

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA FLORESTAL
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

CAMILA VICTÓRIA DA SILVA BRAZIL

**PÓ DE ROCHA DE MINERAÇÃO DE SCHEELITA COMO REMINERALIZADOR
DE SOLO: POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES**

RECIFE
2025



CAMILA VICTÓRIA DA SILVA BRAZIL

**PÓ DE ROCHA DE MINERAÇÃO DE SCHEELITA COMO REMINERALIZADOR
DE SOLO: POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Ygor Jacques Agra Bezerra da Silva

Co-orientadora: Ana Beatriz Torre Melo de Freitas

RECIFE**2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Auxiliadora Cunha – CRB-4 1134

B795p Brazil, Camila Victória da Silva.
Pó de rocha de mineração de scheelita como
remineralizador de solo: potencialidades e
limitações / Camila Victória da Silva Brazil. – Recife,
2024.

49 f.; il.

Orientador(a): Ygor Jacques Agra Bezerra da
Silva.

Co-orientador(a): Ana Beatriz Torre Melo de
Freitas.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Bacharelado em Engenharia Florestal, Recife, BR-
PE, 2025.

Inclui referências.

1. Rochagem. 2. Fertilidade do solo. 3. Produtos
químicos agrícolas. 4. Resíduos agrícolas I. Silva,
Ygor Jacques Agra Bezerra da, orient. II. Freitas,
Ana Beatriz Torre Melo de, coorient. III. Título

CDD 634.9



CAMILA VICTÓRIA DA SILVA BRAZIL

**PÓ DE ROCHA DE MINERAÇÃO DE SCHEELITA COMO
REMINERALIZADOR DE SOLO: POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Aprovado em 20 de dezembro de 2024

BANCA EXAMINADORA:

Ms. Géssyca Fernanda de Sena Oliveira Mergulhão

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Luiz Henrique Vieira Lima

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Ygor Jacques Agra Bezerra da Silva

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Orientador



AGRADECIMENTOS

Se consegui chegar até aqui e ainda tenho forças para trilhar caminhos desafiadores, é porque tenho pessoas incríveis ao meu lado que me incentivam e me inspiram! Carrego em meu coração uma profunda gratidão que permanecerá comigo ao longo de toda minha vida.

Primeiramente, agradeço a Deus, fonte de força, sabedoria e inspiração em todos os momentos. Durante a graduação ganhei um melhor amigo em que sua presença me guiou e me sustentou, especialmente nos desafios deste percurso. Sem Ele, nada seria possível!

Agradeço a minha amada mãe, Maria de Fátima. A senhora foi como fortaleza a qual podia me abrigar e apoiar, mas também uma brisa suave refrescante em dias tão quentes e frustrantes. A mulher da qual me orgulho de ser filha e amo incondicionalmente. Obrigada por estar ao meu lado. Com a senhora sempre posso ir mais longe.

Agradeço às minhas avós Leni Brazil e Maria das Neves, ao meu irmão Felipe Alves, aos meus tios Luiz Aparecido, Suely Pereira, Lourdes Silva, e toda minha família por sempre me apoiarem, mas também puxarem minha orelha quando necessário. Amo todos vocês.

Um agradecimento especial ao meu orientador Dr. Ygor Jacques. Lhe tenho como uma das minhas maiores inspirações profissionais e isso vai além do que o senhor já fez, conquistou ou escreveu. Seu coração é admirável. Obrigada por me deixar fazer parte da sua história e obrigada por me ajudar a construir a minha. Que nossa parceria e amizade permaneçam fortes por longos anos.

Dedico meu carinho e felizes lembranças à companheira mais fiel: minha gatinha, Chiquitita. Agradeço aos meus amigos que a universidade me apresentou, especialmente Julia Lima, Maria Beatriz, Sarah Almeida, Edson Junior e Beatriz Elis, que apenas guardarei as melhores memórias. Agradeço também aos meus colegas de turma e curso; à todo Semearte; aos meus amigos do ensino médio e da vida toda, especialmente Millena Barros, Laura Alves e todo o grupo TDDI. Apesar de cansativa, a graduação nunca foi um fardo pois eu tinha todos vocês, meus companheiros, ao meu lado. Vocês são como Provérbios 27:9!

Um agradecimento especial à Ana Leticia, Gustavo Vieira, Isadora Targino, Maeli Chryslaine e Shaiany Isadora. Vocês têm o poder de transformar o cansaço do trabalho em alegria e boas risadas. Também agradeço a Laura Nascimento e Rayanna Jacques e a todos os membros do Grupo de Pesquisa em Geologia Aplicada a Solos e ao Ambiente (GPGASA) pelo suporte, ensinamentos e companheirismo. Vocês são minha segunda família!

Agradeço aos membros que compuseram a banca avaliadora, Luiz Lima e Géssyca Sena; ao Grupo de Pesquisa em Química Ambiental de Solos (GQAS) e ao Laboratório de Mineralogia do Solo, pelo suporte prestado e valiosas contribuições!

Dedico também esse agradecimento a todos aqueles que contribuíram para a conclusão da minha graduação de alguma forma e realização deste trabalho. Muito obrigada!



Até aqui nos ajudou o Senhor. (1 Samuel 7:12)

*Porque dEle, e por Ele, e para Ele são todas
as coisas; glória, pois, a Ele eternamente.*

Amém. (Romanos 11:36)



PÓ DE ROCHA DE MINERAÇÃO DE SCHEELITA COMO REMINERALIZADOR DE SOLO: POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES

RESUMO

O Brasil é uma das maiores potências agrícolas mundiais, mas enfrenta desafios devido à dependência de fertilizantes convencionais e seus impactos ambientais. Nesse contexto, a rochagem, técnica que utiliza pó de rocha como remineralizador de solos, surge como alternativa sustentável para a agricultura. Este estudo avaliou o potencial do rejeito de mineração de scheelita como remineralizador de solos, conforme os critérios estabelecidos pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), nas Instruções Normativas nº 5 e 6 de 2016. O estudo foi realizado no município de Currais Novos, na Zona Semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. Foram coletadas as rochas encaixantes (gnaisse e mármore) e a hospedeira (scheelita) para análises petrográficas e seis amostras de rejeito de mineração de scheelita para caracterizações mineralógicas, físicas e químicas do pó de rocha. A análise granulométrica, utilizada para determinar a natureza física do material (filler, pó ou farelado), foi realizada com peneiras de malhas variando entre 2 mm e 0,053 mm. A petrografia das rochas foi realizada com o uso de um microscópio petrográfico, enquanto a identificação da composição mineralógica dos rejeitos foi feita por difratometria de raios X (DRX). Os elementos maiores, expressos na forma de óxidos, foram determinados por meio de um espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX). As análises de macronutrientes e demais caracterizações dos rejeitos foram realizadas conforme os procedimentos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa. Os resultados demonstraram que o material apresenta elevada concentração de minerais como biotita, plagioclásio, apatita, actinolita e feldspatos, que atuam como fontes de nutrientes, além de granulometria adequada para liberação gradual de elementos essenciais no solo. Quimicamente, o pó de rocha atendeu a dois dos três pré-requisitos legais, apresentando 41,99% de soma de bases ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$), 1% de K_2O e 24% de SiO_2 livre. Contudo, o teor de arsênio ($\text{As} = 70,31 \text{ mg kg}^{-1}$) ultrapassou quase quatro vezes os limites permitidos pela legislação, inviabilizando sua classificação imediata como remineralizador. Diante do potencial agrônômico identificado e dos desafios associados à presença de elementos potencialmente tóxicos, recomenda-se a continuidade dos estudos, com foco no uso de plantas fitorremediadoras para mitigar os teores de As, garantindo segurança ambiental e viabilidade comercial. O aproveitamento do rejeito de scheelita pode representar uma solução para a destinação adequada desses resíduos, contribuindo para a sustentabilidade agrícola e para o fortalecimento da segurança alimentar no Brasil.

Palavras-chave: rochagem; fertilidade do solo; agrominerais; rejeito de mineração.



SCHEELITE MINING ROCK POWDER AS A SOIL REMINERALIZER: POTENTIALITIES AND LIMITATIONS

ABSTRACT

Brazil is one of the world's leading agricultural powers but faces challenges due to its reliance on conventional fertilizers and their environmental impacts. In this context, rock dust application, a technique that utilizes rock powder as a soil remineralizer, emerges as a sustainable alternative for agriculture. This study evaluated the potential of scheelite mining waste as a soil remineralizer, following the criteria established by the Brazilian Ministry of Agriculture, Livestock, and Food Supply (MAPA) in Normative Instructions No. 5 and 6 of 2016. The research was conducted in Currais Novos, located in the Semi-Arid Zone of Rio Grande do Norte, Brazil. Host rocks (gneiss and marble) and ore (scheelite) were collected for petrographic analyses, along with six samples of scheelite mining waste for mineralogical, physical, and chemical characterization of the rock powder. Granulometric analysis, used to determine the material's physical nature (filler, powder, or granulated), was performed with sieves ranging from 2 mm to 0.053 mm. Petrographic analysis of the rocks was conducted using a petrographic microscope, while the mineralogical composition of the waste was identified by X-ray diffraction (XRD). Major elements, expressed as oxides, were determined using an X-ray fluorescence spectrometer (XRF). Macronutrient analysis and other characterizations of the waste were carried out according to the procedures described in Embrapa's Soil Analysis Methods Manual. The results showed that the material has a high concentration of minerals such as biotite, plagioclase, apatite, actinolite, and feldspars, which serve as nutrient sources, as well as a suitable granulometry for the gradual release of essential elements into the soil. Chemically, the rock powder met two of the three legal prerequisites, presenting a base sum ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$) of 41.99%, 1% K_2O , and 24% free SiO_2 . However, the arsenic content ($\text{As} = 70.31 \text{ mg kg}^{-1}$) exceeded the legal limits by nearly four times, preventing its immediate classification as a remineralizer. Given the identified agronomic potential and the challenges associated with the presence of potentially toxic elements, further studies are recommended, focusing on the use of phytoremediation plants to mitigate As levels, ensuring environmental safety and commercial viability. The valorization of scheelite mining waste could provide an environmentally sound disposal solution while contributing to agricultural sustainability and strengthening food security in Brazil.

Key-words: rock dusting; soil fertility; agrominerals; mining waste.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma metodológico do estudo.	25
Figura 2 - Área de estudo (Mina Brejuí), Rio Grande do Norte, Brasil.	26
Figura 3 - Área de descarte do rejeitos da mineração de scheelita localizado no semiárido tropical brasileiro, no estado do Rio Grande do Norte, município de Currais Novos.	27
Figura 4 - Características petrográficas do tactito explorada na atividade de mineração de scheelita no semiárido brasileiro. (a) e (b) Epidoto com pequenas inclusões de powellita; (c) e (d) Carbonato; (e) e (f) Vesuvianita; (g) e (h) Titanita.	32
Figura 5 - Características petrográficas do mármore. (a) e (b) Aspecto geral do mármore com textura poligonal, formada pelos minerais de calcita, tremolita-actinolita (Tr-Act) e poucos minerais opacos; (c) e (d) aspecto geral com destaque para os pequenos cristais de anfibólio (Tr-Act); (e) e (f) cristais de tremolita-actinolita dispostos em textura aproximadamente radial; (g) e (h) cristais euédricos de tremolita-actinolita.	34
Figura 6 - Características petrográficas do gnaisse. (a) e (b) aspecto geral do gnaisse com destaque para faixa enriquecida em biotita (bt); (c) e (d) aspecto geral do gnaisse com destaque em alguns locais onde o quartzo (Qtz) ocorre em granulação grossa. Na parte superior se observa alguns cristais de feldspato potássico (KF), em menor granulação; (e) e (f) aspecto geral do gnaisse com destaque para os cristais de microclina com típica geminação xadrez; (g) e (h) presença de dobramento no gnaisse, observado por meio da marcação feita por biotitas. Encontram-se presentes na imagem outros minerais formadores: quartzo (Qtz), feldspato (Fsp) e minerais opacos.	36
Figura 7 - DRX da fração areia fina e grossa analisados na forma de pó não orientado no rejeito (pó de rocha) da mineração de scheelita.	38
Figura 8 - DRX da fração argila analisados na forma de pó não orientado no rejeito (pó de rocha) da mineração de scheelita.	39



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição mineralógica (%) das principais rochas exploradas na mineração de scheelita, responsáveis por gerar os rejeitos que formaram os tecnossolos. 31

Tabela 2 - Atributos químicos de remineralizador proveniente de rejeitos da mineração de scheelita da Mina Brejuí. 41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificações de natureza física dos remineralizadores. Fonte: Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. 24



