o uso do pó de granito como alternativa viável e sustentável para o gerenciamento da fertilidade do solo, especialmente em contextos em que o acesso a fertilizantes químicos é limitado ou indesejável devido a preocupações ambientais.

O estudo mostrou que a aplicação do pó de granito influenciou significativamente os parâmetros de crescimento das plantas de milho e feijão-comum, incluindo a massa seca do broto, a altura da planta e o diâmetro do caule. As melhorias mais notáveis no crescimento foram observadas na taxa de aplicação mais alta (40 t ha⁻¹), em que as plantas de milho apresentaram aumento de 250% na massa seca da parte aérea em comparação com o grupo de controle. Da mesma forma, as plantas de feijão apresentaram aumento de 300% na massa seca dos brotos com a mesma taxa de aplicação. Esses resultados destacam o potencial do pó de granito para aumentar a produtividade das culturas, especialmente em solos pobres em nutrientes.

O aumento no acúmulo de nutrientes, especialmente de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) nas plantas de milho e feijão-comum, reforça ainda mais a eficácia do pó de granito como corretivo do solo. Os aumentos observados nas concentrações de micronutrientes, como boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn), também sugerem que o pó de granito pode melhorar o status nutricional geral das culturas. Essa melhoria na nutrição das plantas é crucial para a produtividade e a qualidade das culturas, bem como para a saúde humana, considerando que as deficiências de micronutrientes nos solos podem levar à baixa qualidade nutricional das culturas (Oliveira *et al.*, 2022).

Os efeitos positivos do pó de granito na fertilidade do solo e no crescimento das plantas podem ser atribuídos a vários mecanismos. Em primeiro lugar, a composição mineral do pó de granito fornece diversificação de nutrientes que se tornam disponíveis para as plantas ao longo

do tempo por meio de processos de intemperismo. O lento desgaste de minerais, como feldspato e mica, libera nutrientes essenciais, incluindo potássio, cálcio e magnésio na solução do solo. Essa liberação constante de nutrientes ajuda a manter a fertilidade do solo e reduz a necessidade de aplicações frequentes de fertilizantes.

Em segundo lugar, o pó de granito tem o potencial de melhorar as propriedades físicas do solo. Embora não tenha sido avaliado diretamente neste estudo, pesquisas anteriores indicam que a adição de pós de rocha pode melhorar a estrutura do solo, a retenção de água e a aeração (Heckman *et al.*, 2019). A melhoria da estrutura do solo facilita o crescimento das raízes e a absorção de nutrientes, contribuindo para a saúde e a produtividade geral das plantas. Além disso, a aplicação de pó de granito pode influenciar a atividade microbiana do solo, particularmente a atividade de microrganismos benéficos envolvidos no ciclo de nutrientes. A presença de minerais no pó de granito pode apoiar a proliferação de determinadas comunidades microbianas, aumentando a disponibilidade de nutrientes por meio de processos como a solubilização de minerais e a decomposição de matéria orgânica.

A acidez do solo é um problema comum em regiões tropicais e subtropicais, inclusive no Brasil, que os solos ácidos podem prejudicar a disponibilidade de nutrientes e levar à toxicidade do alumínio, afetando negativamente o desenvolvimento das raízes e o crescimento das plantas. O estudo constatou que a aplicação de pó de granito aumentou o pH do solo, indicando seu potencial para neutralizar a acidez do solo. Esse efeito provavelmente ocorre pela liberação de cátions básicos (por exemplo, cálcio, magnésio) durante o intemperismo dos minerais de granito, que podem neutralizar os íons de hidrogênio na solução do solo.

Ao aumentar o pH do solo e reduzir a toxicidade do alumínio, a aplicação do pó de granito cria um ambiente mais propício para o crescimento das raízes e a absorção de nutrientes. Isso é particularmente benéfico para as culturas cultivadas em solos ácidos, pois a melhoria da saúde das raízes permite melhor acesso à água e aos nutrientes. A redução da toxicidade do alumínio

também contribui para o aumento da produtividade das culturas, pois alivia o estresse nas raízes das plantas, permitindo uma absorção mais eficiente dos nutrientes.

