ReGeo ISSN: 2177-3246

AVALIAÇÃO AGRONÔMICA DA EFICIÊNCIA DE PÓS DE ROCHA NA LIBERAÇÃO DE FÓSFORO: UM ENSAIO DE INCUBAÇÃO

AGRONOMIC EVALUATION OF ROCK DUST EFFICIENCY IN PHOSPHORUS RELEASE: AN INCUBATION ASSAY

EVALUACIÓN AGRONÓMICA DE LA EFICIENCIA DE LOS POLVOS DE ROCA EN LA LIBERACIÓN DE FÓSFORO: UN ENSAYO DE INCUBACIÓN

https://doi.org/10.56238/revgeov17n10-105

Data de submissão: 16/09/2026 **Data de publicação:** 16/10/2026

Heder Bispo de Freitas Pedrosa
Graduação em Engenharia Agronômica
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: freitasheder190@gmail.com

Higo Batista Ferreira
Mestre em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: higoferreira8@gmail.com

João Daniel de Cerqueira Pinto Filho
Graduação em Agronomia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: joaobaheapinto@gmail.com

Lazaro Pinheiro de Brito
Mestre em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: lazarobrito.agro@gmail.com

Lucas Teles de Oliveira
Graduação em Agronomia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: lucastelesdeoliveira3@gmail.com

Sonaly da Silva Freitas Pedrosa
Graduação em Agronomia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: sonalypedrosa25@gmail.com

Tatiana Silva Ribeiro
Doutorado em Geologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: tsribeiro@uefs.br

ReGeo

ISSN: 2177-3246

Rodrigo Nogueira de Vasconcelos
Doutor em Ecologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: rnv@uefs.br

Washington de Jesus Sant'Anna da Franca Rocha
Doutor em Geologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: wrocha@uefs.br

Deorgia Tayane Mendes de Souza
Doutora em Geociências Aplicadas e Geodinâmica
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: dtmsouza@uefs.br

RESUMO

O Brasil destaca-se como uma das principais potências agrícolas mundiais, entretanto grande parte de seus solos apresenta acidez elevada e baixa disponibilidade de nutrientes, especialmente fósforo (P), condição que limita a fertilidade e aumenta a dependência de fertilizantes importados. Nesse contexto, a rochagem surge como alternativa sustentável para a remineralização do solo, por meio do uso de fontes minerais regionais capazes de liberar nutrientes de forma gradual. O presente estudo teve como objetivo avaliar a eficiência agronômica e o tempo de liberação de fósforo de pós de rocha provenientes dos municípios de Ipirá e Gavião, localizados no interior da Bahia, em ensaio de incubação conduzido por 30 e 60 dias. O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 × 6, com dois materiais de pó de rocha, sendo a origem dos municípios de Ipirá-BA e Gavião-BA, seis doses e cinco repetições, totalizando 60 unidades experimentais. As doses foram definidas com base na recomendação de P_2O_5 para a cultura da mandioca em solo de textura areia franca, variando de T_0, sem aplicação, até T_5, correspondente ao dobro da dose recomendada. Os dados foram analisados no software RStudio integrado ao R, por meio de regressão linear, correlação de Pearson, visualizadas por meio de mapas de correlação (corrplots) e Análise de Componentes Principais (PCA), permitindo avaliar a resposta do fósforo disponível às doses aplicadas e as relações entre os atributos químicos do solo. O solo utilizado foi coletado na unidade experimental do curso de Agronomia da (UEFS) na camada superficial (0-20 cm), o qual apresentava inicialmente pH de 4,55, teor de P disponível de 4,24 mg/dm³ e soma de bases de 1,62 cmolc/dm³, evidenciando condição de acidez e baixa fertilidade. Os resultados demonstraram que o pó de rocha de Ipirá apresentou maior reatividade inicial, elevando o fósforo disponível de 4,24 para 12,2 mg/dm³ já aos 30 dias na dose recomendada, e atingindo 22,64 mg/dm³ aos 60 dias na dose máxima. O material de Gavião, composto por apatita, muscovita, granito com matriz calcissilicática e K-feldspato, apresentou maior teor total de P_2O_5, porém liberação mais lenta, alcançando 20,84 mg/dm³ apenas aos 60 dias na maior dose. Além do aumento do fósforo disponível, observou-se melhoria em atributos químicos do solo, com elevação da soma de bases de 1,62 para até 3,47 cmolc/dm³. Conclui-se que a rochagem promove melhorias químicas relevantes em solos ácidos e arenosos, porém sua eficiência depende não apenas do teor total de P_2O_5, mas da composição mineralógica, da reatividade do material e do tempo de contato com o solo.

Palavras-chave: Rochagem. Remineralizadores. Fósforo. Fertilidade do Solo. Incubação.

ABSTRACT
Brazil stands out as one of the world's leading agricultural powers; however, a large proportion of its soils presents high acidity and low nutrient availability, especially phosphorus (P), a condition that limits soil fertility and increases dependence on imported fertilizers. In this context, rock dust application emerges as a sustainable alternative for soil remineralization through the use of regional mineral sources capable of gradually releasing nutrients. This study aimed to evaluate the agronomic efficiency and phosphorus release time of rock powders from the municipalities of Ipirá and Gavião, located in the interior of Bahia, Brazil, through an incubation trial conducted for 30 and 60 days. The experiment was carried out in a completely randomized design, in a 2 × 6 factorial scheme, consisting of two rock powder materials, originating from the municipalities of Ipirá-BA and Gavião-BA, six doses, and five replicates, totaling 60 experimental units. The doses were defined based on the P_2O_5 recommendation for cassava cultivation in sandy loam soil, ranging from T_0, without application, to T_5, corresponding to twice the recommended dose. The data were analyzed using RStudio integrated with R, through linear regression, Pearson correlation, visualized by correlation maps (corrplots), and Principal Component Analysis (PCA), allowing the evaluation of the response of available phosphorus to the applied doses and the relationships among soil chemical attributes. The soil used in the study was collected from the experimental unit of the Agronomy course at the State University of Feira de Santana (UEFS), in the surface layer (0–20 cm), and initially presented a pH of 4.55, available P content of 4.24 mg/dm³, and sum of bases of 1.62 cmolc/dm³, indicating acidic conditions and low fertility. The results showed that the Ipirá rock powder presented greater initial reactivity, increasing available phosphorus from 4.24 to 12.2 mg/dm³ after 30 days at the recommended dose and reaching 22.64 mg/dm³ after 60 days at the maximum dose. The Gavião material, composed of apatite, muscovite, granite with a calc-silicate matrix, and K-feldspar, presented a higher total P_2O_5 content, but slower release, reaching 20.84 mg/dm³ only after 60 days at the highest dose. In addition to the increase in available phosphorus, improvements were observed in soil chemical attributes, with the sum of bases increasing from 1.62 to up to 3.47 cmolc/dm³. It is concluded that rock dust application promotes relevant chemical improvements in acidic and sandy soils; however, its efficiency depends not only on the total P_2O_5 content, but also on the mineralogical composition, material reactivity, and contact time with the soil.

Keywords: Rock Powder. Remineralizers. Phosphorus. Soil Fertility. Incubation.

RESUMEN
Brasil se destaca como una de las principales potencias agrícolas del mundo; sin embargo, gran parte de sus suelos presenta elevada acidez y baja disponibilidad de nutrientes, especialmente fósforo (P), condición que limita la fertilidad y aumenta la dependencia de fertilizantes importados. En ese contexto, la aplicación de polvo de roca surge como alternativa sostenible para la remineralización del suelo, mediante el uso de fuentes minerales regionales capaces de liberar nutrientes de forma gradual. Este estudio evaluó la eficiencia agronómica y el tiempo de liberación de fósforo de polvos de roca de los municipios de Ipirá y Gavião, en el interior de Bahía, Brasil, mediante un ensayo de incubación conducido durante 30 y 60 días. El experimento se realizó en diseño completamente aleatorizado, en esquema factorial 2 × 6, con dos materiales de polvo de roca, seis dosis y cinco repeticiones, totalizando 60 unidades experimentales. Las dosis se definieron con base en la recomendación de P_2O_5 para el cultivo de yuca en suelo franco arenoso, variando desde T_0, sin aplicación, hasta T_5, correspondiente al doble de la dosis recomendada. Los datos se analizaron en RStudio integrado con R, mediante regresión lineal, correlación de Pearson visualizada por mapas de correlación (corrplots) y Análisis de Componentes Principales (ACP). El suelo utilizado, recolectado en la unidad experimental del curso de Agronomía de la Universidad Estatal de Feira de Santana (UEFS), en la capa superficial (0-20 cm), presentaba inicialmente pH de 4,55, contenido de P disponible de 4,24 mg/dm³ y suma de bases de 1,62 cmolc/dm³, indicando condiciones ácidas y baja fertilidad. Los resultados

mostraron que el polvo de roca de Ipirá presentó mayor reactividad inicial, elevando el fósforo disponible de 4,24 a 12,2 mg/dm³ a los 30 días en la dosis recomendada y alcanzando 22,64 mg/dm³ a los 60 días en la dosis máxima. El material de Gavião, compuesto por apatita, moscovita, granito con matriz calcosilicatada y feldespato potásico, presentó mayor contenido total de P_2O_5, pero liberación más lenta, alcanzando 20,84 mg/dm³ solo a los 60 días en la dosis más alta. Además del aumento del fósforo disponible, se observaron mejoras en los atributos químicos del suelo, con la suma de bases pasando de 1,62 a hasta 3,47 cmolc/dm³. Se concluye que la aplicación de polvo de roca promueve mejoras químicas relevantes en suelos ácidos y arenosos, aunque su eficiencia dependa de la composición mineralógica del material y del tiempo de incubación.

Palabras clave: Polvo de Roca. Remineralizadores. Fósforo. Fertilidad del Suelo. Incubación.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se como uma das maiores potências agrícolas globais nos setores de agricultura, pecuária e silvicultura. Contudo, grande parte de seus solos apresenta acidez de moderada a elevada, condição comum em solos tropicais, especialmente quando há remoção de bases trocáveis como Ca^{2+}, Mg^{2+} e K^{+} do complexo de troca. Essa condição compromete a capacidade de troca de cátions (CTC), reduz a disponibilidade de macronutrientes e pode limitar o crescimento e o teto produtivo das culturas (Costa, 2025; Pereira, 2020).

Solos com elevada acidez comumente apresentam níveis tóxicos de alumínio (Al) e manganês (Mn), além de deficiências de cátions básicos como cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e baixa disponibilidade de fósforo (P). Nessas condições, o manejo exige a aplicação de corretivos para a neutralização da acidez, além da suplementação com insumos minerais ou orgânicos para elevar a fertilidade e garantir a viabilidade produtiva (Veloso et al., 2020; Quispe et al., 2025).

A baixa fertilidade natural de muitos solos brasileiros, aliada à insuficiente produção interna de fertilizantes nitrogenados (N), fosfatados (P) e potássicos (K), posiciona o país como o quarto maior consumidor global desses insumos. Essa dependência do mercado externo eleva os custos de produção e expõe o setor a vulnerabilidades logísticas e geopolíticas (Brasil, 2021a; 2021b).

