

**CURVA DE INCUBAÇÃO DO PÓ DE ROCHA CARBONATITO FOSFÁTICO COMO  
REMINERALIZADOR DE SOLO**

por

FELIPE LEIBER COELHO PIMENTEL

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

Junho – 2026

**CURVA DE INCUBAÇÃO DO PÓ DE ROCHA CARBONATITO FOSFÁTICO COMO  
REMINERALIZADOR DE SOLO**

por

FELIPE LEIBER COELHO PIMENTEL

Comitê de Orientação:

Romano Roberto Valicheski, Prof. Dr. – IF Goiano

Rio Verde – GO

Junho – 2023

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

C981 LEIBER COELHO PIMENTEL, FELIPE  
CURVA DE INCUBAÇÃO DO PÓ DE ROCHA  
CARBONATITO FOSFÁTICO COMO REMINERALIZADOR  
DE SOLO / FELIPE LEIBER COELHO PIMENTEL. Rio Verde  
2026.

45f. il.

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

1. Rochagem. 2. Nutrição mineral de plantas. 3. Intemperismo  
mineral. 4. Disponibilidade de nutrientes. 5. Agricultura  
sustentável. I. Título.



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

Documentos 12/2026 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

## INCUBAÇÃO DO PÓ DE ROCHA CARBONATITO FOSFÁTICO COMO REMINERALIZADOR DE SOLO

Autor: Felipe Leiber Coelho Pimentel  
Orientador: Romano Roberto Valicheski

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

APROVADA em 10 de junho de 2026.

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

*Assinado eletronicamente*  
Profa. Dra. Sílvia Sanielle Costa de  
Oliveira  
Avaliador interno - IF Goiano Campus  
Iporá

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

Documento assinado eletronicamente por:

- **Romano Roberto Valicheski, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 10/06/2026 14:54:06.
- **Sílvia Sanielle Costa de Oliveira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 10/06/2026 14:55:05.
- **Estenio Moreira Alves, ENGENHEIRO AGRONOMO**, em 10/06/2026 14:56:23.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 09/06/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 828016  
Código de Autenticação: c4a265da39





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

Ata nº 20/2026 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

### PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO

#### ATA Nº 126 (CENTO E VINTE E SEIS) BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos dez dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e seis, às 13h00min (treze horas), reuniram-se os componentes da banca examinadora em sessão pública realizada por videoconferência, para procederem a avaliação da defesa de Dissertação, em nível de mestrado, de autoria de **FELIPE LEIBER COELHO PIMENTEL**, discente do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Romano Roberto Valicheski, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida ao autor da Dissertação que, em 30 min, procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o examinado, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos, e procedida às correções recomendadas, a Dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM BIOENERGIA E GRÃOS**, na área de concentração Agroenergia, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGBG da versão definitiva da Dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade, se não cumprida essa condição, em até **60 (sessenta) dias** da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Dissertação em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Dissertação de Mestrado, e para constar, foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada eletronicamente pelos membros da Banca Examinadora.

Membros da Banca Examinadora

Nome	Instituição	Situação no Programa
Romano Roberto Valicheski	IF Goiano – Campus Iporá	Presidente
Silvia Sanielle Costa de Oliveira	IF Goiano – Campus Iporá	Membro interno
Estenio Moreira Alves	IF Goiano – Campus Iporá	Membro externo

Documento assinado eletronicamente por:

- **Romano Roberto Valicheski**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/06/2026 14:52:30.
- **Estenio Moreira Alves**, ENGENHEIRO AGRONOMO, em 10/06/2026 14:53:29.
- **Silvia Sanielle Costa de Oliveira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/06/2026 14:54:08.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 09/06/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 828014  
Código de Autenticação: e8e02b3ad9



# 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

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado)                  | <input type="checkbox"/> Artigo científico              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização)       | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC (graduação)                   | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Felipe Leiber Coelho Pimentel

Matrícula:

2024202331540006

Título do trabalho:

Curva de incubação do pó de rocha carbonatito fosfático como remineralizador de solo

## RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique:

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

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 inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** FELIPE LEIBER COELHO PIMENTEL  
Data: 25/06/2026 08:24:13-0300  
Verifique em <https://validar.ifi.gov.br>

Rio Verde

Local

10 / 06 / 2026

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ROMANO ROBERTO VALICHESKI  
Data: 27/06/2026 07:02:34-0300  
Verifique em <https://validar.ifi.gov.br>

## DEDICATÓRIA

A Deus, pela vida, pela sabedoria e por sustentar-me em todos os momentos desta caminhada.

Aos meus pais Gilvan Carlos Pimentel e Maria Sylvania Coelho, pelo amor incondicional e pelo exemplo de dedicação.

À minha irmã Aize Lessa Coelho Pimentel, pelo apoio e incentivo constante.

À minha esposa Fernanda Gonçalves Castilhano e ao meu filho Heitor Castilhano, razão maior da minha perseverança, pelo amor, paciência e compreensão nos dias de ausência.

Aos meus amigos que compartilharam comigo alegrias, desafios e palavras de encorajamento.

Ao meu professor e orientador Romano Roberto Valicheski, pela orientação valiosa, confiança e dedicação.

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, Goiás, pela oportunidade de crescimento acadêmico e profissional.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, cuja graça concedeu-me vida e saúde ao longo de desta jornada, pois sem Ele nada seria possível.

À coordenação do Programa de Mestrado Profissional em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal Goiano (IF Goiano – Campus Rio Verde), pela oportunidade de aperfeiçoamento acadêmico e profissional.

Ao meu orientador Prof. Dr. Romano Roberto Valicheski (IF Goiano – Campus Iporá), pela orientação dedicada, pela disponibilidade, paciência e por compartilhar seus conhecimentos ao longo de todo o mestrado.

À minha família pelo apoio incondicional, em especial à minha esposa Fernanda Castilhano, ao meu filho Heitor Castilhano, bem como aos meus pais Gilvan Carlos Pimentel e Maria Sylvania Coelho, que foram pilares fundamentais para que eu chegasse até aqui.

A todos os professores do programa, pela contribuição à minha formação, não apenas no âmbito técnico-científico, mas também no desenvolvimento humano, ético e profissional. Expresso minha sincera gratidão pelo empenho e dedicação no processo de ensino-aprendizagem.

À EDEM Agrominerais, pela pareceria, apoio e incentivo na realização deste trabalho de pesquisa.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação, o meu muito obrigado.

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, ao seu corpo docente, à direção e à equipe administrativa, pelas condições oferecidas e pelo ambiente acadêmico que possibilitou a realização deste Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	10
ABSTRACT.....	11
<b>CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
2.1. FUNDAMENTOS E LEGISLAÇÃO DOS REMINERALIZADORES .....	15
2.2. PROPRIEDADES QUÍMICAS, MINERALÓGICAS E GÊNESE DO CARBONATITO FOSFÁTICO.	16
2.3. EFEITOS AGRONÔMICOS E AMBIENTAIS .....	17
2.4. IMPORTÂNCIA ESTRATÉGICA E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	18
<b>3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 2 – DINÂMICA DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM RESPOSTA À APLICAÇÃO DE CARBONATITO FOSFÁTICO: EFEITO DE DOSES E TEMPO DE INCUBAÇÃO.....</b>	<b>23</b>
RESUMO .....	23
ABSTRACT.....	23
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>24</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>4. CONCLUSÃO .....</b>	<b>43</b>
<b>5. AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>43</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>43</b>

# CURVA DE INCUBAÇÃO DO PÓ DE ROCHA CARBONATITO FOSFÁTICO COMO REMINERALIZADOR DE SOLO

Por

FELIPE LEIBER COELHO PIMENTEL

Sob a orientação do professor Romano Roberto Valicheski, Prof. Dr. – IF Goiano

## RESUMO

A elevada dependência de fertilizantes minerais solúveis na agricultura brasileira tem estimulado a busca por insumos alternativos capazes de promover a fertilidade do solo de forma mais sustentável, entre os quais se destacam os remineralizadores. Objetivou-se com este estudo avaliar a curva de incubação do carbonatito fosfático e seus efeitos sobre atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distrófico. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições, utilizando-se doses de 0, 1, 3 e 5 t ha<sup>-1</sup> do remineralizador, com períodos de incubação de até 120 dias, coletando-se amostras de solo a cada 30 dias. Ao longo do período avaliado, observou-se aumento gradual do pH e redução da acidez potencial, especialmente nas maiores doses aplicadas, refletindo a dissolução progressiva dos minerais carbonáticos. A aplicação do carbonatito fosfático promoveu incremento contínuo nos teores de fósforo durante a incubação, evidenciando a liberação progressiva das apatitas presentes no material. Também foram observadas alterações na capacidade de troca catiônica, na saturação por bases e na dinâmica dos micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn), condicionadas principalmente pelas mudanças no pH do solo. De modo geral, os resultados indicam que o carbonatito fosfático atua como remineralizador de liberação gradual, com potencial para integrar estratégias de manejo sustentável da fertilidade do solo, especialmente em ambientes tropicais intemperizados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rochagem; Nutrição mineral de plantas; Intemperismo mineral; Disponibilidade de nutrientes; Agricultura sustentável.

# INCUBATION CURVE OF PHOSPHATIC CARBONATITE ROCK POWDER AS A SOIL REMINERALIZER

Por

FELIPE LEIBER COELHO PIMENTEL

Sob a orientação do professor Romano Roberto Valicheski, Prof. Dr. – IF Goiano

## ABSTRACT

The high dependence on soluble mineral fertilizers in Brazilian agriculture has encouraged the search for alternative inputs capable of promoting soil fertility in a more sustainable manner, among it the soil remineralizers stand out. This study aimed to evaluate the incubation curve of phosphate carbonatite and its effects on the chemical attributes of a Dystrophic Red Latosol. The experiment was carried out under greenhouse conditions using a randomized block design with four replications and rates of 0, 1, 3, and 5 t ha<sup>-1</sup> of the remineralizer. Soil samples were collected every 30 days during an incubation period of up to 120 days. Throughout the evaluation period, a gradual increase in soil pH and a reduction in potential acidity were observed, especially at the highest application rates, reflecting the progressive dissolution of carbonate minerals. The phosphate carbonatite application promoted a continuous increase in soil phosphorus contents during incubation, indicating the progressive release of apatites present in the material. Changes were also observed in cation exchange capacity, base saturation, and the dynamics of micronutrients (Cu, Fe, Mn, and Zn), mainly associated with changes in soil pH. Overall, the results indicate that phosphate carbonatite acts as a gradual release remineralizer with potential to be integrated into sustainable soil fertility management strategies, particularly in highly weathered tropical environments.

**KEYWORDS:** Rock remineralization; Plant mineral nutrition; Mineral weathering; Nutrient availability; Sustainable agriculture.

## CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais

### 1. INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira apresenta elevada dependência de fertilizantes minerais importados, especialmente fontes fosfatadas e potássicas, tornando o setor produtivo vulnerável às oscilações de preços internacionais, às instabilidades geopolíticas e aos riscos de desabastecimento. Essa condição tem sido amplamente discutida no Plano Nacional de Fertilizantes 2050, que destaca a necessidade de ampliar o aproveitamento de recursos minerais nacionais e desenvolver tecnologias capazes de reduzir a dependência externa de insumos agrícolas (BRASIL, 2023). Nesse contexto, cresce o interesse por fontes alternativas de nutrientes obtidas a partir de materiais geológicos disponíveis no território brasileiro, capazes de contribuir para a segurança nutricional das culturas e para a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Entre as estratégias propostas para reduzir a dependência de fertilizantes importados, destacam-se os remineralizadores de solo, também denominados pós de rocha, definidos como materiais minerais moídos capazes de promover melhorias graduais nos atributos químicos e mineralógicos do solo (Viana; Caitano; Pontes, 2021; Martinazzo *et al.*, 2022). Esses materiais apresentam potencial para fornecer macro e micronutrientes de forma gradual, reduzindo perdas por lixiviação e aumentando o efeito residual da fertilização (Van Straaten, 2006; Ramos *et al.*, 2022; Swoboda; Döring; Hamer, 2022).

Além de contribuírem para o aproveitamento de recursos minerais disponíveis no território nacional, os remineralizadores podem representar uma alternativa complementar às fontes convencionais de fertilizantes, favorecendo sistemas agrícolas menos dependentes de insumos externos. A eficiência agronômica desses materiais está diretamente relacionada à composição mineralógica, reatividade no solo e interação com os processos biológicos e geoquímicos do ambiente edáfico (Martins; Hardoim; Martins, 2023; Almeida *et al.*, 2022). No Brasil, o uso

agrícola dos remineralizadores foi regulamentado pela Lei nº 12.890/2013 e pela Instrução Normativa nº 05/2016, contribuindo para a expansão das pesquisas voltadas ao aproveitamento agrônomo de recursos minerais nacionais (BRASIL, 2013; BRASIL, 2016; Camara; Santos; Silveira, 2023).