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. HIPÓTESE	16
3. OBJETIVOS	16
3.1. Geral	16
3.2. Específicos	16
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1. Remineralizadores: introdução de uma modernidade do passado presente no futuro	17
4.2. Solubilização das rochas e benefícios do uso de remineralizadores	20
4.3. Regulamentações e registro no MAPA para uso comercial de remineralizadores de solo	22
5. MATERIAIS E MÉTODOS	25
5.1. Caracterização da área de estudo e do pó de rocha da mineração de scheelita ...	25
5.2. Coleta e preparo do pó de rocha	27
5.3. Métodos analíticos	27
5.3.1. Análise granulométrica dos pós de rocha	27
5.3.2. Petrografia	27
5.3.3. Análise mineralógica por DRX	28
5.3.4. Análise da composição química total por Fluorescência de Raios-X	28
5.3.5. Determinação dos elementos potencialmente tóxicos nos pós de rocha por ICP-OES	28
5.3.6. Análise de macronutrientes disponíveis	29
5.3.7. Análise estatística	30
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
6.1. Análise granulométrica dos pós de rocha	30
6.2. Análises petrográficas das rochas formadoras (tactito, gnaisse e mármore) do rejeito (pó de rocha)	31
6.3. Análises mineralógicas do rejeito	37
6.4. Análise da composição química total por Fluorescência de Raios-X	39



6.5. Análises dos macronutrientes e outro atributos químicos do rejeito	40
6.6. Determinação de elementos potencialmente tóxicos segundo MAPA	42
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
8. REFERÊNCIAS	43



1. INTRODUÇÃO

O Brasil é uma das maiores potências agrícolas mundiais. O território brasileiro é o quarto maior produtor de alimentos mundial e carrega o slogan de “celeiro do mundo” (Scolari, 2006), devido ao seu consolidado agronegócio e grande produção e participação nas atividades agropecuárias. Sendo assim, para suprir as exigências de fertilizantes dos solos e corroborar com os resultados dos cultivares produzidos, o país se tornou responsável por cerca de 7 % do consumo global de fertilizantes, representando 35,5 milhões de toneladas em 2018 (ANDA, 2018). Além disso, o Brasil ocupa a quarta posição da lista de consumo de nitrogênio (N), terceiro de fósforo (P) e segundo de potássio (K) (ANDA, 2018; Oliveira *et al.*, 2019). Entretanto, o uso e produção exacerbada de fertilizantes gerados pelo desenvolvimento agrícola pode acarretar na degradação ambiental (Carvalho *et al.*, 2019), que é uma discussão cada vez mais popular ao redor do globo devido à necessidade de conservar e preservar a natureza.

Nesse cenário, surge a preocupação e desenvolvimento de alternativas menos poluentes e viáveis socioeconomicamente em substituição aos fertilizantes, bem como práticas produtivas mais sustentáveis (Carvalho *et al.*, 2019). Dentro desta perspectiva, vêm ganhando força estudos desenvolvidos com rejeitos de mineração no meio agrícola, sendo corretivos ou nutritivos, de modo a potencializar os usos e as destinações desses materiais, além de diminuir os impactos ambientais (Costa, 2022; Gomes, 2017; Silva *et al.* 2017). Nas condições climáticas brasileiras, o emprego de fertilizantes com alta solubilidade, em geral, resulta em baixa eficiência de uso, entre outras causas, devido às perdas por lixiviação (Swoboda *et al.*, 2022), principalmente em solos localizados nas zonas tropicais úmidas. Em consequência, essas perdas podem contribuir para a redução da qualidade da água e, como resultado, levar à degradação ambiental (Huisman *et al.*, 2018).

Nesse aspecto, a rochagem, método que utiliza pó de rocha derivado de rejeito de mineração, vem ganhando sentido e importância na agricultura (Camara *et al.*, 2021; Fraga *et al.*, 2021; Alovise *et al.*, 2020; Brito *et al.*, 2019). Esse pó de rocha é capaz de liberar de maneira gradual nutrientes para o solo, tendo a capacidade de elevar a CTC e facilitar o dinamismo micorrízico do solo (Brito *et al.*, 2019). Sendo assim, a utilização desse material é uma via ecológica e economicamente vantajosa principalmente para a área de



mineração, fazendo com que o rejeito que antes não tinha fim ideal, seja reaproveitado (Brito *et al.*, 2019).

A utilização dos remineralizadores em solos, além de aumentar a eficiência no uso de nutrientes, resulta na formação de novas fases minerais, como argilominerais 2:1 e fases de baixa cristalinidade (Kelland *et al.*, 2020). Essas novas fases minerais possuem elevada capacidade de troca de cátions, que é frequentemente deficiente em solos tropicais altamente intemperizados, e um potencial de estabilização da matéria orgânica. Isso contribui para aumentar o sequestro de carbono nos solos agrícolas (Kelland *et al.*, 2020). Além disso, diferentemente dos fertilizantes de alta solubilidade, os pós de rochas apresentam a característica distinta de liberar nutrientes de forma gradual e lenta no solo, permitindo que a fertilidade seja mantida por um período significativamente mais longo em comparação com os fertilizantes convencionais.

A Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013, define o termo remineralizador como um material de origem mineral que foi submetido somente a processos mecânicos de redução e classificação de tamanho. Esse material deve alterar os índices de fertilidade do solo, adicionando macro e micronutrientes para as plantas, e também promover melhorias nas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas do solo (Brasil, 2013). A fim de garantir sua funcionalidade e qualidade, esses materiais devem atender aos requisitos da instrução normativa de março de 2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Em termos de composição química total, esses materiais devem possuir no mínimo 9 % de soma de bases ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$), no mínimo 1% de óxido de potássio (K_2O) e um máximo de 25 % de SiO_2 livre (quartzo) no produto. Além disso, eles devem ter um máximo de 15 mg kg^{-1} de As, 10 mg kg^{-1} de Cd, $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$ de Hg e 200 mg kg^{-1} de Pb (Brasil, 2016). É importante destacar que a eficiência agrônômica desses materiais deve ser comprovada por meio de testes e pesquisas.

O Governo Federal lançou o Plano Nacional de Fertilizantes (PNF) em 2022 com o objetivo de reduzir a dependência do Brasil na importação de fertilizantes (Vendramini, 2022). O artigo 4º do PNF apresenta uma das metas específicas do plano, que é reduzir o passivo de estéreis e rejeitos da atividade de mineração por meio da adoção de tecnologias para a recuperação dos nutrientes e a produção de novos fertilizantes. Nesse contexto, o uso de pó de rocha como remineralizadores na agricultura e para produção de mudas florestais é uma opção importante, especialmente no Nordeste, onde há ampla



geodiversidade e possibilidade de uso de produtos gerados pelas atividades de mineração que, após avaliações adequadas, podem ser registrados no MAPA para uso comercial.

A mineração é uma das atividades mais importantes para a economia brasileira, representando 20 % de todos os produtos exportados e 6 % do PIB (MME, 2018). E a Mina Brejuí, situada em Currais Novos, Rio Grande do Norte, é considerada como a maior mina de exploração de tungstato de cálcio (scheelita; CaWO_4) da América do Sul (Godeiro *et al.*, 2010) e uma das 200 maiores do Brasil (Minérios & Minerales, 2014) em atividade desde a década de 40 (Costa Filho, 2017). Essa mina é considerada um marco da cidade potiguar em âmbitos socioeconômicos e culturais principalmente pela geração de empregos e desenvolvimento regional (Godeiro *et al.*, 2010).

A composição do principal minério da mina é tungstato de cálcio, CaWO (CaO 19,4 % e WO_3 80,6 %) (Dana, 1974), além do mármore, tactito e gnaiss. Os usos e utilidades do tungstênio são diversos no mercado interno e externo como nas indústrias metalúrgicas, elétricas, mecânicas, bélicas, petrolíferas e aeroespaciais (IBRAM, 2015). No entanto, uma das principais problemáticas do processamento mecânico para obtenção de scheelita na mina Brejuí é a grande quantidade de rejeito, sendo estes acumulados sem proteção em pilhas a céu aberto (Ramos Filho, 2021) que pode resultar em poluição do solo, erosão e perda total ou parcial de áreas devido à geração de resíduos e pilhas de entulho (Gerab, 2014). Estima-se que exista um acúmulo de resto da produção da scheelita na ordem de aproximadamente 6,5 milhões de toneladas de resíduos grossos e finos (Ramos Filho, 2021), e essa elevada quantidade de rejeito deve-se aos interesses econômicos, pois somente a scheelita é de interesse para Mina e o que sobra é considerado rejeito do mineral.

Dentre os principais rejeitos observados na região, destacam-se: i) dois aterros que cobrem uma área de 121.500 m², com volume de 1.943.200 m³, totalizando 3.110.400 toneladas (Carvalho *et al.*, 2002; Fernandes *et al.*, 2009); ii) rejeitos de lama com aproximadamente 1.500.000 toneladas de resíduo (Lima *et al.* 2002). A viabilização desses rejeitos em grandes escalas como remineralizadores, corretivos e/ou condicionadores de solos, proporcionaria benefícios ambientais relacionados ao descarte e redução de resíduos da atividade de mineração, abrindo a possibilidade de subprodutos de valor econômico que podem ser adicionados à substância mineral alvo da extração. No entanto, a falta de embasamento científico sobre o potencial desses rejeitos como remineralizadores de solos, de acordo com os critérios estabelecidos pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e



Abastecimento (MAPA) na diretriz normativa de março de 2016 (Brasil, 2016), impede que esse material seja empregado na agricultura.

Portanto, o estudo objetivou analisar a eficiência e as limitações do pó de rocha proveniente da mineração de scheelita, seguindo as diretrizes estabelecidas nas Instruções Normativas nº 5 e 6, de 10 de março de 2016, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, estabelecendo critérios técnicos de forma a assegurar viabilidade econômica e segurança ambiental do uso desse material na agricultura e produção de mudas visando tanto a produção de insumos comerciais essenciais para os setores quanto a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos de mineração.

2. HIPÓTESE

O rejeito de mineração de scheelita possui características físicas e químicas que atendem aos critérios estabelecidos pelas Instruções Normativas nº 5 e 6 do MAPA (2016), além de características mineralógicas que permitem sua classificação como remineralizador de solos.

3. OBJETIVOS

3.1. Geral:

Avaliar o potencial e limitações do rejeito de mineração de scheelita como remineralizador de solos, conforme as Instruções Normativas nº 5 e 6 do MAPA (2016), com foco na viabilidade econômica, segurança ambiental e destinação sustentável dos rejeitos na agricultura.

3.2. Específicos:

→ Classificar o pó de rocha como filler, pó ou farelado, de acordo com o recomendado pelo MAPA;

→ Determinar composição química total do pó de rocha da mineralização de scheelita quanto à nutrientes e elementos potencialmente tóxicos, objetivando: a) mínimo de 9% de soma de bases ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$); b) mínimo de 1% de óxido de potássio (K_2O); máximo de 25% de SiO_2 livre (quartzo) no produto; c) máximo de 15 mg kg^{-1} de



As, 10 mg kg⁻¹ de Cd, 0,1 mg kg⁻¹ de Hg e 200 mg kg⁻¹ de Pb (Brasil, 2016).

- Identificar e descrever as características petrográficas dos minerais nas rochas formadoras dos rejeitos de mineração de scheelita;
- Realizar a análise mineralógica dos rejeitos da mineração de scheelita por DRX para identificar os minerais fontes de nutrientes.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Remineralizadores: introdução de uma modernidade do passado presente no futuro

Os remineralizadores ou pós de rocha podem ser definidos por produtos de origem mineral dos quais, por meio de processos mecânicos, foram apenas reduzidos e classificados de acordo com o tamanho de sua partícula conferindo aos solos melhoramento dos atributos físico-químicos, físicos ou da atividade biológica do solo (Brasil, 2004).

Apesar de ser um tema atual, o uso de remineralizadores na história da humanidade remonta à antiguidade e povos ancestrais, em que culturas diversas exploravam a incorporação de minerais e substâncias naturais ao solo para melhorar a fertilidade e aumentar a produtividade das terras agrícolas. Embora não haja tantos registros de quando precisamente essas práticas foram iniciadas, há diversas evidências de seu uso em várias civilizações ao longo dos séculos e avanços tecnológicos.

Civilizações como a Mesopotâmia, Egito, China e Grécia já praticavam a adição de materiais minerais, como cinzas, esterco e pós de rocha calcárias, aos solos para melhorar a produtividade das colheitas (Perez *et al.*, 2016; Lopes; Guilherme, 2007). Os romanos também utilizavam práticas de remineralização, empregando técnicas como a adição de cinzas vulcânicas aos campos cultivados (Stadler, 2021). Os agricultores dessas culturas compreendiam intuitivamente que a reposição de minerais essenciais ao solo era indispensável para manter a fertilidade.