Embora o estudo tenha demonstrado os efeitos positivos do pó de granito na fertilidade do solo e no crescimento das culturas, é importante considerar os fatores que podem influenciar sua eficácia. A composição mineral do pó de granito pode variar dependendo da origem geológica, o que, por sua vez, afeta o conteúdo de nutrientes e as taxas de intemperismo. Neste estudo, foi usado o pó de granito de quatro locais diferentes (Bacabeira-MA, Duque de Caxias-RJ, Jaboatão do Guararapes-PE e Santana do Paranaíba-SP), e os resultados sugerem que a origem do pó de granito influencia a eficácia como corretivo do solo.

As propriedades do solo, como textura, pH e teor de matéria orgânica, também influenciam a resposta à aplicação do pó de granito. Por exemplo, os solos arenosos, como o Neossolo Quartzarênico (NQ), podem ser beneficiados pela adição de pó de granito por causa da baixa capacidade de retenção de nutrientes. Por outro lado, os solos com alto teor de matéria orgânica e reservas de nutrientes existentes podem apresentar uma resposta menos acentuada à aplicação do pó de granito. A compreensão dessas interações é fundamental para otimizar o uso do pó de granito em diferentes tipos de solo e condições agroecológicas.

Os resultados deste estudo são consistentes com pesquisas anteriores sobre o uso de pós de rocha de silicato na agricultura. Lu *et al.* (2015) relataram que a aplicação de pó de granito em solos pobres em nutrientes aumentou significativamente o crescimento das plantas e a absorção de nutrientes, semelhante aos resultados observados neste estudo para plantas de milho e feijão-comum. Além disso, Heckman *et al.* (2019) descobriram que a aplicação de pó de rocha melhorou a estrutura do solo e a retenção de água, contribuindo para o aumento da produtividade das culturas.

No entanto, o estudo também destaca que a eficácia do pó de granito pode ser condicional. Conforme observado na pesquisa de Swartjes (2011) e Rayne & Aula (2020), a liberação de

nutrientes do pó de granito depende de fatores como o tamanho da partícula, a acidez do solo e a atividade microbiana. Por exemplo, o pó de granito com partículas mais finas pode degradar mais rapidamente e fornecer nutrientes com mais facilidade do que as partículas mais grossas. Além disso, a presença de determinados microrganismos do solo pode facilitar a solubilização de minerais, aumentando a disponibilidade de nutrientes. Portanto, para maximizar os benefícios do pó de granito, é essencial considerar as características mineralógicas, as propriedades do solo e o microbioma do solo local. Também ficou evidenciado neste estudo que pós de granito de origens diferentes poderão ter resultados diferentes, sendo que os pós de JG-PE e SP-SP destacaram-se dos demais, com incrementos mais significativos tanto na mineralogia do solo quanto na produção da biomassa das plantas. O resultado ocorre porque pós de granito têm valores mais elevados de minerais como K, Ca, Mg, Fe.

O uso do pó de granito como remineralizador do solo está alinhado com os princípios da agricultura sustentável e da economia circular. Ao reciclar o pó de rocha rico em minerais das operações de mineração, essa abordagem não apenas reduz o desperdício, mas também oferece uma alternativa aos fertilizantes sintéticos. A natureza de liberação lenta dos nutrientes do pó de granito apoia a fertilidade do solo a longo prazo, reduzindo a necessidade de aplicações frequentes de fertilizantes e minimizando o impacto ambiental do escoamento de nutrientes.

