



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM EM CIÊNCIAS DA TERRA  
E DO AMBIENTE

HIGO BATISTA FERREIRA

**AGROMINERAIS E SENSORIAMENTO PROXIMAL:  
AVALIAÇÃO E PREDIÇÃO DE ATRIBUTOS QUÍMICOS EM SOLO ÁCIDO**

FEIRA DE SANTANA - BAHIA  
2025

**HIGO BATISTA FERREIRA**

**AGROMINERAIS E SENSORIAMENTO PROXIMAL:  
AVALIAÇÃO E PREDIÇÃO DE ATRIBUTOS QUÍMICOS EM SOLO ÁCIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente da Universidade Estadual de Feira de Santana, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Deorgia Tayane Mendes de Souza

Ficha Catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado - UEFS

F439a

Ferreira, Higo Batista

Agrominerais e sensoriamento proximal: avaliação e predição de atributos químicos em solo ácido / Higo Batista Ferreira. – 2025.

95 f.: il.

Orientadora: Deorgia Tayane Mendes de Souza

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Feira de Santana, 2025.

1.Setor agrícola. 2.Solo - Fertilidade. 3.Rochagem. 4.Sensoriamento hiperespectral. I.Souza, Deorgia Tayane Mendes de, orient. II. Universidade Estadual de Feira de Santana. III. Título.

CDU 631.452

**HIGO BATISTA FERREIRA**


**“AGROMINERAIS E SENSORIAMENTO PROXIMAL:  
AVALIAÇÃO E PREDIÇÃO DE ATRIBUTOS QUÍMICOS EM SOLO ÁCIDO”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente da Universidade Estadual de Feira de Santana, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Deorgia Tayane Mendes de Souza


**Data de aprovação: 11 de março de 2025**

**BANCA EXAMINADORA:**

Documento assinado digitalmente  
 **DEORGIA TAYANE MENDES DE SOUZA**  
Data: 11/02/2026 15:36:31-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Deorgia Tayane Mendes de Souza  
Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS

Documento assinado digitalmente  
 **TATIANA SILVA RIBEIRO**  
Data: 11/02/2026 17:22:47-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Tatiana Silva Ribeiro  
Universidade Federal da Bahia – UFBA

Documento assinado digitalmente  
 **WASHINGTON DE JESUS SANTANNA DA FRANCA**  
Data: 19/02/2026 14:10:39-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Washington de Jesus Sant’Anna da Franca Rocha  
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

## DEDICATÓRIA

Aos familiares ausentes em especial, a minha Mainha e vovô Adilino, que em meio a tantas dificuldades incentivaram que os seus nunca deixassem de estudar e de conquistar tudo que almejam. O legado de vocês permanece vivo. Amo vocês. Para sempre.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus e todos os seres de luz e boas energias que me cercam. É Ele (são eles) quem me mantém de pé, com saúde, firme, forte e perseverante a continuar seguindo, lutando e conquistando tudo aquilo que almejo na vida.

À minha família, em especial, meus pais, meu grande porto seguro, minhas inspirações de vida, meus grandes exemplos de pessoas, de seres humanos. Amo vocês incondicionalmente e agradeço por tudo que fizeram e fazem por mim, essa vitória é nossa! Sonhamos juntos mais esta etapa que agora se concretiza! Ao meu irmão, meu grande (literalmente) e verdadeiro amigo! Só a gente sabe e entende a nossa forma de amar um ao outro. És um homem incrível e que me inspira diariamente. Obrigado por todos os conselhos, conversas e divagações ao longo desses anos. Te amo muito!

Agradeço também aos tios e tias que sempre estiveram na torcida e me apoiaram ao longo da jornada, vocês são incríveis e os guardo no coração! As primas, primos e agregados, vocês também foram importantes e são especiais!

Aos amigos de Cruz - Biu, Binha, Bião, Rol, Miga e toda galera do colégio que sempre estiveram ao meu lado e me apoiam e vibram junto comigo em cada conquista alcançada! Vocês são maravilhosos demais, os amo muito!!! Aos amigos do Jordão, em especial, Best, Vini, Iuri (prin) e Grazi, vocês que estão comigo há mais de 20 anos e também torcem por mim, muito obrigado! Adoro muito vocês! A Vini e Liu por serem grandes amigos e incentivadores! Aos amigos e colegas de Feira, da UEFS, do curso de Geografia que estão comigo nessa jornada acadêmica desde 2017, tenho um apreço e carinho muito grande por todos! Saibam que sempre estarei aqui para tudo.

Ao meu companheiro de vida, Willian, que sonhou comigo esta conquista, saiba que te amo muito! Você me inspira todos os dias pela pessoa e profissional que é. Foi você quem esteve ao meu lado nos melhores e piores momentos dessa jornada, me apoiando, aconselhando e me dando forças para continuar. Serei eternamente grato por tudo que fez, faz e é por mim, por nós. Eu também sempre estarei aqui por você. Isso é só o começo e mais um degrau do que almejamos para nós.

A minha casinha na UEFS, o LABESPECTRO. Este laboratório que me acolheu e acolhe, um espaço que além de acadêmico, também é familiar. Aqui tenho me encontrado enquanto pesquisador e profissional. Um espaço com pessoas que me

ensinam diariamente e despertam o pertencimento e essência de estar em casa mesmo que, fisicamente, não estejamos (hahaha). Ao longo desses anos conheci aqui pessoas incríveis, acolhedoras e inspiradoras - Lazárin, Lulu, Bruninha, Néia, Dani Alerteira, Pêdin, Odaimys, Fran, Sonaly, Heder, João Daniel, Ericka, Iarina, Carlos, Victória e todos os agregados que se achegaram ao longo do tempo... MUITO OBRIGADO! Vocês tornaram a caminhada mais leve, tenho um carinho muito grande e especial por cada um!

A minha querida e linde orientadora, Deorgia. Ela que, com seu jeitinho peculiar, sempre me ensina e me inspira a ser pesquisador. Uma mulher imponente, determinada e destemida que inspira a todos. Deo, você é incrível, tenho um orgulho muito grande de ser uma “cria” sua. Muito obrigado por todos os momentos de acolhimento, conselhos e distrações. Aprendi e quero continuar aprendendo com você. Te adoro muito!

A pró Tatiana, uma pessoa muito especial e excelente profissional. Muito obrigado por todo apoio, ajuda e conselhos, és muito especial para mim!

A minha querida turma XVII, vocês são incríveis! Obrigado por todos os momentos que passamos juntos, todos os Helps e acolhimentos que tivemos uns com os outros. Mile, Joy, Pêdin, Ruivo, Rogério, Tay, Véu, Amandinha, Juli, Tainara, Filipe, Cláudia... desejo boas energias e sucessos na trajetória de cada um!

Ao PPGM e toda sua equipe de profissionais - professores, secretários, zeladores, vigilantes. Todos que pude ter contato e que tornaram os momentos mais prazerosos e leves. Muito obrigado!

A UEFS por ser uma instituição de excelência que preza pela formação de qualidade dos seus. Muito obrigado pelo acolhimento e por ter proporcionado oportunidades e vivências que me formaram na pessoa e profissional que sou hoje.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Frente a isso, agradeço a CAPES pela concessão de bolsa de estudo, sem dúvidas, um incentivo e permanência para a realização deste sonho.

Muito obrigado a todos que passaram e viveram comigo ao longo desses anos. Muito obrigado pelos momentos e por tudo que proporcionaram na minha vida, na minha formação pessoal e profissional.

Que venham as próximas etapas dessa vida! Um cheiro em todos!

“If you’re willing to take the risk... the view on the other side is spectacular!”

“Se você tem disposição para correr o risco... a vista do outro lado é espetacular!”

Grey’s Anatomy

## RESUMO

O uso de agrominerais no setor agrícola tem sido uma alternativa promissora na disponibilidade de macro e micronutrientes que estes podem disponibilizar ao solo, impactando positivamente na qualidade nutricional dos alimentos. Por meio da rochagem, a técnica de fertilização que se utiliza do pó de rocha de agrominerais é possível garantir uma fertilidade eficiente dos solos além de reduzir o uso de insumos químicos. A presente pesquisa tem por objetivo, analisar o comportamento químico e espectral de solos submetidos a teste de incubação com pó de rocha carbonática fosfatada como alternativa sustentável de remineralização. A metodologia adotada perpassa por três etapas, sendo a primeira com atividades de campo para coleta de rocha e solos nos municípios de Irecê e Feira de Santana - Bahia, respectivamente. A segunda com etapas laboratoriais no processo de preparo das amostras, coleta de dados químicos, DRX e espectrais, recomendação para fertilização fosfatada com uso de pó de rocha (PR) e fosfato monoamônico (MAP) e montagem das estações experimentais, com um total de 105 unidades – 50 para cada material e 5 testemunhos, com aplicações de dois materiais (PR e MAP) e cinco doses progressivas para cada uma. A terceira etapa consistiu no processo de acompanhamento e coleta mensal de amostras em um período de 120 dias, análises químicas e espectrais a cada 30 dias e posterior construção de um banco de dados e por fim a análise e interpretação. Os resultados foram apresentados em dois artigos, sendo o primeiro com o objetivo de avaliar, temporalmente, as alterações químicas de solos ácidos submetidos à incubação com doses de pó de rocha carbonática fosfatada e fertilizante sintético monoamônico e seus efeitos na fertilidade. Nele foram gerados gráficos e análises temporais do comportamento de pH e macronutrientes do solo testado. Os resultados apresentaram: i) alterações no pH por material, dose e tempo analisado, sendo as doses com PR os melhores pH. ii) outros parâmetros químicos como o SB e macronutrientes foram analisados, e as amostras com PR apresentaram os melhores resultados, ainda que tenham evidenciado também os desbalanço de nutrientes, predominando o Ca e P, devido a própria composição do PR incubado. Diferente das amostras com MAP, que acidificaram o solo e reduziram a gradativamente a concentração de nutrientes. Foi constatado que as melhores condições para a fertilidade foram apresentadas pelas amostras incubadas com PR. O segundo artigo teve como objetivo aplicar modelos preditivos (PLSR e RF) a partir de dados espectrais para detecção de fósforo e pH em solos submetidos a incubação com diferentes materiais fosfatados. Foram utilizados os modelos PLSR e Random Forest (RF) e aplicações de seis pré-processamentos espectrais – R, SMO, SNV, MSC, CR e AB. Os resultados mostraram que: i) para o pH, ambos os modelos apresentaram bons resultados. O comportamento químico pouco variável pode ter influenciado em maior homogeneidade e melhores desempenhos. ii) o fósforo evidenciou a necessidade de processamentos para predição, devido a principalmente, suas variações nas concentrações químicas. iii) os resíduos para pH em PLSR apresentou variações e menores enviesamentos ao erro. Já o RF para pH e fósforo apresentou padrões de erros, associados ao comportamento químico das amostras. Com isso, o PLSR foi melhor para a predição do pH e o RF para o fósforo. Além disso, os modelos preditivos apresentaram uma alternativa inovadora na avaliação de insumos de caráter agromineral. Com isso, foi possível aliar técnicas de manejos sustentáveis com técnicas radiométricas analíticas na promoção e desenvolvimento de pesquisas que minimizem cada vez mais os impactos sobre o meio ambiente.

**Palavras-chave:** fertilidade; rochagem; sensoriamento hiperespectral; solos.

## ABSTRACT

The use of agrominerals in the agricultural sector has emerged as a promising alternative for supplying macro- and micronutrients to soils, thereby positively influencing the nutritional quality of food. Through rock fertilization, a technique that employs agromineral rock powders, it is possible to enhance soil fertility while reducing the reliance on chemical inputs. The present research aimed to analyze the chemical and spectral behavior of soils subjected to incubation tests with carbonatic phosphate rock powder as a sustainable alternative for soil remineralization. The methodology comprised three main stages. The first stage involved field activities, including the collection of rock material and soil samples from the municipalities of Irecê and Feira de Santana, Bahia, Brazil, respectively. The second stage consisted of laboratory procedures, including sample preparation, chemical, X-ray diffraction (XRD), and spectral data acquisition, recommendations for phosphate fertilization using rock powder (RP) and monoammonium phosphate (MAP), and the establishment of experimental units. A total of 105 experimental units were assembled, including 50 units for each material and five control treatments, with applications of two materials (RP and MAP) and five progressive doses for each source. The third stage involved monitoring and monthly sampling over a 120-day incubation period, with chemical and spectral analyses conducted every 30 days, followed by database construction, data analysis, and interpretation. The results were presented in two scientific articles. The first article aimed to evaluate, over time, the chemical changes in acidic soils incubated with increasing doses of carbonatic phosphate rock powder and monoammonium phosphate fertilizer, and their effects on soil fertility. Temporal analyses and graphical representations of soil pH and macronutrient behavior were generated. The results indicated: (i) variations in soil pH as a function of material, dose, and incubation time, with RP treatments exhibiting the most favorable pH values; (ii) other chemical parameters, such as sum of bases (SB) and macronutrients, also showed improved values in RP-treated samples, although nutrient imbalances were observed, with predominance of Ca and P due to the intrinsic composition of the incubated rock powder. In contrast, MAP-treated samples intensified soil acidification and gradually reduced nutrient concentrations. Overall, the most favorable soil fertility conditions were observed in samples incubated with rock powder. The second article aimed to apply predictive models—Partial Least Squares Regression (PLSR) and Random Forest (RF)—using spectral data to estimate phosphorus and pH in soils incubated with different phosphate sources. Six spectral preprocessing techniques were applied: reflectance (R), smoothing (SMO), standard normal variate (SNV), multiplicative scatter correction (MSC), continuum removal (CR), and absorbance (AB). The results showed that: (i) for soil pH, both models exhibited good predictive performance, likely due to the relatively low variability in chemical behavior, which contributed to greater homogeneity and improved model accuracy; (ii) phosphorus prediction required spectral preprocessing, mainly due to its higher variability in chemical concentrations; (iii) PLSR residuals for pH showed lower bias and more stable error distribution, whereas RF models for both pH and phosphorus exhibited error patterns associated with the chemical behavior of the samples. Consequently, PLSR performed better for pH prediction, while RF showed superior performance for phosphorus estimation. In addition, the predictive models demonstrated an innovative alternative for evaluating agromineral-based inputs. Thus, this study successfully integrated sustainable soil management practices with analytical radiometric techniques, contributing to the development of

research approaches aimed at minimizing environmental impacts.

**Keywords:** soil fertility; rock dusting; hyperspectral sensing; soils.

## LISTA DE ABREVIATURAS

AB	Absorbância
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ca	Cálcio
CaCl <sub>2</sub>	Cloreto de Cálcio
CaO	Óxido de Cálcio
CETAB	Centro Tecnológico Agropecuária do Estado da Bahia
CR	Contínuo Removido
CTAPME	Comitê Interministerial de Análises de Projetos de Minerais Estratégicos
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
Cu	Cobre
DRX	Difratômetro de Raio-X
DTEC	Departamento de Tecnologia
EEEE	Equipe de Estudo e Educação Ambiental
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Fe	Ferro
FRXp	Fluorescência de Raio-X portátil
H	Hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFA	International Fertilizer Association
K	Potássio
KCl	Cloreto de Potássio
LOOCV	Leave-One-Out
MAP	Fosfato Monoamônico
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
Mg	Magnésio
MgO	Óxido de Magnésio
Mn	Manganês
MSC	Correção de Dispersão Multiplicativa
N	Nitrogênio
Na	Sódio
NO <sub>3</sub>	Nitrato
NPK	Nitrogênio-Fósforo-Potássio
ODS	Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável
OH	Hidroxila
P	Fósforo
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de fósforo
PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup>	Íon ortofosfato
Pb	Chumbo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PLSR	Regressão por Mínimos Quadrados Parciais
PPGM	Pós-graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente
PR	Pó de Rocha
R	Reflectância

R <sup>2</sup>	Coeficiente de Regressão
RF	Random Forest
RMSE	Raiz Quadrada do Erro Médio
SB	Soma de Bases
SEAGRI	Secretaria de Agricultura, Pecuária, Irrigação, Pesca e Aquicultura
SEI BAHIA	Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia
Si	Silício
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SMO	Suavização
SNV	Variável Normal Padrão
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
UEFS	Universidade Estadual de Feira de Santana
V	Saturação por Base
VIS	Visível
NIR	Infravermelho próximo
SWIR	Infravermelho de ondas curtas
Zn	Zinco

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Mapa de localização do município de Irecê – Bahia	10
Figura 2	Registros da área de coleta	11
Figura 3	Localização de Irecê (geologia) – Bahia	12
Figura 4	Fluxograma metodológico geral	14
Figura 5	Fluxograma de etapas do ensaio de incubação	16
Figura 6	Unidades experimentais	18
Figura 1	Regressão entre doses de $P_2O_5$ e pH do solo aos 30 (A), 60 (B), 90 (C) e 120 (D) dias de incubação, para MAP e pó de rocha fosfatada.	34
Figura 2	Comportamento temporal das doses aplicadas	36
Figura 3	Análise de Componentes Principais	37
Figura 1	predito x observado - PLSR e RF (pH)	52
Figura 2	predito x observado - PLSR e RF (P)	54
Figura 3	Resíduos - PLSR e RF (pH)	55
Figura 4	Resíduos - PLSR e RF (P)	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros físico-químicos do solo e insumos utilizados	16
Tabela 1	Parâmetros químicos do pó de rocha e MAP	31
Tabela 1	Parâmetros químicos do materiais utilizados	46
Tabela 2	Validação para PLSR e RF	51

## LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A	Laudos químicos das amostras	64
APÊNDICE B	Tabelas: preditos x observados – pH e P (PLSR e RF)	67

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
1.2.1 Objetivo Geral .....	3
1.2.2 Objetivos Específicos .....	3
<b>1.3 BASE TEÓRICA E CONCEITUAL .....</b>	<b>4</b>
1.3.1 Minerais Estratégicos e Agrominerais .....	4
1.3.2 Fósforo .....	5
1.3.3 Técnicas analíticas aplicados à identificação mineralógica e química: Sensoriamento Proximal e Fluorescência de Raio X portátil. ....	6
1.3.4 Rochagem - testes de incubação .....	8
<b>1.4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>10</b>
1.4.1 Área de estudo .....	10
1.4.2 Geologia da área.....	11
1.4.3 Descrição geral.....	13
1.4.4 Ensaio Agronômico - incubação .....	15
1.4.4.1 Etapas experimentais: .....	15
1.4.4.2 Insumos e solo utilizado .....	16
1.4.4.3 Recomendação .....	16
1.4.4.4 Preparo das amostras: .....	17
1.4.4.5 Capacidade de campo .....	18
1.4.4.6 Análises:.....	20
1.4.4.7 Interpretação .....	21
1.4.4.8 Aplicação de Modelos Preditivos .....	21
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>21</b>
<b>CAPÍTULO 2 - ARTIGO 1 .....</b>	<b>27</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>27</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>27</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>32</b>
3.1 Comportamento do pH e fósforo nos solos incubados .....	32
3.2 Análise de Componentes Principais (PCA) .....	37

<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>38</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>38</b>
<b>CAPÍTULO 3 - ARTIGO 2 .....</b>	<b>43</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>43</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>43</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>44</b>
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>46</b>
2.1 Origem dos materiais e preparo das amostras.....	46
2.2 Delineamento amostral do experimento e análise química.....	47
2.3 Análises espectrais.....	48
2.4 Pré-processamentos .....	48
2.5 Modelos preditivo - PLSR e RF .....	49
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>49</b>
3.1 Modelos preditivos PLSR e RF na predição de pH e Fósforo.....	50
3.1.1 Desempenho dos modelos para pH .....	51
3.1.2 Desempenho dos modelos para P.....	53
3.1.3 Resíduos .....	54
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>58</b>
<b>CAPÍTULO 4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>62</b>

## CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

### 1.1 INTRODUÇÃO

Em uma perspectiva de crescimento cada vez mais significativo da população mundial, a necessidade por insumos que contemplem, sobretudo, o ramo da agricultura, é de grande importância para o desenvolvimento das esferas sociais, políticas e econômicas. Atualmente, suprir tais necessidades requer investimentos em pesquisas que viabilizem a descoberta e prospecção de matérias-primas que estimulem o crescimento deste ramo que fomenta, em especial, a economia de um país.

Com a necessidade de crescimento da produção agrícola, expansão de novas áreas e aumento na produtividade, todos decorrentes de um aumento populacional significativo, se faz necessário uma maior demanda por fertilizantes (Abram, 2016), destaca-se neste contexto o Brasil como um notável produtor de alimentos mas, com forte dependência externa de insumos para a fabricação de seus fertilizantes principalmente, o fósforo, que inserido no tripé de macronutrientes principais, junto ao Nitrogênio e Potássio (Loureiro; Monte; Nascimento, 2005), desempenha um papel fundamental na interação solo-planta.

O fósforo apresenta-se associado a mineralogias diversas, mas é na Apatita sua forma mais comum. As rochas fosfáticas estão associadas a diferentes tipos de depósito: ígneas, sedimentares e, também, biogénicas (guanós) (Souza; Fonseca, 2008). Diante desta disponibilidade, muitas iniciativas de pesquisa têm se debruçado na investigação da viabilidade do uso destas como fertilizantes naturais e uma alternativa, principalmente do Brasil, em minimizar os custos na compra de insumos para a produção de fertilizantes, já que podem ser utilizados recursos do próprio território com esta finalidade.

A técnica que visa a adição direta de pó de rocha como remineralizador de solos agrícolas é conhecida por rochagem (Blaskowski *et al.*, 2016), que proporciona a recomposição de minerais facilmente intemperizáveis e portadores de nutrientes essenciais às plantas (Blaskowski *et al.*, 2016; Van Straaten, 2007). Dentre as possibilidades de utilização desse insumo como potencial fertilizante natural se encontra os agrominerais, que são rochas e minerais utilizadas na técnica de rochagem, se apresentando ainda, como opção mais barata frente ao uso de

fertilizantes químicos, que dependem de importação de insumos (Blaskowski *et al.*, 2016). No rol experimental de materiais como os agrominerais, encontram-se os ensaios experimentais de incubação, um estágio inicial de avaliação da rocha a qual se pretende analisar em suas fases de incorporação com o solo.

A necessidade de conhecer áreas que apresentem potenciais para o uso e aproveitamento de agrominerais se dá na relevância econômica e, sobretudo, social do uso destes insumos como vias alternativas de fertilização/remineralização, principalmente, em locais que apresentam solos empobrecidos e/ou degradados. Para isso, se faz necessário também, a utilização de tecnologias associadas a estas fontes alternativas a exemplo da Espectrorradiometria de Reflectância, uma técnica do Sensoriamento Proximal que vem ganhando cada vez mais notoriedade no meio científico pela sua eficiência na predição de resultados além, de ser uma técnica rápida, em que muitas medições podem ser feitas em curto período de tempo, com custo baixo no sentido de manutenção, não destrutiva e sem impacto sobre o meio (Coblinski *et al.*, 2020; Meneses; Almeida; Baptista, 2019).

O uso da Espectrorradiometria de Reflectância tem sido cada vez mais utilizadas em análises pedológicas por apresentar entre outros, eficiências em análises quantitativas e predição de propriedades e características dos solos como, classes texturais, mineralogia, matéria orgânica e fertilidade (Coblinski *et al.*, 2020; Wan *et al.*, 2019; Tavares *et al.*, 2021; Meneses; Almeida; Baptista, 2019).

É uma técnica analítica que contribui na análise de propriedades litológicas e pedológicas, como a mineralogia. Logo, seu uso pode auxiliar na identificação do comportamento espectral de minerais fosfatados submetidos à incubação.

Frente a isto, a presente pesquisa emerge dos seguintes questionamentos: de que forma acontece a incorporação de fósforo em solos submetidos a incubação em diferentes concentrações de pó de rocha? É evidente acompanhar esse processo utilizando a espectrorradiometria de reflectância? A espectrorradiometria tem capacidade de quantificação do Fósforo de forma precisa? Para isso, foi utilizado da referida técnica para avaliar esse processo de incorporação de rocha carbonática fosfatada oriundo do município de Irecê, localizado no estado da Bahia, o que contribui para uma alternativa sustentável de uso de material de pó de rocha e de avaliação do seu potencial como remineralizador de solo.

Por isso, se justifica o desenvolvimento da pesquisa, por a mesma agregar técnicas analíticas aplicáveis na avaliação de agrominerais via rochagem, além de contribuir para que novas investigações na área emergjam e intensifiquem sua prática e uso de insumos desta natureza, impactando nas esferas políticas, econômicas e sociais de desenvolvimento do país. Além de, se enquadrar também no rol do que preconiza os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS), que na presente pesquisa se destacam os objetivos 2 (fome zero e agricultura sustentável) e 12 (consumo e produção responsáveis), abordando aplicações técnicas e fomentando para práticas que melhorem a qualidade da terra e do solo bem como, uso eficiente dos recursos naturais (Brasil, 2016).

Junto a isso, o estímulo à pesquisa e a busca por novas áreas prospectivas de insumos desta natureza têm sido estratégias cada vez mais necessárias, sobretudo, pelo potencial risco de escassez dos mesmos. O fósforo, ligado à segurança na produção de alimentos nos anos futuros, tem emergido como um dos principais desafios a enfrentar no século XXI (Cordell & Neset, 2014; Abram, 2016), consequência de um crescimento acentuado populacional do mundo que demandará, por conseguinte, aumento da produtividade agrícola e produção de alimentos. Pesquisas já apontam para o esgotamento dos suprimentos globais de P ainda neste século, impulsionando para fome generalizada e intensos conflitos geopolíticos globais (Abram, 2016; Cordell; White, 2011, 2013; Syers; Johnston; Curtin, 2008; Gomes, 2021).

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

- Analisar o comportamento químico e espectral de solos submetidos a teste de incubação com pó de rocha carbonática fosfatada como alternativa sustentável de remineralização.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar, temporalmente, as alterações químicas de solos ácidos submetidos à incubação com doses de pó de rocha carbonática fosfatada e fertilizante sintético fosfatado monoamônico e seus efeitos na fertilidade.

- Aplicar modelos preditivos (PLSR e RF) a partir de dados espectrais para detecção de fósforo e pH em solos submetidos a incubação com diferentes materiais fosfatados.

## **1.3 BASE TEÓRICA E CONCEITUAL**

### **1.3.1 Minerais Estratégicos e Agrominerais**

Com potencial de fomentar o desenvolvimento, sobretudo, econômico de um país, os minerais estratégicos se encontram na categoria de minerais vitais para aplicações oportunas do poder nacional e requisitados pelas tecnologias de ponta (Braga; França, 2013), dentre estes se encontram os agrominerais, que contemplam minerais e rochas utilizados no setor da agricultura.

