

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

JOÃO CARLOS FERREIRA MENDONÇA

CARACTERIZAÇÃO E POTENCIAL AGROMINERAL DE UM REGOLITO DE  
RIACHÃO DAS NEVES-BA

MONTE CARMELO  
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
JOÃO CARLOS FERREIRA MENDONÇA

CARACTERIZAÇÃO E POTENCIAL AGROMINERAL DE UM REGOLITO DE  
RIACHÃO DAS NEVES-BA

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de Agronomia da  
Universidade Federal de Uberlândia, Campus  
Monte Carmelo, como parte dos requisitos  
necessários para obtenção do título de  
Engenheiro Agrônomo.

Orientador (a): Prof. Dr. Edmar Isaias  
de Melo.

MONTE CARMELO  
2024

JOÃO CARLOS FERREIRA MENDONÇA

CARACTERIZAÇÃO E POTENCIAL AGROMINERAL DE UM REGOLITO DE  
RIACHÃO DAS NEVES-BA

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de Agronomia da  
Universidade Federal de Uberlândia, Campus  
Monte Carmelo, como parte dos requisitos  
necessários para obtenção do título de  
Engenheiro Agrônomo.

Monte Carmelo, 25 de abril de 2024

Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Edmar Isaias de Melo.

---

Dr. Antonio Nilson Zamunér Filho

---

Dr. Eduardo Osório Senra

MONTE CARMELO  
2024

## RESUMO

Garantir a qualidade nutricional do solo é crucial para otimizar a produtividade das culturas. Os fertilizantes, portanto, devem fornecer os nutrientes essenciais para o crescimento das plantas, no entanto, aumentam os custos de produção. A rochagem consiste em uma técnica de aplicação de resíduos de pós de rochas diretamente ao solo, visando restaurar os nutrientes essenciais e de corrigir o pH do meio. O estudo propõe avaliar a composição mineralógica, solubilidade de nutrientes em meio aquoso do pó de rocha fabricado pela empresa GEOFERTIL na mina de Riacho do Pintor, localizada em Riachão das Neves, Bahia e avaliar as alterações nas características de solo. O pó de rocha foi avaliado em relação a sua composição mineralógica, por difratometria de raios X (DRX), capacidade retenção de água por gravimetria, capacidade de troca de cátions (CTC) pelo método do azul de metileno e pH do ponto de carga zero (pHPCZ). Testes de solubilização foram realizados com solução ácido cítrico e ácido acético na concentração de  $0,02 \text{ mol L}^{-1}$  e água com pH 6,5 utilizando a relação massa/volume de 25g/L nos tempos de contato de 0,5; 2,0; 8,0; 32 e 128 horas. Ensaios de incubação com duas texturas de solos foram realizados com o pó de rocha Geofertil e Ekosil nas doses de 6, 12 e 24 toneladas por hectare para ambos os solos, além de calcário calcítico e dolomítico, nas doses de 2,42 e 2,32 t/ha para solo argiloso e 1,59 e 1,52 t/ha para solo arenoso, respectivamente. Os resultados de DRX mostraram que o pó de rocha apresenta 30% de muscovita e 24% de vermiculita, sendo que essa composição mineralógica contribuiu para uma capacidade retenção de água elevada do material, 44,1%, além das características de carga superficial líquida do material, avaliada pelo pHPCZ, que indica uma predominância de carga negativa. As características mineralógicas do pó de rocha também revelaram uma CTC elevada ( $56,7 \text{ mmol/kg}$ ), além de promover alterações nos valores da CTC dos solos avaliados, principalmente no solo arenoso. Elementos potencialmente tóxicos foram quantificados e todas as concentrações encontradas foram inferiores ao máximo estabelecido na instrução Normativa nº 5 de 2016 do MAPA. Os resultados de solubilização de nutrientes foram expressos em concentração acumulada em função do tempo acumulado, onde foram observadas liberações de 260,7 mg/L em 42,5 horas, Potássio liberou 454, 214 e 130 mg/L de K acumulado em 42,5 horas para os extratores água, ácido cítrico e ácido acético respectivamente. Cálcio e Magnésio tiveram comportamento semelhante na liberação dos nutrientes, totalizando no final 153 e 191 mg/L no tempo acumulado de 170,5 horas para Cálcio e magnésio respectivamente. Silício também teve comportamento semelhante quando se compara os extratores, mas destaque se dá para ácido cítrico no tempo acumulado de 42,5 horas, liberando 298,12 mg/L de (Si). Os elementos ferro e manganês se destacaram com ácido cítrico liberando 3476 e 1028 mg/L em 170,5 horas acumulada. No tempo de incubação de 25 dias os pós de rochas GEOFERTIL e EKOSIL não foram capazes de corrigir o pH do solo em comparação com os calcários calcítico e dolomítico. O pó de rocha Geofertil pode fornecer potássio e alguns outros micronutrientes, além de causar mudanças na dinâmica de liberação de nutrientes para a solução do solo, principalmente em solos arenosos. Seu maior potencial refere-se à capacidade de retenção de água, o que pode contribuir muito para aliviar o estresse hídrico em regiões e períodos de baixa pluviosidade.

**Palavras-chave:** remineralizadores, nutrição de plantas, fertilizantes

## ABSTRACT

Ensuring the nutritional quality of the soil is crucial to optimize crop productivity. Fertilizers, therefore, must provide the essential nutrients for plant growth, however, increase production costs. Rocking consists of a technique of applying waste rock powders directly to the soil, aiming to restore essential nutrients and also to correct the pH of the medium. The rochagem involves applying rock powder residue directly to the soil, with the aim of restoring essential nutrients and correcting the pH of the medium. The study proposes to evaluate the mineralogical composition, solubility of nutrients in aqueous medium of the rock powder manufactured by the company GEOFERTIL in the mine of Riacho do Pintor, located in Riachão das Neves, Bahia and to evaluate the changes in soil characteristics. The water retention capacity was measured by slowly adding 25 mL of water to 20 g of dry rock powder, which resulted in a water retention capacity of 44.11%. Solubility tests were carried out with citric acid solution and acetic acid at 0.02 mol L<sup>-1</sup> in water at pH 6.5. In intervals of 0.5, 2.0, 8.0, 32, and 128 hours, one gram of rock powder was mixed with 40 mL of the solutions. Rock powder Geofertil and Ekosil were used in an incubation assay on sandy and clayey soils at doses of 6, 12 and 24 tons per hectare for both soil types. In addition to limestone and dolomite, doses of 2.42 and 2.32 t/ha for clay soil and 1.32 t/ha and 1.52 t/ha for sandy soil, respectively. The Zero Charge Point of the Geofertil rock powder indicates that when adding it in soil with pH greater than 4.12 will occur the predominance of negative charges. Potentially toxic elements were quantified and all the concentrations found were lower than the maximum established in the normative instruction Normative No. 5 of 2016 MAPA. The elements solubilized as a function of time were expressed in accumulated quantity as a function of accumulated time, and phosphorus (P) released accumulated amount of 260.7 mg/L in 42.5 hours of contact. Potassium released 454, 214 and 130 mg/L of K accumulated in 42.5 hours for the extractors water, citric acid and acetic acid respectively. Calcium and Magnesium had similar behavior in the release of nutrients, totaling at the end 153 and 191 mg/L in the accumulated time of 170.5 hours for calcium and magnesium respectively. Silicon also had a similar behavior when comparing the extractors, but it stands out for citric acid in the accumulated time of 42.5 hours, releasing 298.12 mg/L of (Si). The elements iron and manganese stood out with citric acid releasing 3476 and 1028 mg/L in 170.5 hours accumulated. In the incubation time of 25 days the powders of GEOFERTIL and EKOSIL rocks were not able to correct the soil pH in comparison with the calcitic and dolomitic limestones. The results showed that Geofertil rock powder can provide potassium and some other micronutrients, besides causing changes in the dynamics of nutrient release to the soil solution mainly in sandy soils, Its greatest potential refers to water retention capacity, which can greatly contribute to alleviate water stress in regions and periods of low rainfall.

**Keywords:** remineralizers, plant nutrition, fertilizers

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- mapa de localização da mina de extração do pó de rocha .....	14
Figura 2- Mapa de localização das seções .....	15
Figura 3- Coluna estratigráfica da formação da Serra da Momona.....	16
Figura 4- pH do ponto de carga zero para pó de rocha da Geofertil. $pH_{final}$ em função do $pH_{inicial}$ .....	21
Figura 5- Imagens de uma das trincheiras abertas no local da mineração e do material retirado da trincheira .....	23
Figura 6- Imagens da análise petrográfica. Bandas com variação das facies (A); fragmento de rocha (B); Grãos de quartzo(C); fragmento de rocha com quartzo e biotita(D); cristal tubular de muscovita (E); inclusões de pirita indióblásticas (F).....	24
Figura 7- Difratomia de Raios X com refinamento pelo método de Rietveld .....	26
Figura 8 - Fósforo acumulado em função do tempo de extração em ácido acético (AA) e ácido cítrico (AC) expresso em mg/L. ....	31
Figura 9- Potássio acumulado em função do tempo de extração em ácido acético (AA), ácido cítrico (AC) e água (H <sub>2</sub> O) expressos em mg/L.....	32
Figura 10- Cálcio acumulado em função do tempo de extração em ácido acético (AA), ácido cítrico (AC) e água (H <sub>2</sub> O) expressos em mg/L.....	32
Figura 11- Magnésio acumulado em função do tempo de extração em ácido acético (AA), ácido cítrico (AC) e água (H <sub>2</sub> O) expressos em mg/L.....	33
Figura 12- Silício acumulado em função do tempo de extração em ácido acético (AA), ácido cítrico (AC) e água (H <sub>2</sub> O) expressos em mg/L.....	33
Figura 13- Ferro acumulado em função do tempo de extração em ácido cítrico (AC) e água (H <sub>2</sub> O) expressos em mg/L. ....	34
Figura 14- Manganês acumulado em função do tempo de extração em ácido acético (AA), ácido cítrico (AC) e água (H <sub>2</sub> O) expressos em mg/L.....	35
Figura 15- Condutividade elétrica em função do tempo de extração em ácido acético (AA), ácido cítrico (AC) e água (H <sub>2</sub> O) expressos em $\mu S/cm$ . ....	35
Figura 16- Potencial de correção do pH em solo argiloso com uso de doses de pó de rocha Geofertil e doses de calcário calcítico e dolomítico. ....	36
Figura 17- Potencial de correção do pH em solo argiloso com uso de doses de pó de rocha Ekosil e doses de calcário calcítico e dolomítico. ....	37
Figura 18- Potencial de correção do pH em solo arenoso com uso de doses de pó de rocha Geofertil e doses de calcário calcítico e dolomítico. ....	37

Figura 19- Potencial de correção do pH em solo arenoso com uso de doses de pó de rocha Ekosil e doses de calcário calcítico e dolomítico. ....	38
Figura 20- Resultados visuais em papel de filtro da gota de suspensão de pó de rocha após cada adição de volume de solução de azul de metileno (A); Auréola identificando o volume de solução de azul de metileno a ser utilizada no cálculo da CTC. ....	39
Figura 21- Capacidade de troca de cátions do pó de rocha produzido pela Geofertil em comparação com pós de rochas registrados, Verdete e Ekosil. ....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Doses de calcários e de pós de rochas utilizadas no ensaio de incubação. ....	19
Tabela 2- Valores de $\Delta\text{pH}$ e pH PCZ do pó de rocha avaliado em solução extratora KCl 1,0 mol L <sup>-1</sup> e água destilada na proporção de 1:2,5 .....	22
Tabela 3- Porcentagem de água retida pelo pó de rocha geofertil.....	28
Tabela 4- Concentração máxima permitida pelo MAPA e concentração presente no pó de rocha da Geofertil para elementos potencialmente tóxicos .....	28
Tabela 5- Concentração mínima sugerida pelo MAPA e concentração presente no pó de rocha da Geofertil .....	29