Durante a Idade Média, a prática de espalhar calcário para corrigir a acidez do solo se tornou mais comum em várias partes da Europa (Miranda, 1982). Com o advento da Revolução Agrícola nos séculos XVIII e XIX, houve um aumento na compreensão



científica da importância dos minerais para a fertilidade do solo (Lopes; Guilherme, 2007). Isso levou ao desenvolvimento de métodos mais sistemáticos de remineralização, incluindo a introdução de fertilizantes à base de minerais (Lopes; Guilherme, 2007).

Com o avanço da ciência agrícola, novos métodos de análise de solo permitiram uma compreensão mais profunda das necessidades minerais das plantas. Isso levou ao desenvolvimento de fertilizantes sintéticos, que se tornaram amplamente utilizados na agricultura moderna. No entanto, em paralelo, muitos agricultores continuaram a adotar abordagens mais naturais de remineralização, incorporando substâncias orgânicas e minerais naturais aos solos visando menores impactos no meio ambiente como contaminação dos recursos hídricos, entre outros.

Os solos brasileiros se destacam como um dos maiores exportadores globais de alimentos e um dos maiores importadores mundiais de fertilizantes (Dantas *et al.*, 2021), sendo cerca de 41,6 milhões de toneladas no ano de 2021 (Dantas *et al.*, 2021) e 38,12 milhões de toneladas de adubos e fertilizantes químicos importados só no ano de 2022 (Vegro; Angelo, 2023). A queda nas importações pode ser explicada pela transferência de volume de 2021 para 2022 que, somada à produção nacional, resulta em uma estimativa de oferta de cerca de 53 milhões de toneladas de fertilizantes, que ajudaram a mitigar os efeitos da diminuição das importações (Vegro; Angelo, 2023).

O aumento da área cultivada no Brasil, juntamente com avanços tecnológicos e o impulso das cotações internacionais, levou a um aumento nas importações de fertilizantes nos últimos anos, exceto em 2022, devido a fatores geopolíticos e de saúde global (Vegro; Angelo, 2023). É notável que o Brasil adquira mais de 90 % de seu fertilizante potássico de fontes externas, com a Rússia e Belarus ocupando papéis primordiais como fornecedores desses insumos vitais.

Esse fato demonstra a clara necessidade de práticas de reaproveitamento de insumos como resíduos, pois a dependência externa expõe a nação a flutuações nos preços internacionais, o que por sua vez inflaciona os custos de produção para a maioria das culturas agrícolas, suscitando preocupações a respeito da soberania alimentar do país (Pajolla, 2022) como fonte segura e de qualidade para sua nação e ao globo. Entretanto, ao passo que temos a preocupação e meta de crescimento das lavouras para suprir o mercado, também obtivemos em 2022 que o mesmo agronegócio que alimenta também é o principal responsável pela maior parte do desmatamento ilegal brasileiro (Pajolla, 2022).



A devastação contínua da Floresta Amazônica no Brasil persiste em um ritmo alarmante (Silva, 2023a) sendo necessário a adoção de práticas de regeneração dos solos e reflorestamento. Mas, os fatores que impulsionam esse desmatamento são variados e incluem principalmente atividades humanas, tais como múltiplos usos da terra (pecuária, cultivo de grãos, agricultura de corte e queima, entre outros), diversos projetos de infraestrutura (barragens, estradas e mineração), além de práticas de titulação ilegal e degradação florestal, como a extração não planejada e incêndios florestais (Silva, 2023a; Benatti; Rodrigues, 2005).

As florestas tropicais, em particular, têm um impacto significativo no clima global devido à sua biodiversidade e extensão, o que significa dizer que a preservação e reflorestamento dessas matas evita a liberação maciça de carbono, que ocorre quando são desmatadas ou degradadas (Artaxo, 2020). Para enfrentar esse desafio, a aplicação estratégica de remineralizadores no substrato na hora de produzir mudas florestais pode melhorar sua fertilidade, promovendo um crescimento mais saudável das árvores e aumentando sua capacidade de absorver gases do efeito estufa. A combinação de conservação florestal, uso agrícola-sustentável da terra e o uso inteligente de remineralizadores de solos pode desempenhar um papel vital na redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para um clima mais estável e saudável.

Portanto, quando percebemos que em um mundo onde a população total continua a crescer exponencialmente, a garantia da segurança alimentar, bem estar do planeta e balanço econômico se destacam como prioridades fundamentais. A busca por práticas agrícolas sustentáveis ao mesmo tempo que há uma intensificação das medidas protetivas às florestas emergem como estratégias cruciais para enfrentar os desafios atuais e futuros. E nesse contexto, surgem os remineralizadores de solos como fonte de transformação e impulsionamento socioeconômico da sustentabilidade.

A utilização desses recursos geológicos em conjunto com técnicas que catalisam a liberação de nutrientes como a biofertilização oferece uma abordagem tecnológica e viável (Oliveira, 2021). Isso se deve ao fato de que a combinação de materiais organo-minerais estimula a criação progressiva de novas fases minerais (Oliveira, 2021), especificamente argilas 2:1, o que resulta na formação e enriquecimento de um banco de nutrientes (Theodoro *et al.*, 2006).

É essencial ressaltar que os remineralizadores não constituem uma solução isolada,



mas sim um componente integrado de uma abordagem mais abrangente para a agricultura sustentável. A combinação de práticas agroecológicas, manejo de resíduos orgânicos e uso adequado de recursos hídricos, juntamente com a aplicação de remineralizadores de solos, pode resultar em sistemas agrícolas resilientes, eficientes e ambientalmente amigáveis. Portanto, o conhecimento de remineralizadores de solos que sejam capazes de impulsionar ainda mais esses âmbitos se fazem fundamentais.

4.2. Solubilização das rochas e benefícios do uso de remineralizadores

A eficácia e benefícios da aplicação de rochas silicáticas como remineralizadores de solos estão intrinsecamente ligadas à sua origem, mineralogia, composição química, tamanho das partículas, interação biológica, condições climáticas em que o remineralizador foi inserido, assim como às particularidades do solo, das culturas envolvidas e das metodologias de testes agrônômicos empregadas (Dantas *et al.*, 2022; Martins *et al.*, 2008; Souza *et al.*, 2017). A mineralogia da rocha é um importante indicador de sua capacidade de dissolução e liberação de nutrientes no solo, enquanto a granulometria do pó desempenha um papel de averiguar potencial de solubilidade (Martins *et al.*, 2008).

Para que possa ocorrer essa solubilização e eventual liberação de nutrientes, o intemperismo químico é um fator fundamental, já que seu grau e intensidade é diretamente atuante na taxa e velocidade de liberação desses elementos essenciais às plantas. Por meio das reações químicas de dissolução, hidrólise e oxidação, os minerais primários são transformados em formas mais estáveis e se tornam mais acessíveis para as plantas. Além disso, as partículas menores apresentam maior área de superfície específica, favorecendo assim as reações químicas mais rápidas e intensificando a solubilidade dos minerais, acelerando a disponibilização de nutrientes como cálcio, magnésio, potássio e micronutrientes para o caso das rochas silicatadas (Martins *et al.*, 2008; Souza, 2017).

A dissolução dos minerais é primariamente impulsionada pelo intemperismo, que abrange uma variedade de processos físicos, químicos e biológicos que contribuem para a deterioração das rochas. Esses processos ocorrem de forma contínua que se acentua com o tempo, a menos que todos os fatores envolvidos cessem (Barreto, 1998; Cola *et al.*, 2012). É importante destacar que o intemperismo químico desempenha um papel fundamental na transformação do ambiente geológico e na evolução dos solos já que influencia em mudanças substanciais na composição e características desse sistema, corroborando



diretamente a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Portanto, compreender o intemperismo e suas consequências é muito importante para a agricultura e a gestão sustentável do solo, uma vez que influencia a fertilidade e a qualidade do solo, afetando diretamente a produção de culturas e a saúde dos ecossistemas agrícolas (Silva Filho; Vidor, 2001).

Os efeitos da remineralização na fertilidade do solo e na disponibilidade de nutrientes para as plantas são inúmeros. Podem ser encontrados resultados como aumento linear do pH e um aumento progressivo da soma de bases, aumento da capacidade de troca catiônica, acréscimo representativo dos teores de macro e micronutrientes além de uma diminuição dos valores médios de alumínio tóxico para as plantas e por sua vez saturação por alumínio, e diminuição da acidez potencial em testes de incubação com pós de rocha basáltica (Souza, 2022); uso no cultivo de soja com pós de rocha nefelina - sienito (Santos, 2022); ensaios de lixiviação com pós de rocha basáltica (Hilário, 2022); monitoramento de áreas manejadas por agricultores familiares com uso de pó de rocha de britagem (Oliveira; Bino, 2023).

Por outro lado, as análises granulométricas têm sido objeto de investigação tanto em termos de otimização do processamento industrial quanto em relação ao seu impacto no desempenho agrônomo das fontes minerais, pois, cada mineral possui sua própria dinâmica de mobilidade, que é determinada pela probabilidade de fragmentação e pela distribuição das dimensões das partículas resultantes (Cola *et al.*, 2012). Os materiais mais finos, com tamanhos de partícula menores que 0,002 mm (argila) e entre 0,002 mm e 0,05 mm (silte), desempenham um papel fundamental na disponibilização de seus principais elementos no solo (Cola *et al.*, 2012). Esse fato relaciona-se à natureza da partícula que, quanto menor, maior será sua superfície de contato, facilitando processos de intemperismo e abrasão. Consequentemente, esses materiais têm a capacidade de se transformar mais rapidamente em argilo-minerais (Theodoro *et al.*, 2006).

Além disso, os materiais com maiores frações granulométricas, embora apresentem uma menor superfície de contato, desempenham um papel importante ao prolongar o tempo e a oferta de nutrientes no solo, sendo essenciais para garantir uma oferta contínua de diferentes macro e micronutrientes (Cola *et al.*, 2012), contribuindo para a fertilidade e produtividade do solo. Assim, a granulometria dos remineralizadores desempenha um papel essencial na liberação eficiente de nutrientes, sendo a superfície de contato um fator determinante nesse processo.



Uma ótima alternativa para aumentar a disponibilidade de nutrientes provenientes de rochas é a solubilização biológica (Garcia Júnior, 1991). Diversos microrganismos têm a capacidade de solubilizar nutrientes ao decompor minerais silicatados fazendo com que fiquem disponíveis, além do crescimento dessa microbiota estar intimamente ligado com a disponibilidade de nutrientes no solo (Cola *et al.*, 2012). Esses microrganismos liberam nutrientes por meio de ácidos orgânicos e inorgânicos produzidos durante a atividade biológica (Harley e Gilkes, 2000).

As bactérias *Acidithiobacillus*, conhecidas como oxidantes de enxofre, produzem ácido sulfúrico a partir do enxofre elementar, liberando fósforo e potássio insolúveis devido à redução do pH (Garcia Júnior, 1991). O uso de enxofre elementar com essas bactérias no solo é significativa agronomicamente, tanto pela produção de SO_4^{2-} , essencial para as plantas, quanto pelo efeito do H_2SO_4 no pH do solo, especialmente em solos alcalinos (Stamford *et al.*, 2008). Isso enfatiza a importância da solubilização biológica na melhoria da disponibilidade de nutrientes e no aumento da produtividade agrícola.

Por isso que os microrganismos são capazes de criar um ambiente propício para interação com a fase biológica do solo, que inclui os micro-organismos presentes na rizosfera das plantas (Dantas *et al.*, 2022), auxiliando na atividade e diversidade microbiana, influenciando até na ciclagem de nutrientes no solo. Esses resultados podem ser averiguados através do aumento da respiração basal com uso de pó de rocha de britagem (Oliveira; Bino, 2023), crescimento microbiológico positivo com uso de pó de rocha de rocha basáltica (Anderloni, 2021), entre muitas outras atividades.

4.3. Regulamentações e registro no MAPA para uso comercial de remineralizadores de solo

A regulamentação e o registro de remineralizadores de solo junto ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) constituem um processo essencial para garantir a segurança, qualidade e eficácia desses insumos na agricultura comercial. A obtenção do registro está sujeita a uma análise criteriosa de requisitos, nos termos da Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016 e suas regulamentações correlatas.

Os remineralizadores são avaliados quanto à sua composição química, tamanho de partículas e características que impactam diretamente a saúde humana, o meio ambiente e a



qualidade do produto. No artigo 4º da Instrução Normativa traz que, os remineralizadores devem apresentar características específicas, tais como a soma de bases igual ou superior a 9 % em peso/peso, um teor mínimo de óxido de potássio de 1 % em peso/peso, e um valor de pH de abrasão, conforme declarado pelo registrante.