Para além de estratégico, os minerais podem também, angariar a denominação de críticos, devido a sua contribuição nas cadeias produtivas ou seja, vitais para economia, mas que podem apresentar riscos, dentre os quais se destacam as questões de escassez, dinâmicas geopolíticas dentre outras (Castro, Peiter, Góes, 2022). Assim, é notável que os minerais estratégicos englobam os minerais críticos, porém, esta definição é delineada por cada país mediante estudos de seus bens minerais e suas relações com as cadeias industriais (Castro, Peiter, Góes, 2022).

No Brasil, há políticas que fomentam o desenvolvimento de projetos de produção de minerais estratégicos para o desenvolvimento do país, que é a Política de Apoio ao Licenciamento Ambiental de Projetos de Investimentos para a Produção de Minerais Estratégicos (Pró-Minerais Estratégicos), criado em 2021 através do Decreto nº 10.657, como objetivo a garantia do suprimento interno de bens minerais dos quais, o Brasil é muito dependente (BRASIL, 2021a). Ainda inserido nesta política, encontra-se a criação do Comitê Interministerial de Análises de Projetos de Minerais Estratégicos (CTAPME), que delibera os projetos minerários relevantes para agregar-se ao Pró-Minerais Estratégicos (BRASIL, 2021a). Além disso, destaca-se neste contexto a Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (ENCTI), que propõe e orienta o Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (SNCTI) à busca por soluções sustentáveis frente aos desafios brasileiros nas esferas social, ambiental e econômica. Em seu eixo Minerais Estratégicos, objetiva o fomento à pesquisa, desenvolvimento tecnológico e inovações nas cadeias produtivas de

minerais de importância estratégica (BRASIL, 2016; 2018). Por ser a agricultura uma área estratégica na cadeia produtiva dos países, e demanda por insumos que fomentem o seu desenvolvimento, encontra-se nos agrominerais uma via alternativa e que agrega neste setor. Definido por rochas e minerais utilizados na técnica de rochagem (Blaskowski *et al.*, 2016), os agrominerais apresentam potencial remineralizador de solos, disponibilizando macro e micronutrientes podendo refletir positivamente na qualidade nutricional dos alimentos (Theodoro; Almeida, 2013).

O Brasil conta com a Lei nº 12.890 de 10 de dezembro de 2013, que altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, e inclui os remineralizadores como categoria de insumo destinado à agricultura (BRASIL, 2013), sendo esta mais uma política de fomento ao uso destes recursos no desenvolvimento socioeconômico do país. Mas, ainda que se tenha leis que regulamentem seu uso, o país ainda é muito dependente da importação de insumos para a agricultura. Segundo a Resolução nº2/2021 do CTAPME, o Brasil depende de um elevado percentual de bens minerais para suprir setores vitais da economia, e dentre eles se destaca o minério de fosfato (BRASIL, 2021b), importante para a produção de fertilizantes.

### **1.3.2 Fósforo**

Elemento químico com abundante distribuição no globo terrestre, o fósforo é o décimo elemento mais comum, com simbologia química “P”, integrante do grupo V da Tabela Periódica dos Elementos, com número atômico 15 (Souza; Fonseca, 2008; Loureiro; Monte; Nascimento, 2005), sendo sua forma estável ocorrendo como íon ortofosfato ( $PO_4$ )<sup>3-</sup> (Abram, 2011; Souza; Fonseca, 2008). É um elemento que, junto ao Nitrogênio (N) e o Potássio (K), atua como constituinte primário da vida vegetal e animal (Zapata; Roy 2004).

Desempenha funções essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, atuando na fotossíntese, metabolismo de açúcares, armazenamento e transferência de energia, dentre outros (Potafos, 2005; Zapata; Roy, 2004). Diante de seus benefícios é na agricultura através de fertilizantes, que o fósforo apresenta sua principal aplicação (Loureiro; Monte; Nascimento, 2005; Souza; Fonseca, 2008), se tornando essencial nos altos rendimentos no setor da agricultura moderna para sustentar a população global (IFA, 2023) logo, é notável que há uma interligação deste nas esferas socioeconômica mundial.

Em questões de viabilidade, as rochas fosfáticas são fontes principais de matéria prima para o desenvolvimento e aplicação de fósforo às culturas (IFA, 2023), apresentando origens que variam em sedimentares, ígneas e biogênicas, sendo as duas primeiras as mais importantes economicamente (Souza; Fonseca, 2008). No rol mineralógico, a Apatita -  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$  - é a forma mais comum do fósforo, mesmo apresentando baixa solubilidade, necessitando de transformações em produtos secundários para se tornar disponível para as plantas. Sua principal aplicação é através do ácido fosfórico, matéria-prima para fertilizantes (Abram, 2016; Souza; Fonseca, 2008).

Diante a sua importância para um setor vital da economia como a agricultura, o Brasil tem, cada vez mais, desenvolvido mecanismos que estimulem a prospecção bem como, a independência da importação de insumos de fosfatados. Destaca-se neste contexto o fomento às pesquisas por Agrominerais em território brasileiro. O Projeto Fosfato Brasil, que teve seu primeiro lançamento em 2011, uma iniciativa do Ministério de Minas e Energia junto ao Serviço Geológico do Brasil - SGB, apresenta uma coletânea de pesquisas desenvolvidas com o objetivo de conhecer os depósitos e ocorrências de fosfato no Brasil e ampliar as áreas de reservas mediante a detecção de novos alvos e potenciais mineralizações (Abram, 2011).

Este e outros projetos, como o Potássio Brasil, tem ganhado notoriedade por serem estratégicos a medida que oportunizam a exploração de bens minerais (Almeida *et al.*, 2015) do próprio território, auxiliando na independência brasileira de matérias-prima para a fabricação de fertilizantes, que, atualmente tem sido um dos grandes investimentos no setor da agricultura.

Neste contexto, cada vez mais tem sido impulsionado os estudos que estimulem a procura por áreas que disponham de matéria-prima para este fim, garantindo novas rotas tecnológicas que aliam a sustentabilidade ambiental, social e sobretudo, econômica no setor agrícola (Martins *et al.*, 2024).

### **1.3.3 Técnicas analíticas aplicados à identificação mineralógica e química: Sensoriamento Proximal e Fluorescência de Raio X portátil.**

O Sensoriamento Proximal tem ganhado cada vez mais notoriedade em pesquisas ambientais, sobretudo em estudos pedológicos, contribuindo para uma rapidez na avaliação deste recurso além de, facilitarem na aquisição de dados,

apresentar uma robustez dos mesmos e, serem de baixo custo (Duda *et al.*, 2017).

São sensores que podem ser utilizados in-situ ou laboratórios, como exemplo da Fluorescência de Raio-X portátil e da Espectrorradiometria de Reflectância VIS – NIR - SWIR, que contribuem na aquisição de dados semiquantitativos de materiais como, rochas, solos, vegetação, sedimentos e água. Comparado às técnicas tradicionais laboratoriais, estas ainda apresentam outras vantagens como, não serem destrutivos e rápidos em análises (Chakraborty *et al.*, 2010; Baptista; Madeira Netto; Souza, 2019).

Dentre as eficiências destas técnicas sensoriais na caracterização e identificação de constituintes de materiais se destaca a detecção mineralógica, que se apresenta principalmente em amostras de rochas e solos. A espectrorradiometria de reflectância, por exemplo, tem se apresentado cada vez mais útil nesta detecção e alvo de investigações, desde o século XX, acerca de seus mecanismos de interação da radiação eletromagnética com a matéria, como os clássicos Hunt (1977) e Clark (1999).

Ainda que não apresente a mesma característica de detecção mineralógica como a espectrorradiometria, a fluorescência de raio-x portátil apresenta o mesmo princípio de interação entre radiação e matéria, mas esta, na detecção de bases elementares totais que constituem determinado material analisado (Koch *et al.*, 2017), que podem estar ligados a mineralogia. A emissão de raio-x de baixa potência gera as emissões de radiação secundária (a fluorescência) de elementos, e sua intensidade é proporcional à abundância dos mesmos (Chakraborty *et al.*, 2019; Duda *et al.*, 2017). Para além destas, também se destacam outras técnicas já consolidadas na seara do Sensoriamento para avaliações físico-químicas e mineralógicas de materiais como, a Difractometria de Raio-X e a Microscopia Eletrônica de Varredura, eficientes no diagnóstico de fases cristalinas de materiais.

Com as variadas possibilidades de avaliar os materiais terrestres e agregar na detecção do melhor e mais consciente aproveitamento dos recursos naturais, o Sensoriamento Proximal têm se mostrado cada vez mais eficiente e necessário, sobretudo por suprir demandas ainda mais urgentes à sociedade como, às informações pedológicas, que têm requerido maiores intervenções, seja na exploração agrícola como, na sua compreensão com relação aos sistemas naturais (Baptista; Madeira Netto; Souza, 2019).

Para solos, a técnica da espectrorradiometria é amplamente utilizada e eficiente por exemplo, para a detecção mineralógica (primária e secundária), óxidos de ferro, matéria orgânica, granulometria dentre outras propriedades pedológicas (Baptista; Madeira Netto; Souza, 2019; Duda *et al.*, 2017).

Com vistas a importância de aplicação destas técnicas e necessidade de armazenamento de dados coletados, encontra-se nas bibliotecas espectrais uma alternativa viável de repositório, que associado a outros dados, como os químicos e físicos, e às técnicas tradicionais analíticas, facilita a quantificação e avaliação de atributos dos materiais analisados, e agregam nas investigações e produções de novos materiais científicos.

#### **1.3.4 Rochagem - testes de incubação**

O Brasil apresenta um consumo e importação anual de adubos químicos que passam da casa das milhares de toneladas, uma prática que visa a intensificação e garantia de suas produções no setor da agricultura, caracterizando a uma dependência do produtor do mercado externo (Dalcin, 2018). Como alternativa que viabiliza sua independência desse setor, e que contemple o aproveitamento de resíduos industriais, encontrados em abundância no território nacional, eis que se encontra o pó de rocha como insumo potencial para a fertilização dos solos. Uma alternativa que viabiliza uma produção agrícola menos demandadores de recursos naturais, mais barata, e que possibilita a manutenção e autonomia do pequeno agricultor em suas terras além de, permitir a restauração da soberania alimentar e econômica de países agrícolas fortemente dependentes de insumos químicos como, o Brasil e países do continente africano (Theodoro *et al.*, 2006; 2012).

A técnica que visa a remineralização de solos agrícolas tendo como base a aplicação direta do pó de rocha, é conhecida por rochagem, que aparece como um instrumento de mudança, uma via alternativa de fertilizar os solos nas atividades de agricultura e de recompor as frações minerais intemperizáveis e portadores de nutrientes para as plantas (Blaskovski *et al.*, 2016; Dalcin, 2018; Van Straaten, 2007). Uma tecnologia que visa a redução de insumos químicos e de fácil aceitação por produtores devido ao seu baixo custo (Dalcin, 2018; Theodoro *et al.*, 2006). É uma atividade que positivamente altera os parâmetros de fertilidade do solo com baixo impacto ao meio, e com avanços em pesquisas acerca do seu potencial uso e

impactos sobre o solo e nutrição de plantas (Theodoro *et al.*, 2006; Stralio *et al.*, 2022).

Como vias de aplicação desta técnica, se tem nos agrominerais uma possibilidade de insumo a ser utilizado. Através destes, é possível obter uma enorme gama de macro e micronutrientes que poderão contribuir positivamente na qualidade nutricional de alimentos, ou seja, a utilização destes subprodutos de indústrias e pedreiras que atuam no setor da mineração no Brasil podem ser aproveitados na atividade agrícola e são cada vez mais ofertados aos agricultores como fontes alternativas de nutrientes e condicionadores de solo (Theodoro; Almeida, 2013; Resende *et al.*, 2012).

Segundo Resende *et al.* (2012), apresenta um protocolo de avaliação agrônômica de rochas utilizadas como fontes de nutrientes às plantas e solos. Por se tratarem de matérias primas sem pureza, concentrações ou solubilidades comparadas aos fertilizantes tradicionais comercializados, é necessário que se estabeleça um protocolo experimental personalizado ao material avaliado, levando em consideração suas características químicas e mineralógicas (Resende *et al.*, 2012).

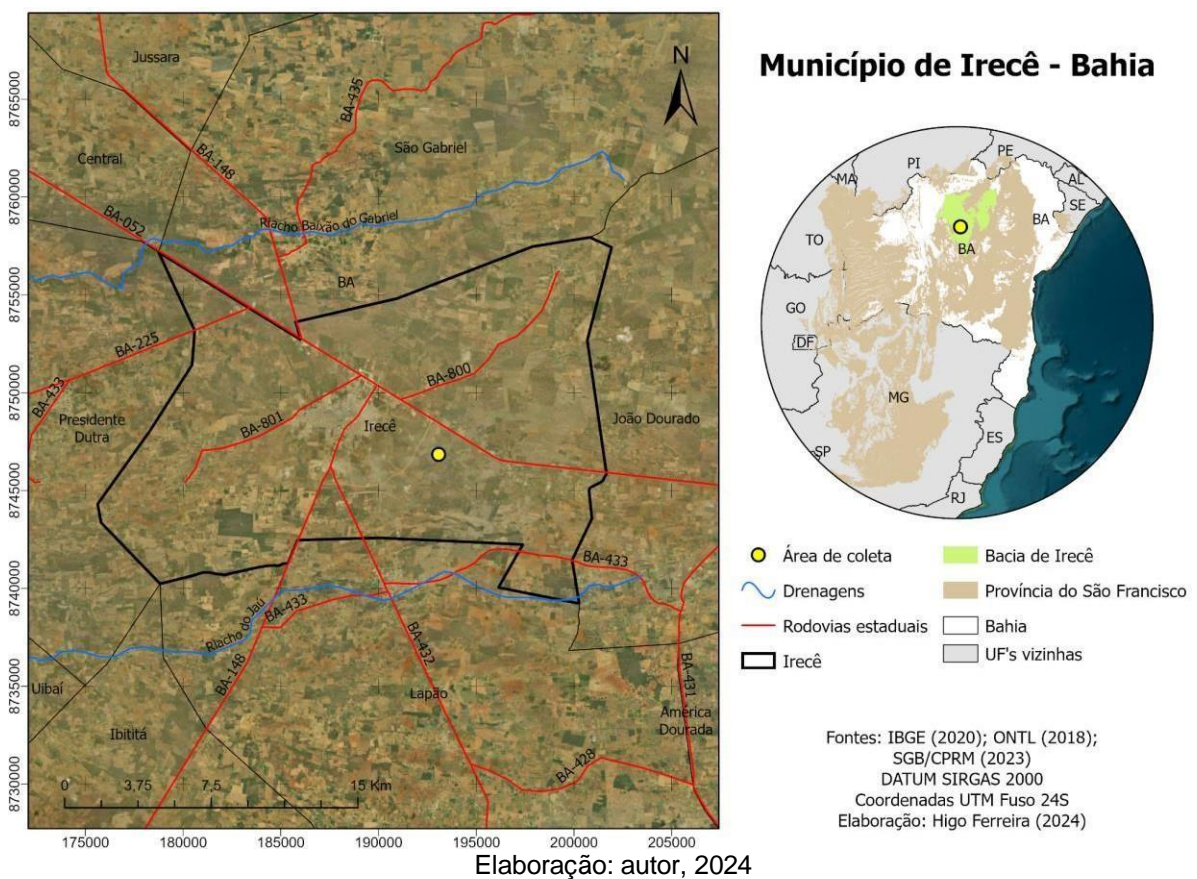
Ao definir os conhecimentos acerca da mineralogia e química do material, a etapa inicial de avaliação do material se dá a partir do teste de incubação, em que há um acompanhamento do experimento agrônômico por um determinado período de tempo, que normalmente são de 30 dias, mas já há experimentos com até 180 dias de avaliação (Resende *et al.*, 2012). Este tipo de ensaio inicial é uma etapa complementar aos ensaios agrônômicos aplicados a remineralizadores e exigidos pela legislação brasileira para comprovação da eficiência e finalidade a qual o material se destina. Ou seja, o registro de um remineralizador/agromineral está condicionado a estas etapas, que devem, ainda, serem conduzidos por instituições oficiais ou credenciadas de pesquisa, e utilizar planta e ser executado em casa de vegetação ou campo (Brasil, 2016).

## 1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 1.4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o município baiano de Irecê, em que foi realizada uma campanha de campo para reconhecimento e coleta de material rochoso (Figura 1). O município está localizado no centro-norte da Bahia, e a 477 quilômetros da capital baiana, Salvador, o município de Irecê se encontra na região setentrional da Chapada Diamantina, em uma área que comporta as Bacias Hidrográficas dos Rios Verde e Jacaré (região do Rio São Francisco). Com uma área de 319,174km<sup>2</sup> e população de 74.507 pessoas (IBGE, 2022), o município está sob domínio do bioma Caatinga, com uma tipologia climática do tipo BSw<sub>h</sub> da Classificação de Köppen-Geiger, o que insere a região também no Polígono da Seca (SEI BAHIA, 2014, 2015).

Figura 1: mapa de localização do município de Irecê - Bahia



O principal acesso ao município, partindo de Salvador, se dá pela rodovia federal BR 324 até o município de Feira de Santana, seguido de trecho pela BR 116 e seguido da BA 052, conhecida como Estrada do Feijão, que ao longo do trajeto

percorre pelos municípios de Anguera, Ipirá, Baixa Grande, Morro do Chapéu, América Dourada, Ipanema e João Dourado, este último limita o município a leste junto a São Gabriel, Presidente Dutra e Lapão a norte, oeste e sul, respectivamente.

Figura 2 - registros da área de coleta



A, E, F - afloramentos rochosos da área de coleta; B, C - paisagem da área; D - estromatólitos mineralizados em fósforo

Fonte: autor, 2023

A área em que foi realizada a coleta das amostras está localizada nas coordenadas: Lat: 24L 193081 Long: 24L 8746843. A paisagem local apresenta vegetação típica de caatinga, com afloramentos rochosos, bem como, ocorrências de níveis de estromatólitos associados aos depósitos de fosfatos da área, com altas concentrações de  $P_2O_5$ . A atividade de campo foi realizada em julho de 2023 ao Alvo Juazeiro, área que há época já apresentava potencial exploração de fosfato pela Mineradora Galvani, no município de Irecê – Bahia. No ano de 2024, a mineradora anunciou a ampliação de sua planta de mineração e iniciou de suas atividades na área para prospecção de concentrados fosfáticos e de calcário agrícola (Galvani Fertilizantes) (Figura 2 A - F).

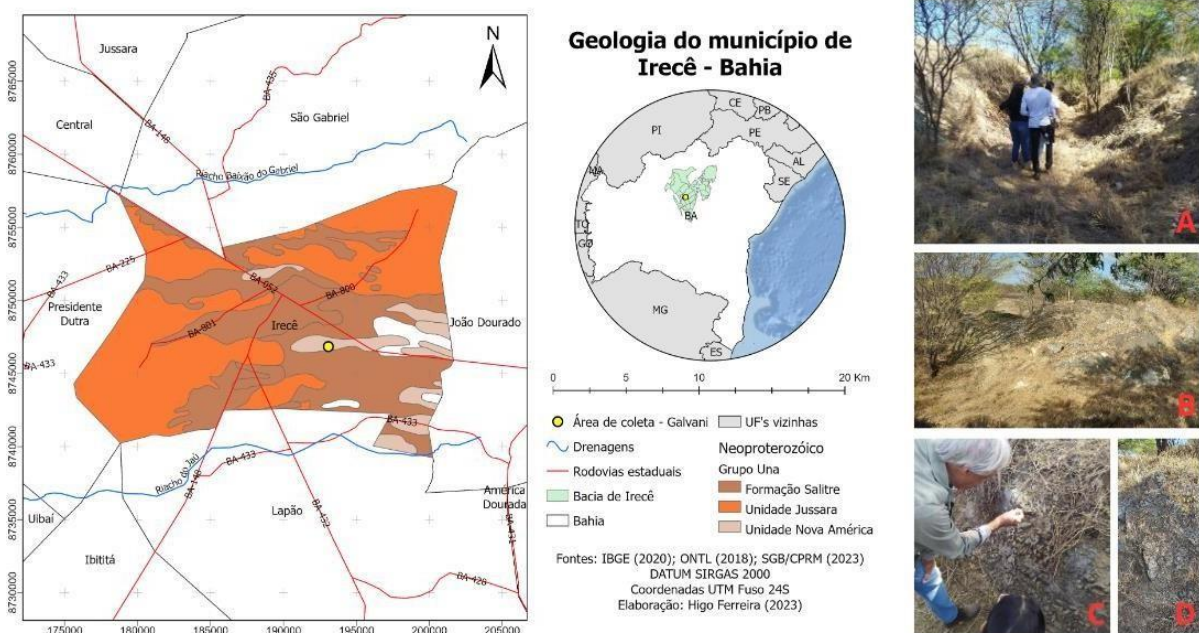
#### 1.4.2 GEOLOGIA DA ÁREA

Em aspectos geológicos, o município, junto a outros da região centro-norte baiano, está localizado na Bacia de Irecê, que se configura como a principal

ocorrências de coberturas sedimentares neoproterozoicas da porção norte do Cráton do São Francisco (Kuchenbecker; Reis; Fragoso, 2011), onde se encontra o seu Supergrupo homônimo. Este Supergrupo, que apresenta espessura máxima de 1.000 metros de rochas sedimentares carbonáticas e siliciclásticas, acumuladas no período criogeniano (850 - 630Ma.) (Barbosa, 2012).

Os registros dessa sedimentação na porção da Chapada Diamantina e na região oeste do estado da Bahia, sendo o primeiro representado pelas formações Bebedouro e Salitre, incluídos no Grupo Una, e o segundo, compreendido pelas formações Jequitaí, do Grupo Macaúbas, e Serra Santa Helena, Sete Lagoas, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade, todas do Grupo Bambuí (Barbosa, 2012).

Figura 3: Localização de Irecê (geologia) - Bahia



A - paisagem da área de coleta; B - afloramento rochoso; C, D - estromatólitos fosfático  
Elaboração: autor, 2023

Destaca-se nesta pesquisa a Formação Salitre, que foi, por Bomfim et al. (1985), subdividida em quatro unidades litofácies carbonáticas e siliciclásticas, que receberam as denominações de Nova América, Gabriel, Jussara e Irecê, sendo a primeira a unidade que corresponde ao local de coleta das amostras analisadas, pertencentes à Mineradora Galvani Indústria, Comércio e Serviços Ltda (Figura 3). Segundo Barbosa (2012), esta unidade se caracteriza por apresentar associações de rocha carbonática com mineralizações de Zn, Pb, Barita e concentrações de fosfato. O mesmo diagnóstico foi feito por Misi e Veizer (1998), ao denominar a unidade por

B1, que segundo os autores, é a mais importante economicamente, apresentando estromatólitos fosfáticos e as mineralizações de sulfeto de Pb-Zn.

### **1.4.3 DESCRIÇÃO GERAL**

A proposta de desenvolvimento da pesquisa se deu em três fases distintas de atividades, em que todas se propuseram em elaborações de artigos que compõem os capítulos da dissertação. A Figura 4 apresenta um panorama geral das etapas realizadas. A etapa um ocorreu, inicialmente, com o processo de coleta de dados bibliográficos, que agregaram na construção do referencial teórico e conceitual com os principais temas relacionados à pesquisa: agrominerais, fósforo, Sensoriamento Proximal, técnica de rochagem e acidez do solo. Ainda na etapa um, foram realizadas as atividades pré-campo e de campo, em que foi realizado a caracterização e atividade de reconhecimento das áreas de estudo e coleta das amostras de rochas e solos utilizados nos municípios de Feira de Santana e Irecê - Bahia.

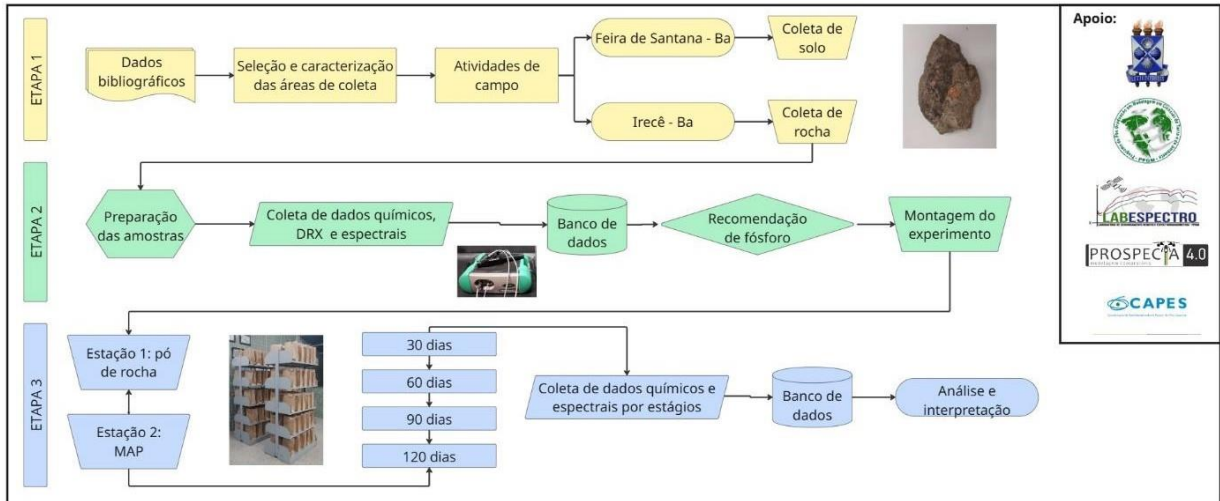
A presente pesquisa bem como, o local de coleta das amostras de fosfato foram pré-definidas pelo Projeto PROSPECTA 4.0 - Infraestrutura de pesquisa e desenvolvimento tecnológico para modelagem exploratória de depósitos de minerais estratégicos - aprovado na Chamada CNPq/CT-Mineral/CT-Energ Nº 27/2022 - PD&I para o desenvolvimento integral das cadeias produtivas de Minerais Estratégicos. A área para esta etapa abrange o município de Irecê localizado no estado da Bahia.

Já os solos utilizados no teste de incubação foram coletados na área experimental do curso de Agronomia - Equipe de Estudo e Educação Ambiental (EEEA) - localizado no campus da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), no município de Feira de Santana - BA. A escolha da área ocorreu em decorrência da facilidade de acesso para coleta, além do mesmo apresentar requisito químico pré-determinado para a realização do experimento, que foi a baixa disponibilidade do macronutriente alvo, o fósforo, para viabilizar o diagnóstico da incorporação do material rochoso através da incubação.