A aplicação de pó de granito na agricultura apresenta oportunidades promissoras para melhorar a saúde do solo e a produtividade das culturas, principalmente em regiões com solos deficientes em nutrientes. No entanto, são necessárias mais pesquisas para explorar a aplicação mais ampla em diferentes zonas agroecológicas e sistemas de cultivo. Ensaios de campo de longo prazo seriam valiosos para avaliar os efeitos residuais do pó de granito sobre a fertilidade do solo e a saúde das plantas, bem como as interações com várias práticas de gestão do solo, como aditivos orgânicos e culturas de cobertura.

Além disso, a investigação dos efeitos sinérgicos do pó de granito com outros aditivos do

solo, como matéria orgânica, biochar ou inoculantes microbianos, poderia fornecer informações sobre estratégias integradas de gerenciamento da fertilidade do solo. A compreensão da função dos microrganismos do solo no intemperismo do pó de granito e no ciclo de nutrientes também pode revelar novas oportunidades para aumentar a eficácia por meio da estimulação ou inoculação microbiana.

Do ponto de vista econômico, o uso do pó de granito como corretivo do solo pode proporcionar economia de custos para os agricultores, especialmente em regiões em que o acesso a fertilizantes sintéticos é limitado ou caro. Ao fornecer uma fonte local e sustentável de nutrientes, o pó de granito pode reduzir a dependência de fertilizantes importados e proteger os agricultores contra as flutuações do mercado. Além disso, a natureza de liberação lenta pode reduzir a frequência das aplicações de fertilizantes, diminuindo os custos de mão de obra e de insumos ao longo do tempo. Do ponto de vista ambiental, o uso do pó de granito contribui para a redução da poluição relacionada aos fertilizantes. A liberação gradual de nutrientes minimiza a lixiviação de nutrientes em corpos d'água, atenuando o risco de eutrofização e contaminação das águas subterrâneas. Além disso, ao utilizar um subproduto da mineração, o uso do pó de granito alinha-se aos esforços de gerenciamento de resíduos e conservação de recursos, promovendo economia circular na agricultura.

6. CONCLUSÃO

A aplicação de pó de granito provou ser uma estratégia eficaz para melhorar a fertilidade do solo e aumentar a produtividade das culturas. Este estudo mostrou que o pó de granito melhora significativamente as propriedades químicas do solo, incluindo níveis mais altos de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), além de aumentar o pH do solo e reduzir a toxicidade do alumínio. Essas mudanças criam um ambiente mais propício para o crescimento das plantas, principalmente em solos ácidos.

O pó de granito também afetou positivamente o crescimento e a absorção de nutrientes das plantas de milho e feijão, provocando maior produção de biomassa e melhor estado nutricional. Essas descobertas estão alinhadas com pesquisas recentes, demonstrando que os pós de rocha, como o granito, podem servir como corretivos sustentáveis do solo, fornecendo uma fonte de liberação lenta de nutrientes essenciais, reduzindo a dependência de fertilizantes químicos convencionais e minimizando os impactos ambientais.

Dessa forma, a adição dos pós de granito ao solo mostrou ser uma alternativa promissora para melhorar a fertilidade do solo e o rendimento das culturas, contribuindo para a sustentabilidade agrícola e a redução da dependência de fertilizantes químicos convencionais. A utilização desses pós, particularmente os de JG-PE e SP-SP, pode ser uma estratégia eficiente para aumentar a produtividade agrícola de forma ambientalmente segura e economicamente viável.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Deise de Oliveira; SCHULTZ, Glauco; DE OLIVEIRA, Leticia. A sustentabilidade econômica, social e ambiental da agricultura orgânica de Porto Alegre-RS. **DRd – Desenvolvimento Regional em debate** (ISSNe 2237-9029) v. 12, p. 521-538, 2022. Disponível em:

<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/254226/001158617.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2024.

ANDA - Associação Nacional para Difusão Nacional de Adubos. Anuário estatístico do setor de fertilizantes São Paulo: ANDA, 2017.

ASSIS, L. B. et al. Desafios em soberania e segurança alimentar: a utilização da rochagem como fonte alternativa e sustentável. In: II Congresso Brasileiro de Rochagem. Poços de Caldas, p. 125-138, 2013.