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
3	OBJETIVOS.....	13
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	14
4.1	ELEMENTOS TOTAIS E COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA .....	16
4.2	CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA.....	17
4.3	CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIOS .....	17
4.4	DETERMINAÇÃO DO PH DO PONTO DE CARGA ZERO E CARGA SUPERFICIAL LÍQUIDA .....	17
4.5	ENSAIOS DE SOLUBILIZAÇÃO .....	18
4.6	ENSAIOS DE INCUBAÇÃO EM VASO.....	19
4.7	ESTATÍSTICA.....	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	21
5.1	PH NO PONTO DE CARGA ZERO .....	21
5.1.1	<i>Análise petrográfica e imagens da rocha aflorada de trincheiras abertas inicialmente.....</i>	22
5.1.2	<i>Difração de Raio X (DRX).....</i>	25
5.1.3	<i>Composição química do pó de rocha da Geofertil .....</i>	28
5.1.4	<i>Solubilização em ácidos orgânicos e água.....</i>	30
5.1.5	<i>Avaliação da capacidade de correção da acidez .....</i>	36
5.1.6	<i>Capacidade de troca de cátions .....</i>	38
6	CONCLUSÃO.....	41
7	REFERÊNCIAS .....	42

## 1 INTRODUÇÃO

A agricultura e a pecuária são atividades reconhecidas como uma das principais responsáveis pela economia brasileira. Na safra 2021/22 a produção de grãos no Brasil alcançou seus 271,2 milhões de toneladas, tendo um aumento estimado de 42 milhões de toneladas para a safra 2022/23, totalizando nesse ciclo cerca de 313 toneladas de grãos. Em relação à safra de 2023/24, a estimativa é de redução em relação ao ano anterior, com produção prevista em torno de 295,6 milhões de toneladas (CONAB, 2024). Contudo o desempenho desse setor é afetado pelas condições climáticas, políticas de crédito e valores dos produtos agropecuários (ARGENTA; BRUM; ALLEBRANDT; MUELLER, 2023).

Para maximizar a produtividade das culturas, é essencial garantir uma ótima qualidade nutricional do solo para que as plantas consigam absorver os nutrientes e se desenvolver de forma adequada. Os fertilizantes adicionados no sistema devem conter os nutrientes considerados essenciais para o desenvolvimento da cultura, que são classificados em dois grandes grupos, sendo os macronutrientes e micronutrientes, necessários em maiores e menores quantidades respectivamente. Os macronutrientes incluem o nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), enquanto os micronutrientes são manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), ferro (Fe), molibdênio (Mo), boro (B) e cloro (Cl) (AMARO, 2024).

A grande maioria dos solos brasileiros são fortemente intemperizados, naturalmente ácidos e apresentam baixa ou quase nenhuma reserva de minerais. Um solo que não consiga suprir quantidades suficientes de qualquer nutriente, seja macro ou micronutriente, irá prejudicar o crescimento e desenvolvimento da planta. Além disso, para aumentar a fertilidade do solo não basta apenas realizar a aplicação de fertilizantes, pois uma das mais importantes medidas consiste na correção da acidez do solo, que está diretamente relacionada com a absorção dos nutrientes pelas plantas, portanto se torna necessário utilizar corretivos da acidez do solo e aplicação de fertilizantes para garantir produtividades satisfatórias (DIAS; FERNANDES, 2006).

Para a produção de fertilizantes podemos citar como principais matérias-primas o petróleo e gás natural para a produção de adubos nitrogenados, para adubos fosfatados temos o enxofre e rocha fosfática e por fim para completar os macronutrientes a rocha potássica para produção de adubos potássicos (CELLA; ROSSI, 2010). O Brasil ocupa a quarta posição no ranque de consumidor de fertilizantes no mundo, portanto, nossa produção atende a apenas 2%

da produção mundial, fazendo com que seja necessário importar mais de dois terços da necessidade de fertilizantes minerais.

Nos últimos anos o Brasil vem presenciando uma necessidade cada vez maior na importação de fertilizantes para suprir sua demanda. Dados obtidos em 2021 pela Associação Nacional para Difusão de Adubos, evidenciam que mais de 80% dos fertilizantes consumidos foram de origem estrangeira. Essa dependência é verificada quando se sabe que o Brasil deverá ser responsável por quase metade de toda a produção mundial de alimentos nos próximos anos, o que aumentará ainda mais a demanda por fertilizantes (PLANO NACIONAL DE FERTILIZANTES, 2021). Com o aumento dos preços e a limitada reserva de fontes de determinados nutrientes, o Brasil vem incentivando a pesquisa por fontes alternativas, uma das quais prevê a utilização de rochas moídas para aplicação diretamente ao solo, técnica conhecida como rochagem.

De acordo com o descrito pela Lei 12.890 de 10 de dezembro de 2013, o remineralizador é definido como um material que tem a sua origem mineral e passou apenas por processos mecânicos antes do seu uso, reduzindo o seu tamanho. Além disso quando adicionado ao solo ele tem a capacidade de modificar o índice de fertilidade do solo, adicionando macro e micronutrientes que serão disponibilizados para as plantas (BRASIL, 2017). A técnica da rochagem é definida pela aplicação de compostos inorgânicos, de origem mineral ao solo, que atuam como corretivos e fertilizantes, sendo também uma tecnologia que visa a remineralização devido a aplicação direta ao solo, como por exemplo a calagem e a fosfatagem (LUZ, 2010).

A utilização de pó de rocha pode promover ou complementar com a demanda de fertilizantes convencionais, podendo citar que em ambos existe o suprimento de nutrientes ao solo que serão usados pelas plantas, mas diferem na quantidade e na velocidade de disponibilidade, pois os fertilizantes convencionais agem de forma imediata, enquanto os pós de rochas agem mais lentamente, mas que são disponíveis por um período mais longo (DE BRITO, 2019; MEDEIROS, 2017).

Com isso, o objetivo da pesquisa foi caracterizar o pó de rocha em relação a sua composição, e solubilidade de nutrientes em meio aquoso e ácidos orgânicos, além de verificar o seu potencial na correção de acidez do solo.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Com a modernização da agricultura brasileira a produção interna de fertilizantes minerais tornou-se insuficiente para conseguir abastecer a alta demanda, principalmente das grandes culturas, fazendo com que o país importe uma grande quantidade de fertilizantes, cerca de 70% de nitrogênio (N), 50% de fósforo ( $P_2O_5$ ) e mais de 90% de potássio ( $K_2O$ ) (ANDA, 2017). Em função do alto preço destes produtos e da limitada reserva de fontes de determinados nutrientes, o Brasil vem incentivando a pesquisa por fontes alternativas que possam substituir fontes de nutrientes, sendo uma destas o uso de rochas moídas para aplicação diretamente ao solo.

Estes materiais quando apresentam características mínimas exigidas pela legislação brasileira, são denominados remineralizadores. O regulamento exige vários requisitos para que se classifiquem e registrem os pós de rocha como remineralizadores (BRASIL, 2016). No entanto, existem poucos estudos referentes a quantidade mínima de nutrientes que devem ser liberados num determinado tempo e sua correlação com a produção vegetal para validar o remineralizador como um fertilizante apropriado para o uso agrícola.

Ao serem aplicados no solo, esses produtos desencadeiam um processo gradual de liberação de nutrientes, o que resulta na melhoria da fertilidade do solo de forma gradativa ao longo do tempo. Essa ação lenta de disponibilização dos nutrientes ao solo proporciona vantagens significativas, visto que permite que as plantas tenham acesso a nutrientes essenciais de maneira mais eficiente. Em contrapartida, uma das principais restrições pode ser a lenta solubilização dos minerais presentes no solo e conseqüentemente a pronta disponibilidade destes de forma imediata para as plantas, que podem sofrer retardo no seu desenvolvimento. De acordo com o previsto pela Lei nº 12.890/2013 e a Instrução Normativa 05/2016 – MAPA, as rochas silicáticas utilizadas na rochagem necessitam atender a tais quesitos, pois são materiais que possuem baixa solubilidade.

Um conjunto de fatores pode desempenhar papéis cruciais na ameaça às culturas agrícolas. Entre eles, destacam-se condições como o clima imprevisível, a invasão de pragas e a propagação de doenças. Contudo, um dos aspectos mais significativos e frequentemente debatidos é a influência dos insumos agrícolas, em destaque os fertilizantes. Embora essenciais para o desenvolvimento das culturas e para a condução segura da lavoura, os fertilizantes elevam os custos de produção e dificultam a implantação da cultura por parte do produtor, que sempre busca a redução de custos (MOZZAQUATRO et al., 2017).

Os solos podem sofrer empobrecimento químico devido a diversos fatores e processos ocorridos durante sua formação. Este fenômeno é particularmente acentuado em regiões de clima tropical, onde as condições climáticas, como altas temperaturas e mudanças sazonais entre períodos de seca e chuva, exercem uma influência sobre tal fator. Para superar essas dificuldades, os agricultores muitas vezes recorrem à incorporação de corretivos e fertilizantes, com intuito de melhorar as condições do solo, garantindo assim um ambiente propício para o crescimento e desenvolvimento das plantas (DE BRITO, 2019).

Uma estratégia viável para enfrentar a demanda por fertilizantes em solos tropicais é o emprego da técnica denominada de rochagem, que consiste na aplicação de resíduos de pós de rochas ao solo, visando não apenas restabelecer os nutrientes essenciais, mas de corrigir também o pH do meio (EDWARD, 2016).

A adição do pó de rocha ao solo tem como algumas vantagens reduzir as perdas por lixiviação, devido a sua lenta liberação dos nutrientes para a solução do solo, ele é considerado um material ecológico por não apresentar nenhuma adição de origem química e em alguns casos o fornecimento de silício, que apesar de não ser considerado um elemento essencial, é considerado como benéfico às plantas (DE BRITO, 2019).

Diante do exposto, o projeto apresenta relevância, porque fomenta resultados referentes a eficiência agrônômica de pó de rocha produzido pela empresa GEOFERTIL na mina de Riacho do Pintor - Riachão das Neves-BA, como insumo agromineral para lavouras de grãos e fibras, no que se refere a viabilizar a remineralização de solos como alternativa sustentável para o setor agrícola da Bahia.

### **3 OBJETIVOS**

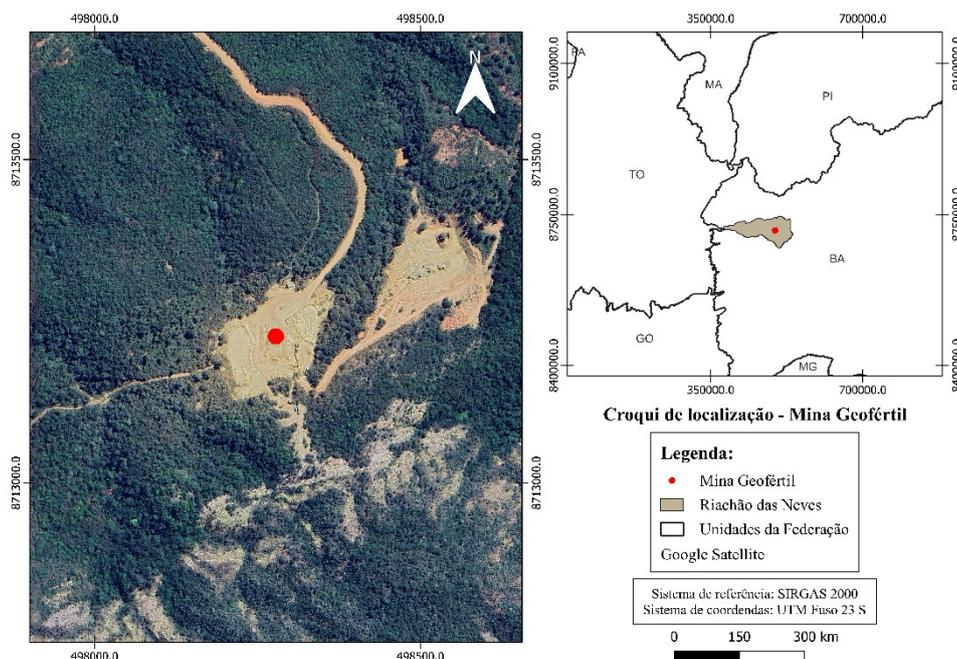
Avaliar a composição mineralógica, solubilidade de nutrientes em meio aquoso do pó de rocha fabricado pela empresa GEOFERTIL na mina de Riacho do Pintor, localizada em Riachão das Neves, Bahia e avaliar as alterações nas características de solo.