Os remineralizadores apresentam potencial para atuar simultaneamente como fontes de nutrientes e condicionadores químicos do solo. Rochas silicáticas e carbonatíticas podem promover incrementos nos teores de cálcio, magnésio, potássio e fósforo, além de favorecerem alterações positivas no pH e na saturação por bases (Melo *et al.*, 2012; Luchese *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2023). Em sistemas agrícolas tropicais, essas alterações são particularmente relevantes pela elevada acidez natural e intensa adsorção de fósforo observada em solos altamente intemperizados (Novais; Smyth, 1999; Resende; Furtini Neto, 2007).

A dinâmica do fósforo em solos tropicais representa um dos principais fatores limitantes à produtividade agrícola. Em condições de elevada atividade de óxidos de ferro e alumínio, grande parte do fósforo aplicado é rapidamente adsorvida ou precipitada, reduzindo a disponibilidade às plantas (Novais *et al.*, 2007; Hinsinger, 2001). Nesse contexto, fontes minerais de liberação gradual apresentam potencial para modular a cinética de disponibilização de fósforo, promovendo maior sincronismo entre liberação e absorção vegetal (Chien *et al.*, 2011; Syers; Johnston; Curtin, 2008). Estudos recentes demonstram que fontes fosfatadas alternativas podem apresentar eficiência agrônoma significativa em solos tropicais brasileiros (Da Silva *et al.*, 2024).

Entre os materiais promissores para remineralização, o carbonatito fosfático destaca-se pela presença de apatita, calcita e dolomita, minerais capazes de fornecer fósforo, cálcio e magnésio ao sistema solo-planta (Gomes *et al.*, 2020). Essas rochas apresentam elevada importância estratégica no território brasileiro, especialmente nos complexos alcalino-carbonatíticos de Catalão (GO) e Araxá (MG). Além disso, por se tratar de um recurso mineral

amplamente disponível em depósitos brasileiros, o carbonatito fosfático apresenta potencial estratégico para ampliar a utilização de fontes nacionais de nutrientes na agricultura e contribuir para a redução da dependência de fertilizantes importados.

Além do potencial nutricional, a presença de minerais carbonáticos confere capacidade corretiva ao material, contribuindo para a neutralização parcial da acidez do solo (Alcarde, 2005; Manning, 2018).

Estudos realizados em diferentes condições edafoclimáticas têm demonstrado resultados positivos da aplicação de remineralizadores sobre os atributos químicos do solo e a produtividade das culturas. De modo geral, materiais silicáticos e carbonatíticos promovem melhorias na fertilidade do solo e podem contribuir para o fornecimento gradual de nutrientes às plantas (Melo *et al.*, 2012; Aguilera *et al.*, 2022; Luchese *et al.*, 2023).

Embora diversos estudos tenham demonstrado benefícios agrônômicos associados ao uso de remineralizadores, ainda são limitadas as informações sobre a dinâmica temporal de liberação de fósforo e outros nutrientes provenientes do carbonatito fosfático e sobre os efeitos nos atributos químicos de solos tropicais. Estudos de incubação permitem compreender a velocidade de dissolução do material e as alterações promovidas na fertilidade do solo ao longo do tempo, fornecendo subsídios para recomendações agrônômicas mais consistentes (Syers; Johnston; Curtin, 2008; Swoboda; Döring; Hamer, 2022).

Hipotetiza-se que a aplicação de carbonatito fosfático altera, de forma dependente da dose e do tempo de incubação, os atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distrófico, especialmente a disponibilidade de fósforo e os indicadores relacionados à acidez e ao complexo sortivo do solo. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a cinética de liberação de nutrientes, com ênfase no fósforo, proveniente do carbonatito fosfático, bem como os efeitos sobre os atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distrófico ao longo de 120 dias de incubação.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Fundamentos e legislação dos remineralizadores**

O uso intensivo de fertilizantes minerais altamente solúveis sustentou os ganhos de produtividade observados na agricultura moderna nas últimas décadas. Entretanto, esse modelo agrícola também intensificou problemas relacionados à degradação ambiental, dependência externa de insumos e vulnerabilidade econômica dos sistemas produtivos (Caligaris *et al.*, 2022). Em escala global, a crescente demanda por fertilizantes fosfatados elevou as preocupações relacionadas à segurança alimentar, esgotamento das reservas minerais e sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Cordell; Drangert; White, 2009; Cordell *et al.*, 2011). No Brasil, a dependência da importação de fertilizantes minerais representa um dos principais entraves para a estabilidade produtiva do agronegócio nacional, especialmente em relação ao fósforo, potássio e nitrogênio (BRASIL, 2023; Withers *et al.*, 2018).

Nesse contexto, os remineralizadores de solo surgem como alternativa promissora para o fornecimento gradual de nutrientes e melhoria da qualidade química dos solos tropicais (Viana; Caitano; Pontes, 2021). Esses materiais consistem em rochas moídas ou subprodutos minerais submetidos apenas a processos mecânicos de fragmentação, capazes de liberar nutrientes de forma lenta e progressiva por meio do intemperismo mineral (Martinazzo *et al.*, 2022; Van Straaten, 2006). Além do fornecimento de nutrientes, os remineralizadores podem contribuir para a recomposição mineralógica de solos altamente intemperizados, promovendo melhorias nos atributos químicos e físicos do solo (Martins; Hardoim; Martins, 2023).

No Brasil, o marco regulatório dos remineralizadores foi consolidado pela Lei nº 12.890/2013, que incorporou esses materiais à legislação nacional de fertilizantes (BRASIL, 2013). Posteriormente, a Instrução Normativa nº 05/2016 estabeleceu critérios técnicos relacionados à composição química, granulometria, garantias mínimas e limites de

contaminantes para o registro e comercialização desses produtos (BRASIL, 2016). A regulamentação impulsionou o avanço das pesquisas envolvendo pós de rocha, agrominerais e estéreis de mineração aplicados à agricultura (Camara; Santos; Silveira, 2023).

A eficiência agrônômica dos remineralizadores depende de fatores como composição mineralógica, granulometria, área superficial específica, condições edáficas e atividade microbiológica (Almeida *et al.*, 2022; Swoboda; Döring; Hamer, 2022). Rochas silicáticas e carbonatíticas podem atuar simultaneamente como fontes de nutrientes e condicionadores químicos do solo, promovendo incremento gradual nos teores de cálcio, magnésio, potássio e fósforo (Ramos *et al.*, 2022). Além disso, esses materiais apresentam potencial para reduzir perdas por lixiviação e melhorar a eficiência do uso de nutrientes em sistemas agrícolas tropicais (Chien; Prochnow; Cantarella, 2009).

## **2.2. Propriedades químicas, mineralógicas e gênese do Carbonatito Fosfático**

Os carbonatitos constituem rochas ígneas raras compostas predominantemente por minerais carbonáticos, apresentando elevada relevância econômica por causa do potencial de fornecimento de fósforo, cálcio e magnésio (Gomes *et al.*, 2020). No Brasil, essas rochas ocorrem principalmente em complexos alcalino-carbonatíticos associados a importantes jazidas fosfáticas, como os complexos de Catalão (GO) e Araxá (MG). A composição mineralógica desses materiais inclui apatita, calcita e dolomita, minerais diretamente relacionados à fertilidade do solo e ao fornecimento de nutrientes para as plantas (Manning, 2018).

A presença de calcita e dolomita confere ao carbonatito elevado potencial corretivo, contribuindo para a neutralização parcial da acidez do solo e incremento da saturação por bases (Alcarde, 2005). Simultaneamente, os minerais fosfatados presentes nessas rochas atuam como fontes de fósforo de liberação gradual, favorecendo maior efeito residual em comparação às fontes altamente solúveis (Chien *et al.*, 2011). Em solos tropicais altamente intemperizados,

caracterizados por elevada adsorção de fósforo, essa característica pode contribuir para maior sincronismo entre disponibilização e absorção vegetal (Novais; Smyth, 1999; Resende; Furtini Neto, 2007).

A dinâmica de dissolução mineral dos remineralizadores depende da interação entre fatores químicos, físicos e biológicos do ambiente edáfico. A atividade microbiana da rizosfera, associada à exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes, pode acelerar o intemperismo mineral e aumentar a disponibilidade de nutrientes presentes nas rochas (Hinsinger, 2001; Ribeiro *et al.*, 2020). Além disso, partículas mais finas apresentam maior área superficial específica, favorecendo a solubilização mineral e a liberação de nutrientes ao solo (Almeida *et al.*, 2022).

A utilização agrícola de rochas carbonatíticas e silicáticas vem sendo estudada como alternativa sustentável para o fornecimento de nutrientes e redução da dependência de fertilizantes importados (Manning; Theodoro, 2020). Estudos recentes demonstram que o uso de fontes minerais alternativas pode contribuir para sistemas produtivos mais resilientes e ambientalmente sustentáveis (Cardozo *et al.*, 2024).

### **2.3. Efeitos agronômicos e ambientais**

O fósforo constitui um dos nutrientes mais limitantes à produtividade agrícola em solos tropicais. Em ambientes altamente intemperizados, grande parte do fósforo aplicado é rapidamente adsorvida aos óxidos de ferro e alumínio, reduzindo a disponibilidade para as plantas (Novais *et al.*, 2007). Dessa forma, a eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados altamente solúveis tende a diminuir ao longo do tempo, principalmente em Latossolos altamente ácidos (Syers; Johnston; Curtin, 2008).

Nesse cenário, remineralizadores contendo apatita e outros minerais fosfatados podem atuar como fontes de fósforo de liberação gradual, promovendo disponibilização mais contínua e compatível com a demanda das culturas (Chien *et al.*, 2011). Estudos recentes demonstram

que fontes minerais alternativas apresentam potencial agrônômico significativo em solos brasileiros, sobretudo quando associadas a condições favoráveis de intemperismo e atividade biológica (Da Silva *et al.*, 2024).

A eficiência dos remineralizadores também está relacionada à capacidade de promover melhorias químicas no solo. Incrementos nos teores de cálcio, magnésio, potássio e fósforo, bem como alterações positivas no pH e saturação por bases, são observados após aplicação de pós de rocha em solos tropicais (Melo *et al.*, 2012; Luchese *et al.*, 2023). Em sistemas agrícolas cultivados com milho e soja, o uso de remineralizadores apresentou efeito residual positivo sobre produtividade e fertilidade do solo (Aguilera *et al.*, 2022).

Além dos benefícios agrônômicos, o uso de remineralizadores apresenta importantes vantagens ambientais. Sob a perspectiva ambiental, esses materiais contribuem para a redução das perdas de nutrientes por lixiviação em razão da liberação gradual dos elementos minerais, além de apresentarem menor índice salino quando comparados a fertilizantes altamente solúveis. Adicionalmente, sua utilização tende a preservar a integridade da microbiota edáfica, favorecendo os processos biológicos do solo, bem como contribuir para a manutenção da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, reduzindo riscos associados à contaminação por nutrientes (Camara; Santos; Silveira, 2023; Cardozo *et al.*, 2024).

#### **2.4. Importância estratégica e perspectivas futuras**

A remineralização de solos vem sendo associada não apenas ao fornecimento de nutrientes, mas também a estratégias de mitigação ambiental e sustentabilidade agrícola. Estudos recentes indicam que o intemperismo acelerado de silicatos pode contribuir para o sequestro de carbono atmosférico, promovendo remoção de CO<sub>2</sub> e melhoria simultânea da fertilidade do solo (Beerling *et al.*, 2020; Kelland *et al.*, 2020). Esses processos são discutidos como alternativas complementares para agricultura de baixo carbono.

A integração entre remineralizadores e microbiota do solo representa importante perspectiva de pesquisa. Microrganismos intemperizadores e solubilizadores de fósforo podem intensificar a dissolução mineral e ampliar a disponibilidade de nutrientes na rizosfera (Ribeiro *et al.*, 2020). Nesse sentido, a interação entre mineralogia, microbiologia e fertilidade do solo constitui importante fronteira científica para sistemas agrícolas tropicais.