As amostras foram coletadas da camada arável do solo (0-20 cm), de forma aleatória em glebas homogêneas, a fim de garantir uma maior representatividade do material de toda a área. Seus dados físicos indicam para um solo de textura areia franca, com um teor de 800 g/kg de areia (equivalente a 80%) (Quadro 1). Já o pó de rocha apresentou um diferencial que é em relação ao seu material de origem ser sedimentar. Essa característica viabilizou, sobretudo, o processo de solubilização do

material durante o teste de incubação e conseqüentemente, maior ou menor disponibilidade do fósforo ao longo do tempo avaliado.

Figura 4: fluxograma metodológico geral



Elaboração: autor, 2024

Posterior às atividades iniciais, a etapa dois concentrou-se nos processos laboratoriais e de preparo. Foram realizados os preparos e coletas das assinaturas espectrais, caracterização mineralógica, através da Difractometria de Raio-X (DRX), e caracterização química das amostras, o que agregou na construção de um banco de dados além de, auxiliarem nos cálculos de recomendação de fósforo, tendo como parâmetro os resultados das análises químicas do solo testemunho, do pó de rocha e do fertilizante sintético utilizados nos testes.

Por fim, a etapa três foi direcionada para a atividade experimental com os materiais fosfatados. Para o teste foi utilizado o solo da estação experimental da Equipe de Estudos e Educação Ambiental (EEEA/UEFS), que passou pelo processo de secagem por 24hs ao ar, seguido de peneiramento em malha de 2mm, e posterior pesagem e ensacamento, com quantidades de 1,5 kg. A quantidade foi determinada com base nas retiradas mínimas mensais para análises químicas e espectrais de cada unidade amostral.

O experimento foi composto por duas estações, referentes a cada um dos materiais utilizados. Além do pó de rocha, foi utilizado o Fosfato Monoamônico (ou Monoamonic Phosphate - MAP), um fertilizante sintético, comercial, amplamente utilizado no segmento agrícola. Sua escolha foi definida para fins comparativos com a fonte alternativa e mais viável em custo, que é o pó de rocha.

O teste de incubação foi realizado nas dependências do prédio de Pós-

graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM), e acompanhado ao longo de quatro meses, em que mês a mês foram realizadas as coletas de amostras para análises químicas e espectrais, que agregaram ao banco de dados da dissertação e posteriormente interpretados para a elaboração dos artigos.

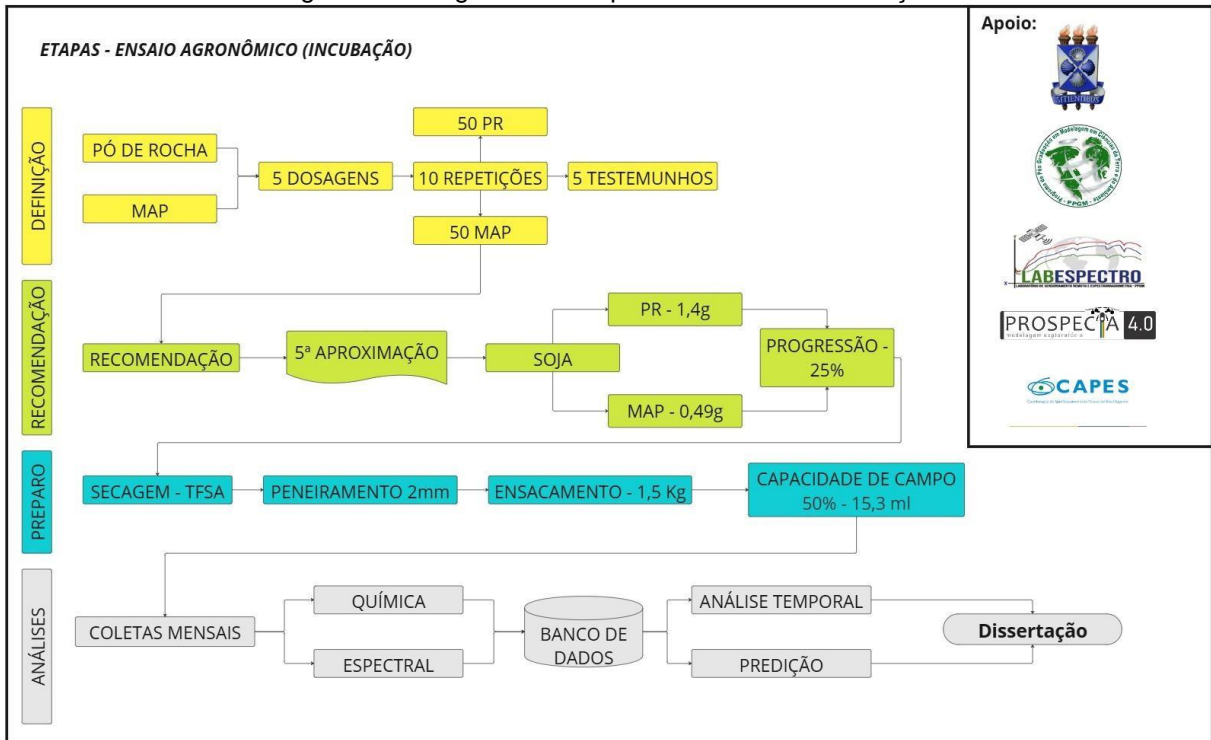
Por ser um experimento agrônomico e necessitar de adaptações para suas realizações, a seguir, será apresentado a metodologia detalhada de todas as etapas realizadas para se alcançar os resultados apresentados no artigo um e dois da dissertação.

#### **1.4.4 ENSAIO AGRONÔMICO - INCUBAÇÃO**

##### **1.4.4.1 Etapas experimentais:**

A figura 5 a seguir destaca todas as etapas executadas no experimento agrônomico de incubação, desde o preparo do solo às análises utilizadas para a interpretação dos dados obtidos. É importante salientar que o delineamento amostral foi casualizado e definido de maneira que houvesse o máximo de repetições possíveis em sua execução - 2 materiais fosfatados (pó de rocha e MAP), 5 dosagens de cada material e 10 repetições para cada dose, totalizando em 100 unidades amostrais, sendo 50 de pó de rocha de calcário calcítico e 50 de fertilizante sintético de fosfato monoamônico (MAP). Além, de 5 unidades amostrais testemunho.

Figura 5: Fluxograma de etapas do ensaio de incubação



Elaboração: autor, 2025

**1.4.4.2 Insumos e solo utilizado:**

Os parâmetros físico-químicos dos materiais utilizados no experimento encontram-se na tabela abaixo. As áreas de coletas e características já foram descritas anteriormente.

Tabela 1: Parâmetros físico-químicos do solo e insumos utilizados

Solo	Unid	cmol/dm <sup>3</sup>							mg/dm <sup>3</sup>		cmol/dm <sup>3</sup>		%	g/Kg		
	pH	Ca	Mg	Ca + Mg	Ca/Mg	Na	Al	Al + H	P	K	SB	CTC	V	Areia	Silte	Argila
	5,4	1,19	1,28	2,47	0,93	0,02	0,10	3,00	1	84	2,70	5,70	47,37	800	80	120
		%														
Pó de rocha	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	S	Cu	Fe	Mn	Zn	N						
	35,336	27,623	0,033	9,629	0,48	0,002	0,328	0,007	0,001	-						
MAP	-	61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12

Elaboração: autor, 2024

**1.4.4.3 Recomendação:**

A etapa inicial do experimento resultou na definição das recomendações de pó

de rocha e MAP para a dosagem mínima em cada unidade experimental. Devido a falta de metodologia padrão para a definição de uma recomendação de material rochoso, foi realizada uma recomendação igual ao padrão estabelecido para fertilizantes sintéticos. Foi usado como base o Manual de Recomendações para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais, de 1999. Justifica o seu uso devido a ausência de uma referência atualizada de manual para o estado da Bahia, apresentando assim, o manual de Minas Gerais o mais próximo em questões de padrões pedológicos. Foi adotado como padrão de recomendação a cultura da soja, por ser de ciclo curto a médio.

Diante os parâmetros pré-definidos, foi obtida uma dosagem mínima de 1,4g de pó de rocha e 0,49 g de MAP para as unidades experimentais. Porém, com o objetivo também de acompanhar a disponibilização do fósforo a partir de doses dos dois materiais, foi definido uma progressão das mesmas em 25% do valor inicial, e ao final da 5<sup>o</sup> dose, obteve-se um valor de 100% da dose inicial.

#### **1.4.4.4 Preparo das amostras:**

Após coleta na área experimental da EEEA/UEFS, os solos foram postos à secagem ao ar livre, seguindo o protocolo de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). Seguido do processo de peneiramento em peneira de 2 mm, ensacadas em sacos plásticos de polietileno, em que cada unidade amostral continha 1,5 kg de solo. Esta quantia foi definida com base nas retiradas que seriam realizadas ao longo dos meses avaliativos para as análises químicas e espectrais.

Após a etapa de ensacamento, as amostras foram separadas e postas em sacos de papelão, tipo kraft, para minimizar os efeitos de temperatura e possíveis interferências na execução do experimento. As unidades experimentais foram amarradas e nas suas aberturas foram colocados canudos plásticos, para viabilizar as trocas gasosas com o meio (Figura 5).

Figura 6: Unidades experimentais



Fonte: autor, 2024

As rochas utilizadas passaram pelo beneficiamento da britagem, onde assumiram o tamanho particular de 0,3 mm (ABNT, nº 50), adequado às especificações da Instrução Normativa nº 5 de março de 2016, que define, dentre as naturezas físicas dos remineralizadores, o pó de rocha com nessas condições (BRASIL, 2016). E o material sintético, fosfato monoamônico (MAP), foi adquirido em comércio de produtos agropecuários.

As amostras seguiram a seguinte codificação: “CPDx – y” ou “CMDx-y”, onde CP são as amostras de PR e CM as amostras com MAP. Os valores de “Dx” correspondem às doses aplicadas e “y” ao tempo de incubação, que variou de 30 a 120 dias.

#### 1.4.4.5 Capacidade de campo:

A capacidade campo, que se refere à ocupação dos microporos dos solos por água (água capilar - disponível para absorção pelas raízes das plantas). Foi pesado aproximadamente 100 g de solo peneirado e seco, posto em copo descartável, e perfurado suas bases. Com o uso de uma proveta, foi montado um sistema contendo um funil e o solo avaliado. Adicionou-se lentamente 100 mL de água no solo. Foi aguardado pelo menos duas horas para a completa drenagem da água do solo. Após

esta etapa, foi feita a leitura do volume coletado da proveta e calculo a capacidade de campo do solo, utilizando a seguinte fórmula:

**CC = água.retida.no.solo(mL) x (100%) / volume.do.solo(mL), onde,**

- **CC** = capacidade de campo do solo, em % de volume de solo utilizado.
- **Água retida no solo** = volume de 100 mL - volume de água coletado na proveta(mL).
- **Volume de solo no funil** = 100 mL.

Para atribuir o real volume de água a ser adicionado nas unidades amostrais, contendo 1,5 kg de solo, foi levado em consideração o seu teor de argila (apresentado em análise física realizada previamente), que é de 120g/kg de solo. Esse critério foi estabelecido já que são as argilas que fazem parte do processo de microporos do solo, que é de interesse para se chegar à capacidade de campo do mesmo.

Sendo assim, foram feitos os seguintes cálculos:

Cálculo 1: determinação da quantidade de água para manter a CC em 50%.

$\begin{array}{l} 120\text{g} - 1000\text{g (1kg)} \\ x\text{g} - 100\text{g } x = 12\text{g} \end{array}$	<p>Avaliar a quantidade de argila a cada 100g de solo.</p>
$120\text{g} - 1\text{kg } x\text{g} - 1,5\text{kg } x = 180\text{g}$	<p>Avaliar a quantidade de argila em 1,5 kg de solo (quantidade determinada para cada unidade experimental do ensaio agrônômico).</p>
$\begin{array}{l} 180\text{g} - 100\% \\ \text{(das argilas estarem ocupadas por água)} \\ x\text{g} - 50\% \\ x = 90\text{g de argila} \end{array}$	<p>Quantidade de argila ocupada por água</p>
$\begin{array}{l} 17\text{ml} - 100\text{g (do solo)} \\ x\text{ml} - 180\text{g} \\ x = 30,6\text{ ml (100\% da capacidade de campo)} \end{array}$	<p>17ml foi a quantidade de água retida em 100g de solo, e 30,6 ml a quantidade retida em 180g (argilas em 1,5 kg do solo).</p>
$\begin{array}{l} 30,6\text{ ml} - 100\% \\ x\text{ml} - 50\% \\ x = 15,3\text{ ml} \end{array}$	<p>Definindo os 50% da capacidade de campo a ser mantida resultou em uma adição de 15,3 ml de água em cada unidade experimental.</p>

Elaboração: autor, 2025

A justificativa da porcentagem definida para alcançar 50% da capacidade de campo foi uma decisão tomada devido às condições de umidade que as amostras já se encontravam logo, foi adotado um padrão para que não houvesse uma possível e futura saturação das amostras, e assim comprometer algum parâmetro químico nos resultados das análises.

#### **1.4.4.6 Análises:**

A cada 30 dias de avaliação, foram realizadas coletas de amostras para análises químicas e espectrais. Para as análises químicas foram preparadas amostras compostas de cada dose aplicada de cada material utilizado. Foram definidas 10 amostras simples para cada amostra composta, totalizando em 10 amostras compostas enviadas a cada quatro meses para as análises e monitoramento da evolução e disponibilização de nutrientes para os solos incubados.

Para a análise espectral, foi feita a coleta de cerca de 120 gramas de solo de cada unidade amostral, que passaram pelo processo secagem em estufa a 45° C por 24 horas, para retirada da umidade (fator que influencia nas leituras espectrais). Além disso, foram peneiradas em malha de 1mm, para uniformizar as partículas das amostras e evitar efeitos de retroespalhamento e sombreamento no momento de interação do sensor com o alvo, e também evidenciar as suas absorções. Posteriormente, foram postas em placas de petri para a análise. Foi utilizado o espectrorradiômetro ASD Inc. - FieldSpec 4 Hi-Res, que contempla as bandas de 350 a 2500 nm (VIS-NIR-SWIR).

Este protocolo foi executado em todas as unidades amostrais, e a cada leitura foram extraídas três assinaturas espectrais por amostras (totalizando em 1200 espectros de todas as amostras no decorrer dos quatro meses de avaliação). Porém, para melhor entender o comportamento espectral, foi definida uma amostra composta por dose para a interpretação e avaliação se houve alterações e/ou padrões espectrais dos solos incubados com pó de rocha e MAP. Esta etapa foi adaptada seguindo os princípios metodológicos de análise espectral definidos por Ben-Dor; Ong; Lau (2015).

#### 1.4.4.7 Interpretação

Os dados químicos coletados de cada amostra composta analisada foram planilhas no software Excel, onde foram gerados gráficos para posterior avaliação e interpretação.

#### 1.4.4.8 Aplicação de Modelos Preditivos

Os dados espectrais, que foram coletados em triplicata, foram submetidos a processamentos utilizando a ferramenta *Spectral Math* no software *ENVI 5.3* (64-bit) para gerar uma assinatura média representativa de cada amostra. Estas assinaturas, juntamente com dados químicos das amostras foram submetidos a calibração de modelos preditivos (PLSR e RF) para a predição de pH e fósforo, duas propriedades químicas que apresentaram resultados significativos na avaliação temporal das amostras. Esta etapa foi realizada com uso da linguagem R - RStudio, onde foi feito todo o tratamento estatístico e gráfico para predição.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAM, M. B. et al. **Projeto Fosfato Brasil - Parte I**. Salvador: CPRM, 2011. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/14807>. Acesso em: 15 mai. 2023.
- ABRAM, M. B. Capítulo I - Introdução. In: ABRAM, M. B.; CUNHA, I. de A.; ALMEIDA, R. C de. **Projeto fosfato Brasil, parte II**. Salvador: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2016. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/16142>. Acesso em: 07 out. 2023.
- ABRAM, M. B. **Fosfato no Brasil**. In: Adolpho José Melfi, Aroldo Misi, Diogenes de Almeida Campos e Umberto Giuseppe Cordani (organizadores). Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. 423p. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/bitstreams/16cc62e4-5bb0-4063-88ee-96c3335d4694>. Acesso em: 21 mai. 2023.
- ALMEIDA, M. E. de et al. **Diretrizes para avaliação dos minerais estratégicos: fosfato, potássio, terras raras e lítio**. Informes de Recursos Minerais: Série Minerais Estratégicos nº 1. Brasília: CPRM, 2015. Disponível em: [http://dspace.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17800/1/irm\\_minerais\\_estrategicos.pdf](http://dspace.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17800/1/irm_minerais_estrategicos.pdf). Acesso em: 15 mai. 2023.
- BAPTISTA, G. M. de M.; MADEIRA NETTO, J. da S.; SOUZA, D. T. M. de. Reflectância dos Solos. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de; BAPTISTA, G. M. de M. **Reflectância dos materiais terrestres: análises e interpretações**. Oficina de Textos: São Paulo, 2019, p. 163-187.

BEN-DOR, E.; ONG, C. LAU, I. C. Reflectance measurements of soils in the laboratory: Standards and protocols. *Geoderma*, 2015. p. 112-124. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.01.002>. Acesso em: 15 jul. 2024.

BLASKOWSKI, A. E. et al. **Projeto agrominerais da região de Irecê-Jaguarari**. In: *Informes de Recursos Minerais, Série Insumos Minerais*, nº 19. Salvador: CPRM, 2016, pág. 105.

DUDA, Bogdan M.; WEINDORF, David C.; CHAKRABORTY, Somsubhra; LI, Bin; MAN, Titus; PAULETTE, Laura; DEB, Shovik. Soil characterization across catenas via advanced proximal sensors. *Geoderma*, [S.L.], v. 298, p. 78-91, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706116308849>. Acesso em: 10 out. 2023.

BRAGA, P. F. A.; FRANÇA, S. C. A. **Lítio: um mineral estratégico**. In: *Série Estudos e Documentos*, 81. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1851>. Acesso em: 15 mai. 2023

BRASIL a. **Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021**. Brasília, 2021. Institui a Política de Apoio ao Licenciamento Ambiental de Projetos de Investimentos para a Produção de Minerais Estratégicos - Pró-Minerais Estratégicos, dispõe sobre sua qualificação no âmbito do Programa de Parcerias de Investimentos da Presidência da República e institui o Comitê Interministerial de Análise de Projetos de Minerais Estratégicos. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pro-minerais-estrategicos/ctapme-2/decreto-10657-de-24-de-marco-de-2021.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2023.

BRASIL b. **Resolução nº 2, de 18 de junho de 2021**. Brasília, 2021. Define a relação de minerais estratégicos para o País, de acordo com os critérios de que trata o art. 2º do Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pro-minerais-estrategicos/ctapme-2/resolucao-no-02.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2023.

BRASIL, **Lei Federal Nº 12.890**, de 10 de dezembro de 2013. Regulamenta o art. 3, e), altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2013/lei/l12890.htm#:~:text=%E2%80%9CDisp%C3%B5e%20sobre%20a%20inspe%C3%A7%C3%A3o%20e,%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias.%E2%80%9D](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/l12890.htm#:~:text=%E2%80%9CDisp%C3%B5e%20sobre%20a%20inspe%C3%A7%C3%A3o%20e,%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias.%E2%80%9D). Acesso em: 25 abr. 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.890 de 10 de dezembro de 2013**. Brasília, 2013. Altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2013/lei/l12890.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/l12890.htm). Acesso em: 19 mai. 2023.

BRASIL. Instrução Normativa Nº, de 10 de março de 2016. Ficam estabelecidas as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. 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>. Acesso em: 20 out. 2023.

BRASIL, Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. **Recuperado em**, v. 15, p. 59, 2016. Disponível em: [http://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/Brasil\\_Amigo\\_Pesso\\_Idosa/Agenda2030.pdf](http://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/Brasil_Amigo_Pesso_Idosa/Agenda2030.pdf). Acesso em: 07 out. 2023.

BRASIL. *Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2016-2022*. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2016.

BRASIL. *Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação: Sumário Executivo*. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2018.

CASTRO, F. F de. PEITER, C. C. GÓES, G. S. **Minerais estratégicos e críticos: uma visão internacional e da política mineral brasileira**. In: Texto para Discussão. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília: IPEA, 2022. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11197>. Acesso em: 15 mai. 2023.

COBLINSKI, João Augusto et al. Prediction of soil texture classes through different wavelength regions of reflectance spectroscopy at various soil depths. **Catena**, v. 189, p. 104485, 2020.

CORDELL, D.; WHITE, S. Sustainable phosphorus measures: strategies and technologies for achieving phosphorus security. **Agronomy**, v.3(1), p.86–116, 2013. doi.org/10.3390/agronomy3010086. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/3/1/86>. Acesso em: 10 out. 2023.

CORDELL, D.; WHITE, S. Peak Phosphorus: Clarifying the Key Issues of a Vigorous Debate about Long-Term Phosphorus Security. **Sustainability**, v.2011(3), p.2027–2049, 2011. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/3/10/2027>. Acesso em: 10 out. 2023.

CORDELL, D.; NESET, T. S. S. Phosphorus vulnerability: A qualitative framework for assessing the vulnerability of national and regional food systems to the multidimensional stressors of phosphorus scarcity. **Global Environmental Change**, n.24, p.108-122, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959378013001970>. Acesso em: 10 out. 2023.

CHAKRABORTY, S.; LI, B.; WEINDORF, D. C.; DEB, S.; ACREE, A.; DE, P.; PANDA, P.. Use of portable X-ray fluorescence spectrometry for classifying soils from different land use land cover systems in India. **Geoderma**, [S.L.], v. 338, p. 5-13, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.043>.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706118309741>. Acesso em: 15 out. 2023.

CHAKRABORTY, Somsubhra; WEINDORF, David C.; MORGAN, Cristine L.s.; GE, Yufeng; GALBRAITH, John M.; LI, Bin; KAHN, Charanjit S.. Rapid Identification of Oil-Contaminated Soils Using Visible Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy. **Journal Of Environmental Quality**, [S.L.], v. 39, n. 4, p. 1378-1387, jul. 2010. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2010.0183>. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/jeq2010.0183>. Acesso em: 15 out. 2023.

DALCIN, G. et al. Efeitos da Aplicação do Pó de Rocha em Argissolo sobre o Crescimento de Alface. **XVII mostra de iniciação científica, pós graduação, pesquisa e extensão. UCS**, 2018.

DUDA, B. M.; WEINDORF, D. C.; CHAKRABORTY, S.; LI, B.; MAN, T.; PAULETTE, L.; DEB, S. Soil characterization across catenas via advanced proximal sensors. **Geoderma**, [S.L.], v. 298, p. 78-91, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706116308849>. Acesso em: 15 out. 2023.

**GALVANI FERTILIZANTES**. Disponível em: <https://galvanifertilizantes.com/>. Acesso em: 27 fev. 2025.

GOMES, R. P. **Mapeamento de fósforo por técnicas de espectroscopia VIS-NIR e suscetibilidade magnética dos solos do Planalto Ocidental Paulista**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/204801>. Acesso em: 07 de out. 2023.

HUNT, G. R. SPECTRAL SIGNATURES OF PARTICULATE MINERALS IN THE VISIBLE AND NEAR INFRARED. **Geophysics**, [S.L.], v. 42, n. 3, p. 501-513, abr. 1977. Society of Exploration Geophysicists. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1440721>. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.1440721>. Acesso em: 15 out. 2023.

IFA. **Phosphate Rock Resources & Reserves**. International Fertilizer Association: Argus/IFA, 2023. Disponível em: <https://www.fertilizer.org/resource/phosphate-rock-resources-reserves/>. Acesso em: 15 mai. 2023.

KOCH, J.; CHAKRABORTY, S.; LI, B.; KUCERA, J. M.; VAN DEVENTER, P.; DANIELL, A.; FAUL, C.; MAN, T.; PEARSON, D.; DUDA, B.. Proximal sensor analysis of mine tailings in South Africa: an exploratory study. **Journal of Geochemical Exploration**, [S.L.], v. 181, p. 45-57, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.06.020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0375674217304697>. Acesso em: 15 out. 2023.

LOUREIRO, F. E. L.; MONTE, M. B. de M.; NASCIMENTO. **Agrominerais - Fosfato**. In: LUZ, A. B. da.; LINS, F. A. F. (edt). Rochas & Minerais Industriais: uso e especificações. 2ed, 2005. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/publicacoes/livros/rmi/07-AGROMINERAIS-FOSFATO.pdf>. Acesso: 15 mai. 2023.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de; BAPTISTA, G. M. de M. **Reflectância dos materiais terrestres: análises e interpretações**. Oficina de Textos: São Paulo, 2019.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de. Reflectância das Rochas. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de; BAPTISTA, G. M. de M. **Reflectância dos materiais terrestres: análises e interpretações**. Oficina de Textos: São Paulo, 2019, p. 163-187.

POTAFOS. **Publicações POTAFOS**, Arquivo do Agrônomo no 10 – Nutri-fatos, 2005. 24 p. Disponível em: [www.ppi.ppic.org](http://www.ppi.ppic.org). Acesso em: 15 mai. 2023.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ-V., V. H. COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais**. 5. ed. Viçosa: UFV, 1999.

RESENDE, A. V. de.; FURTINI NETO, A. E.; MARTINS, E. de. S.; HURTADO, S. M. C.; OLIVEIRA, C. G. de.; SENA, M. C. de. **Protocolo de Avaliação Agronômica de Rochas e Produtos Derivados como Fontes de Nutrientes às Plantas ou Condicionadores de Solo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012, p. 32. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/939641/protocolo-de-avaliacao-agronomica-de-rochas-e-produtos-derivados-como-fontes-de-nutrientes-as-plantas-ou-condicionadores-de-solo>. Acesso em: 20 out. 2023.

SOUZA, A. E. de; FONSECA, D. S. Fosfato. **Anuário Mineral. Departamento Nacional de Produção Mineral: DNPM**, 2008. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/7-2-fosfato>. Acesso em: 15 mai. 2023.

STRALIOTTO, R.; TEIXEIRA, P. C.; POLIDORO, J. C.; BENITES, V. de M. **Capítulo 6 - crescente importância de fertilizantes, condicionadores e novas fontes de nutrientes para solos tropicais**. In: TORRES, L. A.; CAMPOS, S. K. Megatendências da Ciência do Solo 2030. Brasília - DF: Embrapa, 2020, p. 129.

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use**. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18. Rome, Italy, 2008. Disponível em: Acesso em: 10 out. 2023.