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no laboratório do grupo de pesquisa em Recursos Naturais e Agrícolas (RENAGRI) e em casa de vegetação da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo – MG.

O pó de rocha utilizado nos experimentos foi encaminhado pela empresa Geofertil Ltda, cuja mina está localizada no município de Riachão das Neves, no estado da Bahia (Figura 1). Essa empresa possui parceria público privada estabelecida com a Universidade Federal de Uberlândia - Campus de Monte Carmelo cujo extrato de parceria foi publicado no Diário Oficial da União seção 3 n° 213, de 10 de novembro de 2022.

Figura 1- mapa de localização da mina de extração do pó de rocha

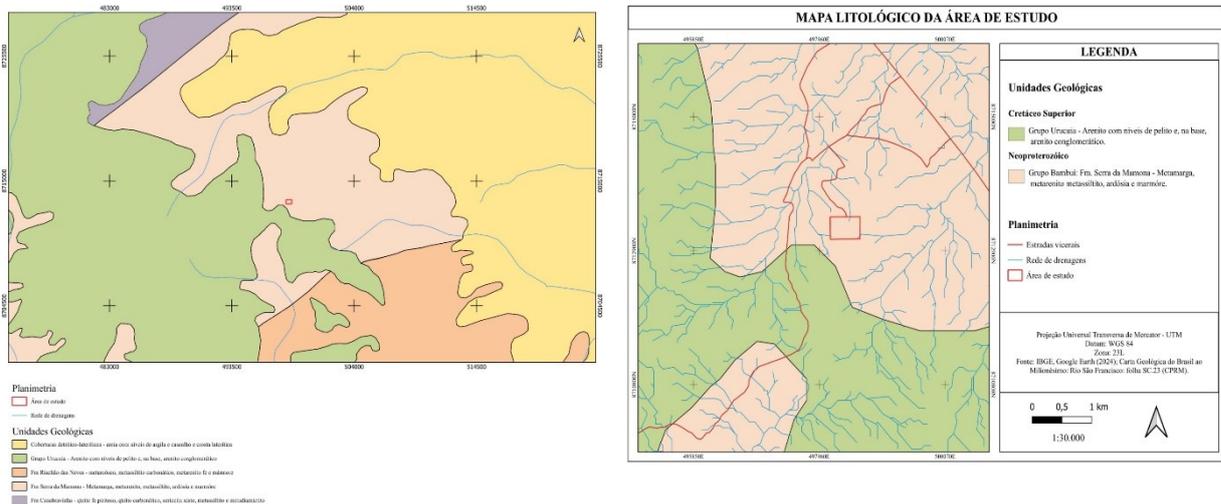


Fonte: Autor (2024)

A mina está localizada no grupo Bambuí no noroeste da Bahia, onde um estudo litoestratigráfico das sequências metassedimentares desse grupo, descrevem cinco domínios geotectônicos, com base nas diferenças do grau metamórfico e na deformação das suas unidades constituintes (SILVA; KARMANN; TROMPETTE, 1989). Estes autores definem também quatro formações neste grupo, nomeadamente, da base para o topo: Canabravinha, São Desidério, Serra da Mamona e Riachão das Neves, todas elas englobadas no Neoproterozóico

(Figura 2 A). Especificamente, a mina do pó de rocha em estudo, está localizada na formação Serra da Mamona (Figura 2B),

Figura 2- Mapa de localização das seções



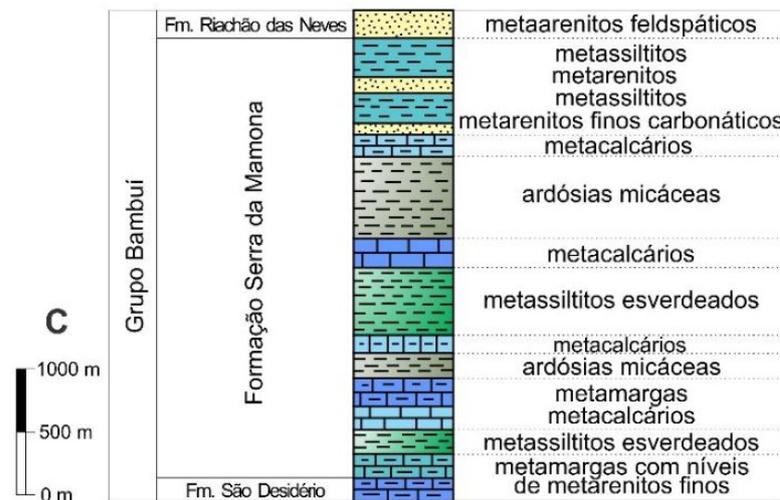
Fonte: adaptado de IBGE-Google Earth (2024)-Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Rio São Francisco: folha SC.23 (CPRM).

A Formação Serra da Mamona ocorre sobreposta à Formação São Desidério, sendo constituída por metargilitos, de cor marrom-amarelada e aspecto pastilhado, e filitos marrom-avermelhados, que apresentam intercalações com camadas de poucos centímetros a decímetros de metarenito fino. Essas rochas apresentam estrutura foliada e contínua, normalmente com ângulo de mergulho acentuado, apresentando dobramentos com amplitude que varia de poucos metros a quilômetros. O nome da formação Serra da mamona foi proposto para designar a sequência de rochas que se encontram sobrepostas aos metacalcários e metamargas da Formação São Desidério e sotoposta aos metacorseaos da Formação Riação das Neves. Esse nome é atrelado ao da serra da Mamona, um acidente geográfico situado a 10 km a norte de São Desidério.

A seção colunar tipo da formação Serra da Mamona levantada ao longo da rodovia que liga a cidade de Barreiras a São Desidério, onde as litologias que compõem essa unidade litoestratigráfica iniciam no sopé da serra da Mamona e tem seu contato basal, com a Formação São Desidério gradacional. O contato superior é igualmente do tipo gradacional onde se passa para os metacóseos que constituem a Formação Riação das Neves. A formação Serra da Mamona inicia-se com metamarga e níveis centimétricos de metarenitos finos. Estes

sobrepõem-se pacotes mais espessos constituídos de metassiltitos esverdeados, metacalcários negros, metamargas e ardósias micáceas. A alternância entre metacarbonatos e metapelitos é uma característica marcante na formação Serra da Mamona (Figura 3).

Figura 3- Coluna estratigráfica da formação da Serra da Mamona



Fonte: Adaptado de SILVA; KARMANN; TROMPETTE, (1989)

#### 4.1 ELEMENTOS TOTAIS E COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

Todos os experimentos foram realizados por laboratórios terceirizados, e os resultados de análise foram fornecidos pela empresa Geofertil.

A porcentagem de CaO e K<sub>2</sub>O foi determinada por Fluorescência de Raios X; A caracterização mineralógica foi realizada por difratometria de Raios X com refinamento pelo método de Rietveld e por análises petrográficas. A composição de elementos totais do pó de rocha foi avaliada por fusão, metaborato de lítio e leitura por ICP-OES.

## **4.2 CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA**

A determinação da capacidade de retenção de água pelo pó de rocha foi realizada adicionando lentamente 25,0 mL de água destilada a 20,0 g de pó de rocha seco (estufa a 105°C até massa constante) colocado em papel de filtro Whatman n° 1 e funil de vidro. Água drenada pela ação da gravidade, foi recolhida em béquer de 100 mL. Após o procedimento de saturação e drenagem foi medido a massa de água drenada contida no béquer. Com as massas do béquer seco e do béquer com a água drenada, foi calculado a porcentagem de retenção de água do material. O ensaio foi realizado em quadruplicada.

## **4.3 CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIONS**

A determinação da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) do pó de rocha foi realizada no Laboratório RENAGRI utilizando a técnica de adsorção de azul de metileno (PEJON, 1992). Trata-se de um método simples e eficiente para indicar a presença de argilominerais expansivos, a qual está associada a elevados valores de adsorção do corante. Foi preparado uma suspensão de pó de rocha na concentração de 1,0 g/L em erlenmeyer de 250 mL e colocada em agitação em agitador magnético. Sob agitação é acrescentado volumes de solução de azul de metileno 0,005 mmol L<sup>-1</sup>. A cada adição de solução de azul de metileno, foi retirada uma gota da suspensão e colocada sobre papel de filtro Whatman n° 40. Essa etapa foi repetida até que seja evidenciado uma auréola azul clara em torno da mancha azul.

## **4.4 DETERMINAÇÃO DO pH DO PONTO DE CARGA ZERO E CARGA SUPERFICIAL LÍQUIDA**

A avaliação do pHPCZ foi realizada em triplicata adicionando 100 mg do pó de rocha em 20,0 mL de água deionizada em diferentes valores de pH ajustados de 1 a 12, com solução

de HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup> ou NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>. O pH inicial de cada solução foi medido e as soluções contendo o pó de rocha permaneceram em repouso por um período de 24h. Após esse período, foi medido o pH final.

Outra metodologia utilizada para avaliar a carga líquida do pó de rocha foi a avaliação dos valores de pH determinados em KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> e em água na proporção 1:2,5 e o cálculo da diferença entre os dois valores obtidos conforme equação 01. Utilizando esses valores de pH também foi possível estimar o PCZ do pó de rocha, calculado conforme Uehara & Gilman (1980) utilizando a equação 02.

$$\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{H_2O} \quad \text{equação 01}$$

$$PCZ = 2pH_{KCl} - pH_{H_2O} \quad \text{equação 02}$$

#### 4.5 ENSAIOS DE SOLUBILIZAÇÃO

Os procedimentos de solubilização foram realizados no laboratório RENAGRI e os extratos gerados pela solubilização foram encaminhados a laboratório terceirizado para quantificação dos elementos por espectrometria óptica de emissão por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

A preparação dos extratos solubilizados foi realizada com pó de rocha com diâmetro médio de partícula menor que 0,3 mm em soluções de ácidos orgânicos e em água destilada. Os ácidos orgânicos utilizados foram o ácido cítrico e o ácido acético, ambos produtos P.A. e na concentração de 0,02 mol L<sup>-1</sup>. Para os testes de solubilidade em água, foi utilizada água deionizada, ultrapura, com valor de pH ligeiramente ácido (pH 6,5).

A massa de 1,0 g de pó de rocha seco em estufa a 105°C foi colocado em tubo falcon de 50 mL e adicionado 40 mL de solução extratora. Os tubos Falcon foram agitados deitados em agitador horizontal por períodos pré-determinados de 0,5; 2,0; 8,0; 32 e 128 horas com 80 oscilações por minuto em temperatura ambiente. Para os testes de 32 e 128 horas, foi seguida seqüências de 8 horas agitando e 16 horas em repouso até completar o tempo necessário. Após a agitação, as amostras foram filtradas em papel filtro quantitativo e os extratos armazenados em refrigerador, em temperatura de 4°C, para posterior quantificação dos elementos. Os resultados foram expressos em tempo de contato acumulativo, onde se somou o tempo atual com o tempo de contato anterior, assim também somado os resultados dos nutrientes

(SOUSA,2012). Os valores de pH e condutividade elétrica dos extratos também foram avaliados.