A normativa também estipula limites para a presença de determinados elementos no produto. Não serão registrados no MAPA e também não poderá ser produzido, importado e/ou comercializado os remineralizadores que excedam os limites estabelecidos, como SiO₂ livre superior a 25 % em volume/volume e teores potencialmente tóxicos, tais como Arsênio (As), Cádmiio (Cd), Mercúrio (Hg) e Chumbo (Pb), que não podem ultrapassar valores específicos, a fim de garantir a segurança dos insumos agrícolas.

O registro de remineralizadores de solo, conforme a Instrução Normativa, é supervisionado pela Superintendência Federal de Agricultura (SFA), Pecuária e Abastecimento do MAPA. O Artigo 7º estipula que o registro é concedido de acordo com a unidade da federação em que o requerente está localizado.

A Instrução Normativa diferencia a aprovação de produtos já testados anteriormente e produtos não testados, que, para nosso caso, o estudo se enquadra no segundo caso em que é exigida a realização de ensaios agrônômicos conduzidos por instituições oficiais ou credenciadas, em ambiente controlado, para demonstrar a adequação do produto (Art. 9º, II).

A declaração dos teores de nutrientes, como fósforo e micronutrientes, é permitida no rótulo ou em documentos fiscais, desde que atendam aos valores mínimos estabelecidos. A Instrução evidencia ainda que o pedido de registro deve ser acompanhado por certificados de análises de geoquímica, teores de metais pesados tóxicos, teor de SiO₂ e trabalhos científicos conclusivos que comprovem a eficácia agrônômica do produto. A mistura de diferentes rochas também é contemplada, desde que os parâmetros sejam cumpridos.

Quanto às especificidades granulométricas, são elas:



Quadro 1 - Especificações de Natureza Física dos Remineralizadores. Fonte: Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016.

ESPECIFICAÇÃO DE NATUREZA FÍSICA	GARANTIA GRANULOMÉTRICA	
	Peneira	Partículas Passantes (peso/peso)
Filler	0,30 mm (ABNT nº 50)	100%
Pó	2,00 mm (ABNT nº 10)	100%
	0,84 mm (ABNT nº 20)	70% mínimo
	0,30 mm (ABNT nº 50)	50% mínimo
Farelado	4,80 mm (ABNT nº 4)	100%
	2,80 mm (ABNT nº 7)	80% mínimo
	0,84 mm (ABNT nº 20)	25% máximo

O processo de registro de remineralizadores de solo, portanto, segue diretrizes específicas e baseia-se em critérios científicos sólidos, visando assegurar a qualidade e segurança desses insumos na agricultura comercial, conforme estabelecido na Instrução Normativa. Mas, a busca pela aprovação comercial de remineralizadores de solo pode ser desafiadora para os produtores. O processo de registro envolve critérios complexos e análises técnicas, o que pode ser custoso em termos de tempo e recursos. A burocracia e a falta de conhecimento sobre as regulamentações também podem dificultar o processo.

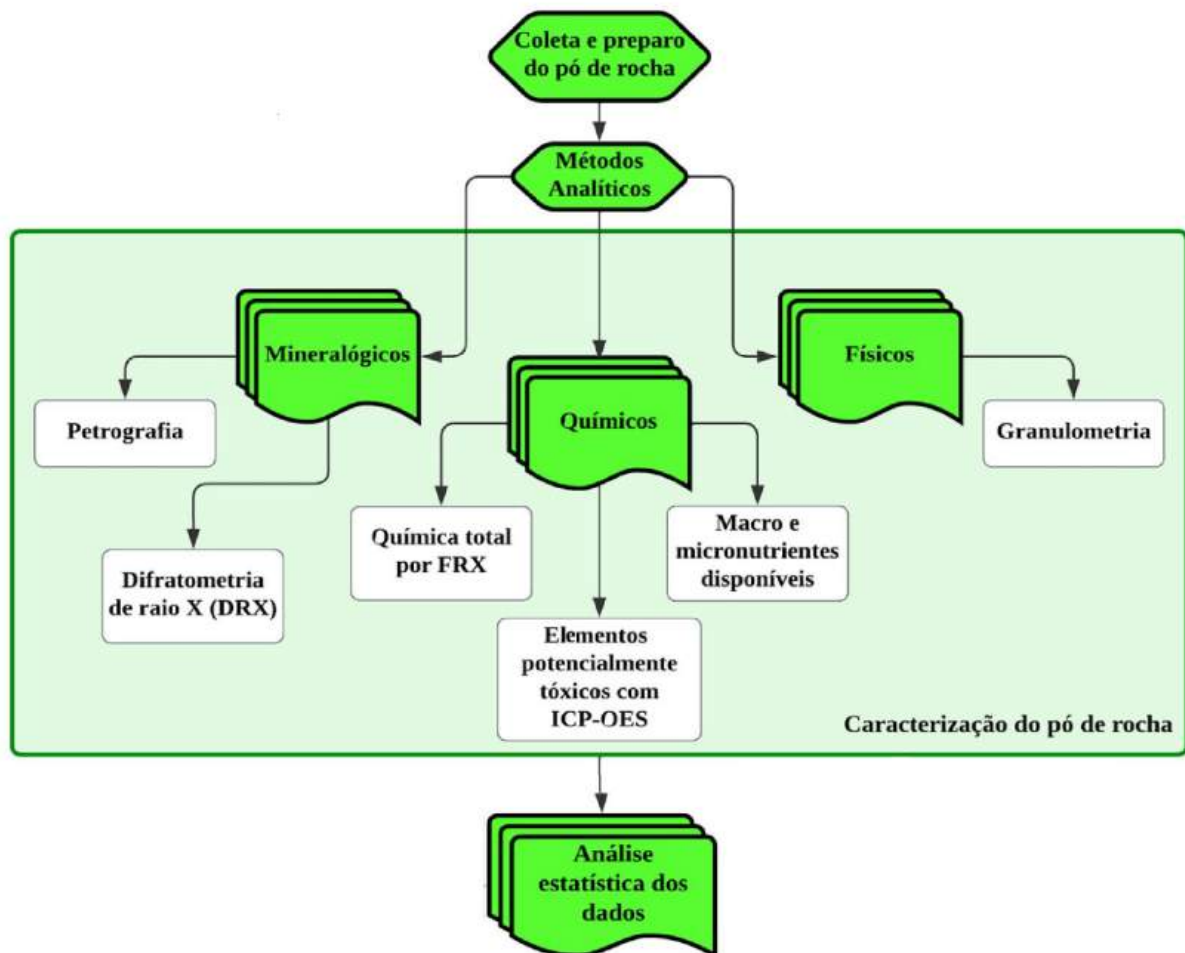
Logo, o desenvolvimento de programas de apoio técnico para orientar os produtores e agilizar o cumprimento dos requisitos entraria em comunhão com os demais objetivos. Além disso, a simplificação da documentação e revisão das regulamentações, considerando mecanismos de aprovação mais ágeis para produtos similares já testados em outros lugares, podem facilitar a aprovação.



5. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada neste estudo pode ser visualizada no diagrama de fluxo apresentado na Figura 1. As atividades realizadas, conforme delineado no referido fluxograma, aderiram rigorosamente aos protocolos preconizados na literatura subsequente.

Figura 1 - Fluxograma metodológico do estudo. Fonte: Autora, 2025.

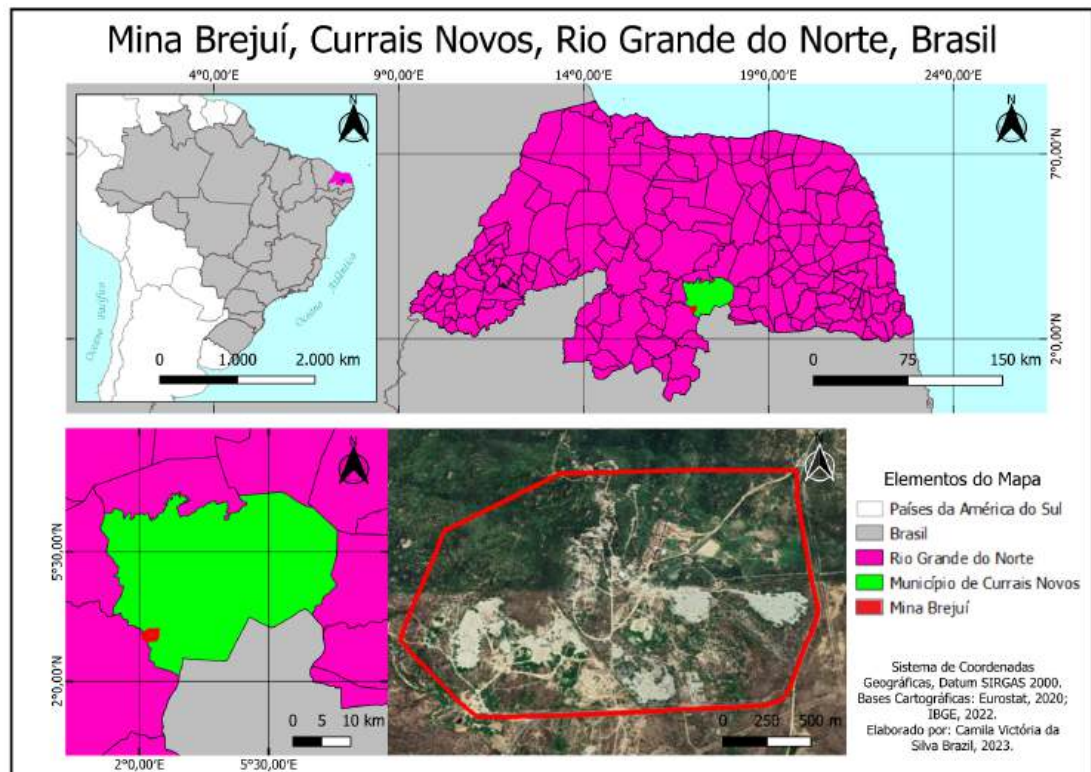


5.1. Caracterização da área de estudo e do pó de rocha da mineração de scheelita

O estudo foi conduzido no município de Currais Novos, Rio Grande do Norte, Brasil. O ponto de coleta é localizado na Mina Brejuí (6°19'19" Sul e 36°32'52" Oeste), inserido na região Centro-Sul do estado, na Mesorregião Central Potiguar e Microrregião do Seridó Oriental (Dutra *et al.*, 2019) (Figura 2).



Figura 2 - Área de estudo (Mina Brejuí), Rio Grande do Norte, Brasil. Fonte: Autora, 2025.

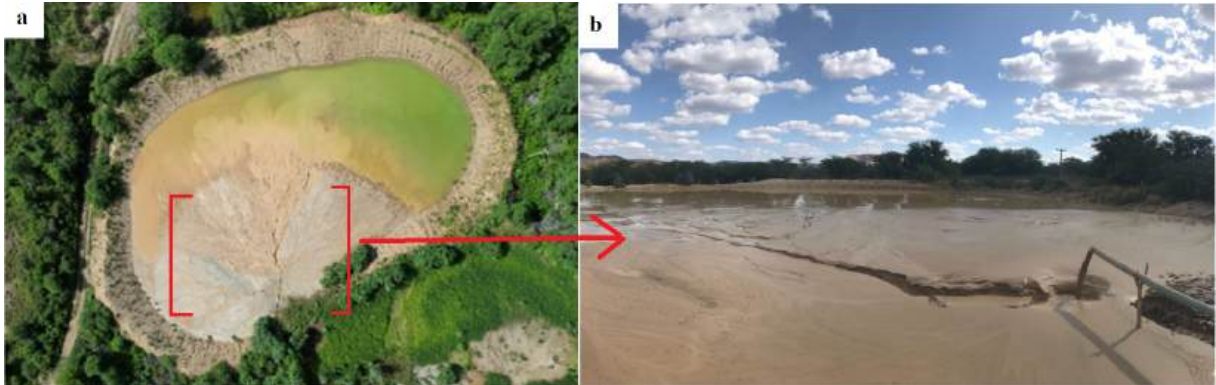


O local se enquadra na classificação climática do tipo BSh de Köppen, por possuir clima semiárido e média anual pluviométrica de 610 mm (Koppen, 1931). Ademais, é uma área coberta por vegetação caatinga hiperxerófila, hidrologia de baixo potencial, relevo com formações antigas e solos suscetíveis à erosão (Dutra *et al.*, 2019).