Segundo dados do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC), a dependência brasileira de fontes à base de fósforo P_2O_5 atingiu 72% em 2020, com uma taxa média de crescimento anual de 3,2%. Atualmente, a produção global é dominada por China, Estados Unidos e Marrocos, o que acentua a vulnerabilidade do suprimento nacional (Brasil, 2023).

Grande parte dos insumos utilizados no país deriva de matérias-primas da indústria petroquímica e da mineração, o que torna o agronegócio brasileiro vulnerável às oscilações do mercado internacional (Ogino; Gasques, 2023; Oliveira; Doner; Almeida, 2023). Essa fragilidade foi evidenciada pela Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), que registrou uma alta de 100% nos preços dos fertilizantes em 2021, com novos reajustes no ano seguinte. Esse aumento abrupto refletiu os conflitos entre Rússia e Ucrânia, grandes exportadores globais, que geraram escassez na oferta e incertezas logísticas. Somada à elevação dos custos de produção, essa conjuntura tende a pressionar os preços dos alimentos no mercado final, comprometendo a rentabilidade do produtor e a segurança alimentar (CNA, 2021, 2022).

Sasabuchi et al., (2023) ressaltam que o fósforo agrícola é majoritariamente proveniente da extração de rochas fosfáticas, sendo necessários aproximadamente 7 kg de minério bruto para a obtenção de apenas 1 kg de fósforo elementar. Os mesmos autores afirmam ainda, a concentração de (P) dessas reservas tem declinado progressivamente. Projeções indicam que o pico da produção global

desse recurso poderá ocorrer por volta de 2050, seguido pelo exaurimento das reservas economicamente viáveis nas décadas subsequentes. Visto que o fósforo é um nutriente essencial e sem substituto sintético, esse cenário impõe um desafio crítico à segurança alimentar e à sustentabilidade agrícola (Pantano et al., 2016).

O Brasil apresenta expressivo potencial estratégico em recursos fosfatados, uma vez que quase 80% dos depósitos nacionais de fosfato estão associados a corpos carbonatítico-alcalinos, de origem ígnea, com teores de P_2O_5 variando em diferentes depósitos brasileiros. Além disso, as reservas declaradas de fosfato no país totalizaram 4,85 bilhões de toneladas em 2024, reforçando a importância desse recurso para a produção de fertilizantes e para a segurança agrícola nacional, conferindo ao país uma posição estratégica no cenário internacional de recursos não renováveis (Agência Nacional de Mineração, 2025; Silva; Silva; Gaia, 2024a).

Apesar dos desafios tecnológicos impostos pela menor solubilidade dessas fontes em comparação às sedimentares, o país figura como o sétimo maior produtor mundial de fosfato. Tal posição evidencia a capacidade de exploração e beneficiamento nacional, além do potencial para ampliar a autonomia na produção de fertilizantes e remineralizadores, atendendo à crescente demanda do setor agropecuário (Sasabuchi et al., 2023).

Frente às estimativas de elevação da demanda e do declínio na disponibilidade global de P_2O_5, intensifica-se a busca por modelos de produção agrícola sustentáveis que promovam maior autonomia e resiliência aos sistemas produtivos. Nesse cenário, o uso de fontes alternativas, como a rochagem (aplicação de pó de rocha in natura), ganha protagonismo.

A rochagem envolve a transformação de rochas naturalmente ricas em macro e micronutrientes em insumos agrícolas, atuando na diversificação dos nutrientes e equilíbrio da fertilidade no solo. A tecnologia se dá pela adição/incorporação de materiais minerais, no suprimento de macros e micronutrientes, atuando ativamente nos processos de fertilidade e na reabilitação de solos antropizados (Brito et al., 2019; Hanisch et al., 2024).

Sua aplicação ao solo, além de atuar como remineralizador, oferece benefícios como a redução dos riscos de lixiviação, o fornecimento gradual de nutrientes e a manutenção da fertilidade residual por períodos prolongados (Nascimento et al., 2025; Brito et al., 2019).

Dado a ampla diversidade geológica brasileira, a técnica da rochagem destaca-se por valorizar o uso de matéria-prima mineral do território nacional, promovendo a melhoria da fertilidade do solo de forma ajustada às diferentes condições edafoclimáticas regionais (Brito et al., 2019; Viana et al., 2021). Além disso, apresenta também vantagens econômicas relevantes, sobretudo pela maior estabilidade de custos quando comparado à volatilidade dos fertilizantes convencionais, ao mesmo

tempo em que proporciona efeitos positivos sobre as propriedades físicas, físico-químicas e biológicas do solo. Esses efeitos contribuem diretamente para o aumento da qualidade do solo e da capacidade produtiva dos sistemas agrícolas, reforçando o caráter sustentável da prática (Luchese et al., 2023; Castro et al., 2022).

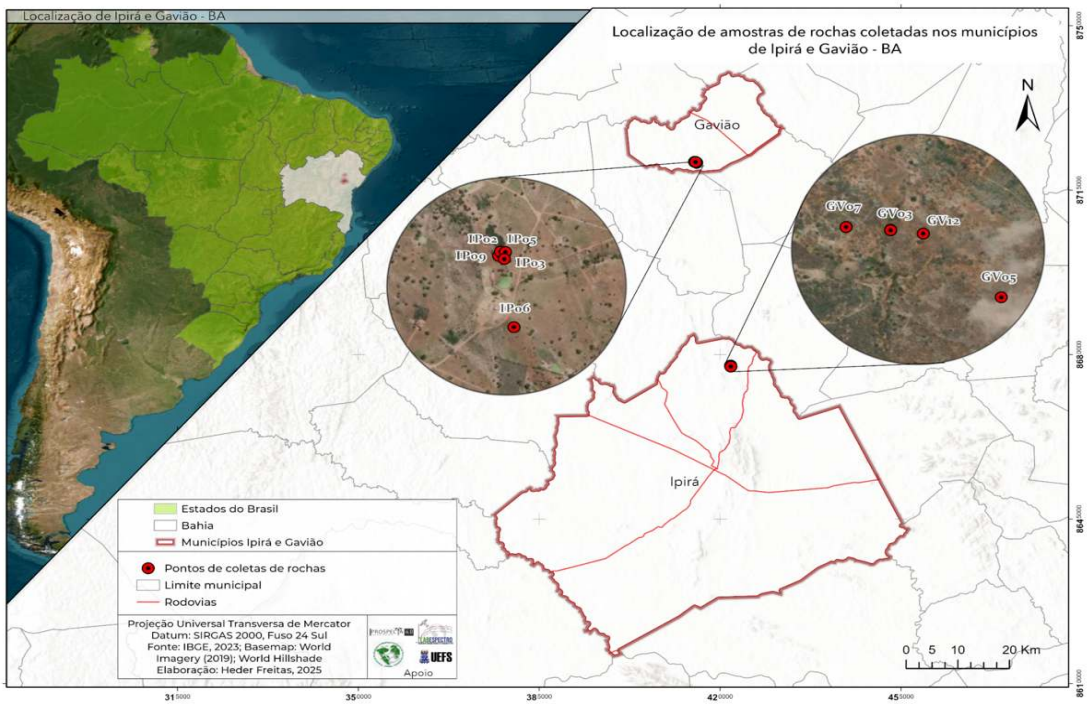
Visto que a rochagem é uma técnica potencialmente eficiente e sustentável tanto a curto quanto a longo prazo, torna-se essencial estudar a potencialidade do uso de pós de rochas sob a fertilidade do solo, a fim de alcançar não somente uma gestão eficiente e sustentável das atividades agrícolas como também a preservação do meio ambiente. Nesse contexto, este estudo tem como objetivos avaliar o tempo de disponibilização do fosfato nos solos incubados com pós de rochas dos municípios de Ipirá e Gavião.

2 METODOLOGIA

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O material aplicado no estudo foram de rochas coletadas nos municípios de Ipirá e Gavião, localizados no interior da Bahia, referenciados na (Figura 1), inseridos na unidade cartográfica conhecida como “Folha Pintadas” e do “Complexo Tanque Novo-Ipirá” (referência cartográfica SC.24-Y-D-V), no Território da Bacia do Jacuípe, região do semiárido baiano. A área apresenta histórico geológico marcado por processos de metamorfismo e alterações químicas, como o metassomatismo, conferindo potencial mineralógico, especialmente para ocorrência de fosfatos (Ribeiro et al., 2021).

Figura 1. Mapa de localização dos municípios de Ipirá e Gavião, Bahia, áreas de coleta dos materiais rochosos.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

2.2 ATIVIDADE DE CAMPO

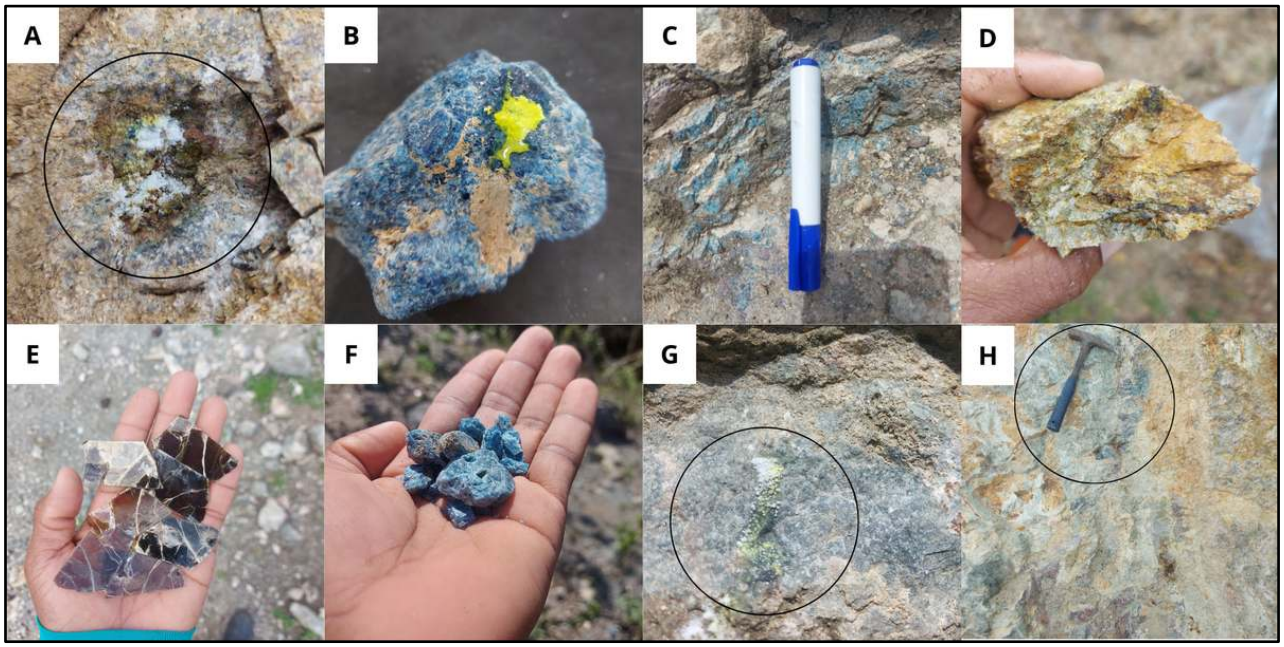
Foram coletadas amostras representativas de rochas nos dois municípios, as quais passaram por triagem em campo e laboratório, garantindo a qualidade e a homogeneidade do material. No município de Ipirá, as amostras foram obtidas em cava de mineração, enquanto em Gavião a coleta ocorreu em afloramentos naturais. Após a seleção, as amostras foram britadas, homogeneizadas e reunidas em blends, formando um composto único por município.