TAVARES, T.R.; MOLIN, J.P.; NUNES, L.C.; Wei, M.C.F.; KRUNG, F.J.; de CARVALHO, H.W.P.; MOUAZEN, A.M. Multi-Sensor Approach for Tropical Soil Fertility Analysis: Comparison of Individual and Combined Performance of VNIR, XRF, and LIBS Spectroscopies. **Agronomy** 2021, 11,1028.<https://doi.org/10.3390/agronomy11061028>

THEODORO, S. H.; ALMEIDA, E de. Agrominerais e a construção da soberania em insumos agrícolas no Brasil. **Agricultura**. v. 10, n. 1. 2013, pág. 22-28. Disponível em: <http://aspta.org.br/files/2013/06/artigo-3.pdf>. Acesso em: 4 out. 2022.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O.; ROCHA, E. L.; REGO, K. G. Experiências no uso de Rochas Silicatadas como Fonte de Nutrientes; **Espaço & Geografia**. Vol. 9. Nº2, p. 263-292, 2006, ISSN: 1516-9375.

THEODORO, S. H.; TCHOUANKOUE, J. P.; GONÇALVES, A. O.; LEONARDOS, O.; HARPER, J. A importância de uma rede tecnológica de rochagem para a sustentabilidade em países tropicais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 06, p. 1390 - 1407, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/232929/26903>. Acesso em: 15 out. 2023.

VAN STRAATEN, P. **Agrogeology: the use of rocks for crops**. Cambridge, Ontário: Environquest, 2007. 440p.

WAN, Mengxue et al. Rapid estimation of soil cation exchange capacity through sensor data fusion of portable XRF spectrometry and Vis-NIR spectroscopy. **Geoderma**, v. 363, p. 114163, 2020.

ZAPATA, F.; ROY, R. N. eds. **Use of phosphate rocks for sustainable agriculture**. Fertilizer and Plant Nutrition Bull. 13, FAO, 2004. 172p. Disponível em: <https://edepot.wur.nl/481326>. Acesso: 12 mai. 2023

## CAPÍTULO 2 - ARTIGO 1

# DINÂMICA QUÍMICA DE SOLO ÁCIDO INCUBADO COM DIFERENTES FONTES DE FÓSFORO

Higo Batista Ferreira<sup>1</sup>  
Deorgia Tayane Mendes de Souza<sup>2</sup>

## RESUMO

O pH é um importante parâmetro indicativo das condições químicas do solo, influenciando diretamente a acidez e a disponibilidade de nutrientes. Em solos sujeitos à acidificação, é comum o uso de insumos sintéticos, como fertilizantes minerais, os quais apresentam implicações econômicas e ambientais, incluindo dependência de importação e riscos de eutrofização. Como alternativa sustentável, a aplicação de pós de rocha tem sido proposta como estratégia de remineralização do solo. O objetivo deste estudo foi avaliar, ao longo do tempo, as alterações químicas de um solo ácido incubado com doses de pó de rocha carbonática fosfatada e de fosfato monoamônico (MAP), e seus efeitos sobre a fertilidade do solo. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com dois insumos e cinco doses, além de um tratamento controle, sendo as avaliações químicas realizadas em períodos sucessivos ao longo de 120 dias de incubação, utilizando amostras independentes em cada tempo. Os tratamentos com pó de rocha apresentaram aumento do pH e maiores teores de cálcio e fósforo em comparação ao MAP, enquanto este último esteve associado à intensificação da acidez ao longo do período avaliado. Os resultados indicam o potencial do pó de rocha como insumo alternativo para melhoria das condições químicas do solo, no contexto avaliado.

**Palavras-chave:** Agrominerais; Carbonatos; MAP; Química do solo.

## ABSTRACT

Soil pH is an important indicator of soil chemical conditions, directly influencing acidity and nutrient availability. In soils subjected to acidification, the use of synthetic inputs, such as mineral fertilizers, is common; however, these inputs are associated with economic and environmental implications, including import dependency and risks of eutrophication. As a sustainable alternative, the application of rock powders has been proposed as a soil remineralization strategy. The objective of this study was to evaluate, over time, the chemical changes in an acidic soil incubated with increasing doses of carbonatic phosphate rock powder and monoammonium phosphate (MAP), and their effects on soil fertility. The experiment was conducted in a completely randomized design, with two inputs and five doses, in addition to a control treatment. Chemical analyses were performed at successive incubation periods over 120 days, using independent samples at each evaluation time. Treatments with rock powder resulted in increased soil pH and higher calcium and phosphorus contents compared to MAP, whereas MAP was associated with intensified soil acidification throughout the evaluated period. These results indicate the potential of rock powder as an alternative input for improving soil chemical conditions within the evaluated context.

**Keywords:** Agrominerals; Carbonates; MAP; Soil chemistry.

## 1 INTRODUÇÃO

A acidez e alcalinidade de um solo é definida pelo seu potencial hidrogeniônico (pH), que expressa o balanço da atividade entre os íons de hidrogênio (H)<sup>+</sup> e da hidroxila (OH)<sup>-</sup> na solução (Kuri; Kampf, 2012; Brady, Weil, 2013). É um parâmetro avaliativo de grande importância por indicar as condições químicas do solo, onde a longo prazo podem afetar sua gênese e a curto prazo, o crescimento das plantas (Lepsch, 2011).

No Brasil, devido a sua localização em uma zona tropical, onde os processos intempéricos são acentuados pela natural dinâmica climática que impacta nos processos de acidificação dos seus solos, e consequente reflexo na sua baixa disponibilidade de nutrientes (Almeida *et al.*, 2022; Rabel *et al.*, 2018), estas atividades reativas se mostram desbalanceadas, o que o coloca em uma constante demanda por insumos que revertam ou minimizem esta realidade.

Estas demandas refletem na dependência do país na importação de insumos que viabilizem a produção de seus fertilizantes químicos, sobretudo os compostos com nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), que apresentam alta solubilidade e grandes impactos ao meio ambiente, como a poluição e eutrofização de recursos hídricos. O potássio (K), que apresenta reservas mal distribuídas e utilizado no Brasil, por exemplo, é quase todo importado de países como Rússia e Canadá (Ramos *et al.*, 2017; Manning, 2015).

Uma alternativa para este problema é a utilização de rochas com capacidades remineralizantes e corretoras do solo, técnica que ganhou destaque no Brasil a partir da década de 90 e anos 2000 com a formação do movimento denominado por Rochagem, que institucionalizou o uso de pós de rocha na agricultura através da Lei nº 12.890 de 10 de dezembro de 2013, e mais tarde, a publicação das Instruções Normativa 05 e 06 que estabeleceram as normas desde a classificação a comercialização destes insumos (Manning e Theodoro, 2020; Swoboda, Doring, Harmer, 2022; Brasil, 2013, 2016).

O uso de pós de rocha, tem apresentado boas avaliações acerca de sua eficiência nas mudanças de comportamento químico do solo, além de ser um insumo de baixo custo, sustentável e de menor impacto sobre o meio ambiente (Almeida *et al.*, 2022; Dalmora *et al.*, 2020; Jama e Van Straaten, 2006; Souza *et al.*, 2018; Theodoro e Leonardos, 2014; Theodoro *et al.*, 2006; Van Straaten, 2007). Como alternativa corretiva, este uso é popularmente conhecida por calagem, onde acontece a alteração do pH do solo a partir da utilização de rochas sedimentares calcárias que liberam cálcio ou cálcio e magnésio, importantes macronutrientes para as culturas (Ronquim, 2020; Olego *et al.*, 2021; Weirich Neto *et al.*, 2000).

Em contrapartida, o uso de fertilizantes sintéticos como o fosfato monoamônico, ainda que muito aplicado na agricultura, sobretudo por sua alta concentração em fósforo e alta solubilidade, potencializa, ao longo do tempo, os processos de salinização e acidificação do solo, e quando lixiviados, podem

contaminar corpos hídricos e desenvolver a eutrofização dos mesmos (Brownrigg; McLaughlin; McBeath, 2022; Liu *et al.*, 2021; Chien *et al.*, 2010).

A recomendação de fertilizantes baseia-se nas análises químicas do solo, sobretudo no pH, parâmetro fundamental para a disponibilidade de nutrientes. Sua determinação pode ocorrer em água, KCl ou  $\text{CaCl}_2$ , sendo a leitura em água a opção mais simples e econômica (Ronquim, 2020), adotada neste estudo. Em solos altamente intemperizados, onde a acidez é naturalmente elevada, o pH torna-se ainda mais relevante para monitorar as mudanças químicas promovidas pelos insumos. Nesse cenário, o pó de rocha carbonático-fosfatado destaca-se por fornecer P, Ca e Mg e contribuir para a correção da acidez ativa, além de representar uma prática sustentável que integra agricultura e mineração com menor impacto ambiental.

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar, temporalmente, as alterações químicas de solo ácido incubado com doses de pó de rocha carbonático-fosfatada e com fertilizante fosfatado sintético monoamônico, e seus efeitos na fertilidade.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento aconteceu nas dependências do Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), no município de Feira de Santana, Bahia, entre os meses de maio e setembro de 2024. O município está localizado há pouco mais de 100 km de Salvador, capital do estado, com classificação climática megatérmico com chuvas de inverno e verão quente (Asa), segundo metodologia de Koppen (1931) (Santos; Martins; Santos, 2018). Foram utilizados sacos plásticos com capacidade de 5kg, que foram preenchidos com 1,5 kg de solo em classe textural areia franca, coletados em profundidade de 0-20 cm na área experimental do curso de Engenharia Agrônoma da UEFS. Após a coleta, os solos foram secos sob protocolo de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) durante 48 horas e homogeneizados.

Antes de serem incubadas, as amostras não passaram por quaisquer tipos de tratamento corretivo. Foi feita a caracterização química do substrato para avaliar suas condições e determinar a recomendação à fertilização, onde foi definido a necessidade de elevar os teores de fósforo, tendo em vista a sua baixa concentração no solo, e a alta concentração de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ao material de pó de rocha testado (Tabela 1). Para a recomendação a incubação foi utilizado o Manual de

Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação, de 1999 (Ribeiro; Guimarães; Alvarez, 1999), tendo como referência a cultura da soja.

Para análise química do pó de rocha (PR), teve como referência o Manual de Métodos Analíticos Oficiais de Fertilizantes, Corretivos, Substratos, Condicionadores e Remineralizadores de Solo (Brasil, 2023), para definição de K<sub>2</sub>O total, CaO total, MgO total, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, S e Fe, Zn, Cu e Mn (Tabela 1).

O solo utilizado foi analisado sob os métodos de Silva *et al.*, (1998), apresentando pH (H<sub>2</sub>O) de 5.4, Ca de 1.19 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>, Mg de 1.28 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> e Al 0.1 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>. O K de 0.21 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> e Na de 0.02 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>. O P de 1 mg/dm<sup>3</sup>, 3.0 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> de H+Al, 2.7 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> de Soma de Bases, CTC de 5,7 cmol c/dm<sup>3</sup> e 47,3 % de Saturação de Base.

Para determinação da composição mineralógica do PR utilizado foram realizadas análises com o difratômetro de Raio-X (DRX) Bruker D2 Phaser 2nd Gen, operando com radiação Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ), a uma tensão de 30 kV e corrente de 10 mA. A varredura foi conduzida na faixa de 10° a 90° 2 $\theta$ , com passo de 0,200° e tempo de contagem de 1 segundo por passo. Foram identificados os picos característicos de fluorapatita, calcita, dolomita indicando que o material apresentava minerais carbonáticos e fosfáticos, que contribuíram para o processo corretivo e de disponibilidade de macronutrientes. Foi identificado também o quartzo, complementando o fornecimento do silício (Si) nos solos incubados.

O material utilizado foi uma rocha calcária, coletada em uma área desativada de mineração, localizada na região da Bacia de Irecê, no município de Irecê, Bahia. O material foi moído adotando a granulometria de 0.3mm (ABNT n°50), enquadrando-se nos critérios de natureza física definidos pela Instrução Normativa n° 5, de 10 de março de 2016 (Brasil, 2016). Além do PR, que passou por análises químicas para determinação de seus principais elementos, detectados na forma de óxidos (Tabela 1), também foi utilizado o fertilizante sintético de fosfato monoamônico (MAP), um fertilizante amoniacal que dentre os oferecidos comercialmente, é o que apresenta as maiores concentrações de fósforo (Tabela 1).

Tabela 1: Parâmetros químicos do pó de rocha e MAP

Material	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	S	Cu	Fe	Mn	Zn
				%					
PR	35,33	27,623	0,033	9,629	0,48	0,002	0,328	0,007	0,001
	6								
MAP	-	61	-	-	-	-	-	-	-

Elaboração: autores, 2024

O experimento foi totalmente casualizado definido no seguinte esquema fatorial - 2x5x10, onde foi utilizado dois insumos: PR e MAP, aplicados em cinco tratamentos de doses distintas recomendadas - 120, 150, 180, 210, 240 kg ha<sup>-1</sup> para ambos materiais, equivalentes a 0, 25%, 50%, 75% e 100% em doses (Ferreira *et al.*, 2025). Todas as amostras estavam em 10 repetições para cada dose, totalizando em 100 unidades experimentais mais 10 unidades de testemunho, em que não foram inseridos qualquer tipo de insumo. A incubação manteve-se a 50% da capacidade de campo, e foi monitorada ao longo de 120 dias. A cada 30 dias foram coletadas 120g de cada unidade experimental e respectiva de cada dosagem para constituir uma amostra composta, que foram encaminhadas para análises químicas. Foram analisadas um total de 41 amostras compostas, sendo 20 para cada tipo de material incubado e uma de testemunho.

O experimento teve caráter observacional e exploratório. As avaliações químicas do solo foram realizadas em tempos distintos de incubação, utilizando-se amostras independentes em cada período, não havendo acompanhamento da mesma unidade experimental ao longo do tempo. Dessa forma, o fator tempo foi tratado como uma variável descritiva, impossibilitando a aplicação de modelos com medidas repetidas ou modelos lineares mistos, uma vez que não houve medições repetidas sobre a mesma unidade experimental, condição necessária para a modelagem de efeitos aleatórios associados ao tempo.

Foram ajustados modelos de regressão para avaliar a resposta da variável química pH do solo às doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em cada tempo de incubação, permitindo a identificação de tendências e padrões de resposta ao longo do período avaliado. E a Análise de Componentes Principais (PCA) foi empregada como ferramenta exploratória multivariada, visando integrar as variáveis químicas do solo e identificar associações entre atributos e fontes, sem pressupor relações causais. Estas análises foram realizadas em ambiente RStudio, versão 4.4.2 (R Core Team, 2023).

As amostras seguiram a seguinte codificação: "CPDx - y" ou "CMDx - y", onde

CP são as amostras de PR e CM as amostras com MAP, os valores de “Dx” correspondem às doses aplicadas e “y” ao tempo de incubação que variou de 30 a 120 dias.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 COMPORTAMENTO DO PH E FÓSFORO NOS SOLOS INCUBADOS

Como apresentado na Figura 1, o comportamento do pH está diretamente relacionado à disponibilização de fósforo (P) ao longo do tempo de avaliação do experimento. As amostras tratadas com PR apresentaram um incremento contínuo nos teores desse macronutriente essencial, que apresenta uma complexidade quanto à sua disponibilidade.

O pH do solo apresentou alterações expressivas nos primeiros 30 dias de incubação, especialmente nos tratamentos com PR. Em comparação ao controle (CT0), o pH aumentou de 5,4 para 5,8 com a dose inicial. A dose quatro registrou o maior valor (6,2), embora a dose três já alcançasse valor semelhante (6,1), indicando efeito corretivo consistente do material. Em contraste, as amostras tratadas com MAP apresentaram redução de pH, variando de 5,1 a 5,3, inferiores ao controle, evidenciando o comportamento acidificante desse fertilizante. Quando comparadas as dosagens de  $P_2O_5$ , notou-se um crescimento abrupto na disponibilização do fósforo neste período desde a dose inicial recomendada, saindo de  $1 \text{ mg/dm}^3$  do solo testemunho para  $90 \text{ mg/dm}^3$  nas amostras incubadas com PR mantendo-se crescente até a dose quatro e com um leve declínio na dose cinco, ainda que com um comportamento alto ( $266 \text{ mg/dm}^3$ ). Isso evidenciou uma resposta moderada ( $R^2 = 0,50$ ), o que indicou para o início da reação do material. O inverso aconteceu nas amostras com MAP, que nos 30 primeiros dias a dose explicou pouca variação do pH ( $R^2 = 0,04$ ) (Figura 1).

Estas alterações do pH de solos incubados com pó de rocha acontecem mediante a concentração dos óxidos de Ca e Mg no material, alterando a acidez e em alguns casos, neutralizando o  $Al^+$  (Conceição *et al.*, 2022), como o insumo avaliado no presente estudo, onde estas variações em todos os tratamentos com o PR foi reflexo da litologia da rocha utilizada, um calcário com elevadas concentrações de CaO (35,3%) (Tabela 1).

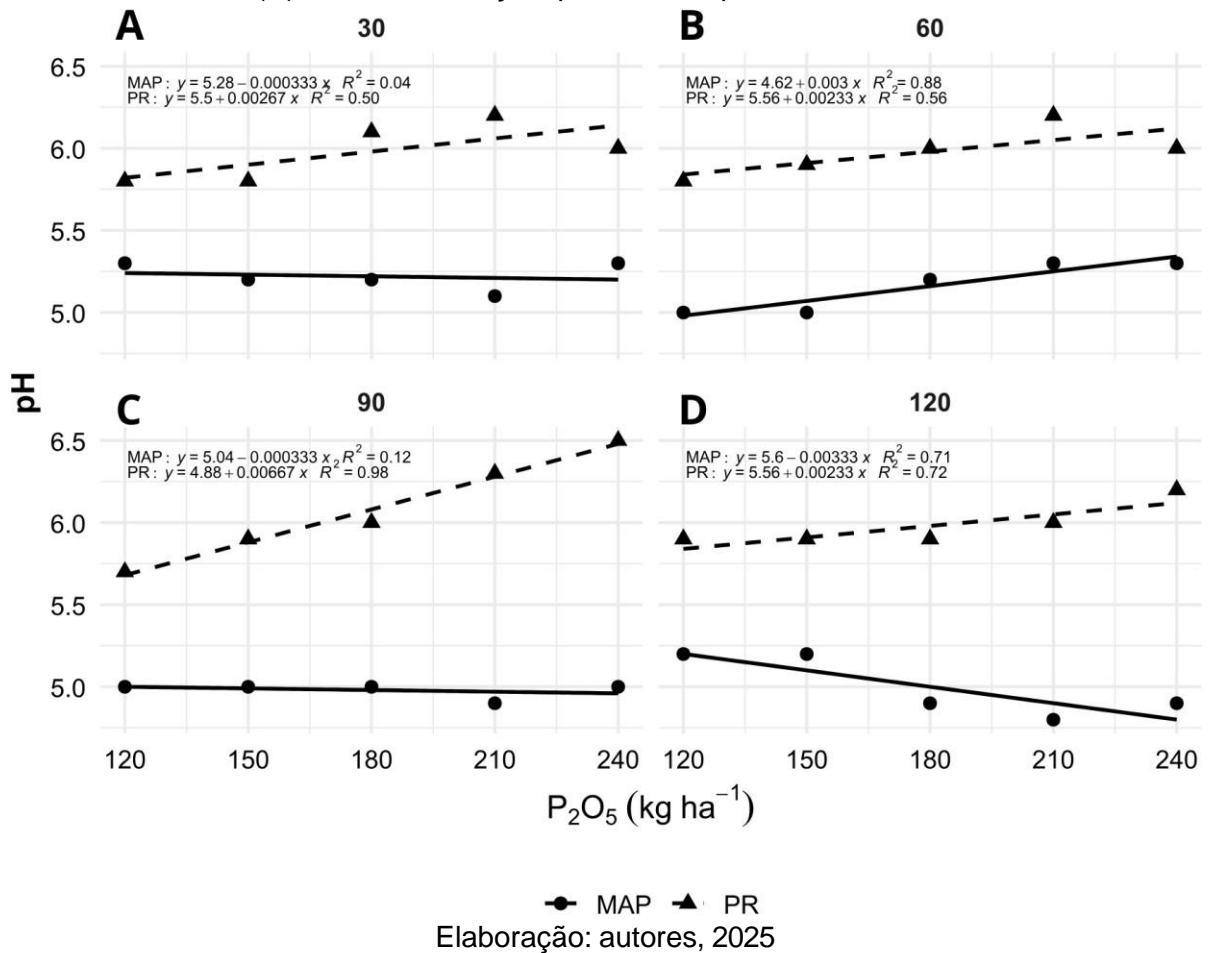
Em 60 dias o pH manteve-se relativamente estável em relação aos 30 dias

anteriores para ambos insumos (PR e MAP). O pó de rocha continuou apresentando melhor desempenho na dose quatro (6,2), enquanto as doses com MAP permaneceram entre 5,0 e 5,3, com os melhores valores obtidos nas doses quatro e cinco, e com uma capacidade elevada explicativa e consistente quanto ao efeito da dose ( $R^2 = 0,88$ ), questão que leva à estabilidade do efeito químico deste material. Já as amostras com PR mantiveram resposta moderada ( $R^2 = 0,56$ ), o que sugere a continuidade do processo de dissolução do material e suas interações no complexo de troca.

Aos 90 dias, observou-se evolução contínua no pH dos tratamentos com PR, com destaque para a dose cinco, que atingiu o maior valor de todo o experimento tanto em pH (6,5) quanto em P ( $389 \text{ mg/dm}^3$ ). Esta sensibilidade do P quanto à variação do pH está associado à: em solos com teores alcalinos, ele tende a se associar ao Ca e formar compostos insolúveis, e em solos ácidos, a associação pode acontecer com ferro e alumínio, por isso a sua faixa ideal oscila até o 6,5, onde se torna mais solúvel e disponível às culturas (Kennedy, 2022; Hinsinger, 2001; Hartemink; Barrow, 2023).

Em contraste, o MAP apresentou queda nos valores de pH, registrando 4,9 e 5,0 nas doses quatro e cinco, respectivamente. O comportamento nesse período evidencia uma inversão de padrão, com o PR apresentando forte relação entre dose e pH ( $R^2 = 0,98$ ), ao passo que o MAP mostrou baixa explicação da variabilidade ( $R^2 = 0,12$ ), inferindo-se à estabilização do sistema.

Figura 1: Regressão entre doses de  $P_2O_5$  e pH do solo aos 30 (A), 60 (B), 90 (C) e 120 (D) dias de incubação, para MAP e pó de rocha fosfatada.



Aos 120 dias, o PR apresentou pouca variação de pH, com maiores valores nas doses três (5,9), quatro (6,0) e cinco (6,2), sendo esta última a mais elevada do período. Já o MAP exibiu forte redução nas doses finais - três (4,9), quatro (4,8) e cinco (4,9), concentrando os menores valores de pH observados para o material. Em ambos notou-se um sistema químico mais estável, ainda que em direções opostas, tendendo o MAP à acidificação e o PR à elevação do pH.

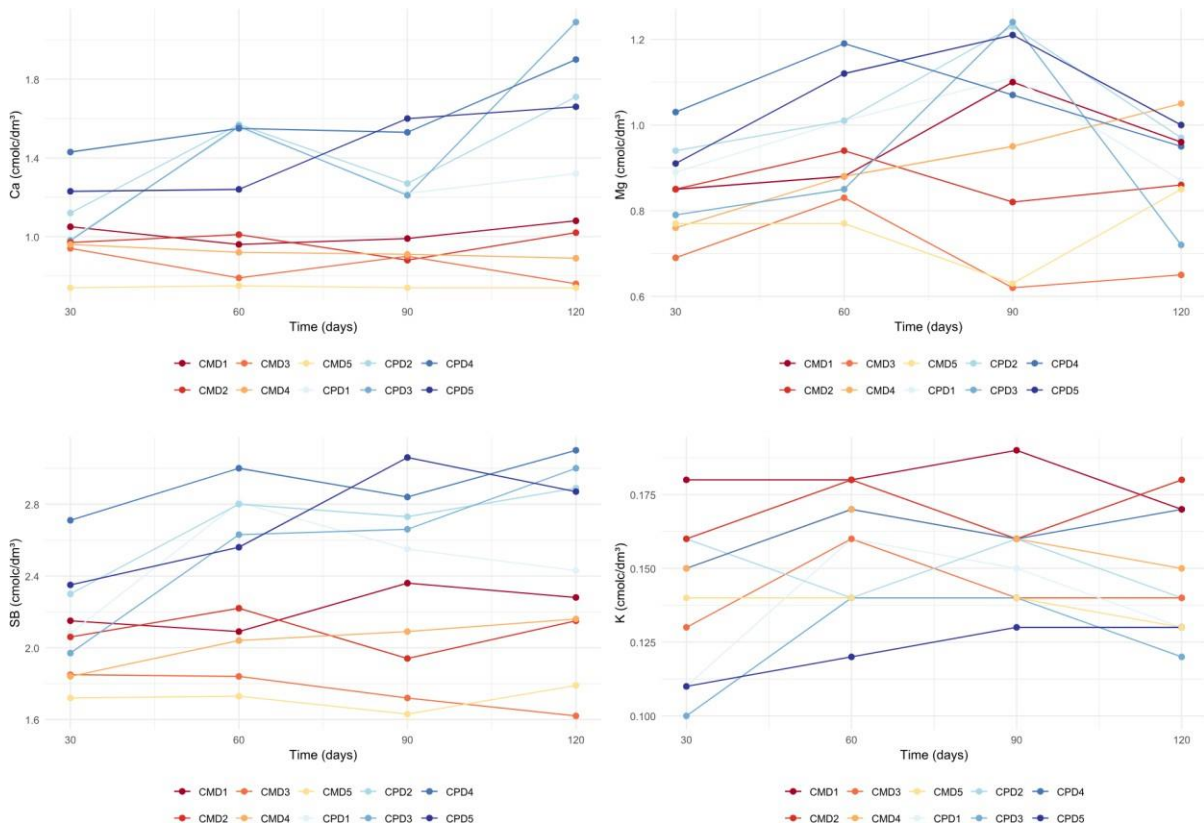
Diferente do pó de rocha, a aplicação de insumos solúveis, como o MAP, apresentam dinâmicas que tendem a naturalmente acidificar o solo, devido a sua composição nitrogenada ureia, que ao entrar em reação com o solo, libera H<sup>+</sup> (Hofig *et al.*, 2024). Embora os processos acidificantes ocorram de forma natural, estudos apontam que a utilização de fertilizantes nitrogenados acelera e intensifica esse processo (Hao *et al.*, 2020; Kunhikrishnan *et al.*, 2016; Tkaczyk *et al.*, 2020). Quando o MAP se dissocia é liberado íons de amônio (NH<sub>4</sub>) que através da nitrificação são

convertidos em nitratos ( $\text{NO}_3$ ) e acabam por liberar íons de hidrogênio (H), contribuindo para o processo acidificante, que permaneceu constante ao longo de todo experimento, apresentando quedas em relação ao testemunho (T0) em unidades que variaram de 0,1 a 0,6 ao longo do tempo e doses aplicadas. Ao contrário da solubilização do calcário, que gera nessa reação OH que interagem com o H livre, formando a molécula de água, facilitando assim, a redução da acidez.