O depósito mineral da Mina Brejuí contém uma variedade de rochas em sua composição mineralógica, das quais destacam paragnaisses acinzentados constituídos principalmente por quartzo, feldspato e biotita, além de minerais como epidoto, microlina, muscovita, minerais opacos e tremolita/actinolita, entre outros. A mina é notável por suas grandes reservas de mármore e, principalmente, tungstênio, que são os principais minerais extraídos (Carvalho *et al.*, 2002; Fernandes *et al.*, 2009). Também foram observados dois aterros na região, abrangendo uma área de 121.500 m², com um volume de 1.943.200 m³ e um total de 3.110.400 toneladas, além de aproximadamente 1.500.000 toneladas de rejeitos de lama (Carvalho *et al.*, 2002; Fernandes *et al.*, 2009) (Figura 3).



Figura 3 - Área de descarte do rejeitos da mineração de scheelita localizado no semiárido tropical brasileiro, no estado do Rio Grande do Norte, município de Currais Novos. Fonte: Autora, 2025.



5.2. Coleta do material de estudo

Para descrição mineralógica modal, foram coletadas amostras das rochas encaixantes (gnaisse e mármore) e da rocha hospedeira regional (scheelita). Para realização dos demais métodos analíticos de caracterização do pó de rocha, foram coletadas seis amostras de rejeito de mineração de scheelita direto do duto de descartes georesiduais (Figura 3b), de modo a haver mínima interferência de fatores externos ao próprio beneficiamento da atividade de mineração da Mina Brejuí.

5.3. Métodos analíticos

5.3.1. Análise granulométrica dos pós de rocha

O pó de rocha coletado na Mina Brejuí foi seco em estufa a 65 °C, quartado e peneirado para a caracterização granulométrica em diferentes malhas: 2,0; 0,84; 0,30; 0,105 e 0,053 mm. Não houve frações maiores do que 2 mm. Essa configuração de peneiras foi escolhida com base na legislação vigente e pesquisas anteriores (Brasil, 2016; Silveira *et al.*, 2010; Ribeiro, 2018). A granulometria da fração inferior a 2 mm de pó de rocha foi determinada a partir de 200 g de amostras de material seco, com quatro repetições. Com base nas tolerâncias admitidas para os remineralizadores destinados à agricultura com relação à especificação de natureza física (Brasil, 2016), o pó de rocha foi classificado como filler, pó ou farelado.

5.3.2. Petrografia

A identificação da composição mineralógica modal das rochas encaixantes e da rocha



hospedeira foi realizada em lâminas (seções finas polidas), preparadas segundo o método proposto por Murphy (1986), usando o microscópio petrográfico (Olympus BX 51, câmera de captura Olympus U-TV0.5XC-3, modelo infinity 1; programa image-Pro Express).

5.3.3. Análise mineralógica por DRX

A identificação da composição mineralógica do pó de rocha foi realizada por difratometria de raios X (DRX). Foi utilizado um difratômetro Shimadzu 7000, operando com radiação Cu K α a 40 kV e 30 mA, com monocromador de grafite e velocidade de 1° min /2 θ . As amostras foram processadas na faixa de 5 a 70° (2 θ). Essas análises, por serem capazes de caracterizar estruturas cristalinas do solo (Paula *et al.*, 2021) são eficientes na confirmação da presença de minerais com capacidade para disponibilizar nutrientes, bem como percentuais de minerais inertes.

5.3.4. Análise da composição química total por Fluorescência de Raios-X (FRX)

Os elementos maiores Si, Al, Fe, Ca, K, Na, Mg, P, Ti e Zr, na forma de óxidos, foram determinados utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios-X (Rigaku modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores). Os resultados foram expressos em peso (%). O controle de qualidade das análises foi realizado com amostra certificada: SRM 2709 San Joaquin soil (Baseline trace element concentrations), certificado pelo National Institute of Standards and Technology (NIST, 2002). As taxas de recuperação dos metais variaram entre 80% e 100%.

5.3.5. Digestão química das amostras e determinação dos elementos potencialmente tóxicos nos pós de rocha por ICP-OES

As digestões das amostras dos rejeitos de mineração foram feitas utilizando a metodologia analítica proposta por Alvarez *et al.* (2001). Para a determinação das concentrações totais de elementos potencialmente tóxicos, foi pesado 0,5 g das amostras pulverizadas. Em seguida, as amostras foram digeridas em béqueres de teflon utilizando: 10 mL de HF, 10 mL de HNO₃, 5 mL de HClO₄ e 5 mL de HCl. Foi adicionado 10 ml de HF concentrado ao béquer de teflon com a amostra, homogeneizando a mistura. Esta foi coberta com uma placa de Petri de plástico e deixada em repouso durante a noite. Na manhã seguinte, foram incorporados 5 ml de HNO₃ concentrado e a solução foi novamente homogeneizada. A amostra foi então aquecida em uma chapa aquecedora a 250 °C,



mantendo-se até sua completa secagem, sem queimar.

Uma vez seca e após atingir a temperatura ambiente, foram adicionadas mais 5 ml de HNO_3 e 5 ml de HClO_4 . O béquer foi então coberto com um vidro de relógio e recolocado na chapa aquecedora a 250 °C, mantendo-se em refluxo até a total digestão das partículas ser observada. Uma vez alcançada a digestão total, a amostra foi removida da chapa aquecedora e destampada. O vidro de relógio foi lavado com água ultrapura (Sistema Direct-Q da Millipore) e o líquido recolhido no béquer. A amostra voltou à chapa aquecedora a 250 °C até que se observou a emissão de um "vapor denso", indicativo da liberação de gases. Ao reduzir a emissão dos gases e a amostra atingir uma textura viscosa (não se movendo mesmo ao inclinar o béquer e sem sinais de queima), o béquer foi removido da chapa e resfriado à temperatura ambiente. Quando foi identificado partículas não digeridas, a digestão foi repetida. O resíduo final no béquer foi dissolvido em uma mistura de 5 ml de HCl e 5 ml de água ultrapura, e a solução foi levemente aquecida na chapa aquecedora. Após o resfriamento, as soluções foram transferidas para balões volumétricos certificados (conforme NBR ISO/IEC) de 25 mL. Os extratos foram filtrados usando papel de filtro lento (Macherey Nagel®) e o volume em cada balão foi completado com água ultrapura (Sistema Direct-Q 3 da Millipore). As digestões foram realizadas em duplicata, e provas em branco foram feitas simultaneamente.

As concentrações de elementos potencialmente tóxicos (As, Cd, Hg e Pb) no pó de rocha foram determinadas por espectrometria de emissão óptica (ICP-OES/Optima 7000, Perkin Elmer) com modo de observação dupla (axial e radial) e detector de estado sólido, com sistema de introdução via amostrador automático AS 90 plus.

O controle de qualidade das análises foi realizado com amostra certificada de solo: SRM 2709 San Joaquin soil (Baseline trace element concentrations), certificado pelo National Institute of Standards and Technology (NIST, 2002). A curva de calibração foi elaborada a partir de padrões 1000 mg L⁻¹ (TITRISOL®, Merck), fazendo-se as diluições com água ultrapura.

5.3.6. Caracterização química dos rejeitos da mineração de scheelita

Foram realizadas as caracterizações químicas dos rejeitos de mineração de acordo com a metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017). As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com abertura de malha de 2 mm (Terra Fina Seca ao Ar - TFSA). O pH do rejeito foi determinado em água destilada (1:2,5 solo: solução). A



composição granulométrica (método do hidrômetro) foi determinada de acordo com Teixeira *et al.* (2017). O potássio e sódio trocáveis e fósforo disponível foram extraídos com os extratores Mehlich-1 (1:10 solo: solução) e Olsen (Olsen, 1982; Teixeira *et al.*, 2017). O cálcio, magnésio e alumínio foram extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ (razão 1:10 solo: solução) (Silva, 2009; Teixeira *et al.*, 2017). Esses elementos foram determinados por espectrofotometria de chama e espectrometria de emissão óptica (ICP-OES / Optima 7000, Perkin Elmer). A acidez potencial (H⁺ + Al³⁺) foi determinada pelo método do acetato de cálcio (0,5 mol L⁻¹, pH 7,0). De posse dos resultados obtidos do complexo sortivo, foram calculados os valores de soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions potencial (T) e efetiva (t), saturação por bases (V) e saturação por Al (m).

5.3.7. Análise estatística

Os resultados analíticos foram avaliados por meio de estatística descritiva (média, máximo, mínimo e desvio padrão), análise de variância e de regressão.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Análise granulométrica dos pós de rocha

A especificação da natureza física do pó de rocha estudado foi classificado como “pó” segundo os critérios discriminadores legislativos da Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016 (Brasil, 2016), já que o pó em questão obteve um percentual de 100 % de partículas passantes na peneira de abertura de malha de 2 mm; taxa de > 80 % de partículas passagens na peneira de abertura de malha de 0,84 mm e quase 70 % de partículas passantes na peneira de abertura de malha de 0,30 mm. Um destaque no pó de rocha em questão é a taxa de quase 12 % de partículas passantes em peneira de abertura de malha de 0,053 mm, demonstrando a potencialidade e eficácia desse pó como remineralizador de solos, pois materiais mais finos, com tamanhos de partícula menores que 0,002 mm (argila) e entre 0,002 mm e 0,05 mm (silte), são fundamentais na disponibilização de seus principais elementos no solo (Cola *et al.*, 2012). Esse fato relaciona-se à natureza da partícula que, quanto menor, maior será sua superfície de contato, facilitando processos de intemperismo e abrasão. Conseqüentemente, esses materiais têm a capacidade de se transformar mais rapidamente em argilominerais (Theodoro *et al.*, 2006).



6.2. Análises petrográficas das rochas formadoras (tactito, gnaïsse e mármore) do rejeito (pó de rocha)

A maior parte dos cristais na amostra de tactito consiste em epidoto com inclusões, incluindo grãos escuros de powellita (Figuras 4a e 4b). Esses cristais variam em tamanho, de finos a grossos, e não apresentam magnetismo. O epidoto aparece em tons de verde claro, verde amarelado e quase incolor. Os cristais de powellita são marrons escuros, ligeiramente opacos e têm uma superfície elevada, estando dispersos pela lâmina. Quando observados a olho nu (seja na amostra de mão, seja na própria secção delgada fora do microscópio), a powellita aparece como um mineral pulverulento de cor amarela. Há poucas inclusões de carbonatos (Figuras 4c e 4d), pequenos cristais isotrópicos de vesuvianita de cor marrom-alaranjada (Figuras 4e e 4f), e titanita (Figuras 4g e 4h). A Tabela 1 apresenta a composição mineralógica do tactito, com diversos macro e micronutrientes em sua composição que pode potencialmente ser liberados ao solo para absorção das culturas agrícolas.

Tabela 1 - Composição mineralógica (%) das principais rochas exploradas na mineração de scheelita, responsáveis por gerar os rejeitos. Fonte: SILVA, 2023b.