BAKKEN, A.K.; GAUTNEB, H.; MYHR, K. Plant available potassium in rocks and mine tailings with biotite, nepheline and K-feldspar as K-bearing minerals. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 47(3):129-134, 1997.

BARSHAD, I. Cation Exchange in micaceous minerals: II. Replaceability of ammonium and potassium from vermiculite, biotite, and montmorillonite. *Soil Science*, 78(1): 57-76, 1954.

BECKMAN, J.; RICHE, S. Changes to the natural gas, corn, and fertilizer price relationships from the biofuels era. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, v. 47, n. 4, p. 494-509, 2015.

BERTHELIN, J.; LEYVAL, C. Ability of symbiotic and non-symbiotic rhizospheric microflora of maize (*Zea mays*) to weather micas and to promote plant growth and plant nutrition. *Plant and Soil*, 68(3):369- 377, 1982.

BLEKEN, M.A., KROGSTAD, T., SPEETJENS, K., HELM, M. Use of a mixture of biotite- and apatite-rich rock powder in a soil with inherent low soil fertility. In D. Neuhoﬀ, N. Halberg, T. Alföldi, W. Lockeretz, A. Thommen, I. A. Rasmussen, H. Willer (Eds.), *Cultivating the Future Based on Science*, v. 1 - Organic Crop Production (ISO FAR, Mo, pp. 90–93). **International Society of Organic Agriculture Research**, 2008.

BORGES, F. B. *et al.* Efeito do uso de MAP revestido com polímeros de liberação gradual em teores de nitrogênio e fósforo foliares na cultura do milho. In: **CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO**, 2010, Goiânia. Resumos. Goiânia: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2010.

BRASIL, Ministério da Agricultura e Abastecimento (MAPA). **Instrução Normativa nº 6, de 14 de março de 2016.** Das definições, da classificação, do registro e renovação de registro de estabelecimentos, do cadastro e renovação de cadastro de prestadores de serviços, fornecedores de minérios e geradores de materiais secundários, das alterações e cancelamentos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 março 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria Especial de Assuntos

Estratégicos. Plano Nacional de Fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil. Brasília: SAE, 2021.

BRASIL. Decreto no 4.954, de 14 de janeiro de 2004. Altera o Anexo ao Decreto no 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que aprova o Regulamento da Lei no 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura. Diário Oficial da União, Brasília, 15 jan. 2004.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. Plano Nacional de Fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil. Brasília: SAE, 2021.

CANAL RURAL. 2019. Fertilizante: 2 milhões de hectares de lavouras já usam pó de rocha. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/agronegocio/fertilizante-2-milhoes-de-hectares-de-lavouras-ja-usam-po-de-rocha/>. Acesso em: 28 de setembro de 2024.

COSTA, A.S.V.; HORN, A.H.; DONAGEMMA, G.K.; SILVA, M.B. Uso do resíduo de granito oriundo da serraria e polimento como corretivo e fertilizante de solos agrícolas. **GEONOMOS** 18 (1): 23 – 27, 2010.

CONCEIÇÃO, L. T. et al. Potential of basalt dust to improve soil fertility and crop nutrition. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 10, p. 100443, dez. 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/365163263_Potential_of_basalt_dust_to_improve_soil_fertility_and_crop_nutrition. Acesso em: 28 de setembro de 2024.

Daniell, Angélique e Danél M. van Tonder. 2023. "Oportunidade de aumentar a qualidade do solo de solos não cultiváveis e esgotados na África do Sul: A Review". *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, no. 2001. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01205-7>.

D'OLIVEIRA, Pérsio Sandir *et. al.*. Uso de pó de rocha em plantas forrageiras. Juiz de Fora, MG Outubro, 2023. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1157266/1/Uso-de-po-derochaemplantas-forrageiras.pdf>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2024.