Ao todo, foram coletadas nove amostras de rochas, contemplando diferentes variações composicionais observadas nas áreas de estudo. Em Ipirá, os materiais apresentaram predominância de rochas calcissilicáticas, com associadas a apatita, já em Gavião, as amostras corresponderam principalmente a rochas calcissilicáticas e anfibolíticas, também associadas à presença de minerais fosfatados, que comporam o material utilizado na formulação dos blends. Dessa forma, optou-se por descrever os materiais a partir de suas características litológicas gerais, considerando que os minerais identificados fazem parte da constituição natural dessas rochas e representam variações composicionais do material coletado (Figura 2) (Ribeiro et al., 2021).

Durante as atividades de campo, também foi realizado testes colorimétricos para identificação qualitativa da presença de fósforo nas amostras, com a aplicação de solução de molibdato de amônio em ácido clorídrico a 10%, onde a manifestação da presença de fósforo é evidenciada pela mudança na coloração dos reagentes, que passaram a apresentar um tom amarelo-esverdeado, sendo um

indicando positivos para presença de fósforo conforme metodologia também usada por Ribeiro et al. (2024) (Figura 2A-B).

Figura 2. Amostras coletadas nas áreas de estudo e testes colorimétricos de campo para identificação qualitativa de fósforo.



(A) Teste colorimétrico em superfície rochosa; (B) Teste colorimétrico em apatita indicando presença de fósforo, sinalizada pela cor esverdeada sob superfície; (C) Veios de apatita aflorando em matriz rochosa, (D) Amostra de material do município de Ipirá (E) Fragmentos de mica exibindo brilho vítreo; (F) Fragmentos de apatita em campo no município de Gavião-BA; (G) Teste colorimétrico em superfície rochosa com leve indicativo da presença de fósforo; (H) Pequenos pontos de apatita em cava no município de Ipirá.
Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

2.3 PREPARO DAS AMOSTRAS

No processo de britagem (moagem), os materiais foram reduzidos a uma granulometria de 2 mm, conforme as diretrizes estabelecidas pela ABNT n.º 10. Essa etapa garantiu a uniformidade e a representatividade do composto a ser utilizado nas análises subsequentes (Brasil, 2016). Posteriormente, foi realizada a análise química dos blends para identificação da composição elementar do material como descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos dos pós de rocha de Ipirá e Gavião: teores de macro e micronutrientes e pH.

Produto	CaO	MgO	K_2O	P_2O_5	S	Cu	Fe	Mn	Zn	pH
					g/Kg					
Ipirá	8,30	12,90	0,39	12,10	7,67	0,01	63,60	0,75	0,04	8,16
Gavião	202,70	21,80	0,43	164,70	7,72	0,02	10,10	0,88	0,02	8,89

Óxido de cálcio (CaO); Óxido de magnésio (MgO); Óxido de potássio (K_2O);Pentóxido de fósforo (P_2O_5); Enxofre (S); Cobre (Cu); Ferro (Fe); Manganês (Mn); Zinco (Zn); Potencial hidrogeniônico (pH).
Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

2.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O ensaio agronômico, foi conduzido em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), em esquema fatorial 2 × 6, sendo dois materiais de pó de rocha (Material A e Material B), e seis doses do insumo (T_0 a T_5), com cinco repetições cada totalizando 60 unidades experimentais, sem o cultivo de culturas.

As doses foram estabelecidas com base na necessidade de fósforo (P) para a cultura da mandioca (Manihot esculenta), para uma produtividade de 8 toneladas por hectare (ha). seguindo as diretrizes do manual de recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (Ribeiro; Guimarães; Alvarez, 1999). O tratamento controle (T_0) caracterizou-se pela ausência de aplicação, a dose recomendada foi definida como o tratamento T_1 e os demais tratamentos (T_2 a T_5) consistiram em acréscimos progressivos de 25% calculados sobre a dose de T_1, de modo que o tratamento T_5 correspondeu ao dobro da recomendação agronômica (Tabela 4), conforme metodologia adaptada de Ferreira et al., (2025).

O experimento foi conduzido nas dependências do prédio do Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM) da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), localizada no município de Feira de Santana, no estado da Bahia.

As amostras de solo utilizadas foram coletadas na unidade experimental do curso de Agronomia da (UEFS), localizada nas proximidades da Equipe de Estudo e Educação Ambiental (EEEA). A amostragem do solo foi realizada na camada superficial (0-20 cm) com trado holandês que foi, posteriormente, homogeneizado, para garantir à uniformidade físico-química do material, seguida da análise química e física para identificação dos parâmetros de fertilidade descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Atributos químicos do solo da unidade experimental de Agronomia da UEFS antes da instalação do experimento.

pH	P	Mg	K	Ca	Al	H+ Al	SB	CTC	V	M.O
$CaCl^2$	---------- mg.dm-3---------			----------cmolc.dm-3----------					%	g.kg-1
4,55	4,24	0,56	103,8	0,79	1,18	2.8	1,62	4,42	36,62	9,73

Acidez potencial (H + Al); SB: Soma de bases trocáveis (Ca, Mg, K e Na); Saturação de bases (V); Matéria orgânica (M.O), Soma de bases (SB); Capacidade de troca catiônica (CTC); Alumínio (AL), Magnésio (Mg); Cálcio (Ca); Fósforo (P); Potássio (K); Potencial hidrogeniônico (pH).
Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A escolha da área experimental justifica-se por seus atributos químicos limitantes, notadamente o pH de 4,55, classificado como fortemente ácido pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Cabe precisar, contudo, que o valor foi determinado em $CaCl_2$ (Tabela 2), meio no qual o pH é

tipicamente 0,5 a 0,8 unidade inferior ao medido em água (Minasny et al., 2011); pelas classes de interpretação próprias desse extrator, o valor corresponde a acidez alta. Essa condição é agronomicamente relevante, pois solos ácidos, especialmente com pH inferior a 5,5, podem apresentar maior solubilidade de alumínio, redução dos teores de bases trocáveis e menor disponibilidade de fósforo, restringindo o desenvolvimento das plantas e a eficiência do uso de nutrientes (Machado et al., 2021; Santos et al., 2025). Tais características reforçam a relevância do estudo na avaliação de práticas sustentáveis para a correção e o manejo da fertilidade do solo em regiões de agricultura familiar (Borges et al., 2021).

Para o experimento, utilizou-se sacos de polietileno com capacidade de 5kg, preenchidos com 1,5 kg de solo, e para cada unidade experimental, foi inserido um canudo para realização das trocas gasosas, promovendo condições adequadas ao desenvolvimento dos processos biogeoquímicos do solo.

Para estimar a quantidade ideal de pó de rocha a ser aplicada em cada unidade experimental, foi realizada uma adaptação da dose por meio do método de densidade do solo. Considerou-se uma densidade média de 1.650 kg m^{-3} para solos com textura arenosa (Tabela 3) e uma profundidade de coleta de 0,20 m, aplicada a uma área de 10.000 m^2 (equivalente a 1 hectare), o que resultou um volume de 2.000 m^3 de solo por hectare. A partir disso, obteve-se a massa total de solo por hectare e procedeu-se à conversão e proporcionalização das doses recomendadas (Santos et al., 2025).

Tabela 3. Atributos físicos e classe textural do solo da unidade experimental de Agronomia da UEFS.

ATRIBUTOS	AREIA	ARGILA	SILTE	TEXTURA
	---------- g.kg^{-1} ----------			
	800	100	100	AREIA FRANCA

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Tabela 4. Quantificação das doses de pó de rocha aplicadas em cada tratamento, por unidade experimental (g) e por hectare (kg), para os dois materiais testados.

Tratamento	Descrição Do Tratamento	Dose de P_2O_5 por tratamento kg/ha	Material de Ipirá (g)	Material de Ipirá kg/ha	Material de Gavião (g)	Material de Gavião kg/ha
T0	Testemunha (sem aplicação)	----	----	----	----	----
T1	Dose recomendada	120	4,5	9.917,35	0,33	716,84
T2	25% acima da dose recomendada	150	5,625	12.396,69	0,4125	896,05
T3	50% acima da dose recomendada	180	6,75	14.876,03	0,495	1.075,26
T4	75% acima da dose recomendada	210	7,875	17.355,36	0,5775	1.254,47
T5	Dobro da dose recomendada (100% a mais)	240	9	19.834,70	0,66	1.433,68

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Apesar da diferença expressiva entre os valores por hectare e unidade experimental, ambos os materiais estão proporcionalmente iguais em níveis de fósforo. O ensaio agronômico foi conduzido ao longo de 2 meses, com avaliações realizadas em 30 e 60 dias de incubação. A escolha desses intervalos seguiu a metodologia proposta por Tokura Alovisi et al. (2017), que indicaram esse período, como o mínimo necessário para detectar a solubilização de fósforo (P) naturais de rochas fosfáticas em solos tropicais. No ensaio agronômico foi mantida a umidade próxima a 70% da capacidade máxima de retenção de água e ao final de cada mês foram retiradas amostras de solo para as análises químicas.

As análises estatísticas foram realizadas no software RStudio integrado ao R, com uso de pacotes especializados para análise de regressão linear e análise de correlação de Pearson, visualizadas por meio de mapas de correlação (corrplots). Também foi aplicado análise de Componentes Principais (PCA) para redução da dimensionalidade os dados foram normalizados e submetidos à PCA, permitindo explorar a variância entre os tratamentos, tipos de pó e tempos de incubação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os pós de rocha de Ipirá e Gavião elevaram o fósforo disponível (P-Mehlich) do solo já aos 30 dias de incubação, bem como os demais atributos químicos avaliados. As respostas observadas variaram em função do tipo de material e das doses aplicadas (Tabela 5).

Registre-se que a análise estatística adotada foi descritiva e exploratória regressão linear, correlação de Pearson e Análise de Componentes Principais, não tendo sido conduzida análise de variância nem teste de comparação de médias entre os tratamentos. As diferenças relatadas a seguir são, portanto, descritas em termos de magnitude e de tendência, e não como diferenças estatisticamente testadas.