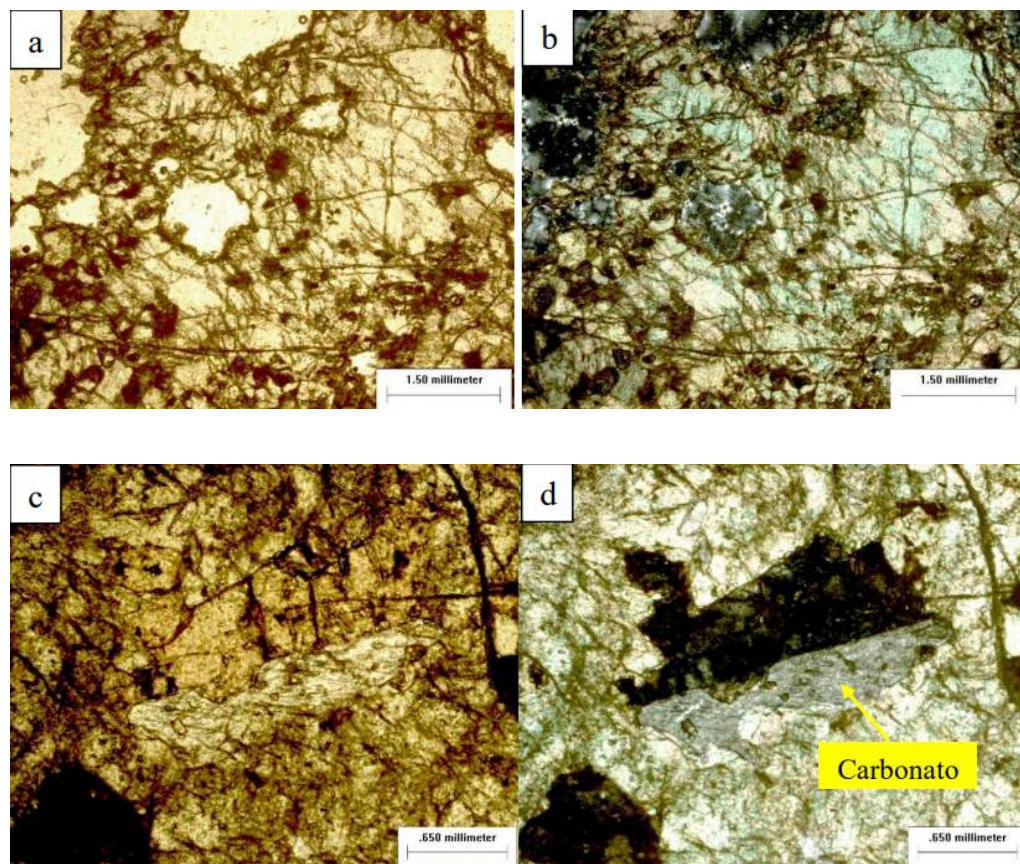
Mineral	Fórmula	Tactito	Mármore	Gnaïsse
Epidoto	$\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3(\text{SiO}_4)_3$	91	-	-
Vesuvianita	$\text{Ca}_{10}(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_4(\text{SiO}_4)_5(\text{Si}_2\text{O}_7)_5(\text{OH,F})_4$	4	-	-
Powerlita	CaMoO_4	3	-	-
Carbonato	CaCO_3	2	86	-
Tremolita-actinolita	$(\text{Ca,Na})_2(\text{Mg,Fe}^{2+},\text{Al})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	-	10	-
Minerais opacos	-	-	3	4
Titanita	CaTiSiO_5	<1	1	-
Quartzo	SiO_2	-	-	38
Feldspato (microclina)	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	-	-	35
Biotita	$\text{K}(\text{Mg,Fe}^{2+})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH,F})_2$	-	-	17

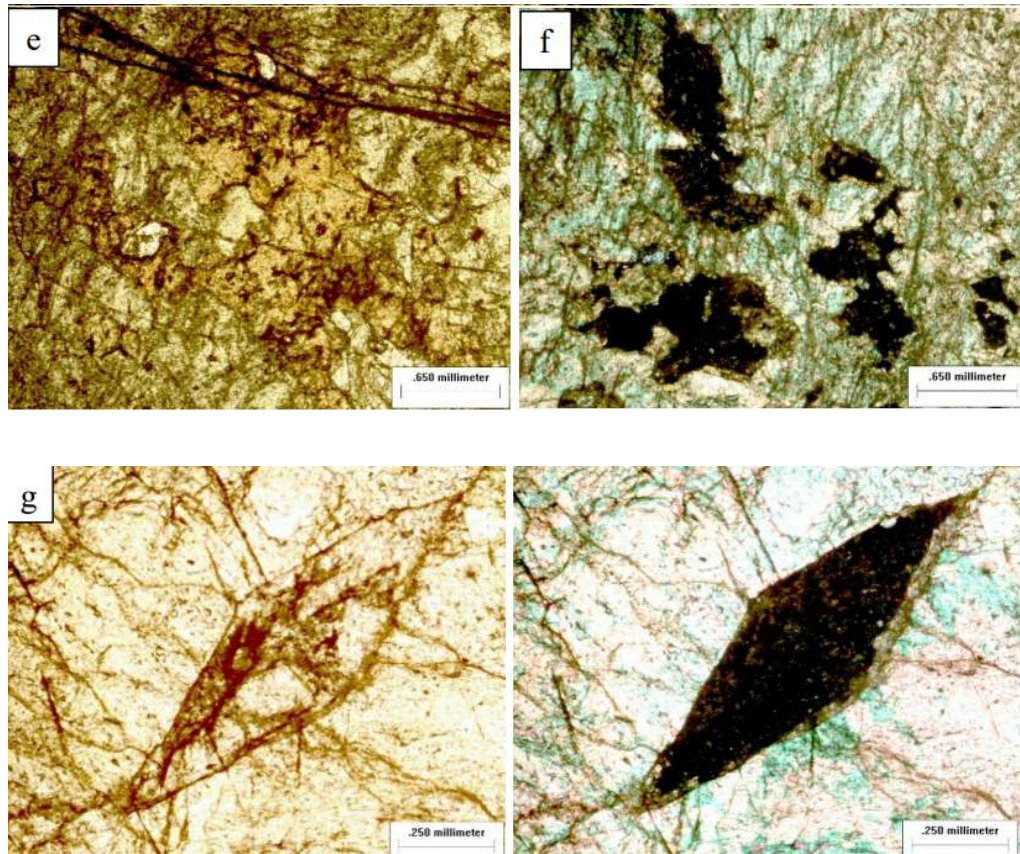


Plagioclásio	Na, Ca, Al(Si,Al)Si ₂ O ₈	-	-	5
Apatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃	-	-	1
Total	-	100	100	100

Quando a superfície da área da amostra de tactito utilizada para a confecção da lâmina foi iluminada pelo *mineralight* (luz violeta de ondas curtas), não se observou fluorescência. No entanto, ao utilizar o equipamento no restante da amostra de mão, foram encontrados pontos fluorescentes predominantemente em branco e amarelo, com algumas áreas exibindo fluorescência azul. Esses pontos são atribuídos à série CaWO₄, ou seja, sheelita (fluorescência branca e azul), que faz solução sólida com powellita (fluorescência amarela).

Figura 4 - Características petrográficas do tactito explorada na atividade de mineração de scheelita no semiárido brasileiro. (a) e (b) Epidoto com pequenas inclusões de powellita; (c) e (d) Carbonato; (e) e (f) Vesuvianita; (g) e (h) Titanita. Fonte: SILVA, 2023b.





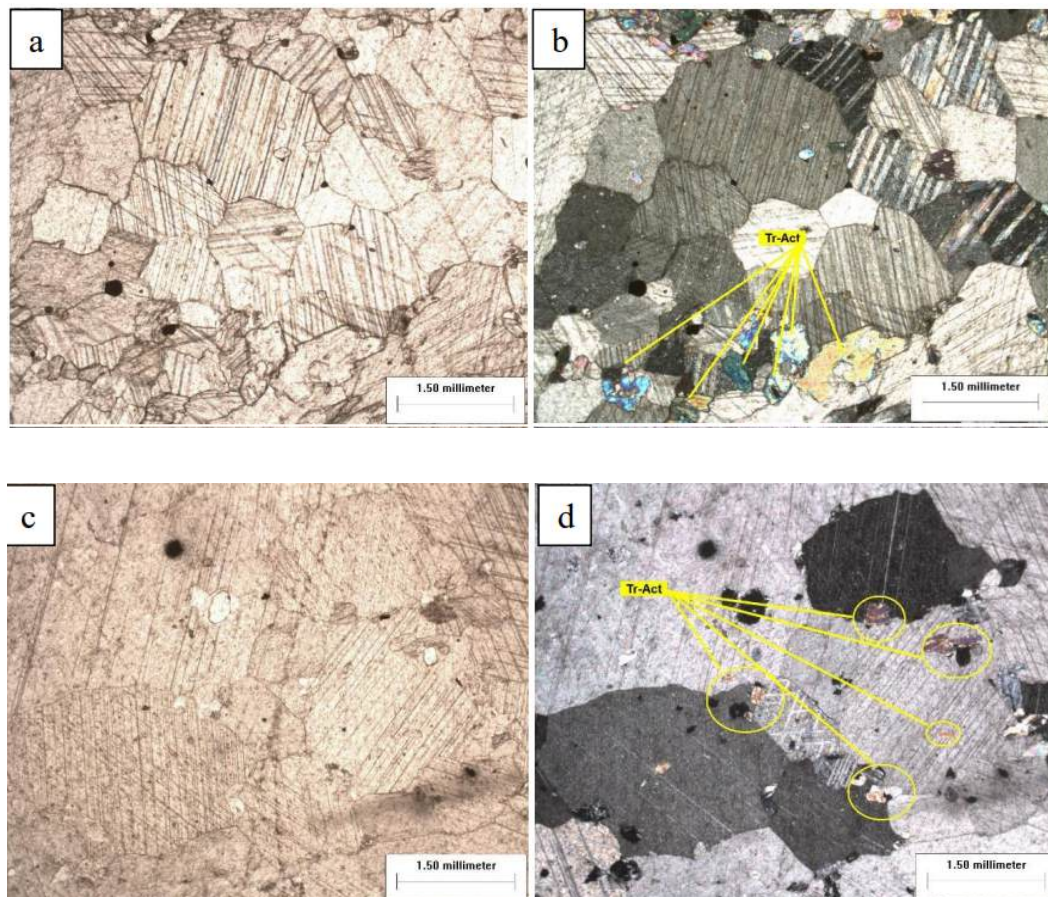
O mármore, um dos materiais formadores do rejeito, apresenta cor branca, com granulação média a grossa e aspecto homogêneo. A amostra não apresenta sinais de alteração, e quando submetida a HCl a 10 % a frio, sofre pronta efervescência, mas não apresenta magnetismo. A maioria dos cristais na amostra são carbonatos, principalmente calcita, entre os quais estão distribuídos os cristais de anfibólio (Figuras 5a, 5b, 5c e 5d), que tendem a se concentrar em agrupamentos alongados, apresentando distribuição heterogênea. Alguns dos cristais de anfibólio apresentam sinais de alteração, com aparência irregular e tendência à formação de fibras em algumas áreas, podendo apresentar textura radial (Figura 5e). O dobramento é fracamente marcado pelos próprios carbonatos deformados, de forma discreta.

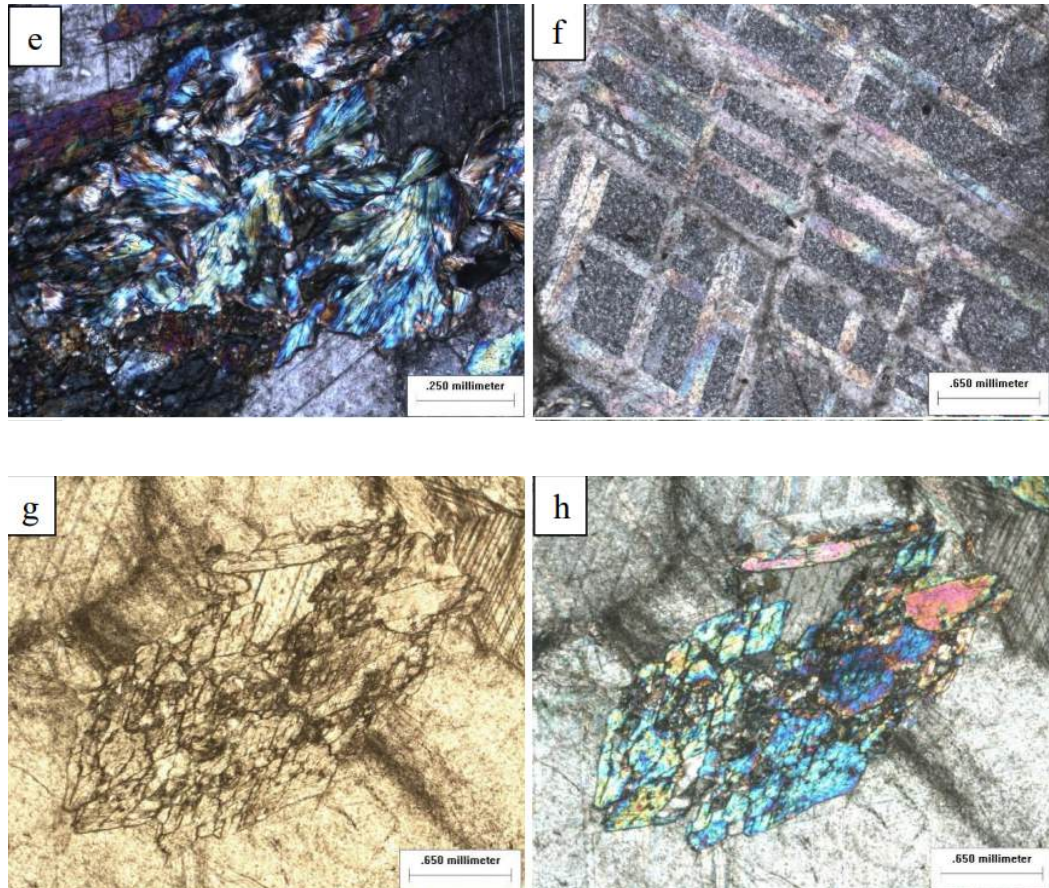
Parte dos carbonatos presentes é calcita (Figura 5f), porém não é possível identificar se é o único carbonato presente, pois a maioria dos cristais não apresenta forma clara e distinta, o que impossibilita a verificação se a geminação passa pela maior diagonal do cristal, uma forma comum de distinção de carbonatos. Nas Figuras 5g e 5h, é possível observar cristais de tremolita-actinolita dispostos em textura aproximadamente radial. A



elevada proporção do pó de mármore no rejeito da atividade de mineração de scheelita sugere que esse material possui alto potencial não apenas para ser usado como remineralizador, mas também para corrigir a acidez de solos.