Estudos de incubação são fundamentais para compreender a dinâmica temporal de liberação de nutrientes provenientes dos remineralizadores. Avaliações controladas permitem investigar alterações em atributos químicos como pH, capacidade de troca catiônica, saturação por bases e disponibilidade de fósforo ao longo do tempo (Swoboda; Döring; Hamer, 2022). Além disso, técnicas complementares de avaliação geoquímica e geofísica são utilizadas para monitorar alterações químicas decorrentes da aplicação de carbonatitos e fertilizantes minerais (Nascimento *et al.*, 2008).

Dessa forma, a utilização de remineralizadores de solo, especialmente carbonatitos fosfáticos, apresenta elevado potencial para contribuir com sistemas agrícolas mais sustentáveis, eficientes e menos dependentes de fertilizantes importados, reforçando a importância de estudos voltados à dinâmica de liberação de nutrientes em solos tropicais. Assim, a integração entre estudos cinéticos e interações biológicas é fundamental para subsidiar recomendações agronômicas precisas, resultando em maior disponibilidade de nutrientes e melhor resposta agronômica das culturas.

### 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, J.G. et al. 2022.** Efeito residual de doses de pó de basalto no milho segunda safra. *Ensaios e Ciências*, v. 26, n. 2, p. 281-288. DOI: 10.17921/1415-6938.2022v26n2p281-288.
- Alcarde, J.C. 2005.** Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas. *Boletim Técnico ANDA*, n. 6, p. 1-24. Disponível em: <https://anda.org.br/wp-content/uploads/2024/09/BT-6-%E2%80%93Corretivos-da-Acidez-dos-Solos-Caracteristicas-e-Interpretacoes-Tecnicas-2o-Edicao-1992.pdf>.
- Almeida, J.A., G.O.M. Cunha, D.A. Heberle & A.L. Mafra. 2022.** Potential of olivine melilitite as a soil remineralizer according to particle size and rates. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 57, e01445. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.01445.
- Beerling, D.J., E.P. Kantzas, M.R. Lomas et al. 2020.** Potential for large-scale CO<sub>2</sub> removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature*, v. 583, p. 242-248. DOI: 10.1038/s41586-020-2448-9.
- Brasil. 2013.** Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. Altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como categoria de insumo destinado à agricultura. *Diário Oficial da União, Brasília, DF*, 11 dez. 2013. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2013/lei-12890-10-dezembro-2013-777603-norma-pl.html>.
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2016.** Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. Estabelece regras sobre definições, classificação, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas. *Diário Oficial da União, Brasília, DF*, 14 mar. 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-5-de-10-3-16-remineralizadores-e-substratos-para-plantas.pdf>.
- Brasil. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. 2023.** Plano Nacional de Fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil. Brasília, DF: SDIC/MDIC. 197 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/sdic/confert/pnf/pnf-v-08-06-12-23.pdf>.
- Caligaris, B.S.A., L.E.P. Rangel, J.C. Polidoro & P.I.V. Farias. 2022.** A importância do Plano Nacional de Fertilizantes para o futuro do agronegócio e do Brasil. *Revista de Política Agrícola*, v. 31, n. 1, p. 112-116. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1142514/1/A-importancia-do-PNF.pdf>.

- Camara, G.R., E.S. Santos & L.L.L. Silveira. 2023.** Potencial agronômico do uso de estéreis de rochas ornamentais como remineralizadores de solos. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, v. 21, n. 12, p. 24832-24851. DOI: 10.55905/oelv21n12-075.
- Cardozo, E. et al. 2024.** Sustainable agricultural practices: volcanic rock potential for soil remineralization. *Journal of Cleaner Production*, v. 455, 142876. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142876.
- Chien, S.H., L.I. Prochnow & H. Cantarella. 2009.** Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy*, v. 102, p. 267-322. DOI: 10.1016/S0065-2113(09)01008-6.
- Chien, S.H., L.I. Prochnow, S. Tu & C.S. Snyder. 2011.** Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 89, p. 229-255. DOI: 10.1007/s10705-010-9390-4.
- Cordell, D., A. Rosemarin, J.J. Schröder & A.L. Smit. 2011.** Towards global phosphorus security: a systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere*, v. 84, n. 6, p. 747-758. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.02.032.
- Cordell, D., J.-O. Drangert & S. White. 2009.** The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, v. 19, n. 2, p. 292-305. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.
- Da Silva, L.J.R. et al. 2024.** Evaluating the agronomic efficiency of alternative phosphorus sources applied in Brazilian tropical soils. *Scientific Reports*, v. 14, 8526. DOI: 10.1038/s41598-024-58911-0.
- Gomes, C.B. et al. 2020.** Os carbonatitos cretácicos da Plataforma Brasileira e suas principais características. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. DOI: 10.11606/9786586403008.
- Hinsinger, P. 2001.** Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*, v. 237, p. 173-195. DOI: 10.1023/A:1013351617532.
- Kelland, M.E., P.W. Wade, A.L. Lewis et al. 2020.** Increased yield and CO<sub>2</sub> sequestration potential with the C<sub>4</sub> cereal *Sorghum bicolor* cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil. *Global Change Biology*, v. 26, n. 6, p. 3658-3676. DOI: 10.1111/gcb.15089.

- Luchese, A.V. et al. 2023.** Use of quarry waste basalt rock powder as a soil remineralizer to grow soybean and maize. *Heliyon*, v. 9, n. 3, e14050. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14050.
- Manning, D.A.C. & S.H. Theodoro. 2020.** Enabling food security through use of local rocks and minerals. *The Extractive Industries and Society*, v. 7, n. 2, p. 480-487. DOI: 10.1016/j.exis.2018.11.002.
- Manning, D.A.C. 2018.** Innovation in resourcing geological materials as crop nutrients. *Natural Resources Research*, v. 27, p. 217-227. DOI: 10.1007/s11053-017-9347-2.
- Martinazzo, R., C.A.P. Silveira, A.L. Bamberg & C.N. Pillon. 2022.** Pó de rocha, agrominerais e remineralizadores. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. 32 p. (Documentos, 527). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1149679>.
- Martins, E.S., P.R. Hardoim & R.C. Martins. 2023.** Princípios geoquímicos, mineralógicos e biológicos do manejo de remineralizadores de solos. *Informe Agropecuário, Belo Horizonte*, v. 44, n. 321, p. 26-39. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1156783>.
- Melo, V.F., S.C.P. Uchôa, F.O. Dias & G.F. Barbosa. 2012.** Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. *Acta Amazonica*, v. 42, n. 4, p. 471-476. DOI: 10.1590/S0044-59672012000400004.
- Nascimento, C.T.C., A.C.B. Pires, R.A.V. Moraes & M.L.B. Blum. 2008.** Radiação gama e resistividade elétrica em solo com aplicação de carbonatito e fertilizantes minerais. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 26, n. 1, p. 21-29. DOI: 10.1590/S0102-261X2008000100002.

## **CAPÍTULO 2 – Dinâmica dos atributos químicos do solo em resposta à aplicação de carbonatito fosfático: efeito de doses e tempo de incubação**

*Dynamics of soil chemical attributes in response to the application of phosphatic carbonatite: effect of rates and incubation time*

*Dinámica de los atributos químicos del suelo en respuesta a la aplicación de carbonatita fosfatada: efecto de las dosis y del tiempo de incubación*

**RESUMO:** A elevada dependência de fertilizantes minerais solúveis na agricultura brasileira tem estimulado a busca por insumos alternativos capazes de promover a fertilidade do solo de forma mais sustentável, entre os quais se destacam os remineralizadores. Objetivou-se com este estudo avaliar a curva de incubação do carbonatito fosfático e seus efeitos sobre atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distrófico. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições, utilizando-se doses de 0, 1, 3 e 5 t ha<sup>-1</sup> do remineralizador, com períodos de incubação de até 120 dias, coletando-se amostras de solo a cada 30 dias. Ao longo do período avaliado, observou-se aumento gradual do pH e redução da acidez potencial, especialmente nas maiores doses aplicadas, refletindo a dissolução progressiva dos minerais carbonáticos. A aplicação do carbonatito fosfático promoveu incremento contínuo nos teores de fósforo durante a incubação, evidenciando a liberação progressiva das apatitas presentes no material. Também foram observadas alterações na capacidade de troca catiônica, na saturação por bases e na dinâmica dos micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn), condicionadas principalmente pelas mudanças no pH do solo. De modo geral, os resultados indicam que o carbonatito fosfático atua como remineralizador de liberação gradual, com potencial para integrar estratégias de manejo sustentável da fertilidade do solo, especialmente em ambientes tropicais intemperizados.

**Palavras-chave:** rochagem; nutrição mineral de plantas; intemperismo mineral; disponibilidade de nutrientes; agricultura sustentável.

**ABSTRACT:** The high dependence on soluble mineral fertilizers in Brazilian agriculture has encouraged the search for alternative inputs capable of promoting soil fertility in a more sustainable manner, among it the soil remineralizers stand out. This study aimed to evaluate the incubation curve of phosphate carbonatite and its effects on the chemical attributes of a Dystrophic Red Latosol. The experiment was carried out under greenhouse conditions using a randomized block design with four replications and rates of 0, 1, 3, and 5 t ha<sup>-1</sup> of the remineralizer. Soil samples were collected every 30 days during an incubation period of up to 120 days. Throughout the evaluation period, a gradual increase in soil pH and a reduction in potential acidity were observed, especially at the highest application rates, reflecting the progressive dissolution of carbonate minerals. The phosphate carbonatite application promoted a continuous increase in soil phosphorus contents during incubation, indicating the progressive release of apatites present in the material. Changes were also observed in cation exchange capacity, base saturation, and the dynamics of micronutrients (Cu, Fe, Mn, and Zn), mainly associated with changes in soil

pH. Overall, the results indicate that phosphate carbonatite acts as a gradual release remineralizer with potential to be integrated into sustainable soil fertility management strategies, particularly in highly weathered tropical environments.

**KEYWORDS:** rock remineralization; plant mineral nutrition; mineral weathering; nutrient availability; sustainable agriculture.

**RESUMEN:** La gran dependencia de los fertilizantes minerales solubles en la agricultura brasileña ha impulsado la búsqueda de insumos alternativos capaces de promover la fertilidad del suelo de manera más sostenible; entre ellos, destacan los remineralizadores de suelos. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la curva de incubación de la carbonatita fosfatada y sus efectos sobre las propiedades químicas de un Latosol Rojo Distrófico. El experimento se llevó a cabo en invernadero utilizando un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones, probando dosis de aplicación de 0, 1, 3 y 5 t ha<sup>-1</sup> del remineralizador durante un periodo de incubación de hasta 120 días, con muestreos de suelo realizados cada 30 días. A lo largo del periodo de evaluación, se observó un aumento gradual del pH y una reducción de la acidez potencial —particularmente con las dosis de aplicación más altas—, lo que refleja la disolución progresiva de los minerales carbonatados. La aplicación de la carbonatita fosfatada provocó un aumento continuo en los niveles de fósforo durante la incubación, demostrando la liberación progresiva de fósforo a partir de las apatitas presentes en el material. También se observaron cambios en la capacidad de intercambio catiónico, la saturación de bases y la dinámica de micronutrientes (Cu, Fe, Mn y Zn), impulsados principalmente por las variaciones en el pH del suelo. En conjunto, los resultados indican que la carbonatita fosfatada actúa como un remineralizador de liberación lenta con potencial para integrarse en estrategias sostenibles de manejo de la fertilidad del suelo, especialmente en entornos tropicales altamente meteorizados.

**Palabras clave:** aplicación de polvo de roca; nutrición mineral de plantas; meteorización de minerales; disponibilidad de nutrientes; agricultura sostenible.

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de remineralizadores de solo tem se consolidado como alternativa técnica para o manejo da fertilidade em sistemas agrícolas tropicais, sobretudo em função de sua capacidade de promover a liberação gradual de nutrientes e modificar atributos químicos do solo ao longo do tempo. Em contraste com a alta solubilidade dos fertilizantes minerais convencionais, esses materiais apresentam comportamento controlado por processos geoquímicos de baixa velocidade, cuja eficiência agrônômica está diretamente associada à dinâmica de dissolução mineral, à reatividade dos minerais constituintes e ao tempo de reação no sistema solo-mineral (Martins *et al.*, 2023).

No cenário brasileiro, a adoção de agrominerais regionais está alinhada às diretrizes do Plano Nacional de Fertilizantes, que busca reduzir a dependência externa e fortalecer a produção nacional de insumos agrícolas (BRASIL, 2023). Essa estratégia é especialmente

relevante diante da elevada dependência brasileira da importação de fertilizantes, principalmente fontes de fósforo e potássio, expondo o setor produtivo à volatilidade dos preços internacionais e a riscos de desabastecimento.