Após 30 dias de incubação, foi observado que a disponibilidade de fósforo aumentou em todos os tratamentos, mas os ganhos variaram conforme a origem do pó de rocha e o valor da dose aplicada. No controle (T_0), o teor de P disponível era de 4,24 mg dm^{-3}; o pó de Ipirá quase triplicou esse valor já na dose recomendada (T_1), chegando a cerca de 12 mg/dm^3, com avanço gradual até 16,2 mg/dm^3 no T_5. Já o material de Gavião, embora seja mais rico nutricionalmente (Tabela 1), obteve apenas 5,9 mg/dm^3 no T_1, alcançando 18,8 mg/dm^3 apenas na dose máxima (T_5) (Tabelas 1 e 5). Cabe precisar que essa vantagem do material de Ipirá é dependente da dose: na dose recomendada (T_1), o teor obtido com Ipirá foi mais que o dobro do observado com Gavião (12,2 contra 5,9 mg dm^{-3}), ao passo que, na dose máxima (T_5) e aos 30 dias, a relação se inverteu, com Gavião atingindo 18,8 mg dm^{-3} contra 16,2 mg dm^{-3} de Ipirá. A superioridade do material de Ipirá manifesta-se, portanto, sobretudo na eficiência por unidade de dose aplicada, e não no teor máximo alcançável aos 30 dias.

Esse contraste evidencia que um elevado valor nutricional de fósforo e demais nutrientes, não garante solubilidade imediata. A velocidade do material de Ipirá pode ser atribuída a suas frações minerais mais reativas, enquanto o Gavião contém fases fosfáticas de dissolução mais lentas, exigindo quantidades maiores para produzir efeito equivalente (Alves et al., 2025; Höfig; Martins, 2025; Tokura Alovisi et al., 2017). Soma-se a isso o elevado teor de CaO do material de Gavião (202,7 g kg^{-1}; Tabela 1): a dissolução da apatita é favorecida por pH ácido e por baixa atividade de Ca^{2+} e de fosfato na solução, de modo que a liberação simultânea de cálcio pelas fases calcissilicáticas tende a desacelerar, por efeito do íon comum, a solubilização do fosfato (Chien; Menon, 1995).

Decorridos 60 dias de incubação, a dinâmica de liberação de fósforo reforçou a superior reatividade do pó de Ipirá. O material manteve um incremento praticamente linear, atingindo 22,64 mg/dm^3 no tratamento T_5, sinal de que suas frações minerais continuam se dissolvendo e disponibilizando (P) ao longo do tempo.

Tabela 5. Atributos químicos de fertilidade do solo após 30 e 60 dias de incubação, por material de pó de rocha e dose aplicada. (PIT) Pó de rocha de Ipirá tratamento (x) (PGT) Pó de rocha de Gavião tratamento (x)

TRATAMENTOS	pH	P	Ca	Mg	K	Al	H+ Al	SB	CTC	V	M.O
	$CaCl_2$	mg/dm3	----			cmolc/dm3				%	g/Kg
30 DIAS DE INCUBAÇAO											
T0	4,5	4,24	0,79	0,56	0,27	0,18	2.8	1,62	4,42	36,62	9,73
1ª PGT 1	4,9	5,9	0,9	0,5	0,24	0,1	1,8	1,6	3,4	47,7	14
1ª PGT 2	4,9	11	0,9	0,5	0,26	0,1	2,1	1,7	3,8	44,2	13
1ª PGT 3	4,9	13,3	1	0,6	0,26	0,1	1,8	1,9	3,7	50,8	14
1ª PGT 4	4,9	15,3	0,9	0,6	0,25	0,1	2,1	1,8	3,8	45,5	13
1ª PGT 5	4,9	18,8	1	0,6	0,25	0,1	1,9	1,9	3,8	49,3	14
1ª PIT 1	4,9	12,2	0,9	0,5	0,23	0,1	2,1	1,6	3,7	43,7	13
1ª PIT 2	4,9	15,9	0,9	0,5	0,22	0,1	1,8	1,6	3,4	47,4	13
1ª PIT 3	5	14,4	1	0,6	0,26	0,1	2	1,9	3,9	48,2	13
1ª PIT 4	5	15,1	1	0,6	0,24	0,1	1,9	1,8	3,7	49,2	14
1ª PIT 5	5	16,2	1	0,6	0,23	0,1	1,9	1,8	3,7	49,1	12
60 DIAS DE INCUBAÇAO											
T0	4,5	4,24	0,79	0,56	0,27	0,18	2.8	1,62	4,42	36,62	9,73
2ª PGT 1	4,8	3,26	1,31	0,96	0,61	0,05	3,23	3,05	6,28	48,59	9,16
2ª PGT 2	4,87	7,76	1,41	0,86	0,61	0,15	3,06	3,07	6,12	50,05	8,89
2ª PGT 3	4,7	14,75	1,31	1,06	0,62	0,15	3,4	3,17	6,57	48,28	7,81
2ª PGT 4	4,7	14,26	1,31	0,86	0,61	0,15	3,06	2,97	6,02	49,22	6,2
2ª PGT 5	4,7	20,84	1,52	1,16	0,61	0,15	3,06	3,47	6,53	53,14	7,01
2ª PIT 1	4,8	11,84	1,41	1,26	0,61	0,15	3,4	3,47	6,86	50,58	5,93
2ª PIT 2	4,8	14,96	1,31	1,16	0,61	0,1	3,4	3,28	6,68	49,08	6,02
2ª PIT 3	4,8	16,89	1,31	1,06	0,61	0,15	3,23	3,17	6,4	49,57	6,2
2ª PIT 4	4,8	16,82	1,41	1,06	0,62	0,15	3,23	3,29	6,52	50,46	6,47
2ª PIT 5	4,9	22,64	1,52	0,86	0,61	0,1	3,23	3,19	6,42	49,68	8,08

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

O solo submetido ao pó de Gavião ocorreu leve redução de (P) nos tratamentos T_1, T_2 e T_4 em relação aos 30 dias, provável reflexo de processos de acidificação e do caráter mais cálcico das fases fosfáticas, que podem formar compostos menos solúveis ao longo da incubação. Ainda assim, a dose potencializada (T_5), do material de Gavião se manteve ascendente e alcançou 20,84 mg/dm³, confirmando que doses mais altas compensam sua solubilidade inicial mais lenta. Esses resultados corroboram a ideia de que não basta um elevado teor total de (P_2O_5), a mineralogia e a velocidade de

dissolução das fases fosfáticas irão determinar a disponibilidade efetiva de fósforo no tempo (Alves et al., 2025; Tokura Alovisi et al., 2017; Silva et al., 2024b).

Estudos de incubação com fosfatos naturais, confirmam uma tendência de que doses crescentes de rocha fosfática, incubadas por 60 dias, promovem elevação linear nos teores de fósforo (P) disponível, ainda que os efeitos variem conforme as características do solo (Machado Filho et al., 2024). No presente estudo, foi observado que ambos os materiais testados promoveram aumentos expressivos nos teores de (P) disponível, em relação ao tratamento controle (T_0). Mesmo nas doses mais elevadas (T_5), os teores finais atingidos foram de 22,64 mg dm³ para o material de Ipirá e 20,84 mg dm³ para o de Gavião, indicando liberação progressiva ao longo do tempo.

Contudo, sob a ótica agronômica, esses valores ainda são considerados pequenos, especialmente quando se trata de solos arenosos, que requerem níveis mais elevados de (P), no extrator Mehlich-1, em razão do seu baixo poder tampão de fósforo. De acordo com as faixas de interpretação para a cultura da mandioca, solos com até 150 g/kg de argila são classificados com fertilidade média quando apresentam teores de fósforo entre 20,1 e 30,0 mg/dm³ (Borges et al., 2021; Sobral et al., 2015).

Mesmo com a aplicação em doses elevadas, os materiais testados apenas aproximaram os teores de (P) ao limiar inferior da faixa considerada adequada, o que reforça a necessidade de estratégias complementares para aumentar a eficiência dessas fontes em condições de campo.

A diferença na solubilização observada entre os materiais pode estar associada às características físico-químicas de cada tipo de rocha utilizada. Fatores como composição mineralógica e resistência à alteração geoquímica influenciam diretamente a liberação de nutrientes no solo. Nesse contexto, o material de Ipirá apresentou maior reatividade, possivelmente devido a um intemperismo mais acelerado. Isso pode estar ligado à maior facilidade de desagregação e à natureza menos cristalina ou mais friável de seus minerais constituintes (Hanisch et al., 2024).

As altas exigências de fósforo em solos de textura areia franca estão relacionadas à sua menor capacidade de adsorção do nutriente, decorrente do baixo teor de argila, o que se traduz em menor fator capacidade de fósforo; por essa razão, os níveis críticos de P-Mehlich são mais elevados em solos arenosos, ao passo que as doses necessárias para elevar o P disponível são, em geral, menores do que em solos argilosos, nos quais a adsorção por óxidos de Fe e Al retém grande parte do P aplicado (Fontana et al., 2021).

Ainda que a disponibilidade do fósforo permaneça na faixa média de fertilidade, os efeitos promovidos pelos pós de rocha não se limitaram somente à liberação gradual desse nutriente. A interação desses materiais com o solo também modificou alguns de seus atributos, como a soma de bases trocáveis, o pH e a CTC, (Tabela 5) propriedades fundamentais para a manutenção da fertilidade

e o aproveitamento eficiente do fósforo liberado (Hanisch et al., 2024).

Em resposta ao aumento nos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} ao longo do período de incubação, observou-se que o comportamento do pH variou conforme o tipo de material utilizado, com destaque para o pó de Gavião, que apresentava maiores teores desses cátions. Inicialmente, o tratamento controle apresentou pH de 4,55, classificado como fortemente ácido, conforme os critérios de interpretação do pH adotados pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2025); ressalte-se, porém, que o valor foi determinado em $CaCl_2$, cujas leituras são tipicamente inferiores às obtidas em água (Minasny et al., 2011). Após 30 dias, verificou-se elevação do pH, atingindo 5,0 no tratamento com Ipirá e 4,9 com Gavião.

Esse aumento inicial do pH está diretamente associado à liberação de bases trocáveis, sobretudo Ca^{2+} e Mg^{2+}, que promovem a neutralização da acidez do solo por meio da substituição de H^+ e Al^{3+} no complexo sortivo. Esse processo reduz a atividade do alumínio na solução do solo, diminuindo sua toxicidade e favorecendo a melhoria das condições químicas para o desenvolvimento vegetal.

Apesar da leve redução do pH observada aos 60 dias em alguns tratamentos com Gavião, os valores permaneceram superiores ao controle inicial, indicando que, mesmo com possíveis reequilíbrios do sistema, houve efeito corretivo ao longo do período de incubação. Esse comportamento sugere que a dinâmica do sistema não se limita a uma elevação contínua do pH, mas envolve processos de tamponamento e redistribuição dos íons no solo.