DETTMER, C.A.; ABREU, U.G.P.; GUILHERME, D.O.; DETTMER, T.L.; MOL, Daniel; SANTOS, Matheus H. da Rocha. Agricultura e inovação: estudo sobre a viabilidade de uso do “pó de rocha” em sistemas de produção agrícola. Naviraí-MS. 2019.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Brasília: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/81665485/artigo-aevolucaodaagricultura-do-brasil>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2024.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Secretaria de Comunicação. Secretaria de Gestão Estratégica. Balanço Social 2014. Brasília: Embrapa, 2014. Disponível em: <http://goo.gl/58qJKq>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2024.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. The statistic division – FAOSTAT. Paris: FAO, 2022. Disponível em:

<http://www.fao.org/faostat>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2024.

FERREIRA, M. M. **Retorno aos investimentos em pesquisa e assistência técnica na cultura do café em Minas Gerais**. 1993. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1993.

FYFE, W.S.; LEONARDOS, O.H.; THEODORO, S.H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 78(4): 721-730, 2006.

GASQUES, J. G. *et al.* **Produtividade total dos fatores na agricultura: Brasil e países selecionados**. Brasília: Ipea, 2022.

GUARÇONI, A.; FANTON, C.J. Resíduo de beneficiamento do granito como fertilizante alternativo na cultura do café. **Ciência Agrônômica**, 42: 16-26, 2011.

GUELFÍ-SILVA, D.R. *et al.* Characterization and nutrient release from silicate rocks and influence on chemical changes in soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(3), 951-962, 2012.

GUELFÍ-SILVA, D.R. *et al.* Agronomic efficiency of potassium fertilization in lettuce fertilized with alternative nutrient sources. **Revista Ciência Agrônômica**, 44(2), 267-277, 2013.

GUELFÍ-SILVA, D.R. *et al.* Yield, nutrient uptake and potassium use efficiency in rice fertilized with crushed rocks. *African Journal of Agricultural Research*, 9, 455-464, 2014.

GUIDOTTI, V.; CERIGNONI, F.; SPAROVEK, G.; PINTO, L. F. G.; BARRETO, A. A funcionalidade da agropecuária brasileira (1975 a 2020). **Sustentabilidade em Debate**, n. 2, dez. 2015. Disponível em: https://www.imaflora.org/public/media/biblioteca/569d15c548199_funcionalidadeagropecuariaSustentabilidadeemdebate2-Materialcomplementar.pdf. Acesso em: 15 de fevereiro de 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023. Estimativa para a safra 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agenciasaladeimprensa/2013agenciadenoticias/releases/38568-ibge-preve-safra-de-306-2-milhoes-de-toneladas-para-2024-com-queda-de-3-2-frente-a-2023>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2024.

KNAPIK, J. G.; ANGELO, A. C. Pó de basalto e esterco equino na produção de mudas de *Prunus Sellowii* Koehne (Rosaceae). *Floresta (UFPR)*, v. 37, p. 427-436, 2007.

LEONARDOS, O.H.; FYFE, W.S.; KRONBERG, B.I. Rochagem O método de Aumento da Fertilidade em Solos Lixiviados e Arenosos. **Congresso Brasileiro de Geologia**, 29, Anais, Belo Horizonte, pp. 137–145, 1976.

LIVI, A., & CASTAMANN, A. Uso do pó de rocha, termofosfato e adubo orgânico em produção de hortaliças. *Rev. Verde de Agroec. Desenv. Sustentável*, Pombal, 10(10), 2016. <https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/594/1/LIVI>.

LSPA - Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agriculturaepecuaria/9201levantamentosistematis>

[icodaproducaoagricola.html#:~:text=Em%20setembro%2C%20IBGE%20prev%C3%AA%20sa%20fra,318%2C1%20milh%C3%B5es. Acesso em: 10 de fevereiro de 2024.](#)

Manning, David A.C. 2015. "Como os minerais alimentarão o mundo em 2050?" Anais da Associação de Geólogos 126 (1): 14–17. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2014.12.005>.