#### 4.6 ENSAIOS DE INCUBAÇÃO EM VASO

Ensaio em vaso com solos em diferentes texturas, sendo solo argiloso e arenoso, com diferentes doses de pó de rocha com umidade controlada foram realizados conforme INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 53, DE 23 DE OUTUBRO DE 2013 atualizado pela INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 6, DE 10 DE MARÇO DE 2016. Os tratamentos consistiram em diferentes doses de pó de rocha da Geofertil, pó de rocha com registro no ministério e da agricultura e pecuária (Ekosil) e dois calcários um dolomítico e um calcítico. Os tratamentos estão detalhados na tabela 1.

Tabela 1- Doses de calcários e de pós de rochas utilizadas no ensaio de incubação.

Tipo de solo	Material avaliado	Concentração (t/ha)	
Argiloso	Pó de rocha Geofertil	6	
		12	
		24	
	Ekosil	6	
		12	
		24	
		Calcário calcítico	2,42
		Calcário Dolomítico	2,32
		<hr/>	
Arenoso	Pó de rocha Geofertil	6	
		12	
		24	
	Ekosil	6	
		12	
		24	
		Calcário calcítico	1,59
Calcário Dolomítico		1,52	

## 4.7 ESTATÍSTICA

Todos os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade utilizando o Software estatístico R (R Core Team, 2021).

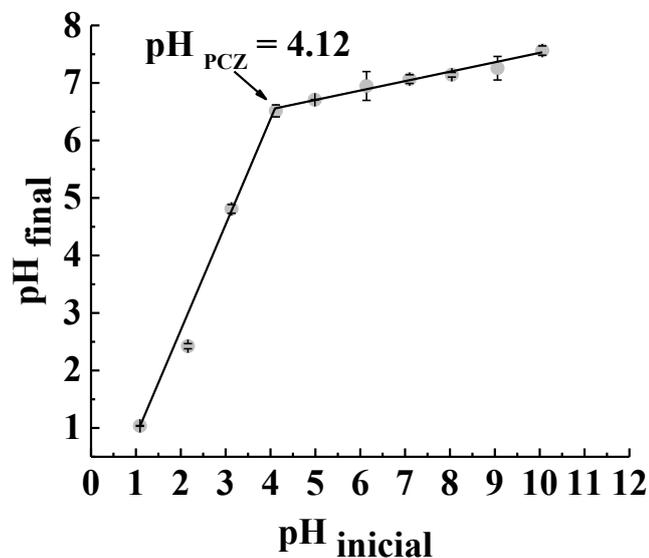
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 pH no ponto de carga zero

O PCZ indica o valor do pH do meio em que o material pode ser colocado, onde a quantidade de cargas negativas e positivas na superfície do material, são iguais, ou seja, é o valor do pH do meio em que o material se encontra onde a carga total líquida é igual a zero. Quando o pH do meio em que o material se encontra for menor que o valor do pH<sub>PCZ</sub> do material, a carga superficial líquida na superfície do material é predominantemente positiva, podendo favorecer a adsorção de espécies químicas negativas na superfície do catalisador. Em contrapartida, quando o valor do pH do meio em que o material se encontra for maior que o valor do pH<sub>PCZ</sub> a carga superficial líquida no material é predominantemente negativa, podendo promover a interação do material com espécies químicas com predominância de carga positiva (KOSMULSKI, 2009).

A figura 4 e tabela 2 apresentam os resultados do pH<sub>PCZ</sub> e carga superficial líquida do pó de rocha da Geofertil.

Figura 4- pH do ponto de carga zero para pó de rocha da Geofertil. pH<sub>final</sub> em função do pH<sub>inicial</sub>



Fonte: Autor (2024)

Tabela 2- Valores de  $\Delta\text{pH}$  e pH PCZ do pó de rocha avaliado em solução extratora KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> e água destilada na proporção de 1:2,5

Repetição	pH água	pH KCl	pH PCZ	$\overline{\text{pH PCZ}}$	$\Delta\text{pH}$	$\overline{\Delta\text{pH}}$
1	6,74	5,27	3,80		-1,47	
2	6,78	5,19	3,60	3,65	-1,59	-1,56
3	6,78	5,17	3,56		-1,61	

Fonte: Autor (2024)

Verifica-se que os valores de  $\Delta\text{pH}$  foi menor que zero indicando a predominância de carga superficial líquida negativa no pó de rocha, o que provavelmente pode ser devido a presença de argilominerais 2:1. Os valores de de pH PCZ (4,12 e 3,65 determinado pela equação 2 e pelo equilíbrio de suspensões do pó de rocha em diferentes valores de pH, respectivamente), sugerem que ao se colocar o pó de rocha em um solo sob cultivo já corrigido ou em um solo com valores de pH em CaCl<sub>2</sub> maior que 4,12 o pó de rocha manterá a predominância de carga negativa superficial líquida que para os solos tropicais brasileiro pode alterar a dinâmica de troca de cátions e liberação de nutrientes.

### 5.1.1 Análise petrográfica e imagens da rocha aflorada de trincheiras abertas inicialmente

Na abertura de trincheiras, o siltito localizado na mina apresentou baixa resistência mecânica, sendo de fácil escavação com o uso da escavadeira hidráulica. O material escavado apresentou granulometria fina e fragmentos de até 0,30m (Figura 5).

As trincheiras abertas possibilitaram a visualização de características da rocha favoráveis a extração, pois o siltito apresentou ser capaz de desagregação mecânica com escavadeira hidráulica, o que evita o uso de explosivos. Em algumas trincheiras foram encontradas a presença de calcário junto com o siltito, indicando que nessa localização da mina, devido o calcário ser uma rocha mais resistente, e o seu desmonte poderá ser necessário o uso de rompedor hidráulico.

Figura 5- Imagens de uma das trincheiras abertas no local da mineração e do material retirado da trincheira

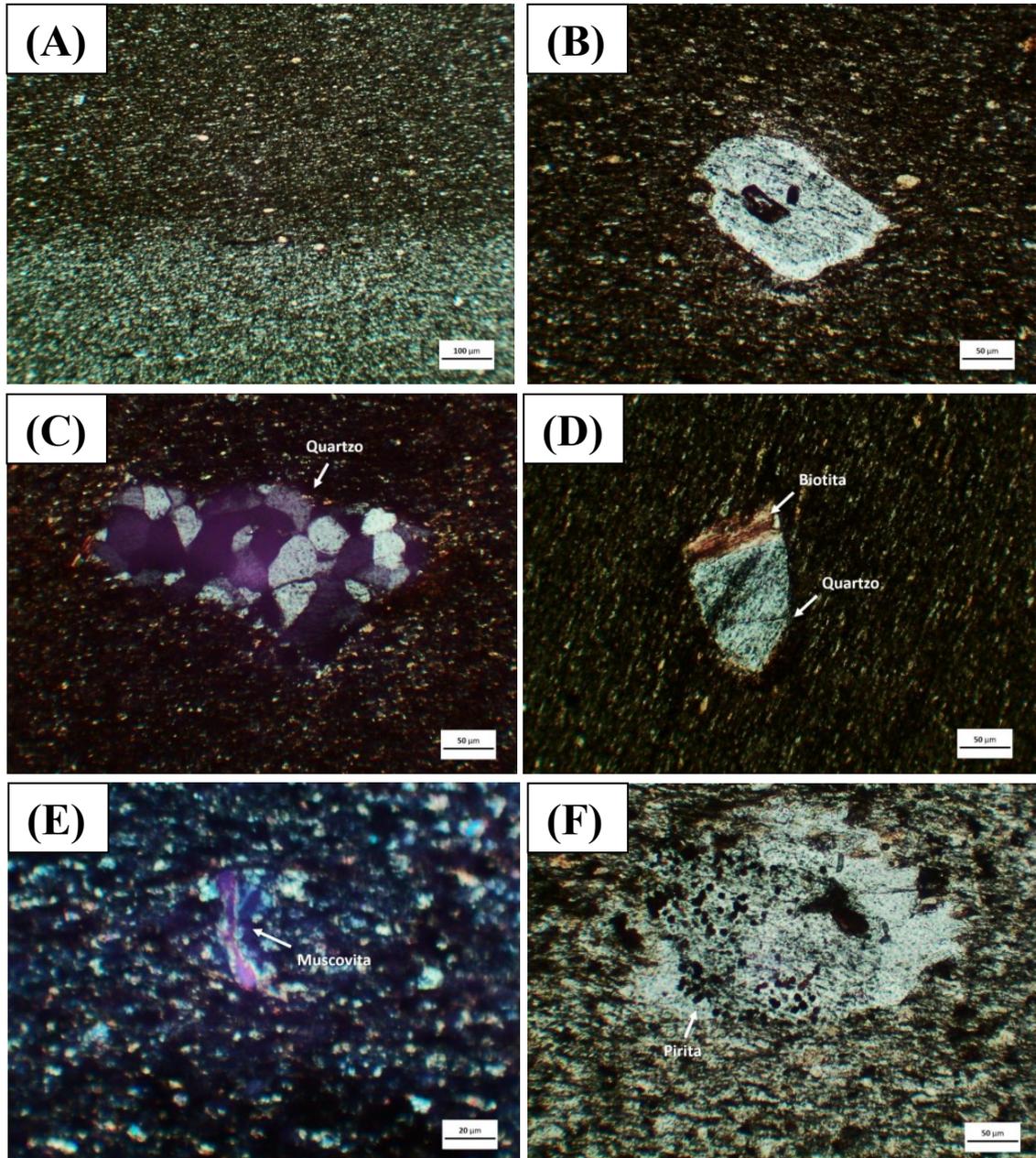


As amostras recolhidas das trincheiras foram avaliadas por análise petrográfica e algumas imagens estão apresentadas na figura 6.

Fazendo uma avaliação macroscópica da rocha é possível verificar uma granulometria muito fina, e uma rocha de cor esverdeada a alaranjada. Não possível diferenciar os cristais a olho nu. A rocha apresenta estrutura fissil e clivagem ardosiana devido a sua partição em planos regulares, pode ser classificada como uma Ardósia/Metapelito.

Análise microscópica permitiu verificar que a rocha apresenta uma textura granolepidoblástica associada a composição formada por filossilicatos, quartzo e óxido de ferro, também é possível observar uma variação na coloração da amostra em tons alaranjados com bandas subparalelas a orientação mineral. Apresenta estrutura fissil com clivagem ardosiana, associada a orientação preferencial dos cristais de granulação muito fina. A amostra trata-se uma Ardósia de grau metamórfico muito baixo e de protólito pelítico.

Figura 6- Imagens da análise petrográfica. Bandas com variação das facies (A); fragmento de rocha (B); Grãos de quartzo(C); fragmento de rocha com quartzo e biotita(D); cristal tubular de muscovita (E); inclusões de pirita indióblásticas (F).



A análise petrográfica permitiu estimar macroscopicamente a composição modal da rocha onde foram encontrados 30% de clorita que ocorre na forma de cristais tabulares subdioblásticas de granulação muito fina orientadas segundo a foliação conferindo a microestrutura lepidoblástica, são incolores a levemente pleocróicas em tons de verde claro. Possuem baixa cor de interferência.

A presença de muscovita foi evidenciada, com 30%, que ocorrem como cristais tabulares incolores muito finos idioblásticos orientados segundo a foliação da rocha. As principais características associadas às muscovitas são as cores vivas de interferência e a clivagem perfeita em uma direção, devido à sua orientação preferencial as micas conferem a textura lepidoblástica.

O quartzo com 20% da amostra e ocorre como cristais xenoblásticos de granulação fina a muito fina dispersos na matriz da rocha. As principais características associadas ao quartzo são as baixas cores de interferência e relevo moderado. Os quartzos também ocorrem como blastos formando subgrãos de granulação fina.