Entre os diferentes materiais utilizados como remineralizadores, o carbonatito fosfático destaca-se pelo potencial agrônomo em razão da composição mineralógica, caracterizada pela presença de apatitas associadas a carbonatos de cálcio e magnésio. Essa composição possibilita o fornecimento simultâneo de fósforo, cálcio e magnésio, além de promover a neutralização gradual da acidez do solo ao longo do processo de intemperismo, favorecendo alterações progressivas no complexo sortivo e na saturação por bases.

Contudo, a eficiência agrônoma desses materiais é condicionada pela solubilidade diferencial de suas fases minerais, em que o teor de  $P_2O_5$  total, embora elevado, apresenta baixa solubilidade imediata em extratores ácidos convencionais, como o ácido cítrico a 2,0%. Essa característica decorre da estrutura cristalina da apatita de origem ígnea, que exige maior tempo de contato no solo para que o ataque por prótons ( $H^+$ ) resulte na liberação efetiva de fósforo e cátions para a solução (Almeida *et al.*, 2022; Chien *et al.*, 2011; Resende; Furtini Neto, 2007). A reatividade dos remineralizadores depende da composição mineralógica, da granulometria e das interações geoquímicas e biológicas que regulam a liberação de nutrientes no solo (Martins *et al.*, 2023; Ribeiro *et al.*, 2020; Swoboda *et al.*, 2022). Portanto, a caracterização da reatividade desse agromineral torna-se indispensável para distinguir o potencial de fornecimento imediato daquele condicionado ao intemperismo de longo prazo.

A adoção desses insumos apresenta uma trajetória de crescimento acelerado, consolidando o país como referência global na regulamentação e aplicação dessa tecnologia. Estima-se que o consumo desses materiais tenha atingido patamares superiores a 7 milhões de toneladas anuais, sendo impulsionado pela existência de diversos produtos registrados sob a Instrução Normativa nº 5/2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2016; Martins *et al.*, 2023; Ramos *et al.*, 2022).

A distribuição geográfica das jazidas é fator determinante para a viabilidade econômica, com destaque para as províncias minerais situadas no Complexo Alcalino do Alto Paranaíba em Minas Gerais e Goiás, na Bacia do Paraná abrangendo os estados do Sul e Sudeste, e em formações do Escudo Brasileiro. O aproveitamento de rochas silicáticas e carbonatíticas nessas regiões permite a regionalização da oferta de nutrientes,

minimizando custos logísticos e promovendo a sustentabilidade ao transformar recursos minerais locais em condicionadores para solos altamente intemperizados (Martins *et al.*, 2023).

Sob a perspectiva da química e da geoquímica de solos, a dissolução de minerais fosfatados e carbonáticos é governada por reações dependentes do pH, da atividade de prótons, da granulometria do material, da composição mineralógica e do tempo de contato com o solo. Em ambientes tropicais, esses processos assumem particular relevância, uma vez que a liberação de nutrientes a partir de minerais primários tende a ocorrer de forma progressiva, em contraste com a rápida solubilização de fontes convencionais (Heřmanská *et al.*, 2022). Nesse contexto, o fósforo destaca-se como um dos nutrientes mais limitantes à produtividade, pois sua disponibilidade é fortemente condicionada pela adsorção em óxidos de ferro e alumínio, reduzindo a eficiência de fontes fosfatadas solúveis em solos tropicais (Novais; Smyth, 1999).

Essa condição é particularmente relevante em solos do Cerrado, cujo manejo da adubação fosfatada requer estratégias que considerem a elevada retenção de fósforo e a baixa disponibilidade natural desse nutriente (Resende; Furtini Neto, 2007). A importância do fósforo para as plantas decorre de seu papel central em diversos processos metabólicos e estruturais. O fósforo exerce funções essenciais no metabolismo vegetal, participando dos processos de transferência e armazenamento de energia por meio das moléculas de ATP e ADP, da constituição dos ácidos nucleicos, da formação das membranas celulares e do desenvolvimento do sistema radicular, influenciando diretamente o crescimento e o desenvolvimento vegetal, a floração, a frutificação e a produtividade das culturas (Malavolta, 2006; Taiz *et al.*, 2017). Nesse contexto, fontes de liberação gradual, como o carbonatito fosfático, podem representar vantagem estratégica em relação aos fertilizantes totalmente solúveis. Ao disponibilizar o fósforo de maneira progressiva, esses materiais tendem a manter menores concentrações do nutriente na solução do solo, e pode reduzir a intensidade das reações de adsorção específica e precipitação no solo. Dessa forma, a liberação gradual do nutriente pode ocorrer de maneira mais sincronizada com a demanda nutricional das plantas ao longo do ciclo de desenvolvimento, favorecendo o aproveitamento e reduzindo perdas por fixação nos colóides minerais (Almeida *et al.*, 2022).

Dessa forma, estudos de incubação constituem ferramenta fundamental para avaliar a eficiência desses materiais, permitindo compreender a curva de liberação de nutrientes

e as alterações promovidas nos atributos químicos ao longo do tempo (Almeida *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2023; Melo *et al.*, 2012). A opção por essa metodologia justifica-se pela necessidade de isolar o efeito da cinética de dissolução mineral das demais variáveis bióticas e abióticas do sistema. Ao manter condições controladas de umidade e temperatura, e na ausência do efeito de exportação de nutrientes pelas culturas ou perdas por lixiviação, torna-se possível mensurar com precisão a reatividade intrínseca do carbonatito no ambiente edáfico. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as alterações dos atributos químicos em um Latossolo Vermelho Distrófico submetido a doses de carbonatito fosfático ao longo de 120 dias de incubação, visando compreender a dinâmica de liberação de nutrientes em condições tropicais.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi conduzido em casa de vegetação, na Fazenda Escola do Instituto Federal Goiano - Campus Iporá. Cada parcela experimental foi constituída de vaso plástico com volume de 12 L. O preenchimento dos vasos foi feito com solo coletado na camada de 0,0 – 0,20 m de profundidade de um Latossolo Vermelho Distrófico (Santos *et al.*, 2018), cuja análise química indicou pH em CaCl<sub>2</sub> de 5,8; teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> de respectivamente 2,7 e 0,6 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>, 214 mg/dm<sup>3</sup> de K<sup>+</sup>, 2,0 mg/dm<sup>3</sup> de P, 0,0 cmol<sub>c</sub>.dm<sup>3</sup> de Al<sup>3+</sup>, 12 g.kg<sup>-1</sup> de matéria orgânica e CTC total de 5,35 cmol<sub>c</sub>.dm<sup>3</sup> e composição granulométrica contendo 550 g.kg<sup>-1</sup> de argila, 130 g.kg<sup>-1</sup> de silte e 320 g.kg<sup>-1</sup> de areia.

Após a coleta do solo, visando melhor padronização, todo o material coletado foi destorroado e passado em peneira em malha de 4,00 mm para uniformização. Em seguida, pelo método da estufa, determinou-se a umidade remanescente do solo, que serviu de base para o cálculo da quantidade exata de solo a ser adicionada em cada vaso, visando manter uma densidade de solo próxima a 1,1 Mg.m<sup>-3</sup>.

O carbonatito fosfático utilizado no experimento foi proveniente de uma jazida localizada no município de Mundo Novo, GO. Conforme análise mineralógica realizada pelo Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI), o material apresentou composição química de 28,2% de SiO<sub>2</sub>, 2,48% de TiO<sub>2</sub>, 11,04% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 24,8% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1,2% de MnO, 4,34% de MgO, 12,27% de CaO, 4,2% de K<sub>2</sub>O e 8,21% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. A caracterização mineralógica indicou predominância dos minerais biotita e annita (35,06%), sanidina (25,70%), fluorapatita (19,01%), goethita (14,60%), calcita (3,89%), rutilo (0,93%) e diopsídio (0,80%).

Quanto à granulometria, as classes de partículas > 2,00 mm; 1,00–2,00 mm; 0,500–1,00 mm; 0,250–0,500 mm; 0,160–0,250 mm e fundo apresentaram, respectivamente, 0,1%; 1,9%; 12,2%; 25,5%; 27,4% e 32,9% da massa total. Dessa forma, 85,9% das partículas apresentaram diâmetro inferior a 0,5 mm, caracterizando o material como de granulometria fina, conforme os critérios estabelecidos pela legislação brasileira para remineralizadores de solo (BRASIL, 2016).

No momento da montagem dos vasos, determinou-se a massa exata de solo (11,0 kg.vaso<sup>-1</sup>) adicionada em cada unidade experimental. Em seguida, incorporaram-se doses de carbonatito fosfático equivalentes a 0, 1, 3 e 5 toneladas por hectare. As doses corresponderam à aplicação de 0, 5, 15 e 25 g de carbonatito fosfático por vaso, respectivamente. Após a pesagem exata da massa de solo de cada vaso, foi colocada em saco plástico, efetuando-se então a adição do carbonatito fosfático, misturando-o de forma homogênea e em seguida, o solo foi acondicionado nos vasos.

Após a montagem, os vasos foram organizados em delineamento em blocos ao acaso, tendo como tratamentos quatro doses de carbonatito fosfático (0, 1, 3 e 5 t.ha<sup>-1</sup>) e cinco épocas de amostragem de solo nos vasos, realizadas aos 0, 30, 60, 90 e 120 dias após o início de incubação, com quatro repetições. Em seguida, o solo dos vasos foi irrigado, procurando manter a umidade do solo próxima à capacidade de campo durante todo o período experimental. As eventuais plantas daninhas que germinaram nos vasos durante o período experimental foram removidas manualmente ainda nos estádios iniciais de desenvolvimento e depositadas sobre a superfície do respectivo vaso.

Para a coleta das amostras, utilizou-se um trado tipo sonda, coletando-se as amostras em toda espessura do solo existente no vaso. As coletas foram realizadas aos 0, 30, 60, 90 e 120 dias, após o início do período de incubação. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em saco plástico devidamente identificados e postas para secar ao ar. Estando completamente secas, efetuou-se o destorroamento e peneiramento de todas, utilizando-se peneira com malha de 2,00 mm, obtendo a terra fina seca ao ar (TFSA).

Posteriormente nestas amostras, efetuou-se a análise química completa seguindo os protocolos descritos em Embrapa (2017). O pH do solo foi determinado em solução de CaCl<sub>2</sub>, cálcio (Ca<sup>2+</sup>), magnésio (Mg<sup>2+</sup>), sódio (Na<sup>+</sup>), potássio (K<sup>+</sup>) e fósforo (P) foram extraídos com solução Mehlich-1, determinando-se o P pelo método colorimétrico, o Ca<sup>2+</sup> e o Mg<sup>2+</sup> por absorção atômica e o K<sup>+</sup> e o Na<sup>+</sup> em fotômetro de chamas. O alumínio (Al<sup>3+</sup>) foi extraído em solução de KCl (1,0 mol.L<sup>-1</sup>) e a acidez potencial (H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>) com acetato de

cálcio ( $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$ ), sendo ambos determinados por titulometria com NaOH ( $0,025 \text{ mol.L}^{-1}$ ). Para determinação do carbono orgânico, utilizou-se a via úmida - método Walkley-Black modificado. O enxofre ( $\text{S-SO}_4^{2-}$ ) foi extraído com fosfato de cálcio ( $500 \text{ mg de PL}^{-1}$ ) e determinado por turbidimetria a  $440 \text{ nm}$  com cloreto de bário ( $\text{BaCl}_2$ ). Os micronutrientes cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe) e manganês (Mn) foram extraídos com ácido dietileno triamino penta-acético (DTPA - pH 7,3) e determinados por absorção atômica e o boro (B), extraído com água quente e determinado por colorimetria a  $420 \text{ nm}$  e com azometina-H. Posteriormente com estes dados, calculou-se a Capacidade de Troca Catiônica do solo (CTC), a saturação por bases (V%) a saturação por alumínio (m%) e as relações Ca/Mg, Ca/CTC, Mg/CTC, (H+Al)/CTC e K/CTC. As análises químicas do solo foram realizadas, conforme os procedimentos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) ao nível de 5% de significância. Quando constatada diferença significativa entre os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Para as variáveis que apresentaram resposta significativa às doses de carbonatito fosfático e/ou ao período de incubação, ajustaram-se modelos de regressão linear e quadrática, selecionando-se o modelo com coeficientes significativos e maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De maneira geral, o tempo de incubação configurou-se como o principal fator regulador das respostas observadas, evidenciando o comportamento característico de insumos remineralizadores (Tabela 1). Esse padrão reflete a predominância de processos controlados pela taxa de dissolução dos minerais constituintes do carbonatito fosfático, que governam a liberação gradual de cátions básicos e fósforo para a solução do solo, resultando em alterações progressivas na fertilidade química do solo (Martins *et al.*, 2023; Almeida *et al.*, 2022).