MELAMED, R.; GASPAR, J.C.; MIEKELEY, N. Pó-de-rocha como fertilizante alternativo para sistemas de produção sustentáveis em solos tropicais. (Série estudos e documentos, 72). Disponível em: http://www.cetem.gov.br/serie_sed.htm. Acesso em: 10 de fevereiro de 2024.

MORAES, Letícia Nunes. **Uso de pó de rocha na agricultura brasileira**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, UnB - Universidade de Brasília, 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/30712/1/2021_LeticiaNunesDeMoraes_tcc.pdf. Acesso em: 10 de fevereiro de 2024.

NOGUEIRA, T.A.R.; MIRANDA, B.G.; JALAL, A.; LESSA, L.G.F.; FILHO, M.C.M.T.; MARCANTE, N.C.; ABREU-JUNIOR, C.H.; JANI, A.D.; CAPRA, G.F.; MOREIRA, A.; et al. Nepheline Syenite and Phonolite as Alternative Potassium Sources for Maize. *Agronomy* 2021, 11, 1385.

NOROUZI, S.; KHADEMI, H. Ability of alfalfa (*Medicago sativa* L.) to take up potassium from different micaceous minerals and consequent vermiculitization. *Plant and Soil*, 328(1–2):83–93, 2010.

OGINO, C. M. *et al.* Poder de compra, preço e consumo de fertilizantes minerais: uma análise para o Centro-Oeste brasileiro. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 59, 2020.

OGINO, Cristiane Mitie. GASQUES, José Garcia. FILHO, José Eustáquio Ribeiro Vieira. **Relação dinâmica: fertilizantes minerais e agricultura brasileira Apêndices**. Brasília, outubro, 2023. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/12502/2/TD_2928_Sumex.pdf. Acesso em: 25 de fevereiro de 2024.

Oliveira, Caroline Figueiredo, Eder Duarte Fanaya, Nikolas Souza Mateus, José Lavres e Elcio Ferreira Santos. 2022. "A melhoria do suprimento de zinco aumenta a eficiência do fósforo nutricional do algodão". *Journal of Plant Nutrition* 46 (10): 2451–61. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2155556>.

OLIVEIRA, T. J. A.; RODRIGUES, W. Uma análise espacial da estrutura produtiva no interior do Brasil: os clusters do agronegócio. *Revista Econômica do Nordeste*, v. 50, n. 1, p. 153–170, jan. 2019.

OLIVEIRA, T. J. A.; RODRIGUES, W. A agricultura familiar e a base econômica nas regiões do agronegócio: planejando um novo rural no interior do Brasil. Em: *Três décadas de planejamento em áreas rurais: balanços e perspectivas*. São Carlos: Pedro & João Editores, 2021.

OSTERROHT, M.V. Rochagem Para Que? **Agroecologia**. 12-15p. 2003.

PRATES, F.B.S. et al. Crescimento de mudas de pinhão-manso em resposta a adubação com superfosfato simples e pó-de-rocha. **Revista Ciência Agronômica**, 43: 207-213, 2012.

RAIJ, B. van; *et al.* Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. 1.ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001.

RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. 2. ed. Piracicaba: **IPNI**, 2017.

RIBEIRO, Milena Teixeira. **Caracterização e Aproveitamento do pó de rocha como Remineralizador de Solos**. Araxá-MG, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas. Disponível em: <https://www.engminas.araxa.cefetmg.br/wpcontent/uploads/sites/170/2023/05/Caracteriza%C3%A7%C3%A3o-e-aproveitamento-do-p%C3%B3-de-rocha-como-remineralizador-de-solos.pdf>. Acesso em: 10 de janeiro de 2024.