As alterações promovidas pela dinâmica do pH e P, também corroboram na alteração de outros nutrientes e parâmetros químicos analisados ao longo do experimento - cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e a soma de bases (SB). Notou-se que, temporalmente, o Ca despontou com as maiores concentrações, tendo os melhores resultados com as doses dois, três, quatro e cinco do último estágio de avaliação (120 dias), com 1,71, 2,09, 1,90 e 1,66  $\text{cmol/dm}^3$ , respectivamente. Já a baixa concentração de Mg no pó de rocha e no solo, impactou também a disponibilidade desse elemento, que frente ao testemunho, apresentou quedas ao longo do tempo. Essa dinâmica refletiu na relação Ca/Mg, que em nenhuma das doses obteve-se a proporção mínima ideal para a maioria das culturas, que varia de 3 a 6:1.

Diferente da dinâmica do PR, houveram amostras com MAP que apresentaram maiores concentrações de Mg que Ca, como as doses CMD5 - 30 (0,77  $\text{cmol/dm}^3$ ) CMD3 - 60 (0,83  $\text{cmol/dm}^3$ ), CMD5 - 60 (0,77  $\text{cmol/dm}^3$ ), CMD1 - 90 (1,10  $\text{cmol/dm}^3$ ), CMD4 - 90 (0,95  $\text{cmol/dm}^3$ ), CMD4 - 120 (1,05  $\text{cmol/dm}^3$ ) e CMD5 - 120 (0,85  $\text{cmol/dm}^3$ ). Os períodos com maior tempo de ação (90 e 120 dias) mostraram-se com as maiores concentrações, ainda que essa variação tenha sido pouca, com exceção da CMD1-90, com melhor resultado para Mg em todo experimento. Porém, estes resultados são inferiores ao testemunho, refletindo na redução da disponibilidade de Mg com o uso do MAP, reflexo da própria composição do material, que não adiciona Mg e Ca e nem regula o pH, acidificando o meio e reduzindo a concentração destes no solo.

Figura 2: Comportamento temporal das doses aplicadas



Elaboração: autores, 2025

A soma de bases (SB) apresentou seus maiores valores nos tratamentos com PR, refletindo principalmente o aumento nas concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$ . Nos períodos de 30, 60 e 120 dias, a dose quatro registrou os maiores valores de SB, com 2,71; 3,00 e 3,10  $\text{cmolc/dm}^3$ , respectivamente, enquanto aos 90 dias o destaque foi a dose cinco (3,06  $\text{cmolc/dm}^3$ ) (Figura 2).

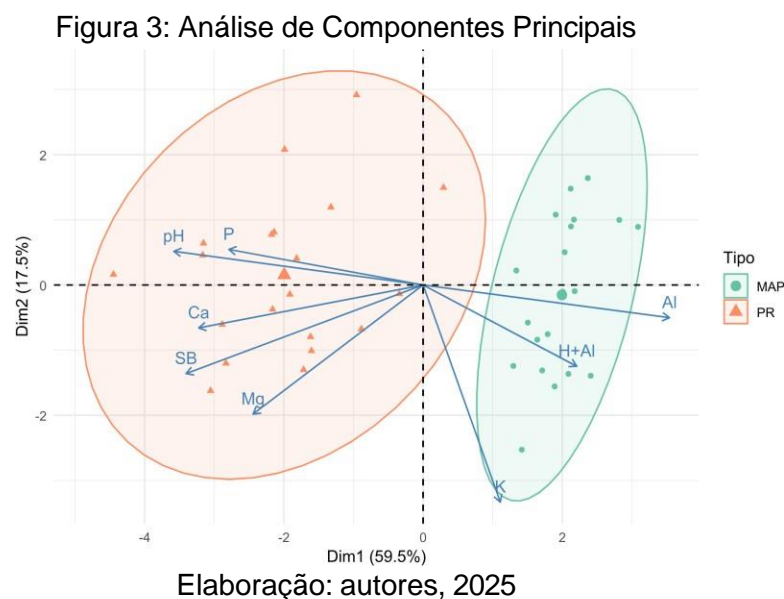
A elevação da SB nessas combinações ocorreu principalmente devido ao acréscimo de  $\text{Ca}^{2+}$  nas amostras CPD4-30 (1,43  $\text{cmolc/dm}^3$ ) e CPD5-90 (1,60  $\text{cmolc/dm}^3$ ), e ao aumento de  $\text{Mg}^{2+}$  em CPD4-60 (1,19  $\text{cmolc/dm}^3$ ). Já em CPD4-120, contribuições menores de  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  também influenciaram o valor obtido. Esses resultados mostram que a disponibilidade de bases variou de acordo com o tempo de incubação e as doses aplicadas.

Essa dinâmica no processo de incubação corrobora com a Lei do Mínimo, postulado por Carl Sprengel em 1826, mas popularizada por Liebig em 1840, onde se demonstra que o solo é o substrato favorável para o crescimento vegetal e que a

há uma quantidade mínima de nutrientes exigido para que haja o pleno desenvolvimento da planta (Tang; Riley, 2021; Saldanha *et al.*, 2016; Lepsch, 2011). Ou seja, o excesso e/ou a falta são fatores limitantes e que podem apresentar prejuízos ao sistema de trocas de nutrientes, uma dinâmica que pode ser observada no experimento, onde as amostras com PR demonstraram o excesso de Cálcio. Ainda que o mesmo tenha apresentado uma melhoria para dinâmica sobretudo, do pH, desbalanceou a disponibilidade de outros nutrientes como, o magnésio e também o potássio.

### 3.2 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA)

A Análise de Componentes Principais (PCA) aplicada evidenciou clara separação entre as fontes fosfatadas ao longo do primeiro eixo (Dim1), explicando 59,5% da variabilidade total dos dados. As amostras com MAP concentraram-se no lado positivo, associadas principalmente aos vetores de Al, H+Al e K, indicando maior acidez potencial e maior presença de alumínio trocável.



Em contraste, as amostras tratadas com PR agruparam-se no lado negativo da Dim1, correlacionando-se positivamente com pH, Ca, Mg, P e soma de bases (SB), o que reflete um efeito alcalinizante e de incremento na fertilidade química do solo. O segundo eixo (Dim2), responsável por 17,5% da variância, contribuiu para a discriminação secundária entre as amostras, relacionada principalmente às variações em Mg e K. A orientação oposta entre os vetores de pH e Al indica relação

inversa entre esses atributos, reforçando o papel do pó de rocha na atenuação da acidez do solo ao longo do processo de incubação.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

1 - O pó de rocha proporcionou as melhores condições químicas ao longo do tempo, destacando-se como um insumo eficaz na correção da acidez potencial e no aumento da soma de bases, com reflexos positivos na fertilidade química do solo.

2 - A dose quatro apresentou maior resposta química observada, enquanto a dose cinco, no período de 90 dias, marcou o ápice das respostas químicas, atingindo pH de 6,5 e máxima disponibilidade de fósforo, indicando maior adequação para sistemas agrícolas de ciclo curto.

3 - Os teores de Ca e P foram predominantes nas amostras com pó de rocha e contribuíram para a neutralização do  $Al^{3+}$  nas maiores doses e períodos. Contudo, observou-se desequilíbrio entre os nutrientes, com menor disponibilidade relativa de Mg e K, devido à maior dominância de Ca e P nos complexos de troca, indicando manejo complementar para esses nutrientes em sistemas com uso contínuo de pó de rocha.

4 - Nos tratamentos com MAP, verificou-se intensificação da acidificação ao longo do tempo, reduzindo a disponibilidade de nutrientes, exceto o P, que ainda assim apresentou queda gradual. De forma geral, o PR mostrou maior eficiência química do solo em comparação ao fertilizante sintético.

Os estudos devem ser interpretados no contexto de um estudo de incubação de caráter exploratório, sendo recomendado ensaios de campo para validação agrônômica em condições reais de cultivo.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BRASIL. **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 uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 11 dez. 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Manual de Métodos Analíticos**

**Oficiais de Fertilizantes, Corretivos, Substratos, Condicionadores e Remineralizadores de Solo.** Brasília: MAPA, 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016.** Estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 14 mar. 2016.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The Nature and Properties of Soils.** 14. ed. London: Pearson Education Limited, 2013. ISBN 978-1292020792.

BROWNRIGG, S.; MCLAUGHLIN, M. J.; MCBEATH, T. et al. Effect of acidifying amendments on P availability in calcareous soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 124, p. 247–262, 2022. DOI: 10.1007/s10705-022-10241-1.

CONCEIÇÃO, L. T. et al. Potential of basalt dust to improve soil fertility and crop nutrition. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 10, 2022. DOI: 10.1016/j.jafr.2022.100443. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>.

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**, Dordrecht, v. 89, p. 229–255, 2011. DOI: 10.1007/s10705-010-9390-4.

DALMORA, A. C.; RAMOS, C. G.; OLIVEIRA, M. L. S. de; OLIVEIRA, L. F. S. et al. Application of andesite rock as a clean source of fertilizer for eucalyptus crop: evidence of sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, 20 maio. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620304790>. Acesso em: 12 nov. 2024.

HAO, T. et al. Impacts of nitrogen fertilizer type and application rate on soil acidification rate under a wheat-maize double cropping system. **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110888, 2020. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110888. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>.

HARTEMINK, A. E.; BARROW, N. J. Soil pH - nutrient relationships: the diagram. **Plant and Soil**, v. 486, p. 209–215, 2023. DOI: 10.1007/s11104-022-05861-z.

FERREIRA, H. B.; BRITO, L. P. de; FREITAS, H. B. de; CERQUEIRA FILHO, J. D. P. de; PEDROSA, S. da S.; BARBOSA, E. S.; SILVA, V. G.; MIRANDA, D. dos R.; RIBEIRO, T. S.; VASCONCELOS, R. N. de; ROCHA, W. de J. S. da F.; SOUZA, D. T. M. de. Proposta metodológica para avaliação de materiais fosfatados na fertilização de solos ácidos. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, [S. l.], v. 23, n. 11, p. e12135, 2025. DOI: 10.55905/oelv23n11-036. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/12135>. Acesso em: 9 fev. 2026.

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. **Plant and Soil**, v. 237, n. 2, p. 173–195, 2001.

HÖFIG, P. et al. Comportamento dos solos, produção de café e qualidade da bebida em dois sistemas de adubação usando fontes regionais e convencionais de nutrientes. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 6, p. 1–26, 2024. DOI: 10.54033/cadpedv21n6-112. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br>.

JAMA, B. E.; VAN STRAATEN, Peter. Potential of East African phosphate rock deposits in integrated nutrient management strategies. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 78, n. 4, p. 735-748, 2006.

SOUZA, M. E, P. de; CARDOSO, I. M.; DE CARVALHO, A. M. X.; LOPES, A. P.; JUCKSCH, I.; JANSSEN, A.. Rock powder can improve vermicompost chemical properties and plant nutrition: an on-farm experiment. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 1, p. 1-12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1418372>. Disponível em: [https://pure.uva.nl/ws/files/26886666/\\_15\\_8\\_2018\\_Rock\\_Powde.pdf](https://pure.uva.nl/ws/files/26886666/_15_8_2018_Rock_Powde.pdf). Acesso em: 12 nov. 2024.

KÖPPEN, W. **Grundriss der Klimakunde: outline of climate science**. Berlin: Walter de Gruyter, 1931. 388 p.

KUNHIKRISHNAN, A. et al. Functional Relationships of Soil Acidification, Liming, and Greenhouse Gas Flux. **Advances in Agronomy**, v. 139, p. 1–71, 2016. DOI: 10.1016/bs.agron.2016.05.001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>.

KURI & KAMPF, Caracterização do solo In: KER, J. C et al., **Pedologia: Fundamentos**, Viçosa, MG: SBCS, 2012.

LEPSCH, I. F. 19 **Lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LIU, L.; ZHENG, X.; WEI, X.; ZHANG, K.; XU, Y. Excessive application of chemical fertilizer and organophosphorus pesticides induced total phosphorus loss from planting causing surface water eutrophication. **Scientific Reports**, London, v. 11, n. 1, p. 23015, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-02521-7.

MANNING, D. A.C.; THEODORO, S. H. Enabling food security through use of local rocks and minerals. **The Extractive Industries and Society**, v. 7, n. 2, p. 480-487, abr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.12.014>.

MANNING, D. A. C. How will minerals feed the world in 2050? **Proceedings of the Geologists' Association**, v. 126, p. 14–17, 2015. DOI: 10.1016/j.pgeola.2014.12.005.

OLEGO, M. Á.; QUIROGA, M. J.; LÓPEZ, R.; GARZÓN-JIMENO, E. The importance of liming with an appropriate liming material: long-term experience with a Typic Palexerult. **Plants**, Basel, v. 10, n. 12, p. 2605, 2021. DOI: 10.3390/plants10122605.

O'KENNEDY, S. Soil pH and its impact on nutrient availability and crop growth. **International Journal of Geography, Geology and Environment**, v. 4, n. 2, p. 236–238, 2022. Disponível em: <https://www.geojournal.net>.

**R CORE TEAM.** *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

RABEL, D. O.; MOTTA, A. C. V.; BARBOSA, J. Z.; MELO, V. F.; PRIOR, S. A. Depth distribution of exchangeable aluminum in acid soils: A study from subtropical Brazil. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 40, n. 1, e39320, 2018. DOI: 10.4025/actasciagron.v40i1.39320. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/acta>. Acesso em: 14 out. 2024.

RAMOS, C. G.; QUEROL, X.; DALMORA, A. C.; PIRES, K. C. de J.; SCHNEIDER, I. A. H.; OLIVEIRA, L. F. S.; KAUTZMANN, R. M.. Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 2700-2706, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616318406?via%3Dihub>. Acesso em: 3 out. 2024.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ-V., V. H. COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais**. 5. ed. Viçosa: UFV, 1999.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. 2. ed. Campinas: Embrapa Territorial, 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1128267/1/5840.pdf>. Acesso em: 12 set. 2024.

SANTOS, R. A. dos.; MARTINS, D. L.; SANTOS, R. L. BALANÇO HÍDRICO E CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN E THORNTHWAITE NO MUNICÍPIO DE FEIRA DE SANTANA (BA). *GeoUERJ*, Rio de Janeiro, n. 33, p. 1-17, 2018. DOI: 10.12957/geouerj.2018.34159. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/geouerj/article/view/34159>.

SALDANHA, C. B. et al. **Ciência do solo: fertilidade do solo e nutrição mineral de plantas**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2016. 192 p.

SILVA, F. C. da; EIRA, P. A. da; BARRETO, W. de O.; PÉREZ, D. V.; SILVA, C. A. **Manual de métodos de análises químicas para avaliação da fertilidade do solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa - CNPS, 1998. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/335210/manual-de-metodos-de-analises-quimicas-para-avaliacao-da-fertilidade-do-solo>.

SOUZA, M. E. P. de; CARDOSO, I. M.; DE CARVALHO, A. M. X.; LOPES, A. P.; JUCKSCH, I.; JANSSEN, A.. Rock powder can improve vermicompost chemical properties and plant nutrition: an on-farm experiment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 49, n. 1, p. 1-12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1418372>. Disponível em: [https://pure.uva.nl/ws/files/26886666/\\_15\\_8\\_2018\\_Rock\\_Powde.pdf](https://pure.uva.nl/ws/files/26886666/_15_8_2018_Rock_Powde.pdf). Acesso em: 12 nov. 2024.

SWOBODA, P.; DÖRING, T. F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. **Science of The Total Environment**, v. 794, p. 148864, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148864.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. Stonemeal: principles, potential and perspective from Brazil. In: GOREAU, Thomas J.; LARSON, Ronal W.; CAMPE, Janine (Eds.). **Geotherapy: Innovative Methods of Soil Fertility Restoration, Carbon Sequestration and Reversing CO2 Increase**. CRC Press, USA, 2014. p. 403-418. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b13788-30/stonemeal-principles-potential-perspectives-brazil-suzi-huff-theodoro-othon-henry-leonardos>. Acesso em: 12 nov. 2024.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O.; ROCHA, E. L.; REGO, K. G. Experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes. **Espaço & Geografia**, v. 9, n. 2, p. 263-292, 2006. ISSN 1516-9375. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegeografia/article/download/39794/30925/113006>. Acesso em: 12 nov. 2024.

TKACZYK, P. et al. The Mineral Fertilizer-Dependent Chemical Parameters of Soil Acidification under Field Conditions. **Sustainability**, v. 12, n. 17, p. 7165, 2020. DOI: 10.3390/su12177165.

VAN STRAATEN, Peter. **Agrogeology: The Use of Rock for Crops**. Toronto: Enviroquest Ltd., 2007. 440 p.

WEIRICH NETO, P. H.; CAIRES, E. F.; JUSTINO, A.; DIAS, J. CORREÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO EM FUNÇÃO DE MODOS DE INCORPORAÇÃO DE CALCÁRIO. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 257-261, 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/cJZsnz6Ks5ZJTMtcJ4xNHRP/>.

## CAPÍTULO 3 - ARTIGO 2

### PREDIÇÃO DE FÓSFORO E pH EM SOLO SUBMETIDO A TESTES DE INCUBAÇÃO COM DIFERENTES MATERIAIS FOSFATADOS

Higo Batista Ferreira<sup>1</sup>  
Deorgia Tayane Mendes de Souza<sup>2</sup>

#### RESUMO

Aliando três grandes ciências (estatística, matemática e química), a quimiometria auxilia na aplicação de modelos preditivos que têm sido uma alternativa viável em custo e rapidez na estimativa de propriedades pedológicas, a partir de dados espectrais. O objetivo do presente trabalho é aplicar modelos preditivos (PLSR e RF) a partir de dados espectrais para detecção de pH e fósforo em solos submetidos a incubação com diferentes materiais fosfatados. Para isso, foi realizado atividades de campo para coleta de rocha e solo, preparo dos materiais e montagem de estações experimentais com diferentes insumos fosfatados (pó de rocha carbonato fosfatado (PR) e fosfato monoamônico (MAP)). O experimento foi avaliado ao longo de 120 dias, com coletas e análises mensais (química e espectral) de amostras compostas. As análises espectrais passaram por 6 pré-processamentos (R, SMO, SNV, MSC, CR, AB) e aplicados a dois modelos preditivos (PLSR e RF). As métricas ( $R^2$  e RMSE) mostraram melhores respostas preditivas para o pH, tendo melhor desempenho o PLSR, e para o fósforo, o RF. A quantidade de amostras utilizadas e a não homogeneidade das propriedades químicas podem ter influenciado nas predições para o P, e o contrário para o pH. Para o pH e P, os resíduos analisados apresentaram uma tendência a super ou subestimação às oscilações químicas para o RF, e para o PLSR ambas propriedades apresentaram semelhanças em oscilações. A aplicação dos modelos mostrou-se como uma alternativa promissora na avaliação de insumos de natureza agromineral, e agregando em processos de inovação e certificação enquanto material remineralizador de solos.

**Palavras-chave:** Agrominerais; Dados espectrais; PLSR; Quimiometria; RF.

#### ABSTRACT

By combining three major sciences—statistics, mathematics, and chemistry—chemometrics aids in the application of predictive models, which have proven to be a cost-effective and rapid alternative for estimating pedological properties based on spectral data. This study aimed to apply predictive models (PLSR and RF) using spectral data to detect pH and phosphorus in soils subjected to incubation with different phosphate materials. Field activities were conducted to collect rock and soil samples, prepare materials, and set up experimental stations with different phosphate inputs (phosphate carbonate rock powder (PR) and monoammonium phosphate (MAP)). The experiment lasted 120 days, with monthly sampling and analyses (chemical and spectral) of composite samples. Spectral data underwent six preprocessing techniques (R, SMO, SNV, MSC, CR, AB) and were applied to two predictive models (PLSR and RF). The  $R^2$  and RMSE metrics indicated better predictive performance for pH, with PLSR performing best, while for phosphorus, RF yielded better results. The number of samples used and the heterogeneity of chemical properties may have influenced phosphorus predictions, whereas the opposite was observed for pH. For pH and P, the analyzed residuals showed a tendency for over- or underestimation of chemical oscillations using RF, while for PLSR, both properties exhibited similar oscillation patterns. The application of predictive models proved to be a promising alternative for evaluating agromineral inputs, contributing to innovation and certification processes as a soil remineralizer.

**Keywords:** Agrominerals, Spectral data, PLSR, Chemometrics, RF.

## 1 INTRODUÇÃO

Com capacidade de remineralizar solos, além de ser uma alternativa a utilização de insumos fertilizantes químicos solúveis, os agrominerais têm sido cada vez mais estudados, e aplicados na seara da agricultura aliando-a ao setor da mineração. A partir da década de 1990, com o movimento denominado por Rochagem, o Brasil tem investido em pesquisas que testam e validam a utilização de materiais desta natureza, que podem ser rochas, rejeitos de mineração ou o próprio mineral, capaz de alterar as propriedades químicas e físicas do solo além de, viabilizar a efetiva nutrição de plantas e conseqüentemente, dos alimentos consumidos pela sociedade (Manning; Theodoro, 2020; Blaskovski *et al.*, 2016; Van Straaten, 2007; Theodoro *et al.*, 2006; Theodoro; Almeida, 2013).

Todo e qualquer tipo de insumo aplicado no setor agrícola deve ser regulamentado pelas Leis vigentes do país, como a Lei dos Fertilizantes - n. 6.894/1980, a Lei dos Remineralizadores - n. 12.890/2013 (BRASIL, 1980; 2013), que incluiu os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura. O mesmo acontece com os agrominerais, que tem nas Instruções Normativas 05 e 06 de 2016, suas instruções e parâmetros físico-químicos para serem validados e comercializados (BRASIL, 2016). Para isso, testes agronômicos, químicos e mineralógicos são utilizados com finalidade de investigar a composição destes insumos, levando a investimentos, por vezes, de alto custo além da geração de resíduos que podem impactar o meio ambiente.

Alternativamente a aplicação de técnicas tradicionais tem sido cada vez mais utilizado o Sensoriamento Hiperespectral, que por meio da radiometria agregam na obtenção de dados espectrais de alvo como o solo, de forma rápida, precisa, baixo custo e sem geração de resíduos (Baptista; Madeira Netto; Souza, 2019). Essa técnica tem como premissa a interação entre alvo e energia eletromagnética são realizadas em segundos e em um intervalo que varia de 350 a 2500 nanômetros, do visível ao infravermelho de ondas curtas, a partir da utilização de sensores não imageadores (espectrorradiômetros), que tem por objetivo determinar a composição de materiais, a partir da curva de reflectância espectral (Meneses; Almeida, 2019).

Porém, técnicas desta natureza também podem apresentar falhas e inconsistências em resultados, sobretudo, em amostras complexas como o solo, que devido sua heterogeneidade pode influenciar nas interações entre radiação incidente e o material analisado. Segundo Baptista; Madeira Netto e Souza (2019), a

reflectância dos solos no VNIR e SWIR decorrem da sua composição (matéria orgânica, minerais, umidade etc), que são reflexos das transições eletrônicas e vibracionais de intensidades energéticas incididas sobre o material.

Para isso, a quimiometria, ciência que alia a matemática, química e estatística na resolução de problemas, junto a aquisição de dado espectrais, auxilia na geração de modelos estatísticos de calibração que possibilita a análise, interpretação e predição de propriedades pedológicas como, os seus nutrientes e constituintes de acidez.

Destacam-se a partir das relações de variáveis espectrais e teores de nutrientes os modelos lineares e não lineares, sendo o primeiro mais aplicado a partir de regressões como, a Regressão de Mínimos Quadrados Parciais (PLSR) e Regressão de Componentes Principais (PCR) (Stenberg *et al.*, 2010; Leone *et al.*, 2012; McCarty *et al.*, 2002). Porém, correlações lineares são raramente comum na natureza (Song *et al.*, 2018; Peng *et al.*, 2021) e em estruturas complexas como o solo, em que a análise por reflectância pode apresentar comportamentos não lineares, logo, modelos alternativos e que solucionem este problema foram desenvolvidos e agregam o segundo como, o Random Forest (RF), um modelo de aprendizado de máquina frequentemente utilizado para estimar nutrientes do solo (Song *et al.*, 2018) além das Redes Neurais Artificiais (ANN) e Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) que são exemplos de modelos desenvolvidos para estimar com maior precisão estas propriedades (Haykin, 1998; Vapnik, 2000).

Trabalhos têm sido desenvolvidos para estimar a composição nutricional de solos a partir de dados espectrais, evidenciando os melhores modelos e tratamentos adotados (Khammao *et al.*, 2024; Zeng *et al.*, 2022; Jia *et al.*, 2023; Buddenbaum; Steffens, 2012; Peng *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024), o que destaca a massiva investigação que assegurem quimiometria e espectrorradiometria na previsão e diagnóstico de propriedades pedológicas. Diferente do que foi destacado com os estudos anteriores, não há registros de aplicações destas técnicas com insumos agrominerais, o que evidencia também para a relevância da pesquisa e de inovação técnica na análise e avaliação destes materiais.

Assim, o presente trabalho tem por objetivo aplicar modelos preditivos (PLSR e RF) a partir de dados espectrais para detecção de pH e fósforo em solos submetidos a incubação com diferentes materiais fosfatados. Justifica-se a predição desses dois parâmetros por serem os que melhor tiverem, quimicamente, alterações no ensaios

de incubação, decorrentes dos insumos aplicados - pó de rocha carbonato fosfatado e fosfato monoamônico (MAP).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 ORIGEM DOS MATERIAIS E PREPARO DAS AMOSTRAS

O teste de incubação foi realizado para avaliar a incorporação dos materiais fosfatados ao longo dos 120 dias e com um total de 40 amostras aplicadas para a predição de pH e fósforo.

A etapa inicial consistiu nas atividades de campo para coleta do material fosfatado e de solo. Sendo o primeiro coletado no município de Irecê, região semiárida baiana, localizado na porção Noroeste do Cráton do São Francisco, na Bacia de Irecê onde, segundo estudos de Misi e Veizer (1998), há ocorrências de rochas carbonáticas mineralizadas em fósforo. Logo, uma área com potencial material agromineral capaz de remineralizar solos.