Figura 5 - Características petrográficas do mármore. (a) e (b) Aspecto geral do mármore com textura poligonal, formada pelos minerais de calcita, tremolita-actinolita (Tr-Act) e poucos minerais opacos; (c) e (d) aspecto geral com destaque para os pequenos cristais de anfibólio (Tr-Act); (e) e (f) cristais de tremolita-actinolita dispostos em textura aproximadamente radial; (g) e (h) cristais euédricos de tremolita-actinolita. Fonte: SILVA, 2023b.

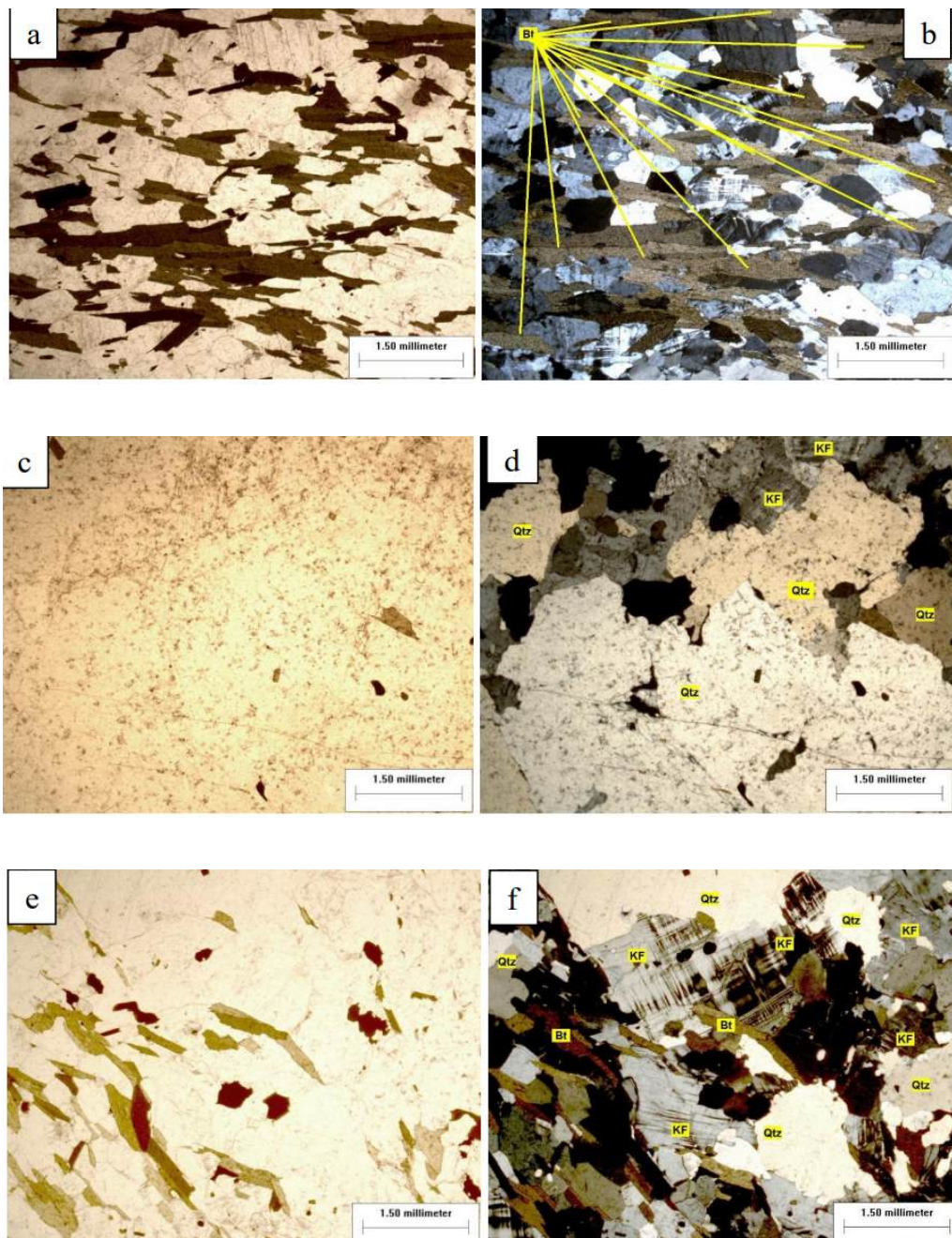


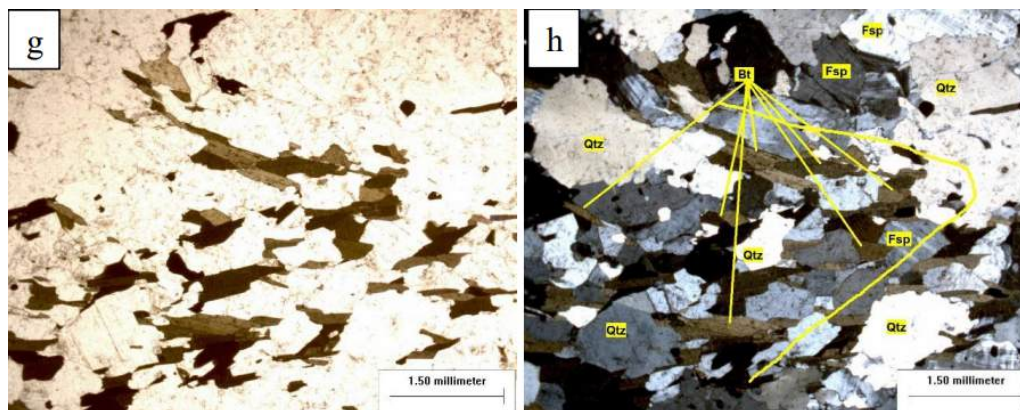


O gnaissé, outro material formador do rejeito que está sendo avaliado como remineralizador de solos para fins agrícolas, apresenta forte orientação, marcada pelo alinhamento de biotitas, formando folhas ou planos micáceos, e por grossos cristais de quartzo alongados, formando fitas de quartzo (Figuras 6a e 6b). Essas características indicam que a rocha originária tinha textura porfírica e que os cristais grossos agora estão recristalizados. Em alguns locais, o quartzo ocorre em granulação grossa (Figura 6c). Na parte superior da Figura 6d, é possível identificar alguns cristais de feldspato potássico com menor granulação. Os minerais máficos ocorrem entre os félsicos, sendo estes últimos predominantes. O gnaissé não apresenta magnetismo.



Figura 6 - Características petrográficas do gnaisse. (a) e (b) Aspecto geral do gnaisse com destaque para faixa enriquecida em biotita (bt); (c) e (d) aspecto geral do gnaisse com destaque em alguns locais onde o quartzo (Qtz) ocorre em granulação grossa. Na parte superior se observa alguns cristais de feldspato potássico (KF), em menor granulação; (e) e (f) aspecto geral do gnaisse com destaque para os cristais de microclina com típica geminação xadrez; (g) e (h) Dobramento no gnaisse, observado por meio da marcação feita por biotitas. Encontram-se presentes na imagem outros minerais formadores: quartzo (Qtz), feldspato (Fsp) e minerais opacos. Fonte: SILVA, 2023b.





O gnaiss é composto principalmente de quartzo, feldspato microclina e biotita. Na Figura 6f, é possível observar cristais de microclina com sua característica geminação xadrez. A amostra sofreu deformação, resultando no alinhamento e aglomeração da biotita em camadas que foram dobradas, embora não muito bem definidas. O dobramento é mais evidente por meio das marcas deixadas pela biotita (Figura 6h). Minerais opacos são identificáveis na Figura 6g (de cor preta). O gnaiss foi submetido a quebra e recristalização dinâmica, que não foi completamente concluída. Como resultado, ainda existem subgrãos que não foram totalmente individualizados e é possível observar extinção ondulatória. Assim como observado no tactito e mármore, o gnaiss possui diversos minerais fontes de macro e micronutrientes (Tabela 1), que podem potencialmente ser liberados ao solo para absorção das culturas agrícolas.

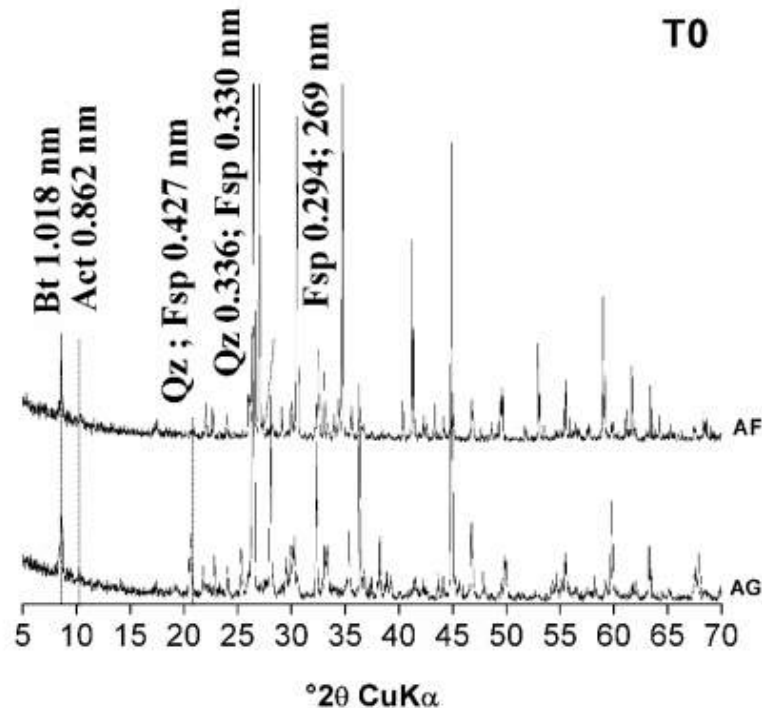
Ademais, a grande diversidade de minerais (biotita, plagioclásios, apatita, microclina, actinolita, epidoto, vesuvianita, powellita, minerais carbonáticos, titanita e minerais opacos) nos materiais formadores do rejeito (tactito, mármore e gnaiss) podem ser importantes fontes de liberação lenta de nutrientes, capazes de manter a fertilidade dos solos a longo prazo.

6.3. Análises mineralógicas do rejeito

Na Figura 7, é possível observar os difratogramas das frações areia grossa e fina provenientes do rejeito. Na amostra, foram identificados diversos minerais que são fontes de nutrientes para as plantas, a exemplo da biotita com pico em 1,018 nm, actinolita com pico em 0,862 nm e feldspato com picos em 0,427 nm, 0,294 nm e 0,269 nm, além do quartzo com picos em 0,427 nm e 0,336 nm.



Figura 7 - DRX da fração areia fina e grossa analisados na forma de pó não orientado no rejeito (pó de rocha) da mineração de scheelita. Fonte: SILVA, 2023b.

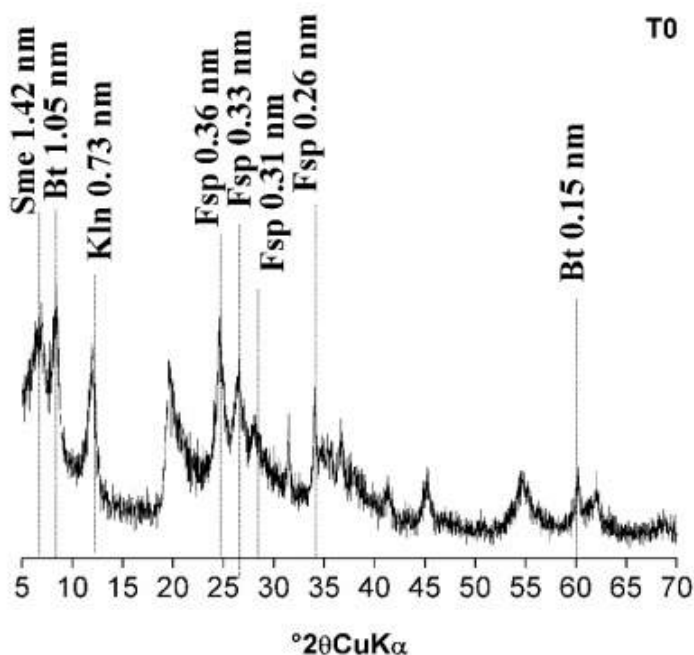


AF: areia fina; AG: areia grossa; Bt: biotita; Fsp: feldspatos; Qz: quartzo; Act: actinolita

Ao analisar a argila do rejeito (pó de rocha) da mineração de scheelita na forma de pó não orientado (Figura 8), foram identificados os seguintes minerais: esmectita com pico em 1,42 nm, biotita com picos em 1,05 nm e 0,15 nm, caulinita com pico em 0,73 nm, feldspato com picos em 0,36 nm, 0,33 nm, 0,31 nm e 0,26 nm, e novamente a biotita com pico em 0,15 nm. Não foi constatada goethita no rejeito. A biotita na argila indica que mesmo nessa fração fina há importantes minerais fontes de potássio às plantas.