Em relação as doses de carbonatito fosfático utilizadas, a análise de variância revelou efeito altamente significativo ( $P < 0,01$ ) para o pH do solo, teores de P e matéria orgânica (M.O) e significativo ( $P < 0,05$ ) para zinco (Zn). Já quanto ao tempo de incubação, exceção feita para os teores de Ca, Ca + Mg, Al, Na e B e para a saturação por alumínio (m %) e a CTC, os demais atributos químicos foram fortemente influenciados por este fator,

indicando que, quando mantido condições elevadas de umidade, há alterações expressivas nos atributos do solo com passar do tempo de incubação.

**Tabela 1** - Valores de F e nível de significância para pH, cálcio (Ca), magnésio (Mg), Ca +Mg, alumínio (Al), H+Al, Capacidade de Troca Catiônica (CTC), fósforo (P), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), matéria orgânica ((M.O.), saturação por Al (m%), saturação por bases (V%), e relações Ca/Mg, Ca/CTC, Mg/CTC, K/CTC e H+Al/CTC.

Variável	Doses (DC.)	Tempo da Coleta (TC)	DC. x TC.	C.V.
<b>pH</b>	8,0 **	578,2**	2,35*	1,0
<b>Ca</b>	1,02 <sup>ns</sup>	0,71 <sup>ns</sup>	0,51 <sup>ns</sup>	11,0
<b>Mg</b>	1,61 <sup>ns</sup>	10,4**	1,26 <sup>ns</sup>	17,1
<b>Ca + Mg</b>	1,22 <sup>ns</sup>	2,1 <sup>ns</sup>	0,69 <sup>ns</sup>	12,1
<b>Al</b>	0,0 <sup>ns</sup>	0,0 <sup>ns</sup>	0,0 <sup>ns</sup>	0,0
<b>H + Al</b>	2,12 <sup>ns</sup>	150,1**	4,59**	7,9
<b>CTC</b>	0,9 <sup>ns</sup>	40,2**	1,14 <sup>ns</sup>	7,6
<b>P</b>	27,8**	24,2**	2,12*	16,6
<b>K</b>	1,5 <sup>ns</sup>	25,4**	2,26*	4,6
<b>Na</b>	0,82 <sup>ns</sup>	1,12 <sup>ns</sup>	0,93 <sup>ns</sup>	135,1
<b>S</b>	0,41 <sup>ns</sup>	3,81*	0,48 <sup>ns</sup>	17,1
<b>B</b>	0,71 <sup>ns</sup>	1,71 <sup>ns</sup>	1,2 <sup>ns</sup>	14,8
<b>Cu</b>	2,39 <sup>ns</sup>	337,6**	3,48**	4,5
<b>Fe</b>	2,67 <sup>ns</sup>	86,7**	2,74**	4,3
<b>Mn</b>	2,1 <sup>ns</sup>	254,2**	2,74**	5,7
<b>Zn</b>	2,99*	29,2**	2,37*	10,5
<b>M.O.</b>	4,43**	3,85**	0,82	13,6
<b>m%</b>	0,0 <sup>ns</sup>	0,0 <sup>ns</sup>	0,0 <sup>ns</sup>	0,0
<b>V%</b>	1,71 <sup>ns</sup>	87,8**	3,27**	4,2
<b>Ca/Mg</b>	1,62 <sup>ns</sup>	56,5**	2,07*	7,7
<b>Ca/CTC</b>	0,97 <sup>ns</sup>	121,3**	2,11*	4,7
<b>Mg/CTC</b>	2,43 <sup>ns</sup>	1,04 <sup>ns</sup>	2,23*	10,0
<b>K/CTC</b>	0,35 <sup>ns</sup>	33,5**	2,59*	6,36
<b>H+Al/CTC</b>	1,47 <sup>ns</sup>	71,2**	2,97**	6,7

CV.: coeficiente de variação\*\* significativo a 1,0%, \*significativo. Fonte: próprio autor

Quanto a interação dos fatores, houve efeito significativo para pH, teores de P, K e Zn e para as relações Ca/Mg, Ca/CTC, Mg/CTC e K/CTC e altamente significativo para os teores de H+Al, Cu, Fe e Zn, bem como para a saturação por bases (V %) e para H+Al/CTC (Tabela 1).

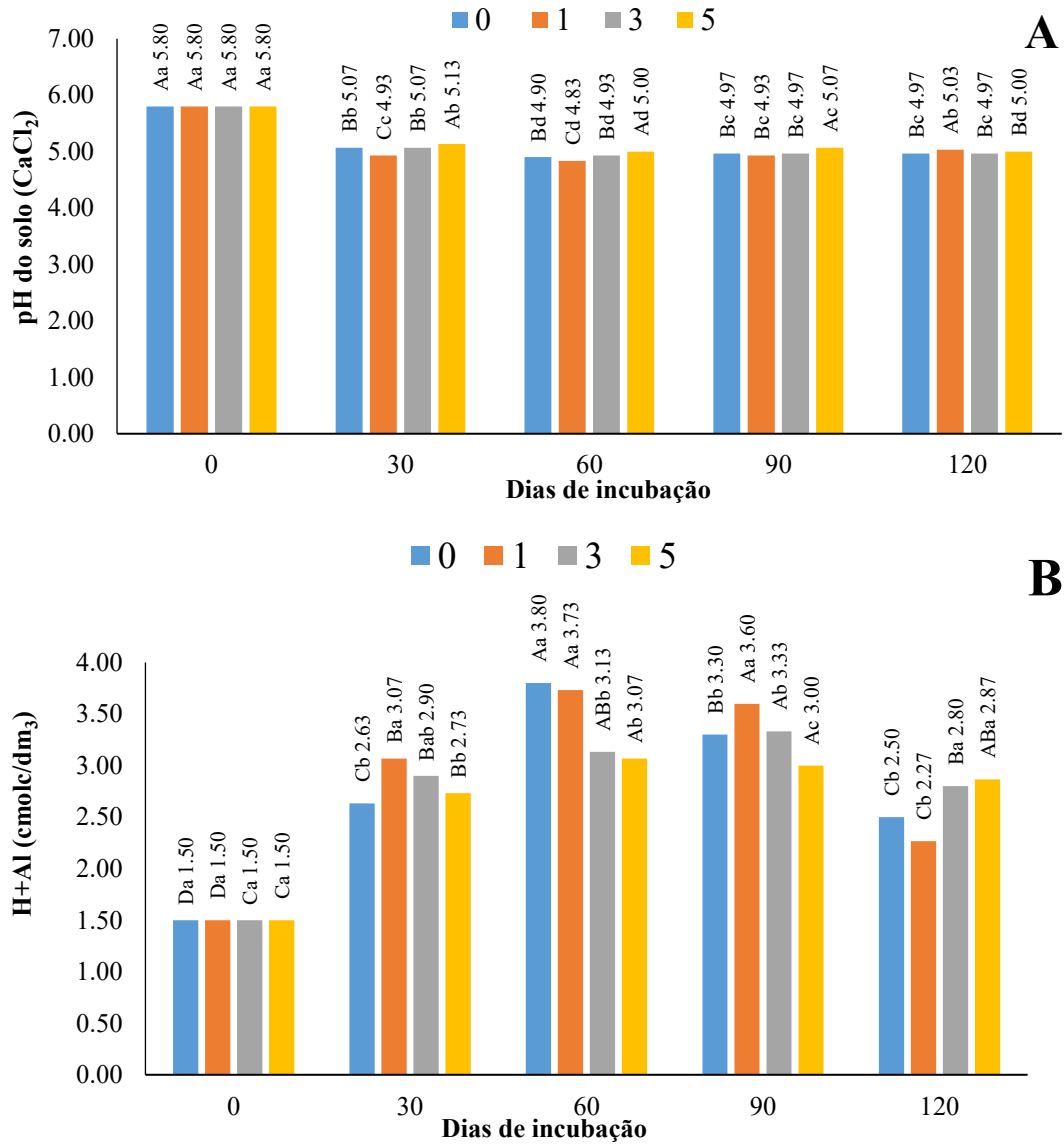
Para o pH do solo, considerando o efeito da interação dos fatores, independente da dose de carbonatito fosfático utilizada, houve redução acentuada para os valores desta variável após 30 dias de incubação, sendo esta alteração mais acentuada nos tratamentos

com 0,0 e 1,0 t.ha<sup>-1</sup> (Figura 1A). No entanto, posteriormente para as coletas realizadas aos 60, 90 e 120 dias, as doses de carbonatito fosfático pouco influenciaram o pH do solo no decorrer do tempo.

Esta redução de aproximadamente 1,0 unidade de pH nos primeiros 30 dias de incubação possivelmente porque o solo foi destorroado durante a montagem dos vasos, mantendo-o praticamente seco para possibilitar a mistura homogênea do carbonatito fosfático com a massa solo utilizada. Dessa forma, ao elevar a umidade do solo para valores próximos à capacidade de campo, foram restabelecidas condições favoráveis à atividade microbológica, intensificando os processos de decomposição da matéria orgânica e mineralização de compostos orgânicos. Esse processo pode promover a liberação temporária de prótons (H<sup>+</sup>) para a solução do solo, contribuindo para a redução inicial do pH observada nos primeiros 30 dias de incubação. Adicionalmente, a reativação dos processos biogeoquímicos, após o reumedecimento do solo, favorece o aumento da respiração microbiana e da produção de ácidos orgânicos, intensificando temporariamente a acidificação do sistema (Zhang; Wang; Li, 2022; Oskonbaeva *et al.*, 2024).

O efeito das doses de carbonatito fosfático na liberação de prótons no solo é mais facilmente visualizado ao analisar o teor de H<sup>+</sup>Al (Figura 1B), uma vez que não houve alterações nos teores de alumínio (Tabela 1). Desta forma, os menores teores de H<sup>+</sup>Al observados com a aplicação das doses de 3,0 e 5,0 t. ha<sup>-1</sup> aos 30, 60 e 90 dias de incubação, associado a elevação do pH do solo nestas campanhas de coleta, principalmente com o uso da dose mais elevada, possivelmente está associado a dissolução de minerais carbonáticos como a calcita, presentes na composição química, liberando hidroxilas para o solo (OH<sup>-</sup>), mantendo deste modo, teores menores de H<sup>+</sup>Al na solução do solo (Figura 1B), em consequentemente, elevando os valores de pH do solo (Figura 1A). Este comportamento está diretamente associado à dissolução progressiva dos minerais carbonáticos presentes nos remineralizadores, responsáveis pelo consumo de prótons da solução do solo e consequente neutralização da acidez ativa do solo (Alcarde, 2005; Martins *et al.*, 2023; Melo *et al.*, 2012).

**Figura 1** - pH do solo e teor de H + Al de um Latossolo Vermelho Distrófico em função da interação das doses do carbonatito fosfático testado (GOFOS) e do tempo de incubação. OBS: Letras maiúsculas comparam o efeito de cada dose de carbonatito entre as coletas realizadas e letras minúsculas comparam o efeito das doses de carbonatito em cada coleta realizada.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Quanto ao efeito da interação das doses e do tempo de incubação nos teores de fósforo, este elemento destacou-se como um dos elementos mais responsivo à aplicação das doses do carbonatito fosfático, ocorrendo aumento de sua disponibilidade com o incremento das doses utilizadas e do tempo de incubação (Figura 2A). Esse resultado é coerente com a presença de minerais fosfatados no material e com o comportamento esperado de fontes minerais de menor solubilidade, cuja liberação de P depende do tempo de contato com o solo, da granulometria e da reatividade das fases minerais presentes (Almeida *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2023).