RIBEIRO, Genicelli Mafra. **Caracterização de pós de rochas silicáticas, avaliação da solubilidade em ácidos orgânicos e potencial de liberação de nutrientes como remineralizadores de solos agrícolas**. Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina. Lages, SC, 2018 Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1478/TESE_GENICELLI_15694159594665_1478.pdf. Acesso em: 10 de janeiro de 2024.

RÖMHELD, V., KIRKBY, E.A., 2010. Research on potassium in agriculture: Needs and prospects. *Plant Soil* 335, 155–180. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0520-1>.

SANTOS, W. O.; MATTIELLO, E. M.; VERGUTZ, L.; COSDTA, R. F. Production and evaluation of potassium fertilizers from silicate rock. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 179, n. 4, p. 547-556, 2016.

SILVA, E.A.; PEREIRA, T.; COELHO, C.M.M.; ALMEIDA, J.A.; SCHMITT, C. Teor de Fitato e proteína em Grãos de Feijão em Função da Aplicação de Pó de Basalto. *Acta Sci. Agron. Maringá* 33 (1), 147–152, 2011.

SILVA et al, Darlan Weber da. Pó de basalto como fertilizante alternativo na cultura do feijão preto em Latossolo vermelho. v. 15, n.4, out.-dez., p. 373-378, *Revista Verde* ISSN 1981-8203 Pombal, Paraíba, Brasil, 2020.

SILVA, A. Efeito de pó de basalto nas propriedades químicas do solo, na nutrição e produtividade do feijoeiro e na absorção de nutrientes por *Eucalyptus benthamii*. Dissertação (mestrado)- Centro de Ciências, Agroveterinárias/ UDESC. Lages, 2007.

SILVEROL, A.C.; MACHADO FILHO, L. Utilização de pó de granito e manto de alteração de piroxenito para fertilização de solos. *Revista Brasileira de Agroecologia*, 2: 703-707, 2007.

SMITH, M., HODECKER, B., FUENTES, D., & MERCHANT, A. Investigating Nutrient Supply Effects on Plant Growth and Seed Nutrient Content in Common Bean. *Plants*, 11. <https://doi.org/10.3390/plants11060737>. 2022.

SOUZA, A. K et al. Poluição do Ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores. ACTA Biomedica Brasiliensia, v. 9, n.º 3, p. 97 – 98, 2018.

SOUZA, F. N. S. et al. Uso da rochagem como fonte alternativa de nutrientes na produção de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) para a indústria de etanol. XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Florianópolis, p. 1-3, 2013.

SOUZA, W. S. Uso da rochagem para remineralização de solos de baixa fertilidade. 2019. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, p. 16-20, 2019.

SWOBODA, P.; DÖRING, T. F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural use of silicate rock powders: A review. Science of the Total Environment, v. 807, n. 3, 150976, 2022. DOI:1https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.15 0976.

THEODORO, S.H. et al. Efeito do uso da técnica de rochagem e adubação orgânica em solos tropicais. In: II Congresso Brasileiro de Rochagem, 2013, Poços de Caldas. Anais do II Congresso Brasileiro de Rochagem. Visconde do Rio Branco/MG: SUPREMA, 2013. v. 1. p. 322-42.

THEODORO, S.H. et al. Experiências de Uso de Rochas Silicáticas como Fonte de Nutrientes. **Espaço & Geografia**, Vol.9, No 2, 2006, 263:292, ISSN: 1516-9375. Disponível em:https://www.researchgate.net/publication/277992686_EXPERIENCIAS_DE_USO_DE_ROCHAS_SILICATICAS_COMO_FONTE_DE_NUTRIENTES. Acesso em: 10 de janeiro de 2024.

THEODORO, S.H & LEONARDOS, O.H (2006) Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution. Academia Brasileira de Ciências. Anais. Rio de Janeiro/RJ. v.78 n.4, p. 721-730.

THEODORO, S.H. Cartilha da Rochagem. Gráfica e Editora Ideal, 2011. 2a edição revisada (online). Brasília, p. 18 – 21, 2020.