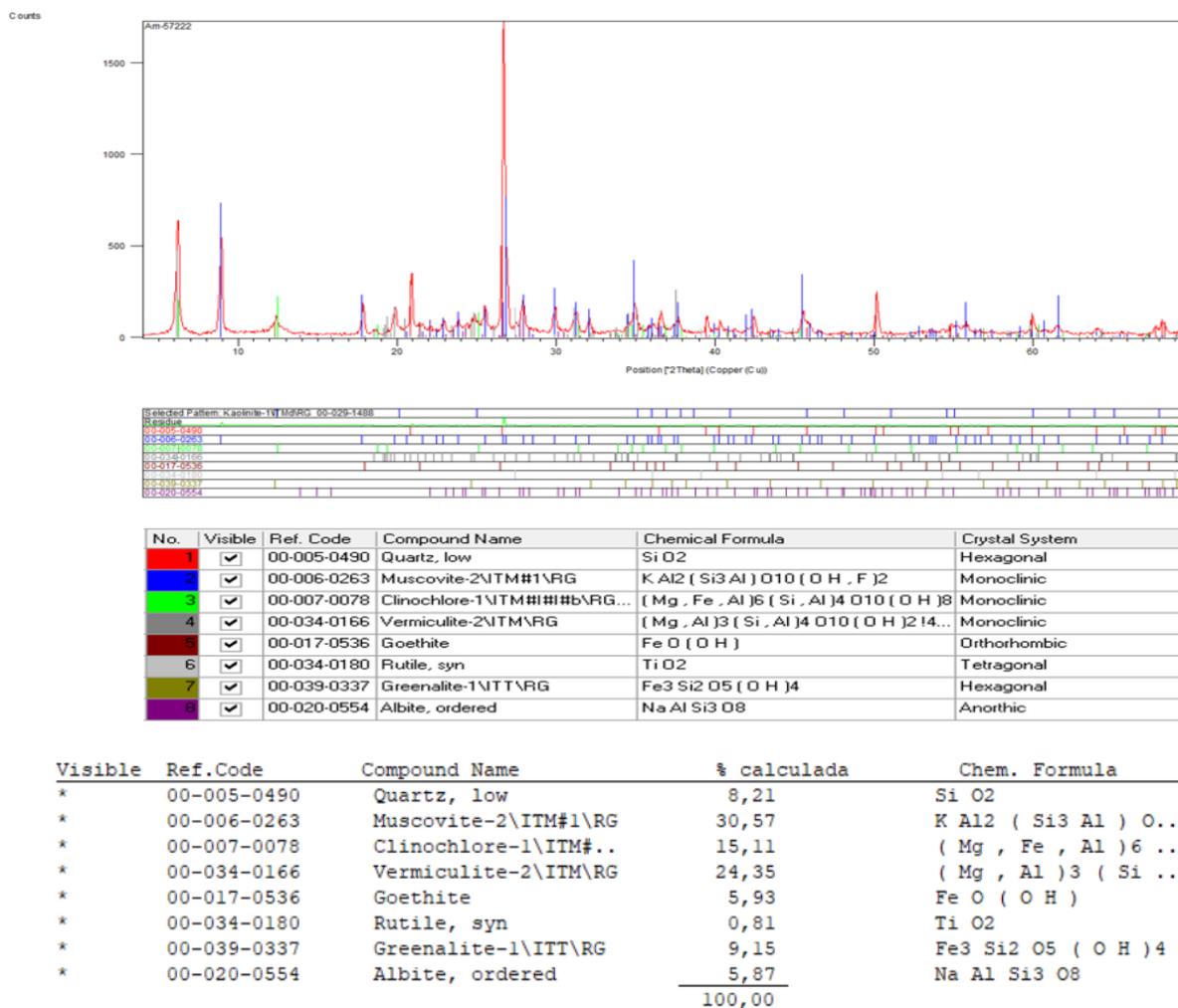
Oxido de Ferro também foi evidenciado na análise petrográfica, com aproximadamente 15% da amostra e ocorrem como cristais subdioblásticos a idioblásticos de granulação fina a média, quando mais bem desenvolvidos caracterizam textura similar a porfiroblástica com desenvolvimento de sombras de pressão nas bordas dos grãos. Caracterizam juntamente com o quartzo a textura Granoblástica.

### **5.1.2 Difração de Raio X (DRX)**

A difração de raio X é umas das principais técnicas para determinação da estrutura cristalina de um material. Ela consiste na passagem de um feixe de raio x sob o material, no qual os átomos presentes na estrutura cristalina causam a difração dos raios x, resultando em um padrão característico. Por meio da análise desse padrão é possível a determinação da disposição de átomos no material, possibilitando a identificação de estruturas cristalinas (SAINI; KAUR, 2021). O espectro de difratograma de raios X do material está apresentado na figura 7.

A partir do difratograma e do método de Rietveld foi possível estimar a porcentagem de argilominerais presentes no pó de rocha, onde foi verificado a presença de argilominerais Vermiculita (24,35%) e Muscovita (30,57%).

Figura 7- Difratomia de Raios X com refinamento pelo método de Rietveld



A muscovita é um mineral pertencente ao grupo das micas, que são silicatos de alumínio hidratados. É conhecida por sua estrutura em camadas e sua capacidade de liberar potássio quando submetida a processos de intemperismo e degradação. A composição química da muscovita  $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ , o que significa que é composta por átomos de potássio (K), alumínio (Al), silício (Si), oxigênio (O) e hidroxilas (OH). A estrutura da muscovita consiste em camadas alternadas de tetraedros de sílica ( $SiO_4$ ) e octaedros de alumínio ( $AlO_6$ ) ligados por oxigênio. Os tetraedros de sílica são organizados em uma camada planar, com átomos de oxigênio formando uma estrutura de pirâmide com o silício no centro. Essas camadas de tetraedros de sílica são intercaladas por camadas de octaedros de alumínio, onde um átomo de alumínio é cercado por seis átomos de oxigênio.

A liberação de potássio da muscovita ocorre principalmente durante processos de intemperismo químico, nos quais o mineral é quebrado e decomposto ao longo do tempo devido à exposição à água, ao dióxido de carbono e a outros agentes ambientais. Durante esse processo,

a água reage com a muscovita e promove a troca de íons, onde íons de hidrogênio ( $H^+$ ) provenientes da água substituem os íons de potássio ( $K^+$ ) na estrutura da muscovita. Essa troca iônica pode resultar na liberação de íons de potássio dissolvidos na água do solo, tornando-os disponíveis para serem absorvidos pelas plantas através de suas raízes.

O potássio é um nutriente essencial para o crescimento das plantas, desempenhando um papel fundamental na regulação osmótica, na síntese de proteínas e no desenvolvimento geral das plantas. Portanto, a capacidade da muscovita de liberar potássio contribui para a fertilidade do solo, fornecendo um suprimento sustentável desse nutriente às plantas à medida que o mineral se decompõe ao longo do tempo.

A vermiculita, presente no pó de rocha é um exemplo proeminente de um argilomineral 2:1, que possui uma estrutura em camadas composta por tetraedros de sílica ( $SiO_4$ ) e octaedros de alumínio ( $AlO_6$ ) e magnésio ( $MgO_6$ ). A composição química da vermiculita pode variar ligeiramente dependendo da fonte e das condições de formação, mas geralmente é representada pela fórmula geral  $(Mg,Fe)_3(Al,Fe)_4(Si,Al)_8O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$ . Vamos analisar essa fórmula para entender os elementos químicos presentes na vermiculita e sua estrutura molecular.

Entre as camadas de octaedros da vermiculita, existem espaços interlamelares que podem conter moléculas de água e íons. A presença desses espaços interlamelares permite que a vermiculita retenha e troque cátions como potássio ( $K^+$ ), cálcio ( $Ca^{2+}$ ), magnésio ( $Mg^{2+}$ ), entre outros. Essa capacidade de troca iônica é fundamental para a fertilidade do solo, pois os nutrientes adsorvidos podem ser liberados gradualmente para as plantas. Uma característica marcante da vermiculita é sua capacidade de expansão. Isso ocorre devido à absorção de água pelas camadas interlamelares, que fazem com que as camadas se separem e se expandam.

Essa característica proporcionada pela vermiculita presente no pó de rocha da Geofertil, foi responsável pelo elevado valor de retenção de água desse pó de rocha (Tabela 3), o que para situações de cultivo em condições de veranico intenso, por exemplo, na região do oeste da Bahia, onde se localiza a mina de extração, faz desse material um excelente material para amenizar stress hídrico em lavouras da região.

Tabela 3- Porcentagem de água retida pelo pó de rocha geofertil

Repetição	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	m <sub>3</sub> (g)	m <sub>4</sub> (g)	R (%)	$\bar{R}$ (%)
1	67,31	81,158	13,848	11,152	44,61	44,11
2	59,25	73,408	14,158	10,842	43,37	
3	59,87	73,826	13,956	11,044	44,18	
4	63,72	77,653	13,933	11,067	44,27	

m<sub>1</sub>: massa do béquer; m<sub>2</sub>: massa bequer+água não retida; m<sub>3</sub>: massa água não retida; m<sub>4</sub>: massa retida; R: porcentagem de água retida.

Fonte: Autor (2024)

### 5.1.3 Composição química do pó de rocha da Geofertil

A Instrução Normativa nº 5, de 2016, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) estabelece as regras para os remineralizadores. A IN nº 5 exige a presença de macronutrientes que asseguram que o pó de rocha irá oferecer às plantas elementos como K, Ca e Mg. Dessa forma, o pó de rocha deverá ter maior ou igual a 1% de K<sub>2</sub>O e a soma de bases (K<sub>2</sub>O + CaO + MgO) deve ser superior ou igual a 9% em massa. O pó de rocha da Geofertil apresentou 4,2% de K<sub>2</sub>O e 9,1% de soma de bases.

A IN nº 5 também estabelece limites máximos nos elementos que são potencialmente tóxicos, garantindo que o uso do pó de rocha não ofereça risco à saúde humana e animal. A tabela 4 apresenta os limites máximos e as concentrações encontradas para os elementos potencialmente tóxicos.

Tabela 4- Concentração máxima permitida pelo MAPA e concentração presente no pó de rocha da Geofertil para elementos potencialmente tóxicos

Elemento	Concentração máxima (mg/kg)	Concentração presente (mg/kg)
Arsênio	15	10,8
Cádmio	10	0,08
Mercúrio	0,1	<0,05
Chumbo	200	9,9
Cromo	200	29,6

A instrução também determina que a presença de quartzo ou sílica livre deve ser inferior a 25%, pois esse mineral é extremamente resistente, com dureza elevada, desgastando os equipamentos de moagem, acarretando uso de energia extra na moagem em função de sua dureza e resistência, além de onerar o transporte do pó de rocha devido ao conteúdo de um mineral inócuo, que não fornece qualquer nutriente à planta e que contribui para um excesso de quartzo no solo em longo prazo, levando a arenização. O pó de rocha da Geofertil apresentou uma concentração de sílica livre de 20% determinado por análise petrográfica e 9,6% determinado por drifratometria de Raios X pelo método de Rietveld.

O pó de rocha da Geofertil também foi avaliado quanto a concentração de elementos não limitantes e não impeditivos para uso do pó de rocha, sugeridos pela IN 05, cujos resultados estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5- Concentração mínima sugerida pelo MAPA e concentração presente no pó de rocha da Geofertil

Elemento	Concentração mínima (% m/m)	Concentração presente (% m/m)
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1,0	0,2
Boro (B)	0,03	<0,001
Cloro (Cl)	0,1	----
Cobalto (Co)	0,005	0,0017
Cobre (Cu)	0,05	0,0044
Ferro (Fe)	0,1	4,6
Manganês (Mn)	0,1	0,065
Molibdênio (Mo)	0,005	0,0003
Níquel (Ni)	0,005	0,0053
Selênio (Se)	0,03	0,0001
Silício (Si)	0,05	19,6
Zinco (Zn)	0,1	0,013

#### 5.1.4 Solubilização em ácidos orgânicos e água

Um dos aspectos mais criticados em relação ao uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes está relacionado à baixa solubilidade da maior parte dos minerais constituintes dessas rochas. Entretanto, salienta-se que isto pode ser uma vantagem em relação aos fertilizantes solúveis nos ambientes tropicais, uma vez que interação de fatores do solo (baixa capacidade de troca de cátions) e do clima (alta pluviosidade) tornam os nutrientes provenientes desses materiais mais susceptíveis à lixiviação. Martins et al. (2010) acrescentam que além de proporcionar efeitos residuais em cultivos sucessivos, os pós de rochas também podem promover a elevação da CTC, resultante da formação de minerais secundários, reduzindo, assim, as perdas por lixiviação.