Considerando as doses testadas, nos vasos testemunha ( $0,0 \text{ t.ha}^{-1}$ ), no decorrer do tempo, também houve incremento do teor de P, passando de  $2,0 \text{ mg.Kg}^{-1}$  obtido no início do experimento para  $3,3 \text{ mg.Kg}^{-1}$  aos 120 dias de incubação. Resultado semelhante foi observado nos vasos que foi aplicado  $1,0 \text{ t.ha}^{-1}$  de carbonatito fosfático (Figura 2A), sugerindo que o uso do remineralizador do solo, pouco efeito teve na disponibilidade de P no solo até os 120 dias de incubação. Nesta condição, o aumento do P disponível nos vasos testemunha possivelmente está associado a degradação da matéria orgânica pela microbiota do solo, disponibilizando o P orgânico para a solução do solo (Novais; Smyth, 1999; Withers *et al.*, 2018). Já para as doses mais elevadas ( $3,0$  e  $5,0 \text{ t.ha}^{-1}$ ), houve incremento significativo do teor de P, após 30 dias de incubação, que passou de  $2,0$  para  $4,0 \text{ mg.Kg}^{-1}$  nos vasos foi aplicado  $3,0 \text{ t.ha}^{-1}$  e de  $2,0$  para  $4,6 \text{ mg.Kg}^{-1}$  nos vasos houve a aplicação de  $5,0 \text{ t.ha}^{-1}$ . Para as demais coletas (60, 90 e 120 dias), houve tendência de estabilização dos teores de P, com valores próximos a  $5,0 \text{ mg.Kg}^{-1}$  com a dose de  $5,0 \text{ t.ha}^{-1}$  e valores próximos a  $4,0 \text{ mg.Kg}^{-1}$  com a dose de  $3,0 \text{ t.ha}^{-1}$ .

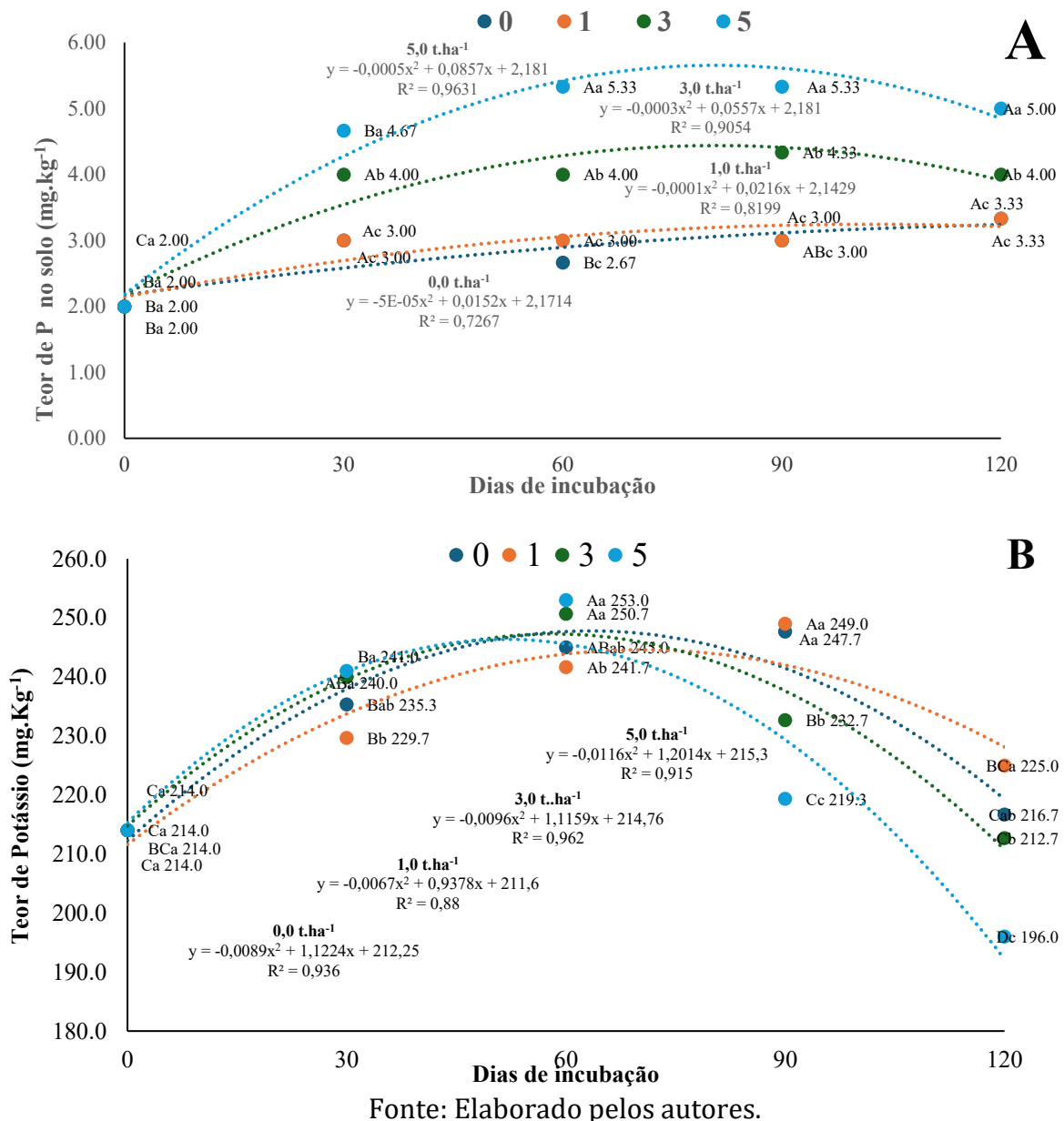
Ao analisar os modelos de regressão polinomial obtidos, observa-se que houve rápida dissolução dos minerais logo no início (até 30 dias de incubação), passando para uma dissolução gradual, até próximo a 90 dias de incubação. Conforme estes modelos, para a dose de  $5,0 \text{ t.ha}^{-1}$ , o teor máximo de P disponível no solo foi de  $5,85 \text{ mg.Kg}^{-1}$  aos 88 dias de incubação e para a dose de  $3,0 \text{ t.ha}^{-1}$ , de  $4,76 \text{ mg.Kg}^{-1}$  aos 91 dias de incubação (Figura 2A).

Este incremento na disponibilidade de fósforo possivelmente está associado à dissolução das partículas mais finas ( $< 0,5 \text{ mm}$ ) do remineralizador, que representam 85,9% da composição granulométrica, aumentando a área específica de reação e favorecendo os processos de intemperismo mineral. Do ponto de vista mineralógico, a fluorapatita constitui a principal fonte de fósforo presente no carbonatito fosfático, sendo sua dissolução favorecida pelo maior tempo de contato com a solução do solo. Além disso, minerais como a calcita podem contribuir indiretamente para o aumento da disponibilidade de P, uma vez que a dissolução promove a neutralização parcial da acidez do solo, criando condições mais favoráveis à dissolução das fases fosfatadas.

A presença de biotita também reforça o potencial de alteração mineral do material ao longo do tempo de incubação, enquanto a goethita pode atuar como sítio de adsorção de fósforo. Entretanto, os incrementos observados nos teores disponíveis de P sugerem que a taxa de liberação proveniente da fluorapatita superou os processos de retenção,

especialmente nas doses iguais ou superiores a 3,0 t ha<sup>-1</sup>. Esses resultados evidenciam que o carbonatito atuou como fonte de fósforo de liberação gradual, dependente da dose aplicada e do tempo de incubação.

**Figura 2** - Teores de fósforo (P) e de potássio (K) de um Latossolo Vermelho Distrófico em função da interação das doses de carbonatito utilizadas e do tempo de incubação. OBS: Letras maiúsculas comparam o efeito de cada dose de carbonatito entre as coletas realizadas e letras minúsculas comparam o efeito das doses de carbonatito em cada coleta realizada.



Este padrão de resposta é consistente com materiais fosfatados naturais, cuja eficiência está associada à dissolução progressiva dos minerais fosfáticos presentes na composição química destes remineralizadores de solo (Almeida *et al.*, 2022; Martins *et al.*,

2023). Estudos recentes mostram que fontes alternativas de P apresentam resposta diretamente proporcional à dose aplicada, elevando as frações lábeis de fósforo no solo. Esse padrão confirma a dissolução gradual das apatitas presentes no material, caracterizando o carbonatito como fonte de fósforo de liberação controlada, tornando-o promissor quando se busca alternativas para reduzir a quantidade utilizada de adubos fosfatados solúveis em sistemas de produção mais sustentáveis (Withers *et al.*, 2018; Brasil, 2023).

O potássio apresentou comportamento semelhante ao do fósforo, com incrementos significativos em todos os vasos nos primeiros 30 dias de incubação, e teores máximos próximos aos 60 dias de incubação (Figura 2B), indicando dissolução gradual do carbonatito fosfático. Quando comparado com o teor inicial de K ( $214 \text{ mg.Kg}^{-1}$ ), nos vasos testemunha ( $0,0 \text{ t.ha}^{-1}$ ), e nos que receberam as doses de  $1,0$ ;  $3,0$  e  $5,0 \text{ t.ha}^{-1}$  de carbonatito fosfático, o incremento de potássio para estas doses foi de respectivamente  $21,0$ ;  $15,7$ ;  $26,0$  e  $27 \text{ mg.Kg}^{-1}$ . Nos vasos testemunha, este aumento no teor de potássio foi similar ao incremento observado nos vasos que receberam  $1,0 \text{ t.ha}^{-1}$ , sugerindo que as aplicações deste carbonatito fosfático, com doses de até  $1,0 \text{ t.ha}^{-1}$ , pouco efeito exerce na disponibilidade de K no solo. Para estes tratamentos, o aumento de potássio disponível observado pode estar associado ao ciclo de umedecimento e secagem do solo utilizado para o enchimento dos vasos, que permaneceu no período de aproximadamente 4 meses seco, sendo reumedecido até a capacidade de campo somente no início da curva de incubação, fato que favoreceu a liberação de K para a solução do solo.

Para Oskonbaeva *et al.* (2024) a disponibilidade de potássio (K) no solo é fortemente regulada pela umidade, uma vez que esse nutriente ocorre predominantemente como  $\text{K}^+$  na solução do solo e em equilíbrio com formas trocáveis e não trocáveis. Assim durante o período de secagem, há redução do filme de água sobre as partículas minerais do solo, e conseqüentemente da difusão de  $\text{K}^+$ , favorecendo a retenção nos sítios de troca. Posteriormente a reumidificação desencadeia respostas rápidas e intensas, promovendo a dessorção do  $\text{K}^+$  dos coloides para a solução do solo. Também há incremento da atividade microbiana do solo, e muitos microrganismos, para sobreviver ao período de seca, podem acumular  $\text{K}^+$  como mecanismo osmótico durante o estresse hídrico, liberando-o para o solo via turnover microbiano, após o restabelecimento da umidade do solo (Zhang; Wang; Li, 2022; Oskonbaeva *et al.*, 2024). No entanto, para doses mais elevadas ( $3,0$  e  $5,0 \text{ t.ha}^{-1}$ ), o incremento ocorrido pode também estar associado a dissolução de minerais potássicos

presentes no carbonatito como a biotita e annita (35,06 %) e sanidina (25,7%), que associado a fina granulometria, após o processo de trituração, pode ter favorecido a liberação do  $K^+$  existente na estrutura cristalina para a solução do solo. Estudos com rochas silicáticas moídas indicam que esses materiais podem atuar como fontes alternativas de potássio, embora a magnitude da resposta dependa da mineralogia, da granulometria e das condições químicas do solo (Crusciol *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2021; Assunção *et al.*, 2024; Martins *et al.*, 2023).

Conforme modelos de regressão polinomial obtidos com os dados coletados, independente dos tratamentos, o teor máximo de potássio disponível no solo ocorre próximo aos 60 dias de incubação, vindo a reduzir para períodos mais prolongados (Figura 2B). Desta forma, na coleta realizada aos 30 dias de incubação, ao comparar o teor de potássio dos vasos testemunha ( $0,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), o teor dos vasos que receberam  $3,0$  e  $5,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ , o uso do carbonatito fosfático promoveu incremento de respectivamente  $2,0$  e  $2,5$  % no potássio disponível no solo. Estes incrementos observados foram moderados, coerentes com o baixo teor de  $K^+$  na composição mineralógica do carbonatito, indicando contribuição secundária desse remineralizador para a dinâmica do potássio no solo.

Já para a coleta realizada aos 60 dias de incubação, este incremento foi de  $2,3$  e  $3,3$  %. Por outro lado, nas coletas realizadas aos 90 e 120 dias de incubação, houve redução acentuada da disponibilidade de potássio com as doses  $3,0$  e  $5,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de carbonatito fosfático, quando comparado com os vasos testemunha ( $0,0$ ) e os que receberam  $1,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Esta redução pode estar associada as alterações do pH no solo que ocorreu nas doses mais elevadas (Figura 1A), que ao manter valores mais elevados, pode ter favorecido para maior retenção de  $\text{Ca}^{2+}$  no complexo de troca, alterando o equilíbrio de adsorção de  $K^+$  no solo (Osikonbaeva *et al.* 2024). Também o maior tempo de incubação, associado a maior disponibilidade de nutrientes, principalmente P e K observado nas doses mais elevadas até 60 dias de incubação pode ter favorecido para maior atividade microbiana, aumentando a demanda biológica deste nutriente e imobilizando temporariamente parte do  $K^+$  na biomassa microbiana (Zhang; Wang; Li, 2022; Osikonbaeva *et al.*, 2024).