A coleta de solo para o experimento aconteceu na área experimental do curso de Agronomia da Equipe de Estudo e Educação Ambiental (EEEA) no campus da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), no município de Feira de Santana, Bahia. O solo utilizado foi determinado por apresentar um importante parâmetro para a realização do experimento - baixa disponibilidade de P - 1 mg/dm<sup>3</sup> (Tabela 2).

Para aplicação via incubação no solo, a rocha passou pelo beneficiamento mineral de moagem, assumindo tamanho particular de 0,3 mm, tornando-se um pó aplicável via rochagem (BRASIL, 2016). As análises químicas para pó de rocha foram feitas e apresentaram os valores indicados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros químicos dos materiais utilizados

Material	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	S	Cu	Fe	Mn	Zn	N
	%									
Pó de rocha	35,336	27,623	0,033	9,629	0,48	0,002	0,328	0,007	0,001	-
MAP	-	61	-	-	-	-	-	-	-	12

Elaboração: autores, 2024

Os dados químicos foram base para os cálculos de recomendações do pó de rocha fosfatado e baseou-se em uma projeção e aplicação para culturas de ciclo curto,

como a soja. Além do pó de rocha, foi utilizado o fertilizante sintético de fosfato monoamônico (MAP), a nível de comparação com o pó de rocha em comportamentos de disponibilidade de nutrientes ao longo do tempo.

Nesta etapa, foi feito também o preparo das amostras de solos - secas, peneiradas em malha de 2mm (ABNT nº 10) e posteriormente, pesadas e postas em sacos plásticos envoltos por um saco de papel pardo do tipo Kraft, como alternativa de minimizar possíveis interferências ambientais como, aquecimentos pela incidência solar sobre o material.

## **2.2 DELINEAMENTO AMOSTRAL DO EXPERIMENTO E ANÁLISE QUÍMICA**

O delineamento amostral foi totalmente casualizado, definido da seguinte maneira: 2 materiais fosfatados (pó de rocha e MAP) com 5 dosagens de cada, sendo o pó: 1,4; 1,75; 2,1; 2,45; 2,8g . E para o MAP: 0,49; 0,61; 0,74; 0,88; 0,99g. As doses se basearam no quartil do valor inicial recomendado para o volume do saco, logo, a cada repetição foi adicionado 25% do valor original, que ao final (5ª repetição) resultou em uma dosagem com 100% do valor inicial. E 10 repetições, totalizando em 100 unidades experimentais, divididas em duas estações - "PR" e "MAP".

Cada unidade foi constituída por um saco plástico de polietileno, preenchidos com 1,5 kg de amostra de solo selecionada. Estes solos foram previamente secos ao ar e peneirados em malhas de 2mm (ABNT nº10). O experimento foi desenvolvido durante 4 meses (03/2024 - 07/2024). O teor de umidade foi mantido a 50% da sua capacidade de retenção de água, sendo realizadas pesagens semanais dos sacos e, posteriormente, reposição com água deionizada.

A cada 30 dias de avaliação foram coletadas uma média de 120 g de solo de cada unidade experimental, resultando em 10 amostras simples e uma composta, que foram encaminhadas para análises química e espectral, sendo as primeiras análises realizadas utilizando os parâmetros estabelecidos pela Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA), 2017 (Tabela 2).

As amostras passaram por recodificação de ID, onde o primeiro valor refere-se ao tipo de material (1 - PR e 2 - MAP), o segundo valor a dose aplicada, variando de 1 a 5, e o terceiro valor ao tempo de incubação (30, 60, 90, 120 dias).

## 2.3 ANÁLISES ESPECTRAIS

Para leitura e aquisição das assinaturas espectrais foi adotado os procedimentos metodológicos de Ben-Dor (2015), onde as amostras compostas coletadas passaram pelo processo de secagem em estufa a 45°C por 24 horas e posterior peneiramento em malha de 2mm, acondicionadas em placas de petri para realização das leituras espectrais com o espectrorradiômetro - FieldSpec 4, Hi-Res, que contempla as bandas do visível ao infravermelho de ondas curtas (350 - 2500 nm/VNIR-SWIR), com resolução espectral de 3nm (350 a 1000 nm - VNIR) e 8nm (1000 a 2500 - SWIR). Esta etapa aconteceu no Laboratório de Espectrorradiometria e Sensoriamento Remoto (LABESPECTRO), do Programa de Pós-graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM/UEFS).

As amostras foram coletadas em triplicata, assim, foi feito o cálculo de média das mesmas para se obtivesse uma curva média de referência para cada material analisado. Esta etapa foi realizada utilizando o Software ENVI 5.3 (64 bit), onde, através da função Spectral Math, foram calculadas as médias das assinaturas. No mesmo ambiente foram criadas as bibliotecas espectrais e pré-análises da composição mineralógica dos materiais, através da morfologia das curvas, absorções e análises comparativas com as bibliotecas espectrais de referência da United State Geological Survey (USGS). Esta etapa auxiliou na caracterização da matriz mineralógica do material, que implica na sua distribuição e concentração dos óxidos apresentados nas análises químicas realizadas (Tabela 1).

## 2.4 PRÉ-PROCESSAMENTOS

A aplicação de técnicas de pré-processamentos ajuda a melhorar a qualidade dos espectros antes de sua utilização para análises qualitativas e de estimativa de propriedades, visto que, em materiais como o solo, a leitura espectral pode apresentar ruídos associados. Então, foram selecionados seis pré-processamentos além do espectro bruto, em reflectância (R). Estes procedimentos foram aplicados aos espectros das amostras compostas analisadas em ambiente do Software *RStudio*, em todos os comprimentos de onda 350 a 2500 nm. Foram aplicados:

- Para a remoção de ruídos e suavização das assinaturas espectrais a Suavização (SMO), que é uma operação de média móvel de janelas, onde cada comprimento de onda é tomado como média dos comprimentos de onda vizinhos (Wadoux *et al.*, 2021).

- Para correção de efeitos de dispersão da luz foram aplicados a Variável Normal Padrão (SNV) (Barnes *et al.*, 1989), que normaliza cada espectro para uma média zero, seguido da divisão de cada banda pelo desvio padrão de todo o espectro. E a Correção de Dispersão Multiplicativa (MSC) (Isaksson e Naes, 1988; Naes *et al.*, 1990), em que o espectro é deslocado e dimensionado para um espectro de referência ideal.
- Continuum Removido (CR) e Absorbância (AB) foram outros dois pré-processamentos aplicados, sendo o primeiro, um processo de normalização dos espectros de reflectância a partir de uma linha de base comum, acentuando suas bandas de absorção (Baptista; Madeira Netto; Souza, 2019; Bunddenbaum; Steffens, 2012). E o segundo, que é bastante utilizado para extrair informações pedológicas a partir da modelagem, devido às melhores relações lineares entre os espectros com este processamento e os componentes químicos do material (Wadoux *et al.*, 2021).

## 2.5 MODELOS PREDITIVO - PLSR E RF

Os modelos aplicados consistem na Regressão de Mínimos Quadrados Parciais (PLSR) e o Random Forest (RF). O PLSR é muito utilizado no estabelecimento de correlações entre propriedades do solo e os espectros de amostras analisadas. E o RF é um algoritmo de aprendizagem de máquina, também muito utilizado para predição de nutrientes no solo, e baseia-se no conjunto de múltiplas árvores de decisão para realizar classificações ou regressões entre variáveis.

Para a validação de desempenho dos modelos aplicados, foi realizada a validação cruzada Leave-One-Out (LOOCV), onde todas as amostras são utilizadas para teste e treinamento do modelo. É utilizado sobretudo em análises que apresentam uma quantidade reduzida de amostras. Para avaliar o potencial preditor dos modelos foram aplicados o Coeficiente de Regressão ( $R^2$ ) e o Erro Quadrático Médio (RMSE).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o processo de incubação avaliado temporalmente, foi possível analisar um comportamento muito acelerado do fósforo e pH, duas propriedades químicas

importantes e que se relacionam na dinâmica pedológica para a fertilidade. Ao longo do período analisado, as amostras que apresentaram doses incubadas de PR apresentaram os melhores comportamentos para o pH, devido, sobretudo à natureza do material de origem incubado, rocha carbonática fosfatada, o que viabilizou para uma alta disponibilidade de cálcio, corrigindo sua acidez e conseqüentemente, alterando seus parâmetros de fertilidade sobretudo, para o fósforo (ver Apêndice A).

Estes resultados corroboram com os estudos de Brito *et al.*, (2024), que desenvolveu experimentos com solos da mesma área em questão, mas com a finalidade de correção da acidez por meio da rochagem com calcários calcíticos de zonas de mineração da região de Irecê, Bahia. Através de testes de incubação, notou-se a progressão no pH e conseqüente disponibilidade de nutrientes, como o fósforo e o cálcio.

Ao avaliar as amostras que foram incubadas com MAP, foi possível notar uma queda no comportamento do pH, conseqüência da capacidade acidificante que o insumo, um fosfato monoamônico, tem de disponibilizar mais hidrogênio no solo e assim, alterá-lo ao longo do tempo. Isso também refletiu na disponibilidade do fósforo, ainda que ele tenha alta concentração de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 61% (Tabela 1), não apresentou valores significativos quanto às amostras com PR (ver Apêndice A).

As questões de alterações nos parâmetros de fertilidade e disponibilidade de nutrientes tem sido pauta de muitos ensaios que discutem a necessidade de encontrar alternativas sustentáveis capazes de viabilizar isso para o solo, afinal, é o substrato basilar no processo de produção de alimentos, uma demanda cada vez mais crescente para sociedade, conseqüência da dinâmica populacional (Van-Straaten, 2022; Almeida *et al.*, 2022; Theodoro *et al.*, 2012; Theodoro; Othon, 2006; Campe *et al.*, 2022). Por isso, o agromineral tem sido uma alternativa viável, sustentável e que apresenta alterações positivas à química do solo, como observado nos resultados encontrados (ver Apêndice A), comparado à aplicação de insumos químicos, que ainda que também altere a dinâmica pedológica, apresenta grandes conseqüências ao meio ambiente.

### **3.1 MODELOS PREDITIVOS PLSR E RF NA PREDIÇÃO DE PH E FÓSFORO**

A calibração dos modelos PLSR e RF às amostras incubadas, um total de 40, aconteceu mediante a aplicação de seis pré-processamentos espectrais (R, SMO,

SNV, MSC, CR, AB), fundamentais para melhoramento das assinaturas e desempenho dos modelos. E suas validações foram analisadas a partir do  $R^2$  e RMSE a cada propriedade química selecionada (pH e P) (Tabela 2).

### 3.1.1 Desempenho dos modelos para pH

O atributo pH apresentou as melhores métricas preditas, ao avaliar o desempenho do PLSR, o  $R^2$  variou de 0,94 a 0,96 e o RMSE de 0,1 a 0,12 (Tabela 2), com o melhor processamento para a Absorbância (AB) em ambas as métricas para este modelo -  $R^2 = 0,96$  e  $RMSE = 0,1$ . Ou seja, o modelo apresentou uma consistência e predição considerável para o pH. Os dados da Figura 1 - A complementam os valores encontrados para AB, enfatizaram ainda a precisão para as amostras com PR comparada às com MAP.

Tabela 2: validação para PLSR e RF

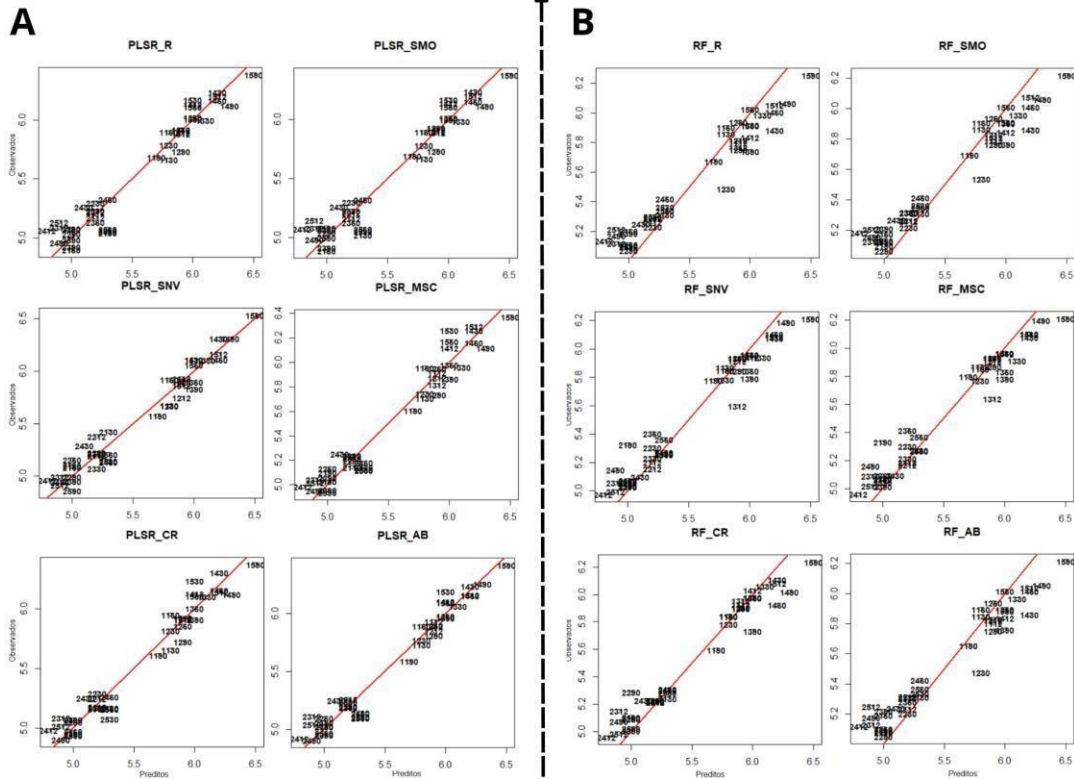
Propriedade	Pré-processamento	PLSR		RF	
		$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
pH	R	0,94	0,12	0,95	0,16
	SMO	0,94	0,12	0,95	0,17
	SNV	0,95	0,11	0,95	0,13
	MSC	0,94	0,12	0,95	0,13
	CR	0,95	0,11	0,96	0,12
	AB	0,96	0,1	0,94	0,17
FÓSFORO (P)	R	0,55	48,13	0,93	24,44
	SMO	0,55	48,14	0,93	25,65
	SNV	0,81	30,92	0,94	22,8
	MSC	0,88	25,1	0,94	23,95
	CR	0,89	23,74	0,95	25,07
	AB	0,94	16,76	0,93	25,34

Elaboração: autores, 2025

Para o RF, o pH também apresentou bons resultados, com  $R^2$  variando de 0,94 a 0,96 e RMSE de 0,12 a 0,17, e o melhor processamento para o Continuum Removido (CR) -  $R^2 = 0,96$  e  $RMSE = 0,12$ . A Figura 1 - B destaca o comportamento das amostras e sua distribuição à normal, onde foi possível observar que, nas amostras de PR, que apresentaram as melhores respostas, há uma leve discrepância, onde algumas das maiores doses (3,4,5) e o tempo de 90 dias destoam das demais. Este

comportamento se repetiu em todos os outros pré-processamentos, mas com um grau de imprecisão maior.

Figura 1: predito x observado - PLSR e RF (pH)



Elaboração: autores, 2025

Esta característica pode ser uma consequência da quantidade de amostras que apresentaram quimicamente, uma baixa variação nos valores para pH, como destacado na Tabela 2. Estudos realizados por Peltre *et al.*, (2011), Brunet *et al.*, (2007) e Rosin *et al.*, (2021) destacaram que a heterogeneidade de amostras pode influenciar no desempenho de modelos. Comportamento que não foi observado no resultado para o pH, variável que no seu conjunto de dados analisados teve uma homogeneidade em seus resultados químicos, o que pode ter influenciado positivamente a precisão do modelo conforme, como observados nas métricas (Tabela 3).

Segundo Luca *et al.*, 2017, ao avaliar carbono total em solos italianos, destacou que em solos homogêneos a predição por PLSR é aumentada à medida que se aumenta o número de amostras. Logo, em uma amostragem maior na presente pesquisa, é possível que o ajuste a este modelo apresentasse métricas ainda mais robustas. Já para o modelo RF, ainda que trabalhos acusem a necessidade de maior número amostral para melhor desempenho, os resultados apresentados

demonstraram não haver reflexo significativo, podendo contribuir também à homogeneidade dos dados, conforme supracitado.

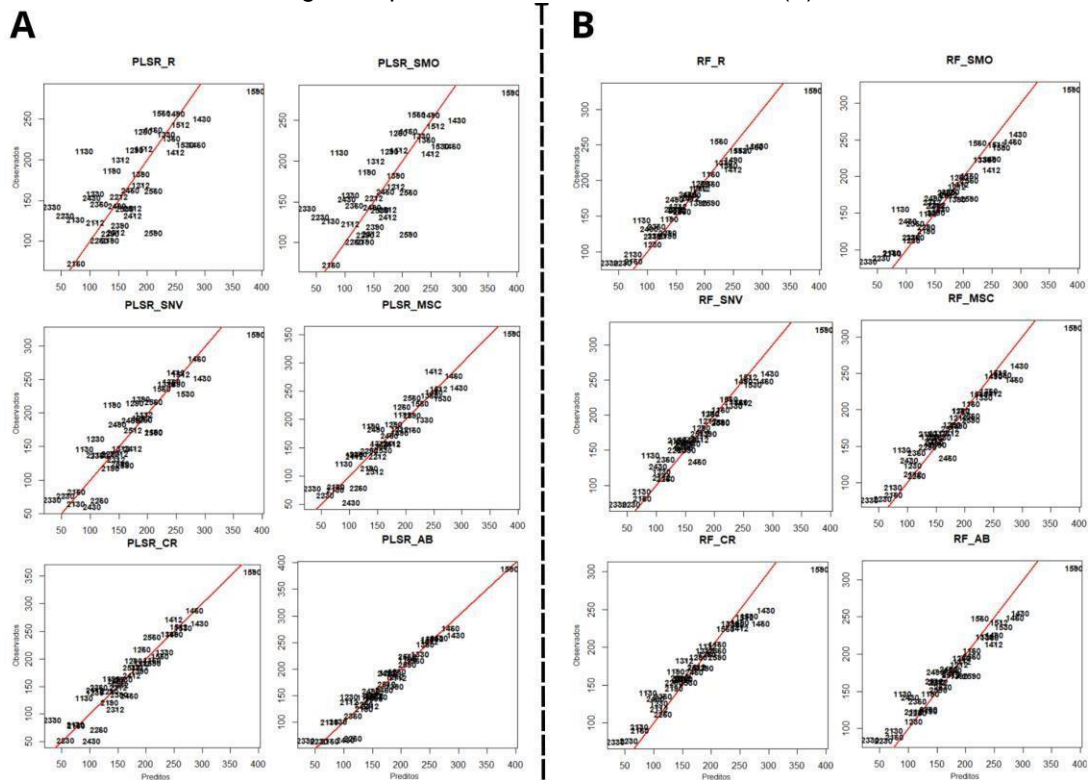
### 3.1.2 Desempenho dos modelos para P

Diferente dos resultados encontrados para a predição de pH, o fósforo apresentou um variado desempenho para o PLSR, tendo um  $R^2$  variando de 0,55 a 0,94 e um RMSE de 16,76 a 48,14. Estes resultados vão de encontro com outros trabalhos desenvolvidos na predição de P por PLSR, possivelmente, o número de amostras utilizadas seja um fator que gere uma sensibilidade ao modelo e resulte em parâmetros mais apurados de precisão.

Por outro lado, Khammao *et al.*, (2024), discute a possibilidade de influência no desempenho do modelo PLSR, ao material parental, tipo e textura de solo e concentrações químicas, sendo os dois primeiros fatores que pouco podem ter alterado na presente pesquisa devido a não variabilidade dessas nos solos avaliados. Mas, quanto às concentrações químicas, esta pode ter sido um fator de influência, já que os tipos e doses de materiais que foram incubados responderam, ao longo do tempo, variações em suas respostas químicas, como destacado na Tabela 2 .

O melhor processamento também foi a AB ( $R^2 = 0,94$  e  $RMSE = 16,76$ ). Os desempenhos mais baixos foram detectados para o SMO e R, evidenciando sobretudo para a necessidade de aplicação de pré-processamentos para a predição desse macronutriente. Ao analisar a Figura 2 - A, notou-se que até mesmo as amostras com maiores doses, apresentaram os melhores ajustes com a AB, e a discrepância que reforçou o comportamento do SMO e R.

Figura 2: predito x observado - PLSR e RF (P)



Elaboração: autores, 2025

Para o RF, houveram melhores resultados, com um  $R^2$  que variou de 0,93 a 0,95 e RMSE variou de 22,8 a 25,65. O CR apresentou melhor  $R^2$  (0,95), e o SNV o melhor RMSE (22,8). Mais uma vez destacou-se a importância dos processamentos na predição além de evidenciar o RF com os melhores ajustes comparado ao PLSR.

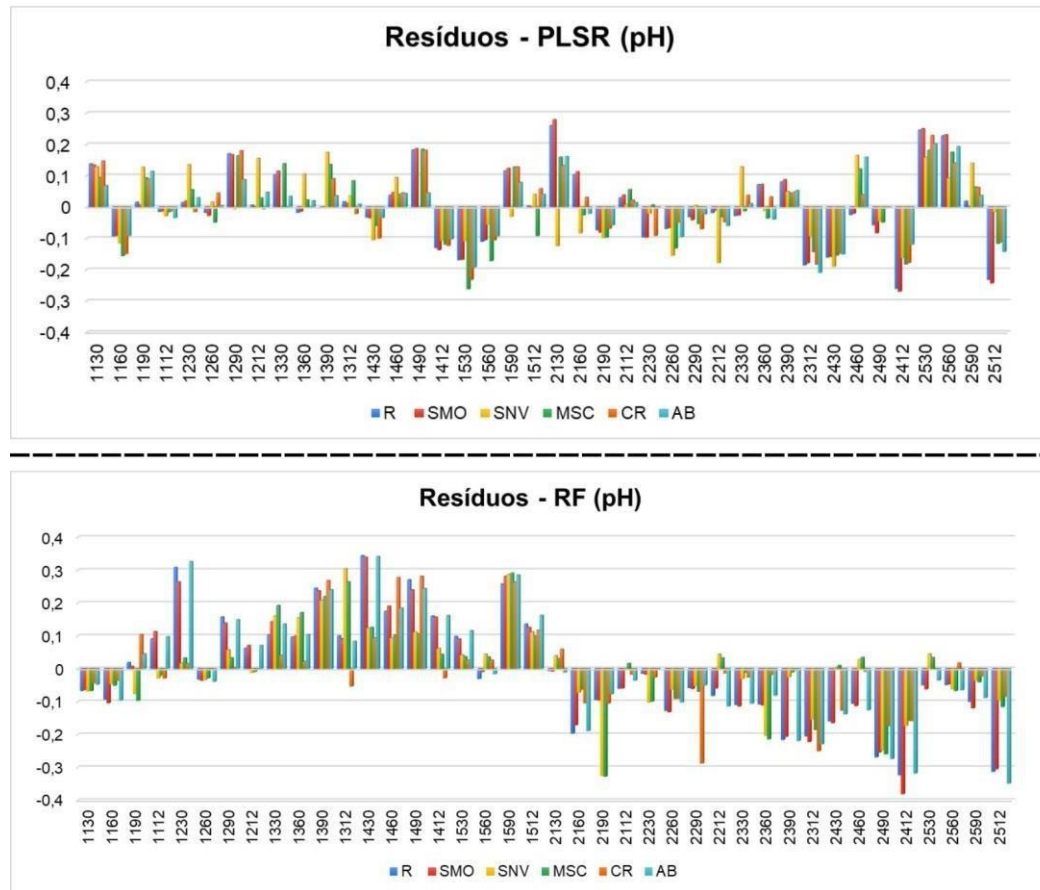
Outro fator que se destaca no RF são os valores do  $R^2$  para o SNV e MSC, dois pré-processamentos que obtiveram o mesmo resultado ( $R^2$  - 0,94) - o mesmo aconteceu com o pH - devido à semelhança de correção de dispersão de ambos (Wadoux *et al.*, 2021).

### 3.1.3 Resíduos

Ao avaliar os valores dispostos na figura 3, é possível notar os erros das predições em cada pré-processamento. Para o pH, no modelo PLSR, notou-se uma variação entre as amostras e processamentos aplicados, mas com predominância à superestimação de entre as doses de PR, com exceção das doses 1160, 1412, 1530, 1560, onde todos os processamentos aplicados foram subestimados, corroborando entre estes um pH de 6,0 com as três maiores doses e de 5,8 com a menor (1160)

(Tabela 2). Para as amostras com MAP, houve predominância para a subestimação com exceção e maior expressividade das doses 2130, 2160, 2530, 2560. Destacando-se as três últimas doses com comportamentos contrários aos do PR.

Figura 3: Resíduos - PLSR e RF (pH)



Elaboração: autores, 2025

Diferente do PLSR, o RF apresentou um padrão de comportamento entre amostras e processamentos. As amostras com PR predominaram a superestimação, com exceção das doses 1130, 1160, 1260, que em todos os processamentos foi subestimada, e quimicamente apresentaram pH 5,8, 5,8 e 5,9 respectivamente. Ao conjunto de amostras com PR que apresentaram superestimação, poucos processamentos foram subestimados, com destaques para o CR, SNV, SMO e AB.

Já para as amostras com MAP, o padrão foi de subestimação para todas as doses analisadas aos processamentos aplicados, com exceção de 2130, 2112, 2212, 2430, 2460, 2530 e 2560, sendo o SNV e MSC superestimados dentre elas. Quimicamente, foram amostras que apresentaram pouca variação de pH, com valores entre 4,8 e 5,3 (Tabela 2).