Nos solos, a dissolução mineral é aumentada pelo desequilíbrio entre solução do solo e a superfície do mineral, através da remoção de íons pelos processos de lixiviação e absorção de nutrientes. Processos na rizosfera e a atividade biológica, no entanto, podem aumentar a dissolução do mineral através da liberação de íons  $H^+$  e de compostos orgânicos complexantes, que contribuem para acelerar as reações nas superfícies dos minerais.

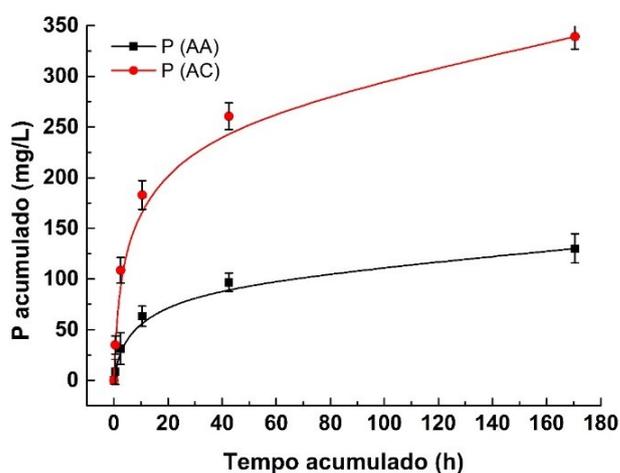
Existe, contudo, uma preocupação sobre a real eficiência destes materiais, relacionada à baixa solubilidade da maioria dos pós de rochas silicatadas, sendo esse geralmente o principal fator limitante. A solubilização dos pós de rocha é dependente dos processos de hidrólise, ou ácido-complexólise nos ambientes naturais (FONTES, 2012; BRANTLEY; STILLINGS, 1996), e tendo em vista a resistência diferenciada dos minerais ao intemperismo, dependendo da composição mineralógica da rocha, isto pode afetar a taxa de liberação de nutrientes. Em outras palavras, rochas com alto conteúdo de determinado (s) nutriente (s) podem não solubilizar nutrientes numa taxa necessária para suprir adequadamente às plantas, pelo fato de possuírem minerais com alta resistência ao intemperismo. Por outro lado, rochas com menor conteúdo total daquele nutriente, podem solubilizar quantidades maiores dele, caso apresentem minerais com menor resistência.

Considerando que ácidos orgânicos simples, assim como ácidos com ação complexante, tais como cítrico e oxálico, são comuns nas camadas mais superficiais dos solos, produtos da decomposição do material orgânico, sintetizados pelos microrganismos e excretados pelas raízes (SILVEIRA; FREITAS, 2007), pressupõe-se que a solubilidade dos minerais em contato com ácidos orgânicos fracos possa ser uma alternativa de simulação mais realística do potencial de liberação de nutrientes pelos minerais contidos em pós de rocha.

Assim, a solubilidade dos pós de rocha em ácidos orgânicos pode representar de modo mais realístico o potencial de liberação de nutrientes delas do que apenas ao conteúdo total, o que não significa que os conteúdos totais também não sejam importantes. Nesse sentido foi avaliada a solubilização de elementos presente no pó de rocha da Geofertil em três extratores (água, ácido acético e ácido cítrico) para estimar o potencial de dissolução de nutrientes.

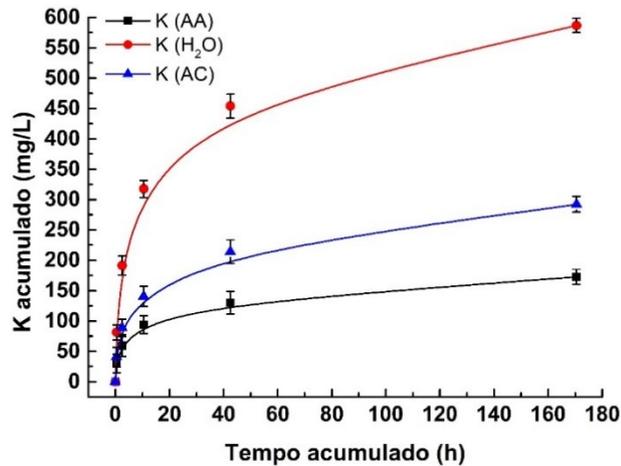
Na figura 8, são apresentados os valores de fósforo (P) acumulado em função do tempo de extração para os dois ácidos orgânicos utilizados, sendo ácido acético (AA) e ácido cítrico (AC) ambos a  $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ , visto que para o extrator água os valores foram abaixo do limite de quantificação de  $1,069 \text{ mg/L}$ . Observa-se que em ácido cítrico foram liberados maiores quantidades de fósforo em comparação com o outro ácido utilizado no experimento, sendo valores acumulados de  $260,7$  e  $96,6 \text{ mg/L}$  de P para AC e AA respectivamente no tempo acumulado de contato de 42 horas.

Figura 8 - Fósforo acumulado em função do tempo de extração em ácido acético (AA) e ácido cítrico (AC) expresso em mg/L.



Para o elemento potássio (K) (Figura 9), o extrator água se destacou na capacidade de solubilizar o nutriente e disponibilizar para a solução, seguido de ácido cítrico e ácido acético, sendo que no tempo de 42,5 horas de contato já havia sido liberado quase todo o K do pó de rocha para os extratores ácido cítrico e ácido acético, com valores respectivos de  $454$ ,  $214$  e  $130 \text{ mg/L}$  de K. Em água se obteve uma maior variação para o ultimo tempo de contato, obtendo  $587 \text{ mg/L}$  de K acumulado no tempo de 170,5 horas.

Figura 9- Potássio acumulado em função do tempo de extração em ácido acético (AA), ácido cítrico (AC) e água (H<sub>2</sub>O) expressos em mg/L.



É possível observar um comportamento de extração semelhante para os elementos cálcio (Ca) e magnésio (Mg) (Figura 10 e 11), em que ambos obtiveram melhores respostas em liberação com o ácido cítrico, com quantidades extraídas de 4284,1 mg/L de Ca e 6179,9 mg/L de Mg no tempo acumulado de contato de 170,5 horas. O segundo extrator em destaque foi o ácido acético, liberando quase todos os dois elementos no tempo de contato acumulado de 42,5 horas, com quantidades de 1640 e 1489 mg/L de Ca e Mg respectivamente, tendo um aumento de 506,9 e 539 mg/L de Ca e Mg até o tempo acumulado de 170,5 horas. Para o extrator água os nutrientes Ca e Mg atingiram uma reta quase linear de extração, totalizando 153 e 191 mg/L respectivamente no tempo acumulado de 170,5 horas.

Figura 10- Cálcio acumulado em função do tempo de extração em ácido acético (AA), ácido cítrico (AC) e água (H<sub>2</sub>O) expressos em mg/L.

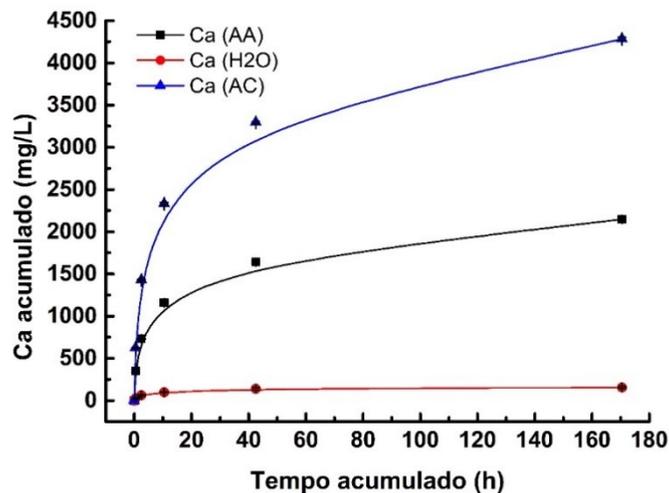
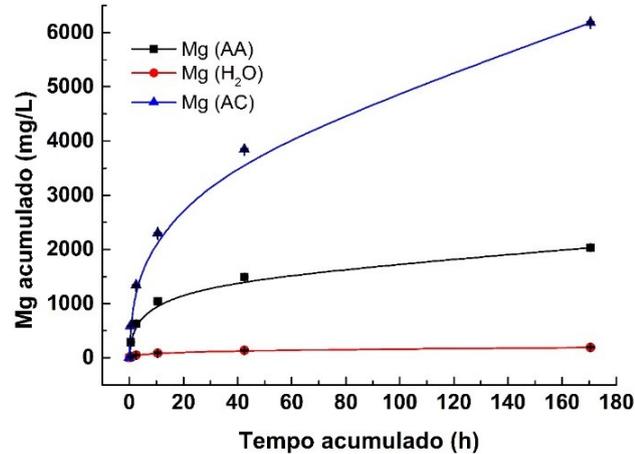
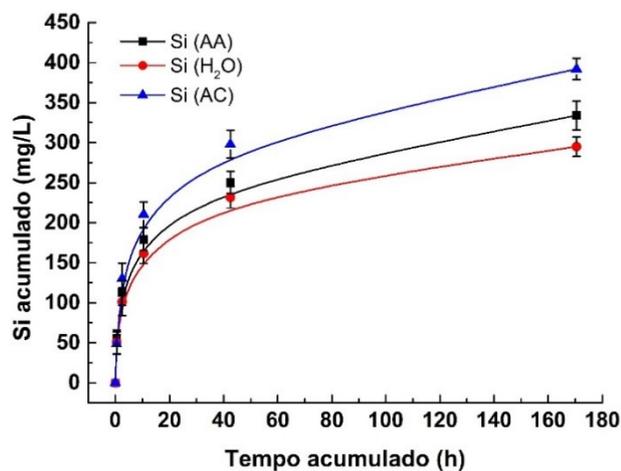


Figura 11- Magnésio acumulado em função do tempo de extração em ácido acético (AA), ácido cítrico (AC) e água (H<sub>2</sub>O) expressos em mg/L.



Para o elemento silício se obteve um comportamento semelhante de extração para todos os três diferentes extratores utilizados, que se diferenciaram apenas nas quantidades extraídas, sendo o ácido cítrico com melhores respostas em quantidades de elemento para todos os tempos, seguido do ácido acético e água, com valores respectivos de 298,12 mg/L, 250,44 mg/L e 231,68 mg/L no tempo de contato acumulado de 42,5 horas, tendo em média aumento de 80 mg/L de Si para o tempo de 170,5 horas de extração (Figura 12).

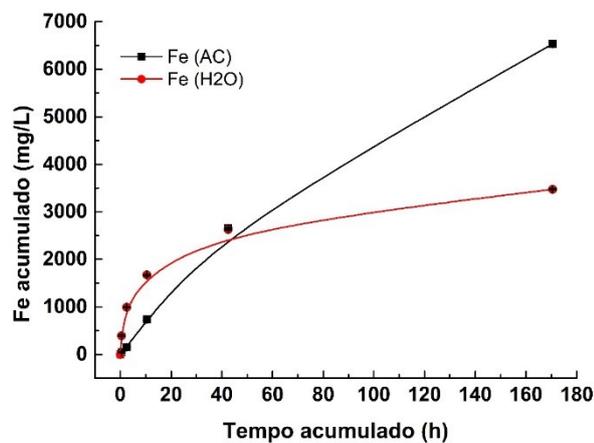
Figura 12- Silício acumulado em função do tempo de extração em ácido acético (AA), ácido cítrico (AC) e água (H<sub>2</sub>O) expressos em mg/L.