Quanto ao efeito das doses testadas no decorrer do tempo de incubação, para estes dois nutrientes, houve tendência de teores mais elevados nas maiores doses, obtendo-se para o Cu nos vasos com  $3,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  teor de  $4,23 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  aos 90 dias de incubação, e nos vasos com  $5,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  teor de  $3,60 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ , aos 120 dias de incubação. Já para o Mn, nestas

coletas os teores foram de respectivamente 83,7 e 64,0 mg.Kg<sup>-1</sup> e para o Zn de 1,1 e 0,87 de mg.Kg<sup>-1</sup>.

**Tabela 2** - Teores dos micronutrientes em (mg.kg<sup>-1</sup>) para cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e Zinco (Zn) em mg.kg-1 em função da interação das doses de carbonatito testadas e do tempo de incubação em condições de umidade próximo a capacidade de campo.

Dias	-----Doses (t.ha <sup>-1</sup> )-----							
	0	1	3	5	0	1	3	5
	-----Cu-----				-----Fe-----			
<b>0</b>	1,90 Ad	1,90 Ad	1,90 Ad	1,90 Ac	103,0 Aa	103,0 Aa	103,0 Aa	103,0 Aa
<b>30</b>	3,87 Aa	3,57 Ab	3,70 Ab	3,67 Aab	93,3 A ab	87,0 Ab	85,0 Ab	83,7 Ab
<b>60</b>	3,53 Abc	3,70 Aa	3,67 Ab	3,77 Aa	80,3 Ab	77,3 Ac	74,3 Ac	82,7 Ab
<b>90</b>	3,60 Bb	3,67 Bab	4,23 Aa	3,67 Bab	89,3 Bb	85,7 Bbc	96,7 Aa	88,3 Bb
<b>120</b>	3,43 Bc	3,40 Bc	3,40 Bc	3,60 Ab	79,7 Ab	73,3 Ac	76,7 Ac	81,3 Ab
	-----Mn-----				-----Zn-----			
<b>0</b>	114,0 Aa	114,0 Aa	114,0 Aa	114,0 Aa	0,80 Ac	0,80 Ab	0,80 Ac	0,80 Ab
<b>30</b>	83,7 Ab	87,0 Ab	83,7 Ab	76,7 Ab	1,40 Aa	1,17 Aa	1,20 Aa	1,03 Aa
<b>60</b>	66,0 A dc	70,7 Ac	69,3 Ac	71,0 Ab	0,87 A bc	0,87 Ab	0,97 Ab	1,00 Aa
<b>90</b>	67,0 B c	69,7 Bc	83,7 Ab	73,0 Bb	1,00 B b	0,87 Bb	1,10 Aab	0,87 Bab
<b>120</b>	58,3 Ad	55,3 Ad	59,0 Ad	64,0 Ad	0,87 Abc	0,80 Ab	0,83 A bc	0,87Aab

Para cada micronutriente médias seguidas da mesma letra maiúscula (na linha) e minúsculas (na coluna) não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5,0% de probabilidade. Fonte: próprio autor.

Os maiores teores de Cu e os incrementos observados para Zn nas doses de 3,0 e 5,0 t.ha<sup>-1</sup> aos 90 e 120 dias de incubação sugerem que parte desses micronutrientes foi gradualmente disponibilizada a partir da dissolução dos minerais constituintes do carbonatito fosfático. Esse comportamento é compatível com a cinética de liberação lenta característica dos remineralizadores, na qual os micronutrientes são liberados progressivamente à medida que ocorre o intemperismo das fases minerais primárias. No caso do zinco, os incrementos observados foram particularmente consistentes, corroborando o efeito significativo das doses verificado na análise de variância (Tabela 1) e os maiores teores registrados nas avaliações realizadas aos 90 e 120 dias de incubação (Tabela 2). Considerando que solos tropicais altamente intemperizados frequentemente apresentam baixos teores disponíveis de Zn e Cu, os resultados obtidos indicam que o carbonatito fosfático pode atuar como fonte complementar desses micronutrientes, contribuindo não apenas para o fornecimento de fósforo, cálcio e magnésio, mas também para o equilíbrio nutricional do sistema solo-planta. Esses resultados evidenciam o potencial agrônomo do remineralizador como fonte secundária de micronutrientes, embora estudos de maior duração e em condições de campo sejam necessários para quantificar a magnitude dessa contribuição ao longo dos ciclos produtivos.

Já para os teores Fe, com o reumedecimento do solo no início do processo de incubação, houve redução significativa na disponibilidade deste elemento (Tabela 2). Este comportamento pode estar associado as reações de oxidação que ocorrem no solo, após o reestabelecimento da umidade do solo, que favoreceu para que o  $\text{Fe}^{2+}$  fosse transformado em  $\text{Fe}^{3+}$ , menos solúvel, reduzindo a disponibilidade para solução do solo. Quando ao efeito das doses utilizadas, para este elemento, o incremento da quantidade aplicada pouco afetou a disponibilidade na solução do solo, exceto para a dose de  $3,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  aos 90 dias de incubação, indicando que o uso deste carbonatito fosfático teve pouco influencia no teor de Fe durante o período de incubação, que pode ter sido insuficiente para proporcionar alterações nas frações mais estáveis de Fe do solo, bem como a dissolução da estrutura dos minerais primários existentes no carbonatito fosfático, mesmo com a redução de valores de pH (Figura 1A).

O ferro por fazer parte do retículo cristalino de muitos minerais primários e secundários, é um nutriente que necessita de longos períodos de incubação no solo para que ocorra alterações significativas na disponibilidade no solo. Desta forma, a ausência de efeito das doses de carbonatito fosfático sobre a disponibilidade de ferro (Fe) ao longo do tempo de incubação indica que os processos que controlam o Fe no solo foram mais dominantes que o efeito da fonte aplicada, mantendo os teores relativamente estáveis entre tratamentos (Brantley *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2023).

A saturação por bases (V %) e as relações entre cátions na CTC refletem diretamente a dinâmica de liberação de nutrientes e a reorganização do complexo sortivo ao longo do período de incubação. De forma geral, observa-se na Tabela 3 que o tempo de incubação exerceu maior influência sobre essas variáveis do que as doses isoladamente, evidenciando o comportamento típico de remineralizadores de liberação lenta, cuja eficiência agrônômica depende da cinética de dissolução mineral e das interações solo-mineral (Martins *et al.*, 2023; Almeida *et al.*, 2022).

Inicialmente (aos 30 dias de incubação), houve redução significativa da V % em todas as doses avaliadas, com valores de saturação por bases passando de aproximadamente 73% no tempo zero para valores entre 57% e 61%. Esse comportamento indica desequilíbrio inicial do sistema, possivelmente associado à reativação da atividade microbiana após o reumedecimento do solo, promovendo liberação de  $\text{H}^+$  pela mineralização da matéria orgânica e aumento temporário da acidez do sistema. Esse fenômeno também foi observado para os teores de  $\text{H}^+\text{Al}/\text{CTC}$ , que apresentaram aumento

nesse período, reforçando a hipótese de acidificação inicial. A influência da atividade biológica e da hidrólise mineral na dinâmica inicial da acidez em sistemas com aplicação de pós de rocha (Zhang; Wang; Li, 2022; Oskonbaeva *et al.*, 2024).

A partir de 60 dias, observa-se tendência de recuperação da saturação por bases, principalmente nas doses mais elevadas (3,0 e 5,0 t·ha<sup>-1</sup>), evidenciando o início efetivo da dissolução dos minerais carbonáticos presentes no carbonatito. Esse processo resulta na liberação de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, que passam a ocupar os sítios de troca, reduzindo a participação relativa do H+Al na CTC. Esse comportamento é consistente com a dissolução progressiva de minerais como calcita e apatita, responsáveis pelo consumo de prótons e elevação gradual da fertilidade do solo (Manning, 2020).

Aos 120 dias, verifica-se relativa estabilização da V%, com valores próximos aos observados aos 30 dias de incubação para as doses menores, enquanto a dose de 5,0 t·ha<sup>-1</sup> apresenta leve redução, sugerindo possível redistribuição dos cátions na CTC e estabelecimento de um novo equilíbrio químico no sistema solo-mineral. Esse comportamento está de acordo com o conceito de equilíbrio dinâmico em sistemas de liberação lenta, no qual a taxa de dissolução mineral aproxima-se da taxa de retenção e redistribuição dos nutrientes no solo (Brantley *et al.*, 2017). A relação Ca/Mg apresentou redução aos 30 dias de incubação, indicando maior mobilidade relativa do cálcio em comparação ao magnésio no início do processo de incubação. Essa redução pode estar associada à dissolução preferencial de fases minerais contendo Mg ou à maior retenção de Ca<sup>2+</sup> no complexo de troca. No entanto, ao longo do tempo, observa-se tendência de estabilização dessa relação, especialmente após 90 dias, indicando equilíbrio entre os cátions básicos no sistema, conforme descrito por Novais *et al.* (2007) para sistemas tropicais altamente intemperizados.

Quanto ao percentual de Ca/CTC e Mg/CTC (Tabela 3), estas variáveis apresentaram comportamento semelhante ao da saturação por bases, com redução inicial aos 30 dias de incubação, seguida de incremento gradual no decorrer do tempo de incubação. A queda inicial dessas relações reforça o efeito da acidificação temporária do sistema, enquanto o aumento posterior pode estar associado a substituição de H<sup>+</sup> e Al<sup>3+</sup> por cátions básicos liberados pelo remineralizador testado.

**Tabela 3** - Saturação por bases (V%), relação cálcio/magnésio (Ca/Mg), e percentuais e cálcio, magnésio, potássio e H+Al na CTC do solo (Ca/CTC; Mg/CTC, K/CTC e H+Al) em função da interação das doses de carbonatito fosfático e do tempo de incubação em condições de umidade próximo a capacidade de campo.

Dias	Doses (t.ha <sup>-1</sup> )							
	0	1	3	5	0	1	3	5
	V%				Ca/Mg			
0	73,0 Aa	73,0 Aa	73,0 Aa	73,0 Aa	4,50 Aa	4,50 Aa	4,50 Aa	4,50 Aa
30	61,3 Ab	57,0 Ac	61,3 A b	61,3 Ab	3,30 Ab	3,50 Ab	3,20 Ab	2,97 Ac
60	52,0 Bb	52,7 Bd	57,7 Abc	60,3 Ab	3,37 Ab	3,17 ABc	3,03Bb	2,70 Cc
90	56,7 Ac	55,0 Acd	57,3 Ac	57,7 Abc	3,17 Ab	2,93 Ad	3,07 Ab	3,47 Ab
120	62,0 Ab	62,7 Ab	61,0 Ab	55,7 Bc	3,37 Ab	3,67 Ab	3,07 Ab	3,47 Ab
	Ca/CTC (%)				Mg/CTC (%)			
0	50,9 Aa	50,9 Aa	50,9 Aa	50,9 Aa	11,3 Ab	11,3 Aa	11,3 Ab	11,3 Ab
30	40,2 Ab	37,7 Ac	40,0 Ab	39,4 Ab	12,2 Aa	10,8 Ac	12,8 Aa	13,2 Aa
60	33,9 Cd	34,2 Bcd	36,8 ABc	38,1 Abc	10,1 Cc	10,9 Cc	12,2 Bab	14,0 Aa
90	36,2 Ac	35,0 Ad	37,4 Ac	38,5 Ab	11,5 Bab	12,0 Ab	12,3 Aab	11,1 Bb
120	41,1 Ab	41,6 Ab	39,9 Ab	37,2 Ac	12,4 Ba	11,4 BCa	13,1 Aa	10,7 b
	K/CTC (%)				H+Al/CTC (%)			
0	10,3 Aa	10,3 Aa	10,3 Aa	10,3 Aa	28,3 Ad	28,3 Ad	28,3 Ad	28,3 Ad
30	8,8 Ab	8,3 Ac	8,9 Ab	8,8 Ab	38,7 Ac	43,4 Ab	39,1 Ab	38,8 Ac
60	8,0 Ac	7,8 Ac	8,8 Ab	8,3 Abc	48,3 Aa	47,2 Aa	42,8 Ba	40,1 Bb
90	8,5 Abc	8,0 Ac	7,6 Ac	8,0 Ac	44,2 Ab	45,1 Aab	42,6 Aa	41,8 Aab
120	8,4 Bbc	9,4 Ab	7,7 Cc	7,7 Cc	37,9 Bc	37,1 Bc	39,5 Bb	43,9 Aa

Para cada variável, médias seguidas da mesma letra maiúscula (na linha) e minúsculas (na coluna) não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5,0% de probabilidade. Fonte: próprio autor.