A disponibilidade de nutrientes no solo é fortemente influenciada pelo pH, que regula a solubilidade de diversos elementos. Em condições de elevada acidez (pH entre 3,2 e 5,5), há aumento da solubilização de íons como Al^{3+}, que podem atingir níveis tóxicos para as plantas (Veloso et al., 2020). Nesse sentido, os resultados obtidos indicam que a aplicação dos pós de rocha contribuiu para a redução da atividade do alumínio no sistema, ainda que de forma gradual, evidenciando um processo de neutralização parcial da acidez do solo.

Os pós de rocha atuam como fontes de remineralização do solo pois reúnem uma grande variedade de minerais que podem enriquecer áreas de baixa fertilidade ou repor nutrientes perdidos por lixiviação. No entanto, sua dissolução não é imediata, como observado nos tratamentos, ela ocorre gradualmente e está condicionada a fatores como a composição química e mineralógica da rocha, o tamanho das partículas, o tempo de incubação, pH e a atividade microbiana do próprio solo (Tokura Alovisi et al., 2017).

À medida que o pH do solo aumenta seja por processos naturais, aplicação de corretivos ou uso de remineralizadores a solubilidade do alumínio tende a diminuir, sendo precipitado em formas menos disponíveis, como hidróxidos. Assim, solos mais ácidos tendem a apresentar maior concentração de

alumínio disponível, enquanto solos com pH mais elevado apresentam teores reduzidos, o que explica a correlação negativa entre essas duas variáveis em ambos os materiais (Figuras 3 e 4). Ressalte-se que as matrizes foram construídas com os valores por tratamento (seis pontos por data, incluindo o controle), de modo que coeficientes elevados podem ser fortemente influenciados por um único ponto, como o controle, cujo teor de Al (0,18 cmolc dm^{-3}) difere dos demais (0,05 a 0,15 cmolc dm^{-3}; Tabela 5); os coeficientes devem, portanto, ser lidos como indicativos. Esse padrão é coerente com o que se observa na ordenação da PCA (Figuras 6 e 7), na qual tratamentos que apresentaram maior pH tendem a se afastar dos vetores associados ao alumínio, indicando menor influência desse elemento nas condições químicas desses tratamentos (Souza et al., 2026).

Figura 3. Matrizes de correlação de Pearson entre os atributos químicos do solo tratado com o pó de rocha de Gavião, aos 30 e aos 60 dias de incubação.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Tokura Alovisi et al. (2017) relataram comportamento análogo ao observado no presente trabalho. Em incubação de fosfatos naturais em Latossolo, os autores registraram aumento linear nos teores de (P) até 30 dias, seguido de declínio gradual nas avaliações posteriores. Esse comportamento foi atribuído à forte ligação dos óxidos de ferro e alumínio, predominantes em solos tropicais altamente intemperizados, pelos íons fosfatados, à medida que o pH se estabiliza e a superfície ativa desses minerais se amplia, intensifica-se a formação de complexos P–Fe /Al e de fosfatos de baixa solubilidade, imobilizando o nutriente e restringindo sua disponibilidade às plantas, o que reforça a

importância de adotar estratégias de manejo que considerem a dinâmica temporal do fósforo nesses ambiente.

Figura 4. Matrizes de correlação de Pearson entre os atributos químicos do solo tratado com o pó de rocha de Ipirá, aos 30 e aos 60 dias de incubação.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Nas Figuras 3 e 4, verificam-se correlações positivas entre Ca^{2+} e o fósforo disponível, com coeficientes de 0,78 (30 dias) e 0,60 (60 dias) para o material de Gavião, e de 0,84 (30 dias) e 0,88 (60 dias) para Ipirá nos mesmos períodos. Tais resultados evidenciam a atuação do cálcio na atenuação da acidez do solo, favorecendo a dinâmica do fósforo e, consequentemente, a melhoria da fertilidade.

Nos solos incubados há 60 dias, os teores de Ca^{2+} aumentaram progressivamente nas segundas PIT, passando de 1,31 (2ª PIT 3) para 1,41 (2ª PIT 4) e 1,52 (2ª PIT 5). Esse incremento de Ca^{2+} ocorreu juntamente com o crescimento dos níveis de fósforo disponível, confirmando a correlação positiva entre essas duas variáveis. Essa relação acontece, porque o aumento do pH eleva a concentração de íons hidróxido (OH^-), levando à formação de hidróxidos de Fe^{3+} e Al^{3+} que deixam de reagir com o fosfato. Paralelamente, a remoção de prótons das hidroxilas presentes nas argilas e na matéria orgânica confere cargas negativas extras à superfície do solo, criando uma força de repulsão contra os íons fosfato. Dessa forma, reduz-se a fixação de P pelos complexos Fe/Al e aumenta-se a quantidade de fósforo remanescente em solução, tornando-o mais disponível para as plantas (Penn; Camberato,

2019). Cabe considerar, adicionalmente, que, sendo a apatita a principal fase fosfática dos dois materiais, sua dissolução libera Ca^{2+} e fosfato simultaneamente, de modo que parte da correlação positiva entre Ca e P decorre da própria estequiometria de dissolução do mineral, e não apenas de efeitos indiretos do pH, que variou pouco entre os tratamentos (4,7 a 5,0; Tabela 5).

A capacidade de troca de cátions (CTC), exerce papel decisivo na retenção de fósforo nos solos, o aumento da fração argila e da matéria orgânica eleva a densidade de cargas negativas nos coloides, favorecendo a adsorção do ânion fosfato. Ao avaliar onze solos do estado de Alagoas, Santos, (2022) constatou correlação significativa entre a CTC e a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) (*r*= 0,646; $p < 0,05$), evidenciando que sistemas com CTC mais elevada retêm quantidades maiores de fosfato nos complexos de troca. Observações semelhantes foram relatadas por Corrêa et al., (2011), que atribuíram o mesmo comportamento à ação conjunta da acidez potencial ($H^+ + Al$) e da CTC na formação de complexos fosfato-argila-óxidos.

A dinâmica da correlação entre a CTC e o fósforo extraído revelou um comportamento temporal de inversão de sinal em ambos os materiais. Aos 30 dias, observou-se uma correlação negativa expressiva, especialmente no solo tratado com o pó de Ipirá ($r = -0,89$), sugerindo que, na fase inicial de contato, solos com maior densidade de cargas apresentam uma força de adsorção mais intensa, reduzindo a labilidade do P. Contudo, aos 60 dias, houve uma inversão para correlações positivas (0,56 para Gavião e 0,71 para Ipirá). Essa transição indica que, após a saturação inicial dos sítios de adsorção e o início da mineralização da matéria orgânica, a CTC passa a exercer um papel de regulação e manutenção do P na solução. A maior correlação global (conjunto das duas datas) observada em Ipirá (0,29) em comparação a Gavião (0,11) reflete a natureza mais responsiva deste material, onde a textura e a composição mineralógica permitem uma interação mais dinâmica entre o complexo de troca e a disponibilidade de nutrientes ao longo do tempo (Vinha et al., 2021).

Embora a Tabela 5 apresente vários atributos químicos do solo, destaca-se a importância das relações entre a CTC, SB e a saturação por bases (V%) na caracterização da fertilidade dos solos, conforme enfatizado por (Souza et al., 2026). Nos tratamentos avaliados, observou-se um aumento expressivo nos valores de SB ao longo do tempo de incubação, atingindo 1,9 cmolc/dm³ aos 30 dias e elevando-se para 3,47 cmolc/dm³ aos 60 dias em ambos os materiais testados (Tabela 5). Cabe ponderar, contudo, que o incremento de SB entre 30 e 60 dias ocorreu de forma praticamente uniforme em todas as doses e em ambos os materiais, e foi acompanhado por aumento do K trocável (de 0,22–0,26 para 0,61–0,62 cmolc dm^{-3}) incompatível com os baixos teores de K_2O dos pós (Tabela 1), bem como por elevação da acidez potencial e da CTC e por redução da matéria orgânica; como o tratamento controle não foi reanalisado ao longo da incubação (Tabela 5), esse padrão pode refletir efeito da

própria incubação ou diferenças entre lotes analíticos, e não exclusivamente a ação dos pós de rocha. Esses resultados confirmam o potencial dos pós de rocha como condicionadores de solo, uma vez que sua aplicação favorece a liberação gradual de nutrientes e o fornecimento contínuo de bases trocáveis, promovendo melhorias consistentes na fertilidade química do solo.

Esses aumentos, podem contribuir para a construção de um sistema mais equilibrado e sustentável. De acordo com Brito et al. (2024), esse tipo de manejo com remineralizadores naturais representa uma estratégia promissora para a reestruturação da fertilidade de solos tropicais, especialmente aqueles com baixa reserva de nutrientes e suscetíveis à acidificação.

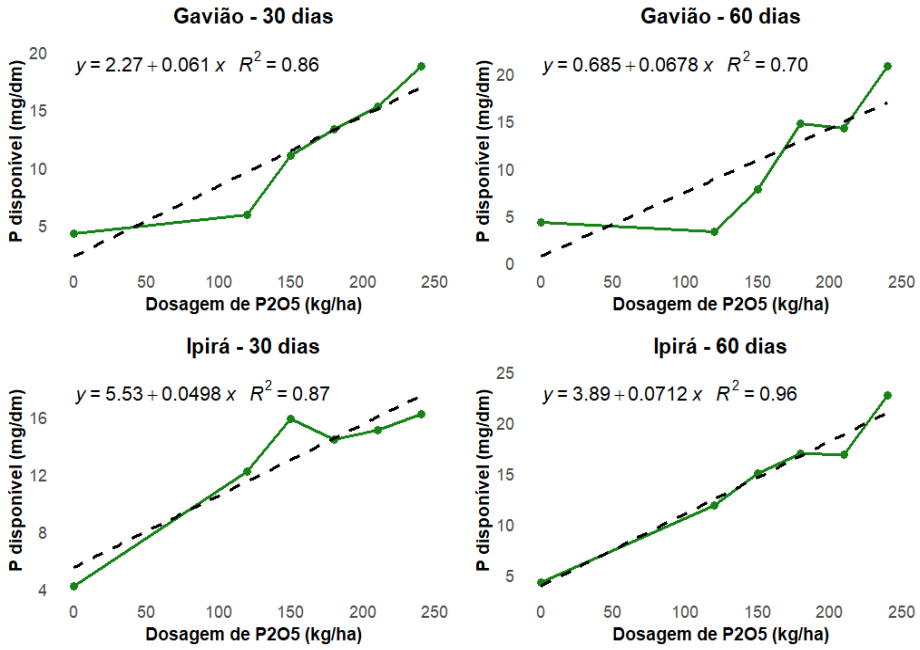
Nas matrizes bidimensionais, também foi observada uma associação positiva entre os teores de fósforo no solo e parâmetros químicos relevantes para a fertilidade, como a V% e a SB. As análises estatísticas evidenciaram correlações positivas entre o fósforo e o V%, com coeficientes de 0,60 para o material oriundo de Gavião e 0,46 para o de Ipirá. Já em relação ao fósforo e à SB, os coeficientes foram de 0,31 e 0,49, respectivamente.