Para o elemento ferro, foi possível obter valores de respostas para os extratores ácido cítrico e água, visto que em ácido acético os valores encontrados foram abaixo do limite de

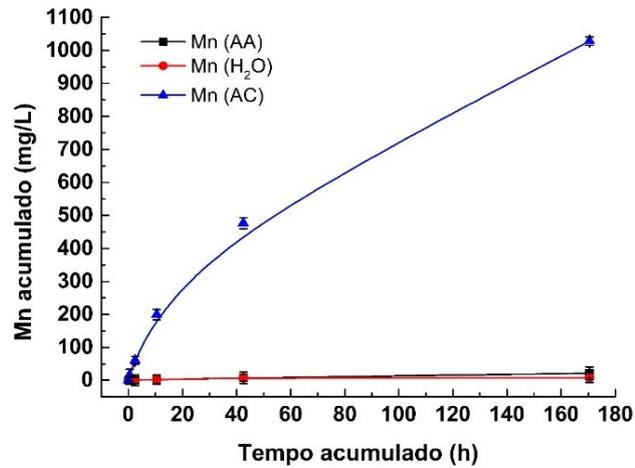
quantificação de 0,047 mg/L. O comportamento para o extrator ácido cítrico foi diferente em comparação com a água, pois neste se teve um pico de extração no tempo de 42,5 horas com 2654 mg/L de Fe para uma concentração de 6530 mg/L de Fe no tempo acumulado de contato 170,5 horas. Já para o extrator água o comportamento em comparação com estes dois tempos foi inferior, saindo de 2628 mg/L em 42,5 horas e atingindo 3476 mg/L de Fe em 170,5 horas de contato acumulado, conforme figura 13.

Figura 13- Ferro acumulado em função do tempo de extração em ácido cítrico (AC) e água (H<sub>2</sub>O) expressos em mg/L.



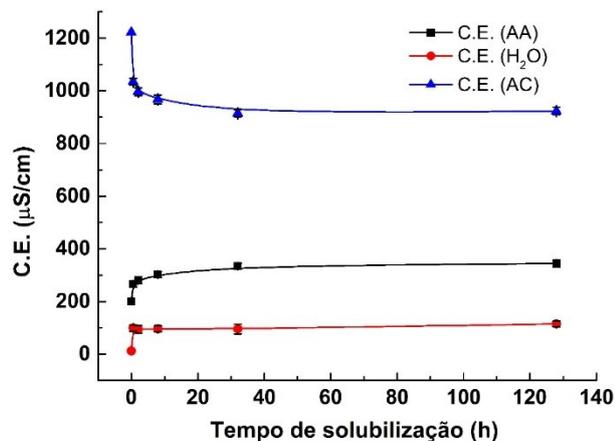
Em relação ao manganês, figura 14, o extrator ácido cítrico extraiu quantidades significativas do elemento em função do aumento do tempo de contato acumulado com o pó de rocha, com valores de 61, 199, 476 e 1028 mg/L de Fe nos tempos respectivos de 2,5, 10,5, 42,5 e 170,5 horas de contato. Já em relação aos extratores ácido acético e água, ambos apresentaram um comportamento similar e constante de extração, atingindo apenas 20 mg/L de Mn para ácido acético e água no tempo de 170,5 horas, respectivamente.

Figura 14- Manganês acumulado em função do tempo de extração em ácido acético (AA), ácido cítrico (AC) e água (H<sub>2</sub>O) expressos em mg/L.



Para a Condutividade Elétrica os valores mais inferiores são do extrator água, com variação de 98,9  $\mu\text{S/cm}$  em 0,5 horas para 114,8  $\mu\text{S/cm}$  em 128 horas de contato. Valores intermediários foram encontrados para o ácido acético, variando nos tempos de 0,5 e 128 horas com 265,9 e 344  $\mu\text{S/cm}$  respectivamente. Resultados coerentes com o esperado foram obtidos em ácido cítrico, devido à maior concentração de íons liberados do pó de rocha para a solução, evidenciando o maior poder de dissolução deste ácido orgânico, figura 15.

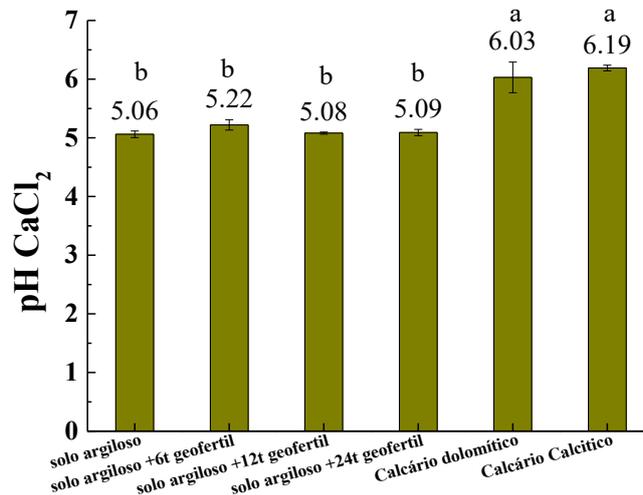
Figura 15- Condutividade elétrica em função do tempo de extração em ácido acético (AA), ácido cítrico (AC) e água (H<sub>2</sub>O) expressos em  $\mu\text{S/cm}$ .



### 5.1.5 Avaliação da capacidade de correção da acidez

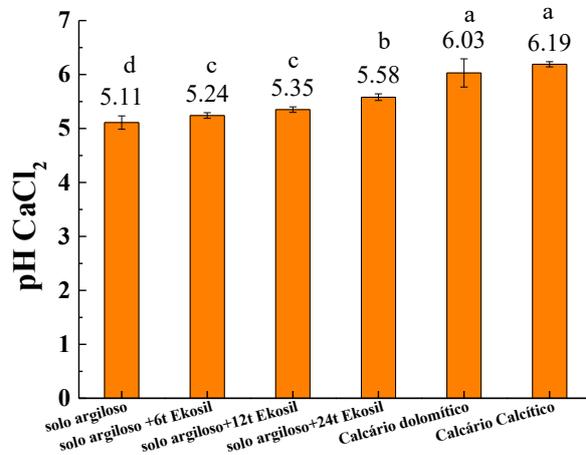
Na figura 16, é possível observar que o pH do solo argiloso não apresentou um aumento significativo após a adição de 6, 12 e 24 toneladas de pó de rocha durante o período de 25 dias incubado. Já para uso com os calcários foi possível observar aumento no valor de pH, sendo que estes se apresentam mais eficazes com uma reação mais imediata em comparação com o pó de rocha Geofertil.

Figura 16- Potencial de correção do pH em solo argiloso com uso de doses de pó de rocha Geofertil e doses de calcário calcítico e dolomítico.



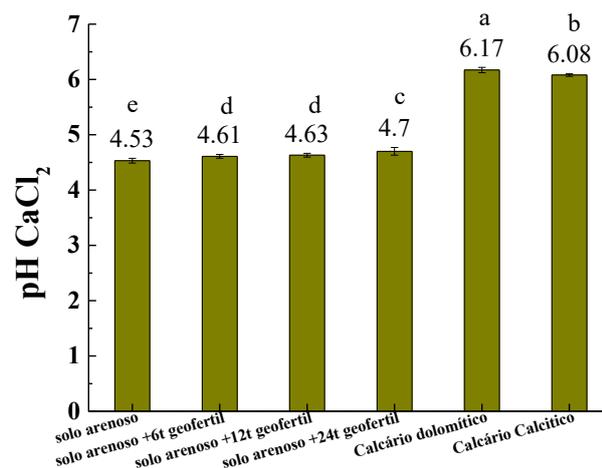
Em figura 17 observamos uma resposta significativa de aumento no valor de pH do solo argiloso com correção usando o pó de rocha já registrado da Ekosil com quantidade de 24 toneladas por hectare, mas quando se compara com o pó de rocha da Geofertil também não teve uma resposta tão acentuada nesse período de ensaio, diferenciando também apenas para os calcários, que proporcionaram aumento relevante no valor de pH mas que não se diferenciaram entre si.

Figura 17- Potencial de correção do pH em solo argiloso com uso de doses de pó de rocha Ekosil e doses de calcário calcítico e dolomítico.



Para o solo arenoso o pó de rocha produzido na empresa Geofertil proporcionou um aumento nos valores de pH em comparação com o solo sem correção e com aplicação de 24 toneladas por hectare de pó de rocha, como podemos observar em figura 18, mas não foi o suficiente para se comparar de forma estatística com o calcário dolomítico, que teve melhor resposta neste período de avaliação de 25 dias.

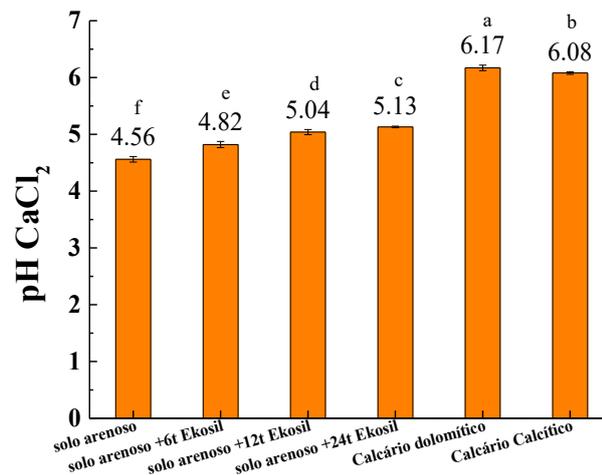
Figura 18- Potencial de correção do pH em solo arenoso com uso de doses de pó de rocha Geofertil e doses de calcário calcítico e dolomítico.



Não diferente dos resultados obtidos com o uso do pó de rocha Geofertil, o pó Ekosil também apresentou correção nos valores de pH em comparação com o solo arenoso sem aplicação de corretivo e com 24 toneladas por hectare no período de 25 dias incubado, saindo

de 4,56 para 5,13. Também para esse ensaio com solo arenoso o resultado com melhor resposta foi a aplicação recomendada com calcário dolomítico, aumentando o pH de 4,56 para 6,17, ilustrado em figura 19.

Figura 19- Potencial de correção do pH em solo arenoso com uso de doses de pó de rocha Ekosil e doses de calcário calcítico e dolomítico.



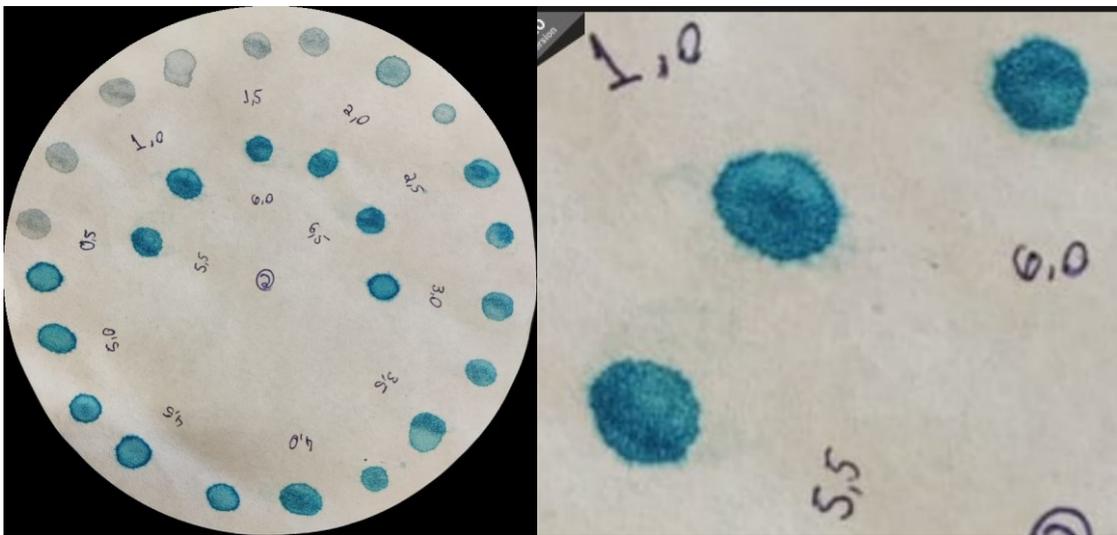
É possível observar que estatisticamente o pó de rocha Geofertil não teve potencial de aumentar o valor de pH dos solos, seja arenoso ou argiloso, em comparação com uso de corretivos tradicionais como o calcário no período de 25 dias. Mas deve-se lembrar que a permanência do pó de rocha irá proporcionar ao longo do tempo maiores correções de acidez dos solos, evidenciando ainda mais suas vantagens de uso para fontes de nutrientes e de correção da acidez do solo.