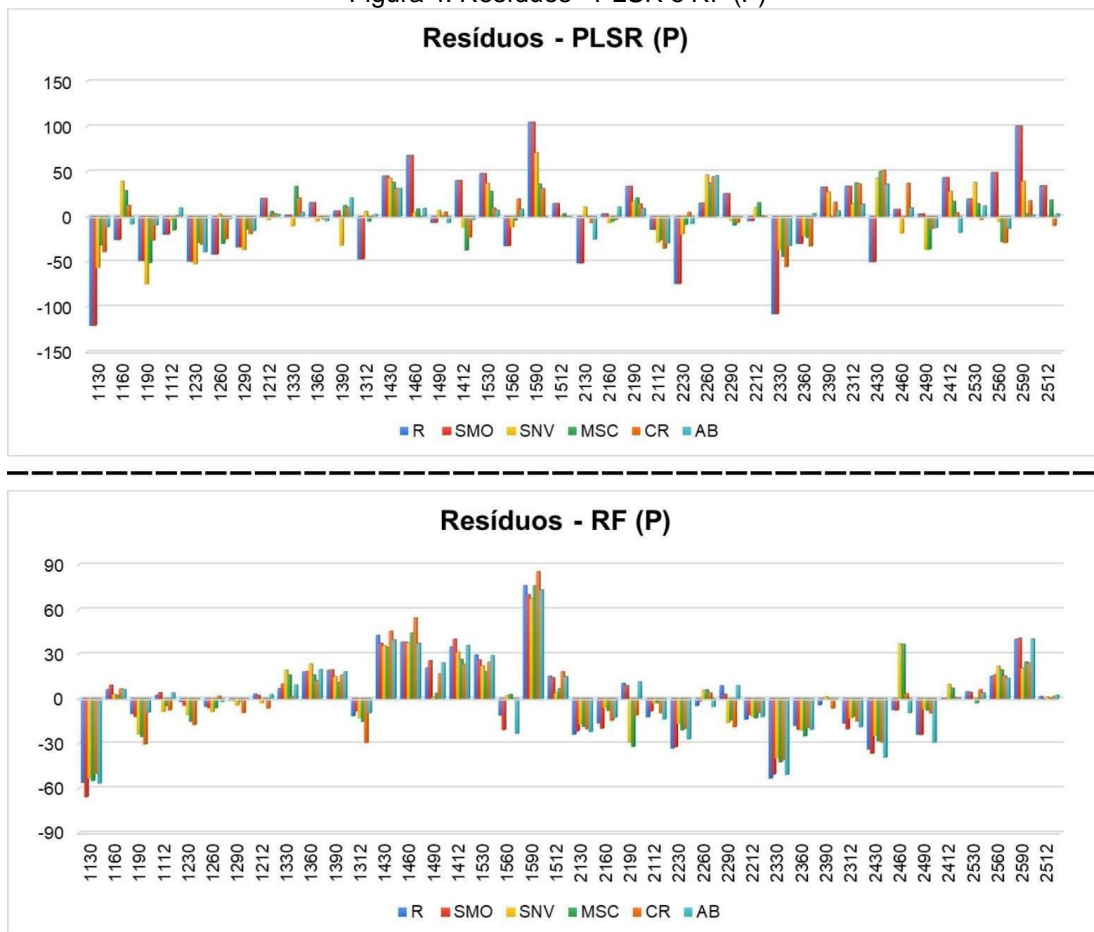
Para este modelo (RF), química das amostras pode ter enviesado o

comportamento de super ou subestimação - quanto mais ácido, maior a subestimação e o contrário com os que apresentaram um processo corretivo. Comparativamente, o RF apresentou maior tendência ao erro de predição do pH que o PLSR, Para o fósforo (P), e semelhante ao comportamento do pH, houve uma variação no erro das predições para o PLSR. Mas, as doses iniciais do PR - 1130, 1160, 1190, 1112, 1230, 1260, 1290 predominaram a subestimação. Ao conjunto de amostras com PR, as doses discrepantes quimicamente - 1130: 90 mg/dm<sup>3</sup> e 1590: 389 mg/dm<sup>3</sup> (Tabela 2) - apresentaram os maiores erros associados, com destaque para o R e SMO, e o primeiro a subestimação e o segundo à superestimação.

Às amostras com MAP, houve uma subestimação às menores doses e predomínio de superestimação às maiores, a partir da 2390 a 2512. Com um padrão à subestimação, o modelo apresentou maiores erros também ao R e SMO nas quatro primeiras doses dos primeiros 30 dias - 2130, 2230, 2330 e 2430, em que se destacam os menores P disponíveis detectados quimicamente (Tabela 2). O contrário (a superestimação) aos mesmos processamentos aconteceram às doses com maiores P - 2560 e 2590, ambas com 211 mg/dm<sup>3</sup>.

Logo, um padrão de comportamento foi estabelecido entre processamento e disponibilidade (maior ou menor) entre as amostras, valendo-se para ambos insumos - PR e MAP (Figura 4).

Figura 4: Resíduos - PLSR e RF (P)



Elaboração: autores, 2025

O RF também apresentou padrões em seus erros. Para o PR, novamente, as doses discrepantes obtiveram o mesmo comportamento que no PLSR, maior e menor disponibilidade refletindo na subestimação e superestimação, respectivamente. Nesta condição, destacou-se o SMO para a dose 1130 e o CR para a dose 1590.

Todas as amostras de PR com todos os processamentos subestimados apresentaram quimicamente os menores valores - abaixo de 200 mg/dm<sup>3</sup>. Diferente do comportamento das amostras com maiores valores - 1330, 1360, 1390, 1430, 1460, 1490, 1412, 1530, 1560, 1590, 1512 (Tabela 2).

As amostras de MAP predominaram a subestimação com destaque para 2130, 2160, 2112, 2230, 2212, 2330, 2360, 2312, 2430, 2490, que tiveram todos os processamentos subestimados, com destaque para o 230, que obteve 34 mg/dm<sup>3</sup>, o menor encontrado em todo agrupamento dos MAP, apresentando os maiores erros principalmente, para o R, SMO e AB. Ainda nesse grupo, a amostra 2460, que teve o melhor valor para P (286 mg/dm<sup>3</sup>), superestimou apenas em SNV e MSC. Esta característica corrobora com o mesmo comportamento das amostras 2412, 2530,

2560, 2590 e 2512, que apresentaram os melhores resultados para P em seus respectivos agrupamentos temporais - 30, 60, 90, 120 dias (Tabela 2).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- A quantidade de amostras pode ter sido um fator decisivo em melhores desempenhos dos modelos;
- Destacou-se também a necessidade de aplicações de pré-processamentos para entender melhor o comportamento de propriedades como foi destacado para o Fósforo (P), o que pode ter sido um reflexo, também, da sua variabilidade química em disponibilidade ao solo;
- A baixa variação nos resultados químicos pode ter influenciado em boas métricas avaliativas para o pH, o contrário pode ter acontecido com o P;
- Ao avaliar os resíduos das predições para o pH, o PLSR apresentou menores viesamentos ao erro, ou seja, foi mais preciso na predição. Comparado ao RF, este apresentou padrões de erros, que possivelmente, levou em consideração o comportamento químico das amostras, tendo as amostras com MAP, que acompanharam o processo de acidificação, à uma subestimação, e a superestimação às amostras com PR.
- O PLSR apresentou os melhores desempenhos para a predição do pH e o RF para a predição do P.
- A aplicação de modelos preditivos a partir dos dados espectrais das amostras para estimar pH e P, mostrou-se como uma alternativa inovadora na avaliação de insumos de caráter agromineral, com vistas à possível aplicação técnica como certificadora que agregue na validação frente ao que se determina as legislações brasileiras para estes materiais com capacidade remineralizante de solos.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J.A. de; CUNHA, G.O. de M. HEBERLE, D.A.; MAFRA, Á.L. Potential of olivine melilitite as a soil remineralizer according to particle size and rates. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.57, e01445, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.01445>. Acesso em: 22 fev. 2025.

BAPTISTA, G. M. de M.; MADEIRA NETTO, J. da S.; SOUZA, D. T. M. de.

**Reflectância dos Solos.** In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de; BAPTISTA, G. M. de M. *Reflectância dos materiais terrestres: análises e interpretações.* São Paulo: Oficina de Textos, 2019. p. 163-187.

BARNES, R. J.; DHANOA, M. S.; LISTER, S. J. Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra. *Applied Spectroscopy*, v. 43, p. 772–777, 1989.

BLASKOWSKI, A. E. et al. Projeto agrominerais da região de Irecê-Jaguarari. In: ***Informes de Recursos Minerais, Série Insumos Minerais***, n. 19. Salvador: CPRM, 2016. p. 105.

BRASIL. 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 uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 11 dez. 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. Estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 14 mar. 2016.

BRITO, L. P.; SOUZA, D. T. M de.; SILVA, L. L da.; FERREIRA, H. B.; BRITO, P. S de.; FRANCA-ROCHA, W. J, S. **AVALIAÇÃO DA INCUBAÇÃO DE PÓ DE ROCHA APLICADO EM SOLO FORTEMENTE ÁCIDO.** In: *Ensaio nas Ciências Ambientais e Agrárias: Pesquisa e Desafios e Perspectivas – Vol. 5.* Curitiba: Editora Bagai, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.37008/978-65-5368-506-2.17.11.24>. Acesso em: 22 fev. 2025.

BUDDENBAUM, H.; STEFFENS, M. The effects of spectral pretreatments on chemometric analyses of soil profiles using laboratory imaging spectroscopy. *Applied and Environmental Soil Science*, v. 2012, p. 274903, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/274903>.

CAMPE, J.; MEJBEL, M.; PATSKOWSKI, D.; ZAMUNÉR FILHO, A. N. ***Remineralization for a Healthy Planet.*** Remineralize the Earth, 19 jul. 2022. Disponível em: <https://www.remineralize.org/wp-content/uploads/2022/08/RTE-Remineralization-for-a-Healthy-Planet.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

HAYKIN, S. *Neural networks: a comprehensive foundation.* Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1998.

ISAKSSON, T.; NÆS, T. The effect of multiplicative scatter correction (MSC) and linearity improvement in NIR spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, v. 42, p. 1273–1284, 1988.

JIA, X.; FANG, Y.; HU, B.; YU, B.; ZHOU, Y. Development of Soil Fertility Index Using Machine Learning and Visible-Near-Infrared Spectroscopy. *Land*, v. 12, n. 2155, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land12122155>. Acesso em: 12 jan. 2025.

KHAMMAO, P.; RATTANAPICHAJ, W.; PITAKDANTHAM, R.; KASEMSAP, P.; SAJJAPHAN, K.; ROGER, J. M. Estimating macronutrient contents in Thai paddy soils using near-infrared (NIR) spectroscopy and locally weighted partial least square regression analysis. *Soil Science and Plant Nutrition*, v. 70, n. 3, p. 197-207, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/00380768.2024.2320406>.

LEONE, A. P. et al. Prediction of soil properties with PLSR and vis-NIR spectroscopy: Application to mediterranean soils from Southern Italy. *Current Analytical Chemistry*, v. 8, n. 2, p. 283-299, 2012.

LI, X.; PAN, W.; LI, D.; GAO, W.; ZENG, R.; ZHENG, G.; CAI, K.; ZENG, Y.; JIANG, C. Can fusion of vis-NIR and MIR spectra at three levels improve the prediction accuracy of soil nutrients? *Geoderma*, v. 441, 2024. ISSN 0016-7061. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116754>.

McCARTY, G. W.; REEVES, J. B.; REEVES, V. B.; FOLLETT, R. F.; KIMBLE, J. M. Mid-infrared and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil carbon measurement. *Soil Science Society of America Journal*, v. 66, p. 640-646, 2002. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.6400>.

MANNING, D. A. C.; THEODORO, S. H. Enabling food security through use of local rocks and minerals. *The Extractive Industries and Society*, v. 7, n. 2, p. 480-487, abr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.12.014>.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de. Fundamentos de Espectrorradiometria. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de; BAPTISTA, G. M. de M. *Refletância dos materiais terrestres: análises e interpretações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. p. 163-187.

NAES, T.; ISAKSSON, T.; KOWALSKI, B. Locally weighted regression and scatter correction for near-infrared reflectance data. *Analytical Chemistry*, v. 62, p. 664-673, 1990.

PENG, Y.; WANG, L.; ZHAO, L.; LIU, Z.; LIN, C.; HU, Y.; LIU, L. Estimation of Soil Nutrient Content Using Hyperspectral Data. *Agriculture*, v. 11, n. 1129, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture11111129>. Acesso em: 12 jan. 2025.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, v. 36, p. 1627-1639, 1964.

SONG, Y.-Q.; ZHAO, X.; SU, H.-Y.; LI, B.; HU, Y.-M.; CUI, X.-S. Predicting Spatial Variations in Soil Nutrients with Hyperspectral Remote Sensing at Regional Scale. *Sensors*, v. 18, n. 3086, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s18093086>. Acesso em: 12 jan. 2025.

THEODORO, S. H.; ALMEIDA, E. de. Agrominerais e a construção da soberania em insumos agrícolas no Brasil. *Agricultura*, v. 10, n. 1, p. 22-28, 2013. Disponível em: <http://aspta.org.br/files/2013/06/artigo-3.pdf>. Acesso em: 4 out. 2022.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O.; ROCHA, E. L.; REGO, K. G. Experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes. *Espaço & Geografia*, v. 9, n. 2, p. 263-292, 2006. ISSN 1516-9375. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegeografia/article/download/39794/30925/113006>. Acesso em: 12 nov. 2024.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. *The use of rocks to improve family agriculture in Brazil*. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, n. 4, p. 721-730, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000400008>. Acesso em: 22 fev. 2025.

THEODORO, S. H.; TCHOUANKOUE, J. P.; GONÇALVES, A. O.; LEONARDOS, O. H.; HARPER, J. A Importância de uma Rede Tecnológica de Rochagem para a Sustentabilidade em Países Tropicais (The Importance of a Stonemeal Technological Network for Sustainability in Tropical Countries). **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 5, n. 6, p. 1390–1407, 2013. DOI: 10.26848/rbgf.v5i6.232929. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/232929>. Acesso em: 24 fev. 2025

VAN STRAATEN, P. *Agrogeology: the use of rocks for crops*. Cambridge, Ontário: Environquest, 2007. 440 p.

VAN STRAATEN, P. Distribution of agromineral resources in space and time – a global geological perspective. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.57, e01453, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.01453>.

VAPNIK, V. N. *The nature of statistical learning theory*. New York: Springer-Verlag, 2000.

ZENG, R.; ROSSITER, D. G.; ZHANG, J.; CAI, K.; GAO, W.; PAN, W.; ZENG, Y.; JIANG, C.; LI, D. Quão bem a espectroscopia de reflectância pode alocar amostras para classes de fertilidade do solo? *Agronomy*, v. 12, n. 1964, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12081964>.

WADOUX, Alexandre M. J.-C.; MALONE, Brendan; MINASNY, Budiman; FAJARDO, Mario; McBRATNEY, Alex B. *Soil Spectral Inference with R: Analysing Digital Soil Spectra using the R Programming Environment*. [S.l.]: Springer, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64896-1>.

## CAPÍTULO 4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo analisar o comportamento químico e espectral de solo submetido a teste de incubação com pó de rocha carbonática fosfatada como alternativa sustentável de remineralização. Partiu-se de questionamento centrais: de que forma acontece a incorporação de fósforo em solo submetido a incubação em diferentes concentrações de pó de rocha? É evidente acompanhar esse processo utilizando a espectrorradiometria de reflectância? A espectrorradiometria tem capacidade de quantificação do Fósforo de forma precisa?

Concluiu-se que a incubação com pó de rocha carbonática fosfatada foi eficiente na disponibilização de fósforo e na correção da acidez ao longo do tempo, comparada à aplicação do MAP, que devido sua composição nitrogenada, acidificam as amostras e inviabilizou a disponibilidade de nutrientes. Também, ficou evidente a importância de testagens a partir de doses progressivas do material, já que observou-se uma variação na concentração de nutrientes dispostos pelo pó de rocha, diferente do MAP, o que pode causar também, um desequilíbrio no sistema.

Além disso, a aplicação técnica da espectrorradiometria, através da geração de modelos preditivos, como destacado no artigo 2, apresentou resultados satisfatórios na mensuração do fósforo e pH, que apresentaram melhores alterações às aplicações de insumos químico e natural, além de serem dois importantes atributos no processo de fertilidade do solo. Os modelos gerados mostraram-se promissores e com potencial à inovação em processos de alternativas à certificação de insumos de natureza agromineral, o que destaca a espectrorradiometria e o seu potencial frente às técnicas analíticas tradicionais.

Com isso, o comportamento químico e espectral de solo ácido incubado com pó de rocha carbonática fosfatada avaliou inicialmente e, de forma efetiva este material da região da Bacia de Irecê, na Bahia. Porém, alguns desafios merecem destaques como, a necessidade de criar/innovar em protocolos de dosagens e recomendações à aplicação de agrominerais no setor da agricultura.

Além disso, no presente estudo, ainda que a quantidade de amostras testadas nos modelos não implicaram significativamente nos resultados encontrados, elas são fundamentais para melhores ajustes e calibrações. Logo, quanto maior seu número, melhor e mais preciso podem ser os resultados, questões que podem ser melhor trabalhadas e revistas em propostas futuras. Também é importante que novos ensaios, seguindo os

protocolos exigidos pela legislação brasileira, devam ser realizados com o intuito de validar o material utilizado enquanto insumo alternativo sustentável à remineralização de solos.

**APÊNDICE A - laudo químico das amostras**

AMOSTRA	pH em H <sub>2</sub> O	P	Ca + Mg	Ca	Mg	Relação Ca/Mg	K	Na	Al	Al+H	SB	CTC	V	Fe	Cu	Zn	Mn
	-	mg/dm <sup>3</sup>	cmol c/dm <sup>3</sup>			-	cmol c/dm <sup>3</sup>						%	mg/dm <sup>3</sup>			
<b>CT0</b>	5,4	1	2,47	1,19	1,28	0,93	0,21	0,02	0,1	3,00	2,70	5,70	47,37	44,96	0,14	1,40	2,78
<b>Classificação</b> 1	Baixa	Muito baixo	-	Baixo	Bom	Baixo	-	Muito baixo	Baixo	Médio	Médio	Bom	Médio	Bom	Muito baixo	Médio	Baixo
<b>30 DIAS</b>																	
<b>1130</b>	5,8	90	1,88	0,99	0,89	1,11	0,11	0,09	0,05	2,58	2,08	4,66	44,64	44,2	0,09	0,54	1,29
<b>1230</b>	5,8	109	2,06	1,12	0,94	1,19	0,16	0,08	0,05	1,78	2,30	4,08	56,37	44,49	0,09	0,70	1,75
<b>1330</b>	6,1	233	1,77	0,98	0,79	1,24	0,10	0,10	0,00	1,94	1,97	3,91	50,38	43,08	0,08	0,36	0,99
<b>1430</b>	6,2	295	2,46	1,43	1,03	1,39	0,15	0,10	0,00	0,97	2,71	3,68	73,64	41,33	0,10	0,65	1,67
<b>1530</b>	6,0	266	2,14	1,23	0,91	1,35	0,11	0,10	0,00	1,61	2,35	3,96	59,34	40,53	0,08	0,36	1,01
<b>2130</b>	5,3	75	1,90	1,05	0,85	1,24	0,18	0,07	0,24	2,74	2,15	4,89	43,97	58,26	0,12	1,01	2,50
<b>2230</b>	5,2	57	1,82	0,97	0,85	1,14	0,16	0,08	0,19	1,29	2,06	3,35	61,49	47,22	0,11	0,79	1,87
<b>2330</b>	5,2	34	1,64	0,94	0,69	1,38	0,13	0,08	0,19	1,94	1,85	3,79	48,81	44,69	0,09	0,63	1,59
<b>2430</b>	5,1	103	1,62	0,96	0,76	1,13	0,15	0,07	0,19	2,26	1,84	4,10	44,88	60,95	0,09	0,67	1,48
<b>2530</b>	5,3	160	1,51	0,74	0,77	0,96	0,14	0,07	0,24	2,42	1,72	4,14	41,55	66,42	0,08	0,50	1,24
<b>60 DIAS</b>																	
<b>1160</b>	5,8	211	2,56	1,55	1,01	1,53	0,16	0,09	0,05	2,37	2,81	5,18	54,25	47,95	0,13	1,18	1,87
<b>1260</b>	5,9	193	2,58	1,57	1,01	1,55	0,14	0,08	0,05	2,05	2,80	4,85	57,73	52,66	0,13	1,08	1,64
<b>1360</b>	6,0	242	2,41	1,56	0,85	1,83	0,14	0,08	0,00	2,37	2,63	5,00	52,60	53,56	0,13	1,20	1,99
<b>1460</b>	6,2	286	2,74	1,55	1,19	1,30	0,17	0,09	0,00	2,21	3,00	5,21	57,58	52,82	0,12	0,90	1,40
<b>1560</b>	6,0	225	2,36	1,24	1,12	1,11	0,12	0,08	0,00	1,90	2,56	4,46	57,4	48,10	0,13	1,36	2,35
<b>2160</b>	5,0	76	1,84	0,96	0,88	1,09	0,18	0,07	0,24	2,66	2,09	4,75	44,00	49,56	0,10	0,72	1,68
<b>2260</b>	5,0	116	1,95	1,01	0,94	1,07	0,18	0,09	0,24	2,58	2,22	4,80	46,25	54,15	0,10	0,85	1,91
<b>2360</b>	5,2	116	1,62	0,79	0,83	0,95	0,16	0,06	0,19	2,58	1,84	4,42	41,63	58,56	0,10	0,63	1,50
<b>2460</b>	5,3	171	1,80	0,92	0,88	1,05	0,17	0,07	0,19	2,91	2,04	4,95	41,21	65,67	0,10	0,76	1,81
<b>2560</b>	5,3	211	1,52	0,75	0,77	0,97	0,14	0,07	0,24	2,42	1,73	4,15	41,69	70,87	0,09	0,57	1,36
<b>90 DIAS</b>																	
<b>1190</b>	5,7	138	2,33	1,22	1,11	1,10	0,15	0,07	0,05	2,21	2,55	4,76	53,57	43,02	0,13	1,27	1,79
<b>1290</b>	5,9	178	2,50	1,27	1,23	1,03	0,16	0,07	0,05	2,05	2,73	4,78	57,11	48,60	0,14	1,13	1,65
<b>1390</b>	6,0	189	2,45	1,21	1,24	0,98	0,14	0,07	0,00	1,90	2,66	4,56	58,33	50,71	0,12	0,85	1,35
<b>1490</b>	6,3	250	2,60	1,53	1,07	1,43	0,16	0,08	0,00	1,74	2,84	4,58	62,01	46,16	0,13	1,40	2,15
<b>1590</b>	6,5	389	2,81	1,60	1,21	1,32	0,13	0,12	0,00	1,74	3,06	4,80	63,75	51,51	0,12	0,84	1,22
<b>2190</b>	5,0	135	2,09	0,99	1,10	0,90	0,19	0,08	0,19	2,91	2,36	5,27	44,78	61,80	0,11	0,94	2,18

<b>2290</b>	5,0	135	1,70	0,88	0,82	1,07	0,16	0,08	0,19	2,42	1,94	4,36	44,50	56,72	0,10	0,83	1,83
<b>2390</b>	5,0	152	1,52	0,90	0,62	1,45	0,14	0,06	0,24	2,91	1,72	4,63	37,15	66,51	0,10	0,63	1,52
<b>2490</b>	4,9	147	1,86	0,91	0,95	0,96	0,16	0,07	0,19	2,74	2,09	4,83	43,27	66,26	0,12	0,86	1,79
<b>2590</b>	5,0	211	1,42	0,74	0,63	1,25	0,14	0,07	0,24	2,10	1,63	3,73	44,70	70,13	0,10	0,65	1,50
<b>120 DIAS</b>																	
<b>1112</b>	5,9	194	2,19	1,32	0,87	1,52	0,13	0,11	0,05	1,61	2,43	4,04	60,15	39,24	0,11	0,80	1,48
<b>1212</b>	5,9	189	2,68	1,71	0,97	1,76	0,14	0,07	0,00	3,32	2,89	6,21	46,54	46,97	0,14	1,02	1,36
<b>1312</b>	5,9	153	2,81	2,09	0,72	2,90	0,12	0,07	0,00	2,37	3,00	5,37	55,87	49,33	0,13	1,08	1,64
<b>1412</b>	6,0	249	2,85	1,90	0,95	2,00	0,17	0,08	0,00	2,05	3,10	5,15	60,19	44,04	0,13	1,18	1,82
<b>1512</b>	6,2	258	2,66	1,66	1,00	1,66	1,13	0,08	0,00	1,58	2,87	4,45	64,49	48,39	0,12	0,87	1,28
<b>2112</b>	5,2	109	2,04	1,08	0,96	1,13	0,17	0,07	0,19	2,58	2,28	4,86	46,91	57,56	0,10	0,89	1,94
<b>2212</b>	5,2	150	1,88	1,02	0,86	1,19	0,18	0,09	0,19	2,91	2,15	5,06	42,49	60,67	0,11	1,00	2,23
<b>2312</b>	4,9	145	1,41	0,76	0,65	1,17	0,14	0,07	0,19	3,23	1,62	4,85	33,40	64,42	0,10	0,67	1,62
<b>2412</b>	4,8	175	1,94	0,89	1,05	0,85	0,15	0,07	0,24	2,42	2,16	4,58	47,16	66,10	0,10	0,76	1,72
<b>2512</b>	4,9	175	1,59	0,74	0,85	0,87	0,13	0,07	0,19	2,74	1,79	4,53	39,51	66,09	0,08	0,58	1,35

<sup>1</sup>Classificação segundo o Manual de Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação (1999).