Para a relação K/CTC, observa-se comportamento distinto, com aumento inicial e posterior redução ao longo do tempo. Esse padrão pode estar associado à rápida disponibilização de  $K^+$  na solução do solo no início do período de incubação, seguida por processos de redistribuição, adsorção nos coloides e possível imobilização pela biomassa microbiana. Além disso, a elevação do pH nas maiores doses pode ter favorecido a competição iônica no complexo de troca, reduzindo a participação relativa do potássio na CTC (Crusciol *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2021; Zhang; Wang; Li, 2022). Já a relação H+Al/CTC apresentou comportamento inverso ao da V%, com aumento inicial e posterior redução ao longo do período de incubação. Esse resultado confirma que, após um período inicial de acidificação, ocorre progressiva neutralização da acidez potencial, decorrente da dissolução dos minerais carbonáticos e da liberação de bases trocáveis.

De maneira geral, os resultados da Tabela 3 evidenciam que o carbonatito fosfático promove alterações graduais, porém consistentes, nas relações químicas do solo, com destaque para a melhoria da saturação por bases e reorganização do complexo de troca. Esse comportamento demonstra o caráter de liberação lenta do remineralizador, com efeitos dependentes do tempo de incubação, e mais expressivos em doses superiores a  $3,0 \text{ t ha}^{-1}$ . Estudos brasileiros com pós de rocha e remineralizadores também indicam que os efeitos desses materiais sobre os atributos químicos do solo dependem da dose, da granulometria, da mineralogia e do tempo de reação no solo (Melo *et al.*, 2012; Almeida *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2023).

Os dados de Ca/CTC indicam redução em relação ao tempo inicial, mas com recuperação vinculada ao incremento das doses a partir dos 60 dias de incubação, variando de 33,9% nos vasos testemunha a 38,1% nos vasos que receberam a dose de  $5,0 \text{ t.ha}^{-1}$ . Comportamento similar foi observado para a relação Mg/CTC, que também respondeu positivamente à aplicação do carbonatito fosfático, obtendo-se para esta variável, valor de 14,0% nos vasos que receberam a maior dose ( $5,0 \text{ t.ha}^{-1}$ ), enquanto para os vasos testemunha, este valor foi de 10,1%. Este comportamento sugere que minerais como a biotita e a annita, presentes na composição mineralógica do carbonatito fosfático em teste, possuem uma cinética de liberação de magnésio que atinge o ápice de troca iônica entre 30 e 60 dias, promovendo o reequilíbrio estequiométrico no complexo sortivo.

Contudo, a redução acentuada nessa relação observada na dose de 5,0 t ha<sup>-1</sup> após os 60 dias de incubação (de 14,0 % para 10,7 % aos 120 dias) sugere que, após a rápida dissolução inicial das fases minerais magnésicas, o sistema atinge um ponto de saturação temporária seguido por um rearranjo iônico. Essa queda pode estar associada a imobilização biológica pela biomassa microbiana, estimulada pela maior disponibilidade de P e K, ou à precipitação de novas fases minerais secundárias em microssítios de pH elevado, que retiram o Mg<sup>2+</sup> da fase trocável (Zhang; Wang; Li, 2022; Oskonbaeva *et al.*, 2024).

Paralelamente, a variável H+Al/CTC apresentou comportamento inverso à saturação por bases, atingindo seu pico nos vasos testemunha aos 60 dias (48,3 %), coincidindo com o menor valor de pH. Contudo, a aplicação da maior dose de carbonatito reduziu significativamente essa acidez potencial para 40,1% no mesmo intervalo, indicando que está contribuindo para neutralização da acidez potencial do solo. Este fato pode contribuir para reduzir os sítios de adsorção de alta energia, facilitando a permanência do fósforo na solução do solo e aumentando a eficiência agronômica dos fertilizantes aplicados, com destaque para os fosfatados.

Por fim, a redução observada na relação Ca/Mg nas doses mais elevadas, associado ao período de incubação de até 60 dias, indica que o fornecimento de magnésio pelo carbonatito de “Mundo Novo” é proporcionalmente superior à contribuição de cálcio frente ao balanço original do solo, porém mesmo com esta alteração, a relação Ca/Mg encontra-se nos limites adequados para o desenvolvimento das plantas cultivadas, que são valores que variam de 2 a 5, Esse ajuste é benéfico em solos tropicais altamente intemperizados, em que a relação Ca:Mg frequentemente se encontra acima do ideal para culturas anuais. Desta forma, considerando os dados obtidos, estes sugerem que o uso do carbonatito fosfático foi eficiente em promover alterações nos parâmetros químicos do solo, tornando uma alternativa promissora para melhorar a disponibilidade de nutrientes no solo, e conseqüentemente, favorecer para melhor desenvolvimento e produtividade das plantas. No entanto, torna-se necessário que mais estudos sejam desenvolvidos, principalmente em condições de campo para melhor entender os efeitos que a aplicação proporciona nos atributos químicos e no complexo sortivo do solo no decorrer do tempo.

#### 4. CONCLUSÃO

O carbonatito fosfático promoveu alterações nos atributos químicos do Latossolo Vermelho Distrófico, sendo mais eficiente em doses iguais ou superiores a 3,0 t ha<sup>-1</sup>. Nessas condições, observou-se aumento do pH, das relações Ca/CTC e Mg/CTC e da disponibilidade de fósforo, evidenciando seu potencial como remineralizador de solo.

A dose de 1,0 t ha<sup>-1</sup> apresentou efeito limitado sobre os atributos químicos avaliados, não diferindo substancialmente do tratamento testemunha.

São necessários novos estudos em condições de campo e por períodos mais prolongados para avaliar a persistência dos efeitos observados e a contribuição do carbonatito fosfático para a produtividade das culturas.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Ao IF GOIANO pelo apoio financeiro para tramitação e publicação de artigos (PIAT), logística e infraestrutura, a EDEM Agrominerais/Neofertil, ao CEBIO-UTT Iporá pela parceria, infraestrutura e apoio financeiro e a todos os colegas e servidores que contribuíram para a realização desta pesquisa.

#### 6. REFERÊNCIAS

ALCARDE, J.C. Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas. Boletim Técnico ANDA, n. 6, p. 1-24. Disponível em: <https://anda.org.br/wp-content/uploads/2024/09/BT-6-%E2%80%93-Corretivos-da-Acidez-dos-Solos-Caracteristicas-e-Interpretacoes-Tecnicas-2o-Edicao-1992.pdf>. Jan 25. 2005.

ALMEIDA, J.A., CUNHA, G.O.M., HEBERLE, D.A., MAFRA, A.L. Potential of olivine melilitite as a soil remineralizer according to particle size and rates. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, e01445. 2022. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.01445>.

ASSUNÇÃO, R.D.V., CASSOL, P.C., GRANADOS, S.B., MAFRA, Á.L., BITTENCOURT, R.F.P.M. Microbial-inoculated remineralizers as source of potassium and other nutrients. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 2, e275193. 2024. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n2e275193>.

BRANTLEY, S.L., LEBEDEVA, M.I., BALASHOV, V.N., SINGHA, K., SULLIVAN, P.L., STINCHCOMB, G. Toward a conceptual model relating chemical reaction fronts to water flow paths in hills. **Geomorphology**, v. 277, p. 100-117. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.027>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. Estabelece regras sobre definições, classificação, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 mar. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-5-de-10-3-16-remineralizadores-e-substratos-para-plantas.pdf>. Jan. 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos. Brasília, DF: MAPA. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/manual-de-metodos-2017-isbn-978-85-7991-109-5.pdf>. Jan 25. 2017.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Plano Nacional de Fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil. Brasília, DF: SDIC/MDIC. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/sdic/confert/pnf/pnf-v-08-06-12-23.pdf>. Jan 25. 2023.

CHIEN, S.H., PROCHNOW, L.I., TU, S., SNYDER, C.S. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 89, p. 229-255. 2011. <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9390-4>.

CRUSCIOL, C.A.C., SORATTO, R.P., GILABEL, A.P., COSTA, C.H.M., CAMPOS, M., CASTRO, G.S.A., FERRARI NETO, J. Broadcast application of ground silicate rocks as potassium sources for grain crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, e02443. 2022. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02443>.

HEŘMANSKÁ, M., VOIGT, M.J., MARIENI, C., DECLERCQ, J., OELKERS, E.H. A comprehensive and internally consistent mineral dissolution rate database: Part I: Primary silicate minerals and glasses. **Chemical Geology**, v. 597, 120807. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120807>.

MALAVOLTA, E. Manual de Nutrição Mineral de Plantas. São Paulo: Agronômica Ceres. Manning, D.A.C., Theodoro, S.H. 2020. Enabling food security through use of local rocks and minerals. **The Extractive Industries and Society**, v. 7, n. 2, p. 480-487. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.11.002>.

MARTINS, E.S., MARTINS, E.S., HARDOIM, P.R. Princípios geoquímicos, mineralógicos e biológicos do manejo de remineralizadores de solos. **Informe Agropecuário**, v. 44, n. 321, p. 26-39. 2023. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1156783>. Jan 25.

MELO, V.F., UCHÔA, S.C.P., DIAS, F.O., BARBOSA, G.F. Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 4, p. 471-476. 2012. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000400004>.

NOVAIS, R.F., SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=572348>. Jan. 1999.

NOVAIS, R.F., SMYTH, T.J., NUNES, F.N. Fósforo. In: Novais, R.F., Alvarez V., V.H., Barros, N.F., Fontes, R.L.F., Cantarutti, R.B., Neves, J.C.L. (ed.). Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 471-537. Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=857678>. Jan. 2007.

OSKONBAEVA, Z., KHAN, A., HEMKEMEYER, M., SCHWALB, S., JOERGENSEN, R.G., WICHERN, F. From dry to thrive: increased metabolic activity, potassium content and a shift towards fungi after drying-rewetting reveals adjustment of the microbial community to osmotic stress. **Applied Soil Ecology**, v. 202, 105578. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105578>.

RAMOS, C.G., QUEROL, X., OLIVEIRA, M.L.S., PIRES, K.C.J., KAUTZMANN, R.M., OLIVEIRA, L.F.S. Possibilities of using silicate rock powder: an overview. **Geoscience Frontiers**, v. 13, n. 1, 101185. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101185>.

RESENDE, A.V., FURTINI NETO, A.E. Aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada em solos do Cerrado. **Documentos**. Embrapa Cerrados, n. 195, p. 1-32. 2007. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/572251>. Jan 25.

RIBEIRO, I.D.A., VOLPIANO, C.G., VARGAS, L.K., GRANADA, C.E., LISBOA, B.B., PASSAGLIA, L.M.P. Use of mineral weathering bacteria to enhance nutrient availability in crops: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 590774. 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.590774>.

SANTOS, H.G., JACOMINE, P.K.T., ANJOS, L.H.C., OLIVEIRA, V.A., LUMBRERAS, J.F., COELHO, M.R., ALMEIDA, J.A., ARAÚJO FILHO, J.C., OLIVEIRA, J.B., CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Jan. 2018.

SANTOS, L.F., SODRÉ, F.F., MARTINS, É.S., FIGUEIREDO, C.C., BUSATO, J.G. Effects of biotite syenite on the nutrient levels and electrical charges in a Brazilian Savanna Ferralsol. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 51, e66691. 2021. <https://doi.org/10.1590/1983-40632021v5166691>.

SWOBODA, P., DÖRING, T.F., HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: a review. **Science of the Total Environment**, v. 807, 150976. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed. 2017.

TEIXEIRA, P.C., DONAGEMMA, G.K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>. Jan. 2017.

WITHERS, P.J.A., RODRIGUES, M., SOLTANGHEISI, A., CARVALHO, T.S., GUILHERME, L.R.G., BENITES, V.M., GATIBONI, L.C., SOUSA, D.M.G., NUNES, R.S., ROSOLEM, C.A., ANDREOTE, F.D., OLIVEIRA JUNIOR, A., COUTINHO, E.L.M., PAVINATO, P.S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, 2537. 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20887-z>.

ZHANG, Z., WANG, D., LI, M. Soil respiration, aggregate stability and nutrient availability affected by drying duration and drying-rewetting frequency. **Geoderma**, v. 413, 115743. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115743>.