Esses resultados indicam que o aumento da disponibilidade de fósforo no solo está associado ao aumento dos teores de bases trocáveis e na saturação por bases, reforçando a ideia de que a liberação de fósforo pode estar acompanhada da melhoria de outros indicadores de fertilidade do solo. Tal comportamento é coerente com estudos desenvolvidos em ambientes tropicais, nos quais a resposta do crescimento vegetal se mostra mais eficiente quando há uma interação sinérgica entre a disponibilidade de fósforo e a saturação por bases, especialmente no que diz respeito à absorção de nutrientes e ao desenvolvimento radicular. Um exemplo disso é evidenciado por Gomes et al. (2004), em pesquisas com mudas de angico-branco (Anadenanthera colubrina), nas quais se observou que o aumento simultâneo desses fatores promoveu maior vigor e desempenho das plantas.

A relação entre as doses aplicadas e o fósforo disponível revelou comportamentos contrastantes entre os materiais ao longo do período de incubação, sugerindo a atuação de mecanismos distintos na regulação da disponibilidade do nutriente. Observa-se que, embora a resposta inicial indique tendência linear em ambos os casos, a consistência dessa relação varia com o tempo, refletindo mudanças nos processos de retenção e liberação de fósforo no solo.

Essas diferenças são evidenciadas nas regressões lineares apresentadas na (Figura 5), que sintetizam a resposta do P disponível em função das doses e permitem avaliar a evolução do ajuste dos modelos ao longo do tempo.

Figura 5. Regressão linear entre a dose de P_2O_5 aplicada e o fósforo disponível no solo, com as equações de regressão e os respectivos coeficientes de determinação (R^2), aos 30 e aos 60 dias de incubação.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Conforme evidenciado na Figura 5, o fósforo disponível manteve relação linear com as doses em ambos os materiais, contudo a qualidade desse ajuste mudou com o tempo de incubação. Para o pó de Ipirá, o coeficiente de determinação (R^2) passou de 0,87 aos 30 dias para 0,96 aos 60 dias, indicando que, ao final da incubação, aproximadamente 96% da variação observada no P disponível foi explicada pelo aumento das doses aplicadas. Esse comportamento evidencia uma resposta mais consistente do material, uma vez que os teores de P tendem a aumentar de forma mais proporcional às doses, sugerindo liberação mais previsível e uniforme do nutriente (Raniro et al., 2022).

Em contraste o pó de Gavião o R^2 caiu de 0,86 para 0,70, de modo que apenas 70 % da variação permaneceu associada à dose aos 60 dias; o restante decorre de maior dispersão entre repetições, possivelmente por precipitação de fosfatos de (Ca - Fe) ou heterogeneidade do material. Nos tratamentos de Gavião a 60 dias, a ligeira redução de Mg (1,06 - 0,86 cmolc dm^3) (Tabela 5) coincidiu com o menor R^2 da regressão de P, ficando em $R^2 = 0,70$, sugerindo que desequilíbrios na relação Ca e Mg podem aumentar a variabilidade na disponibilidade de P.

A dinâmica química do solo evidencia uma clara distinção entre os atributos associados à fertilidade (P, pH e V%) e aqueles relacionados à acidez (Al), conforme ilustrado na Figura 6. Esse padrão reflete o comportamento antagônico entre os cátions básicos e o complexo de acidez, frequentemente observado em análises multivariadas de atributos do solo.

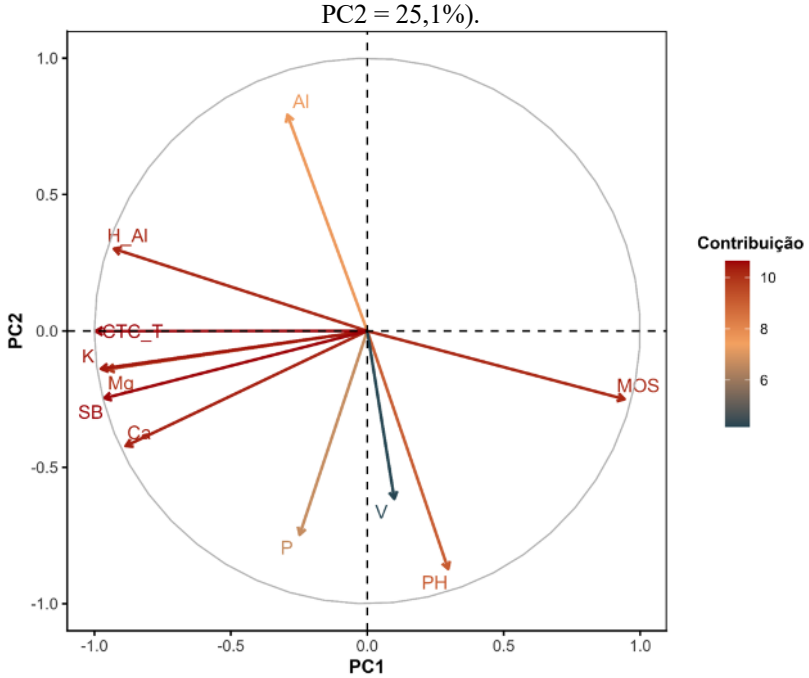
No presente estudo, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA), com objetivo

de reduzir a dimensionalidade dos dados químicos do solo e identificar os principais padrões de variação entre os tratamentos. Essa abordagem permitiu sintetizar o comportamento conjunto das variáveis avaliadas em novos eixos explicativos. O primeiro componente principal (PC1) explicou 59,6% da variância total, indicando que a maior parte da variabilidade esteve associada ao contraste entre as datas de avaliação. A Figura 6 mostra K, Mg, SB, Ca, CTC e H+Al com cargas negativas elevadas em PC1 e a matéria orgânica com carga positiva elevada, e a Figura 7 separa integralmente, ao longo desse eixo, as amostras de 30 dias (valores positivos) das de 60 dias (valores negativos); o PC1 expressa, portanto, sobretudo a diferença entre as duas datas, e não um gradiente de dose.

De forma complementar, o segundo componente principal (PC2), responsável por 25,1% da variância, evidencia a contribuição de variáveis ligadas ao complexo de troca, com destaque para o alumínio trocável (Al), com carga positiva, em oposição ao fósforo disponível, ao pH e à saturação por bases, com cargas negativas, contraste que separa o controle (T_0) das amostras tratadas. Essa estrutura reforça que as alterações nos atributos químicos do solo resultam de interações entre os constituintes do complexo sortivo, indicando modificações na disponibilidade de nutrientes e na acidez do sistema (Novak, et al., 2021).

Nesse contexto, a organização dos componentes principais sugere que as intervenções no solo promovem mudanças integradas na sua química, refletidas na redistribuição dos atributos ao longo dos eixos da PCA.

Figura 6. Contribuições e orientações das variáveis nos dois primeiros componentes principais da PCA (PC1 = 59,6%; PC2 = 25,1%).

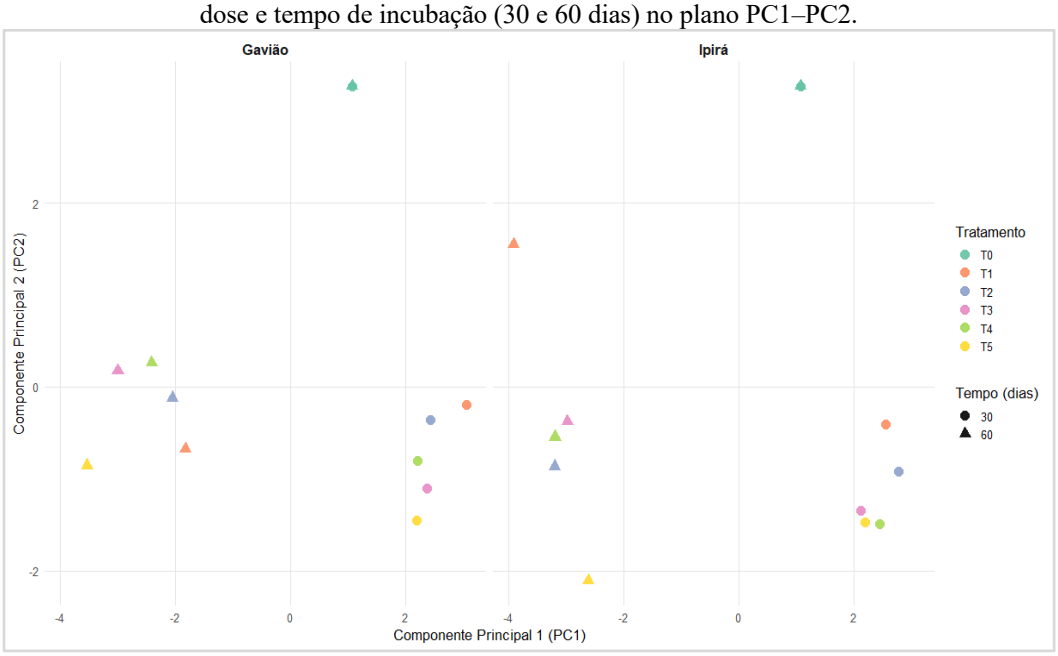


Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A Figura 7 apresenta a ordenação multivariada das amostras obtidas por meio da Análise de Componentes Principais (PCA), permitindo sintetizar a variação conjunta dos atributos químicos do solo em função dos tratamentos avaliados. Essa abordagem possibilita visualizar, em um mesmo plano, os efeitos do tipo de material, das doses aplicadas e do tempo de incubação, evidenciando padrões de aproximação, dispersão e distinção entre os grupos amostrais. Assim, a distribuição dos pontos nos eixos PC1 e PC2 serve como base para interpretar as alterações químicas promovidas pelos pós de rocha no sistema solo.

O gráfico de dispersão das amostras apresentado separadamente para os materiais de Gavião e Ipirá revela padrão semelhante entre ambos, com os pontos distribuídos conforme o tempo de incubação (30 e 60 dias) e as diferentes doses aplicadas (T_0 a T_5). Os tratamentos com maiores doses de pó de rocha (T_4 e T_5), especialmente após 60 dias, deslocaram-se para as extremidades do plano de ordenação, indicando alterações químicas expressivas ao longo do período experimental.

Figura 7. Análise de Componentes Principais (PCA): dispersão das amostras por material de pó de rocha (Gavião e Ipirá), dose e tempo de incubação (30 e 60 dias) no plano PC1–PC2.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

O vetor de Al, com carga positiva em PC2, e o baixo pH do solo explicam o agrupamento das amostras de controle (T_0), que apresentaram teores elevados de alumínio 1,18 cmolc dm^3 e de acidez potencial 2,8 cmolc dm^3 (Tabela 2) , posicionando-se de forma oposta às amostras tratadas. A redução desses dois indicadores, combinada ao aumento do pH e da saturação por bases (V%), confirma que a aplicação dos pós de rocha contribuiu para a correção da acidez do solo e para a elevação da disponibilidade de cátions básicos efeitos claramente capturados pelos dois primeiros componentes

principais da análise de componentes principais (PCA). Essa leitura aplica-se sobretudo aos 30 dias; aos 60 dias, a acidez potencial elevou-se acima do valor inicial em todos os tratamentos (3,06 a 3,40 cmolc dm^{-3}; Tabela 5), o que indica que a correção da acidez foi parcial e transitória.