Elaboração: autor, 2024

**APÊNDICE B - Tabelas: preditos x observados – pH e P (PLSR e RF)**

AMOSTRA	pH	PLSR											
		R		SMO		SNV		MSC		CR		AB	
		Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo
1130	5.8	5,662358	0,137642	5,666365	0,133635	5,671753	0,128247	5,70554	0,09446	5,653933	0,146067	5,732216	0,067784
1160	5.8	5,893718	-0,09372	5,891919	-0,09192	5,916146	-0,11615	5,956098	-0,1561	5,949988	-0,14995	5,8922	-0,0922
1190	5.7	5,684716	0,015284	5,693358	0,006642	5,573179	0,126821	5,60693	0,09307	5,611543	0,088457	5,586532	0,113468
1112	5.9	5,915439	-0,01544	5,913781	-0,01378	5,929484	-0,02948	5,916791	-0,01679	5,9135	-0,0135	5,934955	-0,03495
1230	5.8	5,786184	0,013816	5,781274	0,018726	5,665227	0,134773	5,745255	0,054745	5,816174	-0,01617	5,770569	0,029431
1260	5.9	5,918044	-0,01804	5,927863	-0,02786	5,884481	0,015519	5,949564	-0,04956	5,855417	0,044583	5,895417	0,004583
1290	5.9	5,730114	0,169886	5,733171	0,166829	5,907251	-0,00725	5,736564	0,163436	5,720844	0,179156	5,812537	0,087463
1212	5.9	5,89404	0,00596	5,899068	0,000932	5,744933	0,155067	5,871508	0,028492	5,907013	-0,00701	5,853306	0,046694
1330	6.1	5,997101	0,102899	5,985615	0,114385	6,103207	-0,00321	5,961887	0,138113	6,100366	-0,00037	6,066134	0,033866
1360	6	6,018161	-0,01816	6,014723	-0,01472	5,894905	0,105095	5,977777	0,022223	6,004101	-0,0041	5,980466	0,019534
1390	6	6,003718	-0,00372	6,000391	-0,00039	5,825881	0,174119	5,86472	0,13528	5,90989	0,09011	5,963871	0,036129
1312	5.9	5,883375	0,016625	5,888062	0,011938	5,864698	0,035302	5,816491	0,083509	5,922017	-0,02202	5,891241	0,008759
1430	6.2	6,233032	-0,03303	6,235622	-0,03562	6,306082	-0,10608	6,26015	-0,06015	6,300278	-0,10028	6,235181	-0,03518
1460	6.2	6,162555	0,037445	6,15399	0,04601	6,106103	0,093897	6,160337	0,039663	6,155213	0,044787	6,157097	0,042903
1490	6.3	6,118037	0,181963	6,113983	0,186017	6,304439	-0,00444	6,11579	0,18421	6,119421	0,180579	6,255229	0,044771
1412	6	6,130415	-0,13041	6,137323	-0,13732	6,107506	-0,10751	6,120087	-0,12009	6,123741	-0,12374	6,103437	-0,10344
1530	6	6,169406	-0,16941	6,168384	-0,16838	6,109157	-0,10916	6,262384	-0,26238	6,232863	-0,23286	6,192969	-0,19297
1560	6	6,110644	-0,11064	6,105816	-0,10582	6,056076	-0,05608	6,172397	-0,1724	6,106252	-0,10625	6,093704	-0,0937
1590	6.5	6,384378	0,115622	6,376485	0,123515	6,530946	-0,03095	6,37239	0,12761	6,372478	0,127522	6,421504	0,078496
1512	6.2	6,197169	0,002831	6,199985	1,52E-05	6,159977	0,040023	6,292323	-0,09232	6,141576	0,058424	6,15989	0,04011
2130	5.3	5,040264	0,259736	5,021546	0,278454	5,424774	-0,12477	5,140899	0,159101	5,167729	0,132271	5,138938	0,161062
2160	5	4,896814	0,103186	4,887815	0,112185	5,083996	-0,084	5,026294	-0,02629	4,969294	0,030706	5,021945	-0,02194
2190	5	5,073848	-0,07385	5,081813	-0,08181	5,099039	-0,09904	5,097603	-0,0976	5,069243	-0,06924	5,058595	-0,0586
2112	5.2	5,170925	0,029075	5,162239	0,037761	5,19232	0,00768	5,144784	0,055216	5,178075	0,021925	5,186438	0,013562
2230	5.2	5,296326	-0,09633	5,297797	-0,0978	5,22131	-0,02131	5,193419	0,006581	5,291682	-0,09168	5,200192	-0,00019

<b>2260</b>	5	5,069468	-0,069468	5,066541	-0,066541	5,155664	-0,155664	5,13191	-0,13191	5,049514	-0,049514	5,095911	-0,095911
<b>2290</b>	5	5,032097	-0,032097	5,041681	-0,041681	4,995033	0,004967	5,054114	-0,054114	5,070704	-0,070704	5,02400	-0,02400
<b>2212</b>	5.2	5,218738	-0,018738	5,211358	-0,011358	5,378947	-0,178947	5,232346	-0,032346	5,248431	-0,048431	5,26026	-0,06026
<b>2330</b>	5.2	5,228088	-0,028088	5,226736	-0,026736	5,072112	0,127888	5,213506	-0,013506	5,163063	0,036937	5,189263	0,010737
<b>2360</b>	5.2	5,128747	0,071253	5,127571	0,072429	5,213051	-0,013051	5,236699	-0,036699	5,167604	0,032396	5,240038	-0,040038
<b>2390</b>	5	4,919739	0,080261	4,912897	0,087103	4,950626	0,049374	4,955839	0,044161	4,95291	0,04709	4,947346	0,052654
<b>2312</b>	4.9	5,085788	-0,185788	5,079497	-0,179497	4,99288	-0,09288	5,043636	-0,143636	5,083703	-0,183703	5,109818	-0,209818
<b>2430</b>	5.1	5,260946	-0,160946	5,258929	-0,158929	5,290275	-0,190275	5,254759	-0,154759	5,248764	-0,148764	5,251213	-0,151213
<b>2460</b>	5.3	5,325314	-0,025314	5,321037	-0,021037	5,135678	0,164322	5,178978	0,121022	5,260554	0,039446	5,141318	0,158682
<b>2490</b>	4.9	4,957718	-0,057718	4,983473	-0,083473	4,94542	-0,04542	4,949505	-0,049505	4,901663	-0,001663	4,903646	-0,003646
<b>2412</b>	4.8	5,06125	-0,26125	5,069805	-0,269805	4,962514	-0,162514	4,982822	-0,182822	4,97848	-0,17848	4,920366	-0,120366
<b>2530</b>	5.3	5,054749	0,245251	5,049957	0,250043	5,141864	0,158136	5,119106	0,180894	5,071962	0,228038	5,098386	0,201614
<b>2560</b>	5.3	5,072598	0,227402	5,069615	0,230385	5,207223	0,092777	5,125105	0,174895	5,159178	0,140822	5,107643	0,192357
<b>2590</b>	5	4,981584	0,018416	4,99869	0,00131	4,860372	0,139628	4,936507	0,063493	4,937978	0,062022	4,963205	0,036795
<b>2512</b>	4.9	5,132404	-0,232404	5,143827	-0,243827	4,915501	-0,015501	5,017188	-0,117188	5,012861	-0,112861	5,043018	-0,143018

AMOSTRA	pH	RF											
		R		SMO		SNV		MSC		CR		AB	
		Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo
1130	5.8	5,858257	-0,06733	5,863997	-0,064	5,868427	-0,06843	5,86746	-0,06746	5,843493	-0,04349	5,848253	-0,04825
1160	5.8	5,90381	-0,09344	5,90443	-0,10443	5,84673	-0,04673	5,851323	-0,05132	5,836613	-0,03661	5,896273	-0,09627
1190	5.7	5,674633	0,0188	5,693057	0,006943	5,776577	-0,07658	5,79707	-0,09707	5,596273	0,103727	5,654783	0,045217
1112	5.9	5,801523	0,090823	5,787373	0,112627	5,929213	-0,02921	5,920407	-0,02041	5,929383	-0,02938	5,802623	0,097377
1230	5.8	5,485823	0,307973	5,536173	0,263827	5,783497	0,016503	5,767557	0,032443	5,78429	0,01571	5,474273	0,325727
1260	5.9	5,939987	-0,03233	5,936127	-0,03613	5,93424	-0,03424	5,928687	-0,02869	5,900713	-0,00071	5,93944	-0,03944
1290	5.9	5,753603	0,157047	5,761473	0,138527	5,84268	0,05732	5,86722	0,03278	5,89697	0,00303	5,751423	0,148577
1212	5.9	5,817727	0,0621	5,829263	0,070737	5,91284	-0,01284	5,90932	-0,00932	5,904803	-0,0048	5,829187	0,070813
1330	6.1	5,98463	0,103333	5,95682	0,14318	5,939403	0,160597	5,907843	0,192157	6,05908	0,04092	5,96435	0,13565
1360	6	5,91818	0,096217	5,900853	0,099147	5,844833	0,155167	5,829407	0,170593	5,978127	0,021873	5,89645	0,10355
1390	6	5,742257	0,244963	5,76307	0,23693	5,792363	0,207637	5,780347	0,219653	5,73227	0,26773	5,760197	0,239803
1312	5.9	5,767083	0,099813	5,809127	0,090873	5,596143	0,303857	5,635823	0,264177	5,953677	-0,05368	5,81656	0,08344
1430	6.2	5,88363	0,34376	5,861353	0,338647	6,07612	0,12388	6,07444	0,12556	6,10611	0,09388	5,85908	0,34092
1460	6.2	6,005827	0,174857	6,00973	0,19027	6,105953	0,094047	6,097737	0,102263	5,922833	0,277167	6,015663	0,184337
1490	6.3	6,063763	0,27038	6,060507	0,239493	6,188467	0,111533	6,194403	0,105597	6,01907	0,28093	6,056163	0,243837
1412	6	5,836787	0,160193	5,843197	0,156803	5,938647	0,061353	5,956497	0,043503	6,028503	-0,0285	5,83855	0,16145
1530	6	5,916367	0,09807	5,909937	0,090063	5,958203	0,041797	5,96382	0,03618	5,97394	0,02606	5,884297	0,115703
1560	6	6,025423	-0,03048	6,0097	-0,0097	5,955947	0,044053	5,96468	0,03532	5,9741	0,0259	6,01635	-0,01635
1590	6.5	6,256557	0,258003	6,219083	0,280917	6,21248	0,28752	6,209683	0,290317	6,23655	0,26345	6,215357	0,284643
1512	6.2	6,054137	0,135707	6,07454	0,12546	6,088253	0,111747	6,100997	0,099003	6,08266	0,11734	6,037977	0,162023
2130	5.3	5,31112	-0,00669	5,308497	-0,0085	5,26057	0,03943	5,269337	0,030663	5,241287	0,058713	5,311347	-0,01135
2160	5	5,201683	-0,19704	5,171737	-0,17174	5,073203	-0,0732	5,063463	-0,06346	5,10474	-0,10474	5,189357	-0,18936
2190	5	5,09554	-0,09447	5,096193	-0,09619	5,325987	-0,32599	5,32805	-0,32805	5,105537	-0,10554	5,07768	-0,07768
2112	5.2	5,261593	-0,0603	5,259813	-0,05981	5,199287	0,000713	5,184173	0,015827	5,21783	-0,01783	5,235823	-0,03582
2230	5.2	5,22932	-0,01467	5,217177	-0,01718	5,30263	-0,10263	5,29957	-0,09957	5,226297	-0,0263	5,201143	-0,00114

<b>2260</b>	5	5,111997	-0,12784	5,13203	-0,13203	5,06335	-0,06335	5,09128	-0,09128	5,09125	-0,09125	5,10255	-0,10255
<b>2290</b>	5	5,07082	-0,05857	5,06104	-0,06104	5,05144	-0,05144	5,06973	-0,06973	5,28784	-0,28784	5,0507	-0,0507
<b>2212</b>	5.2	5,28846	-0,08245	5,26000	-0,06	5,15624	0,04375	5,16744	0,03255	5,21392	-0,0139	5,31438	-0,1143
<b>2330</b>	5.2	5,30076	-0,10984	5,314817	-0,11482	5,23065	-0,03065	5,212013	-0,01201	5,22642	-0,02642	5,30586	-0,10586
<b>2360</b>	5.2	5,288117	-0,10804	5,3111	-0,1111	5,40357	-0,20357	5,414517	-0,21452	5,21827	-0,01827	5,28177	-0,08177
<b>2390</b>	5	5,18495	-0,21609	5,20697	-0,20697	5,025227	-0,02523	5,011327	-0,01133	5,005657	-0,00566	5,2195	-0,2195
<b>2312</b>	4.9	5,11988	-0,20567	5,12245	-0,22245	5,05464	-0,15464	5,085943	-0,18594	5,15058	-0,25058	5,12961	-0,22961
<b>2430</b>	5.1	5,25122	-0,15946	5,26521	-0,16521	5,09798	0,002017	5,090327	0,009673	5,227397	-0,1274	5,238657	-0,13866
<b>2460</b>	5.3	5,41989	-0,10603	5,413167	-0,11317	5,272067	0,02793	5,26588	0,03412	5,30896	-0,00896	5,42614	-0,12614
<b>2490</b>	4.9	5,16827	-0,26905	5,15403	-0,25403	5,148397	-0,2484	5,160193	-0,26019	5,074	-0,174	5,17447	-0,27447
<b>2412</b>	4.8	5,13337	-0,3238	5,18096	-0,38096	4,97320	-0,1732	4,958123	-0,15812	4,958897	-0,1589	5,1185	-0,3185
<b>2530</b>	5.3	5,36361	-0,05015	5,36202	-0,06202	5,2556	0,0444	5,266203	0,033797	5,30147	-0,00147	5,3355	-0,0355
<b>2560</b>	5.3	5,340277	-0,04951	5,347237	-0,04724	5,36202	-0,06202	5,36739	-0,06739	5,282507	0,01749	5,364987	-0,06498
<b>2590</b>	5	5,098667	-0,10051	5,119927	-0,1199	5,03635	-0,03635	5,041123	-0,04112	5,02267	-0,02267	5,08865	-0,08865
<b>2512</b>	4.9	5,21574	-0,31305	5,20562	-0,30562	4,99561	-0,09561	5,01651	-0,11651	4,98535	-0,08535	5,24902	-0,34902

AMOSTRA	Fósforo mg/dm <sup>3</sup>	PLSR											
		R		SMO		SNV		MSC		CR		AB	
		Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo
1130	90	210,8059	-120,8059	210,8225	-120,8225	146,7204	-56,72043	121,7199	-31,71989	129,1924	-39,19238	101,6839	-11,68395
1160	211	236,7113	-25,71125	236,7551	-25,75506	171,9636	39,03645	182,4838	28,51621	198,5391	12,46086	219,5046	-8,504565
1190	138	187,0718	-49,07176	187,0615	-49,06153	213,0999	-75,09992	189,365	-51,36498	164,3604	-26,36044	147,8673	-9,867269
1112	194	213,7822	-19,78221	213,7502	-19,75017	197,9773	-3,977317	209,0896	-15,08956	193,0377	0,96234	184,5697	9,430343
1230	109	158,8029	-49,80287	158,8228	-49,82278	161,7089	-52,70893	137,732	-28,73205	139,9251	-30,92505	148,4367	-39,4367
1260	193	234,9032	-41,90317	234,8692	-41,86916	190,2924	2,707581	223,09	-30,09005	217,9951	-24,99515	196,0322	-3,032208
1290	178	211,908	-33,90804	211,8928	-33,89283	215,1812	-37,18122	192,106	-14,10597	197,1855	-19,18547	193,9939	-15,99386
1212	189	168,938	20,06195	168,9727	20,02727	192,9925	-3,992478	183,4047	5,595284	185,8373	3,162731	186,6379	2,362099
1330	233	231,5187	1,481251	231,5762	1,423794	243,518	-10,51799	199,6492	33,3508	212,4751	20,52489	228,5004	4,499557
1360	242	226,5577	15,44234	226,5741	15,42592	247,3866	-5,386558	243,2257	-1,225672	245,1107	-3,110717	247,0024	-5,002374
1390	189	182,8947	6,10529	182,843	6,15704	221,1849	-32,1849	176,7931	12,20693	178,9242	10,07583	168,4358	20,56416
1312	153	200,1713	-47,17133	200,1805	-47,18047	147,4153	5,584738	158,3879	-5,387863	152,7168	0,283213	150,821	2,179036
1430	295	250,0831	44,9169	250,1122	44,88779	252,4916	42,50836	257,096	37,90397	264,154	30,84605	264,0135	30,98654
1460	286	218,3631	67,63692	218,3413	67,65871	281,6812	4,31883	277,6868	8,313158	287,83	-1,829977	277,046	8,954029
1490	250	256,761	-6,761043	256,7431	-6,743113	243,4727	6,52725	249,3937	0,606264	245,2354	4,76459	256,8827	-6,88271
1412	249	209,1362	39,86383	209,0769	39,92307	260,9128	-11,91282	286,3507	-37,35073	272,1359	-23,13595	252,8406	-3,840648
1530	266	218,4148	47,58518	218,4532	47,54678	229,2873	36,71273	238,1684	27,83162	256,7409	9,2591	259,0456	6,954449
1560	225	257,5656	-32,56555	257,5688	-32,56883	236,7363	-11,73628	229,2418	-4,241845	205,6386	19,36139	216,8879	8,112103
1590	389	284,5191	104,4809	284,4782	104,5218	318,2181	70,78189	353,1797	35,82033	358,008	30,99202	389,0873	-0,087344
1512	258	243,6541	14,34589	243,6347	14,36531	258,2361	-0,236123	254,8091	3,190943	258,3496	-0,349627	257,755	0,245022
2130	75	126,6398	-51,63985	126,6789	-51,67891	64,3973	10,6027	76,52531	-1,525314	81,94985	-6,949846	100,4699	-25,46991
2160	76	73,02871	2,971291	73,05913	2,940866	82,94055	-6,940554	81,40366	-5,403656	79,68345	-3,683448	65,55272	10,44728
2190	135	101,5676	33,43238	101,6279	33,37212	118,0747	16,92532	114,4416	20,55838	121,0949	13,90508	126,0337	8,966276
2112	109	123,3168	-14,31683	123,2835	-14,28346	137,7931	-28,79314	134,9206	-25,92061	144,4155	-35,41554	138,6134	-29,61337

<b>2230</b>	57	131,5284	-74,5284	131,5171	-74,5171	76,58752	-19,58752	65,99664	-8,996639	52,51557	4,484437	65,06542	-8,065421
<b>2260</b>	116	101,1564	14,84364	101,1339	14,86618	70,01906	45,9804	78,99067	37,00939	71,88957	44,11048	70,75347	45,24653
<b>2290</b>	135	109,568	25,43198	109,628	25,37198	139,6773	-4,677251	144,7933	-9,793499	141,75	-6,754977	134,933	0,06690
<b>2212</b>	150	154,7712	-4,771184	154,7487	-4,74813	140,0317	9,968922	134,5449	15,45506	149,4059	0,59417	150,296	-0,2965
<b>2330</b>	34	142,0189	-108,0189	142,0345	-108,0345	70,6966	-36,6966	78,4894	-44,4894	89,78356	-55,78356	66,61499	-32,61499
<b>2360</b>	116	146,181	-30,18101	146,1756	-30,17564	137,4173	-21,41731	139,3684	-23,36837	148,9809	-32,98087	112,6695	3,33047
<b>2390</b>	152	119,4038	32,59618	119,4523	32,54774	124,7491	27,25092	153,2155	-1,215549	136,2638	15,73624	145,787	6,218967
<b>2312</b>	145	111,473	33,52698	111,4511	33,54894	130,8536	14,14642	107,8377	37,16225	109,0108	35,9892	131,2017	13,79829
<b>2430</b>	103	153,3199	-50,31989	153,3081	-50,3081	60,29699	42,70301	52,99982	50,00018	51,80478	51,19522	67,00947	35,99059
<b>2460</b>	171	163,0369	7,963084	163,0138	7,986204	189,7367	-18,73666	172,0537	-1,053652	134,1076	36,89244	161,4416	9,558359
<b>2490</b>	147	144,0401	2,959939	144,0975	2,902545	183,7528	-36,75276	183,4003	-36,40029	160,4607	-13,46073	159,5694	-12,56947
<b>2412</b>	175	131,9195	43,08054	131,8659	43,13409	147,0831	27,91691	158,1626	16,83744	170,866	4,134028	192,8589	-17,85893
<b>2530</b>	160	140,5425	19,45749	140,5625	19,43746	122,0774	37,92259	145,8379	14,16211	163,6753	-3,675309	148,2467	11,75397
<b>2560</b>	211	162,3827	48,61734	162,3846	48,61536	216,8439	-5,843914	239,3077	-28,30772	240,2406	-29,24056	224,5654	-13,56536
<b>2590</b>	211	110,6548	100,3452	110,6332	100,3668	171,8062	39,19382	207,9667	3,03326	193,4933	17,5067	209,3537	1,646917
<b>2512</b>	175	140,8872	34,11279	140,8153	34,18465	174,6882	0,311831	156,7703	18,22972	185,2113	-10,21135	171,9262	3,073798

AMOSTRA	Fósforo mg/dm³	RF											
		R		SMO		SNV		MSC		CR		AB	
		Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo	Predito	Resíduo
1130	90	145,0789	-56,4204	155,947	-65,947	143,0842	-53,0842	145,1129	-55,1129	140,3426	-50,3426	146,8331	-56,8331
1160	211	209,1253	6,092633	201,8835	9,116533	208,075	2,924967	208,8335	2,166467	204,4842	6,515767	204,8375	6,162467
1190	138	146,4589	-10,19	150,0373	-12,0373	161,9334	-23,9334	163,5423	-25,5423	168,5477	-30,5477	147,2654	-9,26543
1112	194	189,0815	2,301833	190,0109	3,9891	202,8274	-8,8274	198,7721	-4,7721	201,6228	-7,6227	190,2012	3,798833
1230	109	111,0058	-2,1521	113,4955	-4,4955	119,9903	-10,9903	124,3104	-15,3104	126,5896	-17,5896	110,1529	-1,1529
1260	193	196,9264	-5,2806	199,1961	-6,19607	201,9272	-8,92723	199,2757	-6,27573	191,3627	1,6373	195,1666	-2,16657
1290	178	180,3066	-1,2571	179,3552	-1,35517	182,4366	-4,4366	179,9093	-1,90933	187,5414	-9,5414	178,4002	-0,4002
1212	189	189,6568	3,024367	186,7873	2,2127	192,0385	-3,03847	189,8165	-0,8165	195,5438	-6,5438	186,2162	2,7838
1330	233	225,7987	6,816767	223,1474	9,852567	213,8453	19,1547	217,1598	15,84023	231,4298	1,5702	223,7667	9,233333
1360	242	221,4427	17,9912	223,6687	18,3313	218,6487	23,3513	226,2123	15,7877	229,9332	12,06677	222,5041	19,49587
1390	189	168,8252	18,99627	169,7229	19,27707	174,287	14,71297	178,2452	10,75477	173,1856	15,81443	170,9781	18,02193
1312	153	164,5503	-11,6022	161,2776	-8,27763	166,0272	-13,0272	168,4172	-15,4172	182,6608	-29,6608	162,7203	-9,7203
1430	295	248,6968	42,44927	257,9151	37,08493	259,5016	35,4984	260,5807	34,4193	249,6829	45,31713	255,5397	39,46027
1460	286	247,6192	37,964	248,1006	37,89943	248,4528	37,54723	241,9279	44,0721	231,8224	54,1776	248,8296	37,17043
1490	250	229,4957	20,5295	224,5144	25,4856	248,9943	1,005667	246,2484	3,751567	233,2995	16,70047	226,0093	23,9907
1412	249	215,8199	34,69323	209,0965	39,9035	217,7117	31,28833	222,6768	26,3232	225,9586	23,04143	213,2983	35,70167
1530	266	242,4572	29,33617	239,9689	26,03107	244,0228	21,97717	248,0021	17,99787	241,4596	24,54037	237,1583	28,84173
1560	225	255,9114	-11,2144	245,9145	-20,9145	223,0232	1,976833	222,2668	2,7332	225,0	-0,0	248,4681	-23,4681
1590	389	326,9837	75,86593	319,2542	69,74583	321,8818	67,11817	313,2056	75,79443	303,8119	85,18813	316,0371	72,9629
1512	258	242,2971	15,07517	243,9388	14,06117	254,1471	3,8529	251,22	6,779967	239,905	18,09487	243,1953	14,8047
2130	75	96,72173	-24,0139	96,77143	-21,7714	92,1404	-17,1404	93,74957	-18,7496	95,35387	-20,3539	97,30717	-22,3072
2160	76	87,5645	-16,4663	95,95047	-19,9505	82,1069	-6,1069	84,0473	-8,0473	90,6859	-14,6859	88,68243	-12,6824
2190	135	122,6437	10,24693	126,2465	8,753533	164,4625	-29,4625	167,2373	-32,2373	146,1924	-11,1924	123,7426	11,25743
2112	109	122,4568	-12,4006	117,4579	-8,45787	112,017	-3,01703	111,9519	-2,95193	118,6423	-9,64227	122,8365	-13,8365
2230	57	84,8433	-33,3025	89,46637	-32,4664	73,53197	-16,532	78,1418	-21,1418	77,00753	-20,0075	84,20203	-27,202

<b>2260</b>	116	122,7268	-4,72677	117,682	-1,68197	110,4545	5,5455	110,1012	5,8988	112,1627	3,8377	121,528	-5,5284
<b>2290</b>	135	127,172	8,612033	132,028	2,971967	151,087	-16,087	149,3329	-14,3329	154,0159	-19,0159	126,25	8,74
<b>2212</b>	150	159,8553	-13,9395	160,8344	-10,8344	162,0716	-12,0716	163,104	-13,104	159,4369	-9,4369	162,298	-12,298
<b>2330</b>	34	85,15167	-53,4678	84,77077	-50,7708	73,95963	-39,9596	76,5794	-42,5794	75,06683	-41,0668	85,0639	-51,0639
<b>2360</b>	116	136,2257	-18,1741	136,6516	-20,6516	137,2551	-21,2551	141,1204	-25,1204	135,5297	-19,5297	136,8303	-20,8303
<b>2390</b>	152	158,3885	-4,24033	151,7436	0,256433	150,7028	1,297167	152,6979	-0,6979	158,5693	-6,5693	152,6188	-0,61877
<b>2312</b>	145	160,1617	-16,585	165,3831	-20,3831	158,0223	-13,0223	156,9455	-11,9455	160,2327	-15,2327	164,0484	-19,0484
<b>2430</b>	103	132,7921	-33,9701	139,7956	-36,7956	127,8772	-24,8772	131,3357	-28,3357	132,3902	-29,3902	142,4337	-39,4337
<b>2460</b>	171	181,2261	-7,39083	178,8266	-7,82657	134,287	36,71297	134,5992	36,40077	167,6476	3,3524	180,6198	-9,61977
<b>2490</b>	147	174,1581	-24,067	171,2627	-24,2627	153,7371	-6,73707	154,9467	-7,9467	156,7933	-9,79327	176,4419	-29,4419
<b>2412</b>	175	175,2169	0,1904	175,7381	-0,73807	165,3441	9,655867	167,9815	7,018467	174,266	0,734	174,378	0,622
<b>2530</b>	160	156,8606	4,6768	155,7716	4,228367	160,1092	-0,10917	162,9298	-2,92977	153,9795	6,020467	156,1519	3,848133
<b>2560</b>	211	195,9262	15,0839	194,9697	16,03027	189,3386	21,6614	191,7596	19,24037	195,723	15,277	197,2882	13,7118
<b>2590</b>	211	168,7092	39,8103	170,4301	40,5699	190,5006	20,49937	186,3436	24,65637	187,1583	23,84173	170,9766	40,02343
<b>2512</b>	175	176,1077	1,487533	175,227	-0,227	173,7517	1,248267	174,7269	0,2731	173,4127	1,587933	172,6797	2,320267