### 5.1.6 Capacidade de troca de cátions

A capacidade de troca de cátions foi avaliada com uso do método de azul de metileno, corante que quando em contato com o material a sua molécula é adsorvida, conseqüentemente acarretará a liberação dos cátions para a solução, podendo citar o sódio, cálcio, potássio e magnésio, os quais estão adsorvidos nos argilominerais. A figura 20 apresenta a observação das

manchas azuis provocadas pela gota da suspensão de azul de metileno sobre papel de filtro Whatiman nº 40, a cada volume de solução de azul de metileno adicionada na suspensão de pó de rocha em água e evidencia a auréola azul clara em torno da mancha azul escura indicando o ponto de adsorção máxima do azul de metileno e, portanto, o volume a ser utilizado no cálculo da CTC do material.

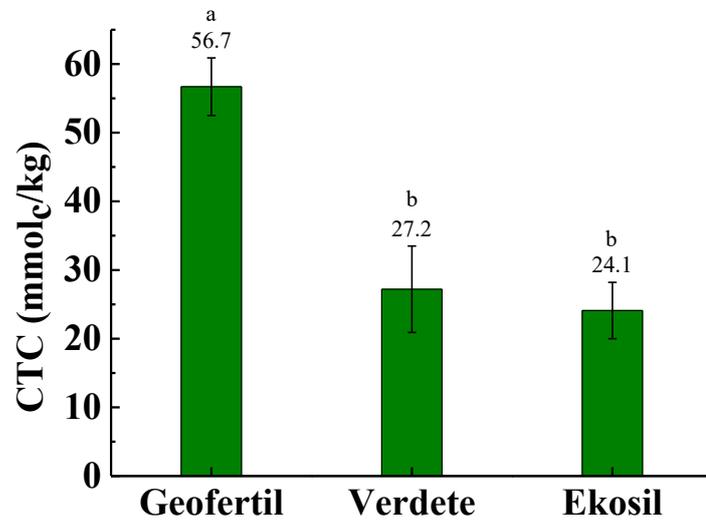
Figura 20- Resultados visuais em papel de filtro da gota de suspensão de pó de rocha após cada adição de volume de solução de azul de metileno (A); Auréola identificando o volume de solução de azul de metileno a ser utilizada no cálculo da CTC.



Fonte: Autor (2024)

Na figura 21 é possível verificar que o pó de rocha da Geofertil apresentou CTC com valor de 56,7 mmol/kg, valor superior que se diferenciou estatisticamente dos pós de rochas, Verdete e Ekosil, que não se diferenciaram entre si com valores de CTC respectivos de 27,2 e 24,1 mmol/kg, sendo o Ekosil um pó de rocha já registrado.

Figura 21- Capacidade de troca de cátions do pó de rocha produzido pela Geofertil em comparação com pós de rochas registrados, Verdete e Ekosil.



## 6 CONCLUSÃO

É possível concluir que o pó de rocha produzido pela empresa Geofertil possui potencial de suprir a solução do solo com nutrientes que serão disponibilizados para as plantas. Em comparação com os fertilizantes químicos, apresenta a desvantagem de ser uma liberação lenta, que ocorre ao longo do tempo, e não de forma tão imediata.

A grande capacidade de retenção de água do pó de rocha Geofertil possibilita a segurança hídrica das plantas, principalmente em regiões com restrições hídricas e escassez de água como nos locais da Bahia.

Em relação aos elementos presentes no material que podem ser considerados tóxicos, as quantidades determinadas são inferiores ao máximo permitido pela instrução normativa, ou seja, o pó de rocha Geofertil não possui potencial de contaminação do solo com elementos não desejáveis para o meio ambiente.

O uso de pó de rocha Geofertil em relação ao uso de calcários não demonstrou ser eficaz para correção de acidez do solo no tempo de estudo de 25 dias de incubação, em solos com textura arenosa e argilosa, juntamente com outros tipos de pós de rochas, visto que os calcários possuem potencial de reagir e corrigir o pH dos solos. Mas que com o passar do tempo a permanência do pó de rocha no solo irá corrigir mais ainda o pH. Estudos continuam em andamento.

Os resultados mostraram que o pó de rocha da Geofertil pode fornecer potássio e alguns outros micronutrientes, além de provocar mudanças na dinâmica de liberação de nutrientes para a solução do solo principalmente em solos arenosos, sendo que seu maior potencial se refere a capacidade de retenção de água, o que pode contribuir muito para amenizar muito o stress hídrico em regiões e períodos de baixa pluviosidade.

## 7 REFERÊNCIAS

AMARO, G. B. **Adubos e fertilizantes**. 2022. Disponível em:

<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/pimenta/pre-producao/insumos/adubos-e-fertilizantes>. Acesso em: 18 mar. 2024.

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

ARGENTA, Cláudia Vanessa; BRUM, Argemiro Luís; ALLEBRANDT, Sérgio Luís; MUELLER, Airton Adelar. A realidade do mercado de fertilizantes no Brasil: uma breve análise. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [S.L.], v. 16, n. 3, p. 1-17, 30 set. 2023. Centro Universitario de Maringa. <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2023v16n3e10998>.

BRANTLEY, S.L. & STILLINGS, L. Feldspars dissolution at 25oC and low pH. **Am. J.Sci.**, v.296, p. 101-127, 1996

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

[https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393222/do1-2016-03-14-instrucao-normativa-n-6-de-10-de-marco-de-2016-21393092](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393222/do1-2016-03-14-instrucao-normativa-n-6-de-10-de-marco-de-2016-21393092)

BRASIL. CARLOS AUGUSTO POSSER SILVEIRA. . **III Congresso brasileiro de rochagem**: protocolo para avaliação da eficiência agrônômica de remineralizadores de solo uma proposta da Embrapa. PROTOCOLO PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE REMINERALIZADORES DE SOLO – UMA PROPOSTA DA EMBRAPA. 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/pimenta/pre-producao/insumos/adubos-e-fertilizantes>. Acesso em: 18 mar. 2024.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Instrução Normativa (IN) nº 05 de 10 de março de 2016 (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, Brasília, DF, 10 jan 2016.

[https://www.in.gov.br/materia//asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393137/do1-2016-03-14-instrucao-normativa-n-5-de-10-de-marco-de-2016-21393106](https://www.in.gov.br/materia//asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393137/do1-2016-03-14-instrucao-normativa-n-5-de-10-de-marco-de-2016-21393106)

CELLA, Daltro; ROSSI, Mário César de Lima. Análise do mercado de fertilizantes no Brasil. **Revista Interface Tecnológica**, v. 7, n. 1, p. 41-50, 2010.

CHEN, T. J.; SANTOS, P. S.; FERREIRA, H. C.; ZANDONADI, A. R.; CAMPOS, L. V. Determinação da capacidade de troca de cátions e da área específica de algumas argilas e caulins cerâmicos brasileiros pelo azul de metileno e sua correlação com algumas propriedades tecnológicas. *Cerâmica*, 20, p. 79 (1974).

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. 2024. Disponível em: [file:///C:/Users/joaom/AppData/Local/Temp/MicrosoftEdgeDownloads/77be7491-cf58-49a9-9153-ec402cf60367/V2\\_ApresentacaoZ6ZLevZSafraZGraos.pdf](file:///C:/Users/joaom/AppData/Local/Temp/MicrosoftEdgeDownloads/77be7491-cf58-49a9-9153-ec402cf60367/V2_ApresentacaoZ6ZLevZSafraZGraos.pdf). Acesso em: 17 mar. 2024.

DE BRITO, RYCHAELLEN SILVA et al. Rochagem na agricultuta: importância e vantagens para adubação suplementar. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, v. 6, n. 1, 2019.

DIAS, Victor Pina; FERNANDES, Eduardo. **Fertilizantes: uma visão global sintética**. 2006.

EDWARD, W. O. O. **Influência do uso de pó de rochas fosfáticas e basálticas na ocorrência de micorrizas arbusculares em solo de cerrado**. 45 f., il. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

EGYDIO-SILVA, Marcos; KARMANN, Ivo; TROMPETTE, ROLAND. Litoestratigrafia do Supergrupo Espinhaço e Grupo Bambuí no noroeste do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 19, n. 2, p. 141-52, 1989

FONTES, M.P.F. I. Intemperismo de Rochas e Minerais. In: KER, J.C.; CURI, N.; SCHAEFER, R.G.R.; TORRADO, P.V.; orgs. Pedologia Fundamentos. Minas Gerais, **Soc. Bras. Ci. Solo**, p. 171-206, 2012

KOSMULSKI, Marek. PH-dependent surface charging and points of zero charge. IV. Update and new approach. **Journal Of Colloid And Interface Science**, [S.L.], v. 337, n. 2, p. 439-448, set. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2009.04.072>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979709005748>. Acesso em: 18 abr. 2024.

LUZ, A. B. et al. Rochas, minerais e rotas tecnológicas para a produção de fertilizantes alternativos. In: **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.4, p.61-88.

MARTINS, E.S.; Resende, A.V.; Oliveira, C.G. & Furtini Neto, A.E. (2010). Materiais Silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos. In: Fernandes, F.R.C.; Luz, A.B.; Castilhos, Z.C. eds. **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM. p.89-104.

MEDEIROS, Fernanda de Paula. **Uso dos remineralizadores associado a policultivos para produção da palma forrageira no semiárido baiano**. 2017. xxii, 110 f., il. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Rural) -Universidade de Brasília, Planaltina, 2017.

MOZZAQUATRO, E. M. S. S.; ALMIRAO, D. D. O.; RIGHI, A. P.; LOPES, J. C. D. S. Viabilidade econômica da cultura da soja em uma propriedade rural. **Revista Congrega-Mostra de trabalhos de conclusão de curso-ISSN 2595- 3605**, v.1, p. 806-824, 2017.

PEJON, O.J. (1992) Mapeamento geotécnico da folha de Piracicaba-SP (escala 1: 100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos, Tese de Doutorado, Programa de Pós- Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos

PLANO NACIONAL DE FERTILIZANTES 2050: Uma Estratégia para os Fertilizantes no Brasil. Brasília: Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos, 2021.

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

SAINI, B. S.; KAUR, R. X-ray diffraction. Em: Handbook of Modern Coating Technologies: Advanced Characterization Methods. [s.l: s.n.].

SILVEIRA, A.P.D. & FREITAS, S.S. Microbiota do Solo e Qualidade Ambiental, IAC, P.312, 2007.

SOUSA, Lidia Dely Alves de. **CINÉTICA DE LIBERAÇÃO DO POTÁSSIO EM REJEITO DE MINERAÇÃO DE VERMICULITA PARA O FORTALECIMENTO DO SOLO**. 2012. 44 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, 2012.

UEHARA, G. & GILLMAN, G. P. Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals: I. **Theory. Soil Sci. Soc. Amer. J.**, 44: 250 - 255. 1980.