A análise de componentes principais (PCA) indicou que, aos 30 dias, a matéria orgânica, mais elevada nessa data (12 a 14 g kg^{-1}; Tabela 5), foi o principal vetor responsável pelo deslocamento dos pontos no sentido positivo do eixo PC1. Já aos 60 dias, conforme observado na Tabela 5, o aumento de K, Ca, Mg, SB, CTC e H+Al contribuiu para o deslocamento dos pontos no sentido negativo da PC1.

Um exemplo ilustrativo é o tratamento com o material de Gavião aos 60 dias (Tabela 5), no qual o fósforo disponível no tratamento 2ª PGT5 atingiu 20,84 mg dm^3. Esse resultado, associado ao aumento da soma de bases (SB), do V% e à redução do teor de alumínio, explica o posicionamento da amostra no extremo negativo do eixo PC1, junto às demais amostras de 60 dias, afastando-se do controle e evidenciando o ganho de fertilidade proporcionado pela rochagem.

Em contraste, no tratamento 2ª PIT5, referente ao material de Ipirá aos 60 dias, observou-se um teor de fósforo ainda maior, de 22,64 mg/dm^3, acompanhado por elevação do V% e redução do alumínio para 0,10 cmolc/dm^3. Apesar disso, o ponto correspondente no gráfico aparece deslocado para uma região distinta e situada no extremo negativo do eixo PC2, coerente com o maior teor de P disponível e o menor teor de Al, variáveis que definem esse eixo (Figura 6).

No eixo vertical (PC2), observam-se sobretudo diferenças entre o controle e as amostras tratadas e, secundariamente, entre doses. De modo geral, aos 60 dias, os pontos se distribuem acima ou abaixo dos círculos representativos dos 30 dias, indicando que parte da variabilidade capturada pela PCA está associada ao fator temporal. Um exemplo é o tratamento T4 de Gavião, que apresentou teor de fósforo disponível de 15,3 mg/dm^3 aos 30 dias e de 14,26 mg dm^3 aos 60 dias, o que justifica seu deslocamento ao longo do eixo PC2.

O vetor de Al também explica o agrupamento dos controles (T0), que apresentam valores elevados de Al 1,18 cmolc/dm^3 e H + Al 2,8 cmolc/dm^3, posicionando-se de forma oposta às amostras tratadas. A redução desses dois indicadores, aliada ao aumento do pH e da saturação por bases (V%), confirma que a aplicação dos pós de rocha promoveu correção da acidez e maior disponibilidade de cátions básicos, efeitos capturados pelos dois primeiros componentes principais da PCA.

Em síntese, os dados numéricos reforçam a interpretação visual da análise, altas doses e maior tempo de incubação intensificam os efeitos da rochagem, deslocando as amostras para regiões associadas a melhores condições de fertilidade maior P disponível, SB e V% e menor Al. Essas transformações químicas sustentam a eficácia do uso de pó de rocha como estratégia viável para

melhoria de solos ácidos e pobres em bases.

3.1 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Os resultados devem ser interpretados considerando seis limitações. A primeira é a ausência de análise de variância: embora o experimento tenha sido instalado em delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições, os dados foram tratados apenas por regressão, correlação e ordenação multivariada. Não foram apresentados valores médios com medidas de dispersão nem teste de comparação de médias, o que impede afirmar formalmente a significância das diferenças entre materiais e entre doses. A aplicação de ANOVA fatorial seguida de teste de médias constitui o complemento analítico necessário a este conjunto de dados.

A segunda limitação diz respeito ao extrator utilizado. O Mehlich-1 é uma solução ácida que pode solubilizar parcialmente fases fosfáticas de baixa solubilidade, sobretudo fosfatos de cálcio como a apatita, presentes em ambos os materiais testados. Em solos tratados com fontes fosfatadas naturais, esse extrator tende, portanto, a superestimar o fósforo efetivamente disponível às plantas quando comparado a métodos como a resina trocadora de íons, e a magnitude dessa superestimativa varia com a fonte de P e com o tempo de contato solo-fonte (Freitas et al., 2013). Essa ressalva é particularmente relevante aqui, dado que a apatita é constituinte declarado dos blends.

A terceira limitação é a ausência de planta-teste. Tratando-se de ensaio de incubação sem cultivo, avaliou-se a disponibilização química do fósforo no solo, e não a eficiência agronômica em sentido estrito, que exigiria mensurar absorção, produção de matéria seca e resposta produtiva. A quarta é o horizonte temporal: sessenta dias representam o mínimo indicado para detectar solubilização de rochas fosfáticas, mas são insuficientes para caracterizar o efeito residual de longo prazo, que é justamente o atributo mais valorizado nos remineralizadores.

A quinta limitação é a de escopo edáfico: utilizou-se um único solo, de textura areia franca e fortemente ácido, de modo que a extrapolação para solos argilosos, com maior capacidade de adsorção de fósforo, não é imediata. A sexta refere-se à caracterização dos materiais: a composição mineralógica foi descrita qualitativamente, sem quantificação por difratometria de raios X nem determinação da distribuição granulométrica dos pós após a moagem, parâmetros que condicionam diretamente a superfície específica e a taxa de dissolução.

3.2 CONTRIBUIÇÃO DO ESTUDO

O trabalho oferece três contribuições. No plano empírico, caracteriza comparativamente dois materiais rochosos regionais ainda não avaliados agronomicamente, provenientes do Complexo

Tanque Novo-Ipirá, no semiárido baiano, fornecendo valores de referência de liberação de fósforo em duas datas de incubação e em seis níveis de dose. No plano conceitual, demonstra empiricamente que o teor total de P_2O_5 é um indicador insuficiente de desempenho agronômico: o material de Gavião, com teor total de P_2O_5 mais de treze vezes superior ao de Ipirá, apresentou liberação mais lenta, o que reposiciona a mineralogia e a reatividade como critérios centrais de seleção. No plano aplicado, o resultado é diretamente relevante para a agricultura familiar do semiárido baiano, ao indicar que fontes minerais locais podem elevar a fertilidade química de solos ácidos e arenosos, ainda que os teores alcançados permaneçam próximos ao limiar inferior da faixa considerada adequada para a cultura de referência.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que a eficiência dos pós de rocha na disponibilização de fósforo ao solo não depende apenas dos teores totais de P_2O_5 presentes nos materiais, mas principalmente das características mineralógicas, da dureza e da reatividade de cada fonte.

Embora o aumento da dose favoreça, de modo esperado, maiores teores de P disponível, os resultados evidenciam que a dose, isoladamente, não explica todo o desempenho agronômico dos materiais. Isso porque, sob a mesma condição experimental e no mesmo nível de aplicação, o pó de rocha proveniente de Ipirá-BA apresentou resposta superior ao pó de Gavião, sobretudo na dose recomendada (T_1), na qual o teor de P disponível aos 30 dias foi mais que o dobro do obtido com Gavião (12,2 contra 5,9 mg/dm³), e no tratamento T_5, correspondente ao dobro da dose recomendada, no qual alcançou 22,64 mg/dm³ de fósforo disponível aos 60 dias de incubação. Esse comportamento indica maior capacidade de liberação progressiva de P pelo material de Ipirá, reforçando sua maior reatividade e seu potencial como alternativa mais eficiente para a melhoria da disponibilidade de fósforo em solos ácidos de textura areia franca.

Do ponto de vista ambiental e agronômico, os pós de rocha representam uma alternativa promissora para o manejo sustentável da fertilidade dos solos, especialmente por possibilitarem o aproveitamento de fontes minerais regionais e a liberação gradual de nutrientes. Entretanto, os resultados deste estudo demonstram que a escolha do material não deve ser baseada apenas no teor total de nutrientes, mas também na composição mineralógica, na taxa de solubilização das fases fosfatadas e no tempo necessário para sua reação no solo.

Dessa forma, o pó de Ipirá demonstrou maior eficiência na remineralização de solos arenosos nas condições testadas, destacando a importância da adequação das doses e do tempo para maximizar a disponibilidade de fósforo e garantir a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), por meio do edital CNPq/MCTI nº 441271/2023-5 –Presente, Passado e Futuro da Biodiversidade do Semiárido: Inventários, Monitoramento, Impactos das Mudanças Climáticas e Implicações para o Uso e Conservação da Flora, Fauna e Fungos. W.J.F.R. foi apoiado por bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq (processo nº 314954/2021-0), Projeto Prospecta 4.0 –CNPq (processo nº 407907/2022-0) e pelo projeto 30202010010121001 –CTBIO –FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia do Semiárido (UEFS –CTBio-CIMATEC SERTÃO). Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estudos Interdisciplinares e Transdisciplinares em Ecologia e Evolução (INCT IN-TREE), financiado pelo CNPq (408930/2024-1), pela CAPES (88887.195651/2025-00) e pela FAPESP. Financiamento adicional foi fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), por meio do programa Bioeconomia, Recursos Hídricos e Sustentabilidade Ambiental na Bahia, no âmbito da Chamada nº 38/2022, Acordo de Cooperação Técnica nº 294/2023 e Termo de Outorga nº PPF0003/2023. Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM/UEFS) pelo apoio institucional, bem como ao SENAI CIMATEC pela contribuição no desenvolvimento científico e tecnológico voltado à inovação aplicada.R.N.V. foi apoiado pelo INCT IN-TREE e agradece a bolsa SET-G 30202010010121001 –CTBIO –FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia doSemiárido (UEFS –CTBio-CIMATEC SERTÃO), vinculado a Projetos Especiais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Sumário Mineral 2025: ano-base 2024. Brasília, DF: ANM, 2025.

ALVES, V. R. et al. Potencial de remineralizadores silicáticos para a disponibilização de fósforo e potássio no desenvolvimento inicial da soja. ARACÊ, [S. l.], v. 7, n. 8, p. e7441, 2025. DOI: 10.56238/arev7n8-191.

BORGES, A. L. (ed.). Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2021. 303 p. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1134518. Acesso em: 17 ago. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2016.

BRASIL. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Secretaria de Desenvolvimento Industrial, Inovação, Comércio e Serviços. Plano Nacional de Fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil. Brasília: SDIC/MGI, 2023. 197 p. ISBN 978-65-981379-4-6.

BRASIL. Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Estudo Estratégico: Fertilizantes. Brasília: SAE/PR, 2021a. Disponível em: https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf. Acesso em: 18 maio 2026.

BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (PNF 2050). Brasília: SAE, p 195. 2021b. Disponível em: https://static.poder360.com.br/2022/03/plano-nacional-de-fertilizantes-brasil-2050.pdf. Acesso em: Mai, 2024.

BRITO, L. P.; et al. AVALIAÇÃO DA INCUBAÇÃO DE PÓ DE ROCHA APLICADO EM SOLO FORTEMENTE ÁCIDO. ENSAIOS NAS CIÊNCIAS AMBIENTAIS E AGRÁRIAS. 1ºed.Curitiba, 2024, v. 5, p. 1-88.

BRITO, R. S. D. et al. Rochagem na agricultura: importância e vantagens para adubação suplementar. South American Journal of basic education, technical and technological, v. 6, n. 1. Rio Branco, UFAC, 2019. Disponível em: https://periodicos.ufac.br/index.php/SAJEBTT/article/view/2331/1585. Acesso em: 14 de mai, 2024.

CASTRO, J. P. V. et al. Eficiência Agronômica de Remineralizador do Solo de Micaxisto na Sucessão Milheto-Soja. Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento , [S. l.] , v. 14, pág. e76111435864, 2022. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i14.35864.

CHIEN, S. H.; MENON, R. G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. Fertilizer Research, v. 41, n. 3, p. 227-234, 1995. DOI: https://doi.org/10.1007/BF00748312.

CNA - Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. Panorama do agro: semana 13 a 17 de dezembro de 2021. Brasília, 2021. Disponível em: https://www.cnabrasil.org.br/storage/arquivos/Panorama-Agro-ed.40.pdf. Acesso em: 25 abr, 2026.

CNA - Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. Taxa de câmbio e fertilizantes: efeitos na composição dos custos de produção de cana-de-açúcar. Julho, Brasília, 2022. Disponível em: https://cnabrasil.org.br/publicacoes/dependencia-do-mercado-externo-de-fertilizantes-expoe-produtores-de-cana-de-acucar-brasileiros-as-oscilacoes-de-precos-e-cambio. Acesso em: 25 abr, 2026.

CORRÊA, R.M.; NASCIMENTO, C.W.A.; ROCHA, A.T. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. Acta Scientiarum Agronomy. Maringá, v.33, ed.1, p.153-159, 2011.

COSTA, Magna Maria Macedo Nunes. Acidez do solo e calagem. Campina Grande, PB: Embrapa Algodão, 2025. 11 p. (Embrapa Algodão. Circular Técnica, 145).

FERREIRA, H. B, et al. Proposta metodológica para avaliação de materiais fosfatados na fertilização de solos ácidos. OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA, [S. l.], v. 23, n. 11, p. e12135, 2025. DOI: https://doi.org/10.55905/oelv23n11-036.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; SANTOS, J. J. S. dos; DONAGEMMA, G. K.; SANTOS, O. A. Q. dos. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de textura arenosa com fertilidade construída. Revista Agrogeoambiental, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 606–614, 2021. DOI: 10.18406/2316-1817v13n320211639. Disponível em: https://doi.org/10.18406/2316-1817v13n320211639. Acesso em: 18 mai. 2026.

FREITAS, I. F. de; NOVAIS, R. F.; VILLANI, E. M. de A.; NOVAIS, S. V. Phosphorus extracted by ion exchange resins and Mehlich-1 from Oxisols (Latosols) treated with different phosphorus rates and sources for varied soil-source contact periods. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, n. 3, p. 667-677, 2013. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300013.

GOMES, K. C. O. et al. Influência da saturação por bases e do fósforo no crescimento de mudas de angico-branco. Revista Árvore. Viçosa-MG, v. 28, n. 6, p. 785–792, 2004.

HANISCH, A. L.; CANTÚ, R. R.; JUSTEN, J. G. K.; GONÇALVES, G. L. S. Potencial do pó de basalto como remineralizador de solo em sistemas de produção de hortaliças. Agropecuária Catarinense, v. 37, n. 1, p. 25–30, 2024. DOI: https://doi.org/10.52945/rac.v37i1.1788.

HÖFIG, Pedro; MARTINS, Eder de Souza. Remineralizadores do solo: interação com fontes orgânicas pela compostagem tropical. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2025. 62 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 415). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1178235. Acesso em: 16 mai. 2026.

LUCHESE, A. V.; LEITE, I. J. G. C.; GIARETTA, A. P. da S.; ALVES, M. L.; PIVETTA, L. A.; MISSIO, R. F. Use of quarry waste basalt rock powder as a soil remineralizer to grow soybean and maize. Heliyon, [S. l.], v. 9, n. 3, 2023. DOI:https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14050.

MACHADO, P. L. O. de A.; BENITES, V. de M.; BOLAN, N. Liming acidic soils. In: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). Recarbonizing global soils: a technical manual of recommended sustainable soil management. Roma: FAO, 2021. v. 3, p. 273–287. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1137163/1/v3-p273.pdf. Acesso em: 18 mai. 2026.

MACHADO FILHO, Gilberto Coutinho et al. Influência de doses de fosfato de rocha na disponibilidade de nutrientes em diferentes classes de solos do Tocantins. AGRI-ENVIRONMENTAL SCIENCES, v. 10, n. 1, p. 11-11, 2024.

MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B.; BROUGH, D. M.; JACQUIER, D. Models relating soil pH measurements in water and calcium chloride that incorporate electrolyte concentration. European Journal of Soil Science, v. 62, n. 5, p. 728-732, 2011. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01386.x.

NASCIMENTO, V. R. R.; TORRES, J. L. R.; SILVA, A. de A.; MAGALHÃES, R. de O.; MAGELA, M. L. M.; VIEIRA, D. M. da S. Potential of basalt powder as a soil remineralizer in collard greens production systems. Horticultura Brasileira, v. 43, e299899, 2025. DOI: https://doi.org/10.1590/1806-9991-299899.

NOVAK, E.; CARVALHO, L. A.; SANTIAGO, E. F.; FERREIRA, F. S.; MAESTRE, M. R. Composição química do solo em diferentes condições ambientais. Ciência Florestal, v. 31, n. 3, p. 1063-1085, 2021. DOI: https://doi.org/10.5902/1980509828995.

OGINO, C. M.; GASQUES, J. G. Fertilizantes: dependência externa e impacto produtivo. In: VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G. (org.). Agropecuária brasileira: evolução, resiliência e oportunidades. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2023. v. 1, p. 97-124. DOI: https://doi.org/10.38116/9786556350530cap5.

OLIVEIRA, T. J. A.; DONER, S. H.; ALMEIDA, R. E. M. A dependência do agronegócio brasileiro em relação aos fertilizantes importados. Informe GEPEC, v. 27, n. 1, p. 363-383, 2023. DOI: https://doi.org/10.48075/igepec.v27i1.30129.

PANTANO, G. et al. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. Química Nova, v. 39, n. 6, p. 732-740, 2016.

PENN, C. J.; CAMBERATO, J. J. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. Agriculture, v. 9, n. 6, p. 120, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture9060120.

PEREIRA, M. G. et al. Estimativa da acidez potencial através do método do pH SMP em solos de altitude de Santa Catarina. Agropecuária Catarinense, v. 33, n. 1, p. 50-55, 2020.

QUISPE, K.; HERMOZA, N.; MEJIA, S.; ROMERO-CHAVEZ, L. E.; OTTOS, E.; ARCE, A.; SOLÓRZANO ACOSTA, R. Spatial Analysis of Soil Acidity and Available Phosphorus in Coffee-Growing Areas of Pichanaqui: Implications for Liming and Site-Specific Fertilization. Agriculture, v. 15, n. 15, p. 1632, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture15151632.

RANIRO, H. R.; SOARES, T. de M.; ADAM, C.; PAVINATO, P. S. Waste-derived fertilizers can increase phosphorus uptake by sugarcane and availability in a tropical soil. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, v. 185, n. 3, p. 391-402, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/jpln.202100410.

RIBEIRO, A. C; GUIMARÃES, P. T. G; ALVAREZ, V. H. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (CFSEMG), Viçosa, 1999. 359 p.

RIBEIRO, T. S. et al. The Lomagundi-Jatuli carbon isotopic event recorded in the marbles from the northeast São Francisco Craton, Brazil: a review, new data, palaeogeography and phosphogenetic correlation. International Geology Review, v. 67, n. 3, p. 352-380, 2024. DOI: https://doi.org/10.1080/00206814.2024.2389556.

RIBEIRO, T. S.; MISI, A.; OLIVEIRA, L. R. dos S.; SÁ, J. H. da S.; DEBRUYNE, D.; CÂMARA, I. S. Evidence of Paleoproterozoic phosphogenesis in the Salvador-Curaçá Orogen (Tanque Novo-Ipirá Complex), northeastern São Francisco Craton, Brazil. Brazilian Journal of Geology, v. 51, n. 3, e20190137, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/2317-4889202120190137.

SANTOS, A. A. Determinação de níveis críticos de fósforo no solo, com base nos teores de argila e P-remanescente em solos do Estado de Alagoas. 2022. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2022. Disponível em: https://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/9916. Acesso em: 26 jun. 2026.

SANTOS, H. G. dos et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. 6. ed. Brasília: Embrapa, 2025.

SASABUCHI, I. T. et al. Sustentabilidade no uso de fósforo: uma revisão bibliográfica com foco na situação atual do estado de São Paulo, Brasil. Química Nova, v. 46, n. 02, p. 185-198, 2023. DOI: https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170967.

SILVA, G. F. da; SILVA, A. D. R. da; GAIA, S. M. de S. (org.). Panorama do potencial do Brasil para minerais críticos e estratégicos: edição 2024a. Brasília: Serviço Geológico do Brasil, 2024.

SILVA, L. J. R. da; SANDIM, A. da S.; SILVA, A. P. R. da; DEUS, A. C. F.; ANTONANGELO, J. A.; BÜLL, L. T. Evaluating the agronomic efficiency of alternative phosphorus sources applied in Brazilian tropical soils. Scientific Reports, v. 14, art. 8526, 2024b. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-58911-0.

SOBRAL, L. F.; BARRETTO, M. C. V.; SILVA, A. J.; ANJOS, J. L. dos. Guia prático para interpretação de resultados de análises de solo. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. 13 p. (Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros, n. 206).

SOUZA, T. H. de; NOLLA, A.; SILVA, P. H. da; SILVA, T. G. da. Aspectos da acidez e correção do solo para o cultivo de Helianthus annuus. Journal of Agronomic Sciences, v. 15, n. especial, p. 49-70, 2026.

TOKURA ALOVISI, A. M. et al. Alterações nos atributos químicos do solo com aplicação de pó de basalto. Acta Iguazu, v. 6, n. 5, p. 69-79, 2017. DOI: https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v6i5.18471.

VELOSO, C, A, C. et al . Correção da acidez do solo. In: LV – Recomendações de corretivos e fertilizantes para os solos do Estado do Pará – Parte 1: Aspectos gerais relacionados ao uso de fertilizantes e corretivos. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2020. p. 123–133.

VIANA, L. S. de B.; CAITANO, T. B. dos S.; PONTES, A. N. A remineralização de solos como iniciativa ao desenvolvimento sustentável. Research, Society and Development, v. 10, n. 14, 2021.

VINHA, A. P. C. et al. Adsorção de fósforo em solos de regiões tropicais. Nativa, v. 9, n. 1, p. 30-35, 2021.