Figura 8 - DRX da fração argila analisados na forma de pó não orientado no rejeito (pó de rocha) da mineração de scheelita. Fonte: SILVA, 2023b.



Sme: esmectita; Bt: biotita; Kln: caulinita; Fsp: feldspatos

Em geral, o rejeito (pó de rocha) da mineração de scheelita possuem elevada reserva natural de nutrientes nos minerais primários presentes nas frações areia (Figura 7) e argila (Figura 8), a exemplo da biotita, feldspatos e actinolita. Assim, esse pó de rocha apresenta potencial de fornecer nutrientes a médio prazo e superar as principais limitações nutricionais para a atividade agrícola. A apatita em um dos materiais formadores (gnaisse, Tabela 1) do rejeito pode vir a ser uma importante fonte de P para as plantas. Pós de rochas têm sido usados como remineralizadores de solos, como fertilizantes de liberação lenta de vários nutrientes, capazes de manter a fertilidade do solo a longo prazo (Van Straaten, 2006).

6.4. Análise da composição química total por Fluorescência de Raios-X (FRX)

O pó de rocha (rejeito) da mineração de scheelita apresentou a seguinte composição química total: MgO = 3,71 %; Al₂O₃ = 7,19 %; SiO₂ = 24,03 %; P₂O₅ = 0,56 %; SO₃ = 0,18 %; K₂O = 1,00 %; CaO = 37,28 %; TiO₂ = 0,43 %; Cr₂O₃ 0,03 %; MnO = 0,38 %; Fe₂O₃ = 5,29 %; CuO = 0,02 %; ZnO = 0,02 %; Rb₂O = 0,01 %; SrO = 0,10 %; ZrO₂ = 0,01 %;



$\text{MoO}_3 = 0,03 \%$; $\text{BaO} = 0,07 \%$; $\text{WO}_3 = 0,11 \%$; e $\text{Bi}_2\text{O}_3 = 0,01 \%$. Os elementos Co_2O_3 ; NiO ; Y_2O_3 e Nb_2O_5 apresentaram apenas traços na química total do pó de rocha em questão, enquanto V_2O_5 ; As_2O_3 ; Ga_2O_3 e ThO_2 não foram detectados.

Esses resultados nos mostram que o rejeito em questão se enquadra como remineralizador até então em dois dos três pré requisito estabelecidos pela Lei no 12.890, 10 de dezembro de 2013, já que são exigidos e apresentadas as seguintes características: a) mínimo de 9 % de soma de bases ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$) (Brasil, 2013), sendo apresentando quase quatro vezes (41,99 %) o valor mínimo; b) mínimo de 1 % de óxido de potássio (K_2O) e máximo de 25 % de SiO_2 livre (quartzo) presente no produto (Brasil, 2013), dos quais também foram contemplados pelo pó de rocha estudado, que apresentou 1 % de K_2O e 24 % de SiO_2 livre.

6.5. Análises dos macronutrientes e outro atributos químicos do rejeito

O pó de rocha derivado da mineração de scheelita demonstrou uma série de características químicas notáveis, que têm implicações significativas para sua utilização em aplicações agrícolas e ambientais principalmente em solos ácidos, arenosos e pobres em nutrientes. Isso se deve ao fato da composição química diversificada desse pó de rocha, com destaque para os elevados teores de CaO , MgO e K_2O , que representaram 42% do total, impactando em seu pH alcalinos em água e KCl (8,8 e 8,3 respectivamente), além de Ca^{2+} ($5,29 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e Mg^{2+} ($1,35 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) altamente disponíveis, apesar da concentração de K^+ ($0,05 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e Na^+ ($0,22 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) serem baixas (Tabela 2). A acidez potencial do pó de rocha foi de $1,32 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Tabela 2). Esses cátions são importantes para a melhoria das propriedades dos solos, atuando na formação de complexos organominerais, na disponibilidade de cátions, na neutralização da acidez e na atividade microbiana.

Além disso, a elevada saturação por bases (83,93%) desse pó de rocha, é um indicativo importante do seu elevado potencial como remineralizador. Essa característica ressalta sua viabilidade como corretivo e condicionador de solos brasileiros, que são predominantemente ácidos e pobres em nutrientes (Lani *et al.*, 2022). A alta saturação por bases no pó de rocha sugere que ele pode ser eficiente em neutralizar a acidez do solo e fornecer um ambiente mais propício para o crescimento das plantas, representando uma promissora opção para a agricultura e o manejo sustentável dos solos no Brasil.

Vale ressaltar que não foram detectadas concentrações disponíveis de Al^{3+} no pó de



rocha, reduzindo a preocupação com a saturação por alumínio (Tabela 2). Além disso, houve grande variação na disponibilidade de fósforo, com concentração média de 16,70 mg kg⁻¹ quando extraído pelo extrator Mehlich⁻¹ e apenas 0,44 mg kg⁻¹ pelo extrator Olsen (Tabela 2). Essa diferença na disponibilidade de P extraídos por diferentes extratores ocorreu porque o pó de rocha proveniente da mineração de scheelita possui natureza alcalina. Quando se utiliza um extrator ácido, como o Mehlich-1, em um remineralizador com pH alcalino, pode ocorrer superestimação dos resultados, pois ele extrai mais P do que a planta seria capaz de acessar. Assim, para remineralizadores de pH alcalino como esse, é recomendado o uso de um extrator alcalino, como o Olsen.

Estudos indicam que o pó de rocha é um material com potencial para atuar como remineralizador no cultivo de espécies florestais, especialmente devido ao seu uso prolongado em viveiros, onde as mudas podem permanecer de 5 a 12 meses (Silva, 2020; Aguiar *et al.*, 2021). Os atributos químicos dos rejeitos provenientes da mineração de scheelita (Tabela 2) indicam que esse pó de rocha pode ser eficaz em melhorar a fertilidade do solo e a produtividade das culturas a longo prazo, uma vantagem para as práticas de cultivo de mudas florestais. Os remineralizadores, dependendo de seu material de origem, são capazes de desempenhar um papel significativo na redução da acidez em diferentes tipos de solos, devido aos seus efeitos de neutralização, além de aumentar a fertilidade, fornecendo nutrientes (Souza *et al.*, 2023; Luchese *et al.*, 2024; Brasil, 2019).

Tabela 2 - Atributos químicos do rejeito proveniente da mineração de scheelita da Mina Brejuí. Fonte: Autora, 2025.

Identificação	pH (1:2,5)		Δ pH	Ca	Mg	Na	K	Al	H+Al	SB	t	T	V	m	P disp	P Olsen
	H ₂ O	KCl														
	cmol _c dm ³									cmol _c dm ³		(%)		mg kg ⁻¹		
Rejeito de mineração	8,8	8,3	-0,5	5,3	1,3	0,2	0,05	0,0	1,3	6,9	6,9	8,2	100	0	16,7	0,4

(H+AL) - Acidez potencial; (SB) - Soma de Bases; (t) - Capacidade de troca catiônica efetiva; (T) - Capacidade de troca catiônica total; (V) – Saturação por bases ; (m) - Saturação por alumínio.



6.6. Determinação de elementos potencialmente tóxicos segundo MAPA

O pó de rocha proveniente de rejeito de mineração de scheelita apresentou concentrações de $6,27 \text{ mg kg}^{-1}$ de Pb e $0,36 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd, valores dentro dos limites estabelecidos pela legislação brasileira para classificação de remineralizadores quanto aos elementos potencialmente tóxicos. Não foram detectados teores de Hg nas amostras analisadas, indicando níveis abaixo do limite de detecção e dentro das especificações estabelecidas pelo MAPA. Entretanto, foi observada concentração média de $70,31 \text{ mg kg}^{-1}$ de As, valor que ultrapassa quase quatro vezes os limites máximos permitidos pelo MAPA (15 mg kg^{-1}), inviabilizando a classificação do pó de rocha como remineralizador de solos. Essa concentração elevada pode representar riscos ambientais e à saúde humana.

Diante do potencial agronômico do pó de rocha identificado neste estudo, recomenda-se a continuidade das pesquisas, especialmente com o uso de plantas fitorremediadoras para a mitigação do teor de As, visando a viabilidade segura de sua utilização na agricultura

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O pó de rocha proveniente do rejeito de mineração de scheelita apresenta potencial agronômico relevante, destacando-se como uma fonte natural de nutrientes para a agricultura. O material estudado atende parcialmente aos critérios estabelecidos pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), cumprindo os requisitos físicos e alguns requisitos químicos, como a soma de bases ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$) e o teor de SiO_2 livre.

As análises petrográficas e mineralógicas (DRX) confirmaram minerais como biotita, plagioclásio, apatita, actinolita e feldspatos, que possuem elevado potencial para liberação gradual de nutrientes essenciais, como cálcio, magnésio e potássio. Além disso, a fração granulométrica fina do material favorece os processos de intemperismo e solubilização, aumentando a disponibilidade de nutrientes a médio e longo prazo.

No entanto, o nível de arsênio (As) detectado no pó de rocha ultrapassa os limites máximos permitidos pela legislação vigente, o que inviabiliza sua classificação imediata como remineralizador de solos. Esse resultado ressalta a necessidade de estratégias complementares, como o uso de plantas fitorremediadoras, para reduzir os teores desses



elementos tóxicos e viabilizar a utilização segura e sustentável do rejeito na agricultura.

Diante das demais características favoráveis do pó de rocha, recomenda-se a continuidade das pesquisas, com foco na mitigação de elementos potencialmente tóxicos e na avaliação de sua eficiência agrônômica em diferentes condições edafoclimáticas. Assim, o aproveitamento desse material pode representar uma solução ambientalmente adequada para o descarte dos rejeitos de mineração e uma alternativa viável para o fornecimento de insumos agrícolas, contribuindo para a agricultura sustentável e a segurança alimentar.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, N. S.; MASTELLA, A. D. F.; GABIRA, M. M.; WALTER, L. S.; FELIX, F. C.; MATOS, D. C. P. de; WENDLING, I.; ANGELO, A. C.; GASPAR, R. G. B. Pó de rocha como remineralizador de solo no crescimento inicial de *Monteverdia ilicifolia*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 41, e2142, 2021.

ALOVISI, A. M. T; TAQUES, M. M.; ALOVISI, A. A.; TOKURA, L. K.; SILVA, J. A. M.; CASSOL, C, J. ROCHAGEM COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA A FERTILIZAÇÃO DE SOLOS. v. 9: Edição Especial II - **Simpósio Mundial de Sustentabilidade**, 2020.

ALVAREZ, J. R. E.; MONTERO, A. A.; JIMÉNEZ, N. H.; MUÑIZ, U. O.; PADILLA, A. R.; MOLINA, R. J.; VERA, S. Q. de. Nuclear and related analytical methods applied to the determination Cr, Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in a red ferralitic soil and Sorghum samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 247, n. 3, p. 479-486, 2001.

ANDERLONI, N. V. ESTUDO DO USO DE REMINERALIZADOR BASÁLTICO NA DINÂMICA DE LIXIVIAÇÃO DE SOLO CULTIVADO. FRANCISCO BELTRÃO, 2021.

ARTAXO, P. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. **ESTUDOS AVANÇADOS** 34 (100), 2020.

ANDA. ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Estatísticas**. Disponível em:<<http://anda.org.br>>. Acesso em: março de 2023.

BARRETO, S. B. A farinha de rochas MB-4 e o solo – 1998. Disponível em: <http://www.campestreterramistica.com.br/arq/Livro_farinha.pdf>. Acessado em 7 de set. 2023.



BENATTI, J. H.; RODRIGUES, L. Privately-owned forests and deforestation reduction: an overview of policy and legal issues. *Tropical Deforestation and Climate Change*, p. 111, 2005.

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

BRASIL. Lei n. 12.890, 10 dez 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**, Brasília, DF, 10 dez 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 05 de 10 de março de 2016. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 mar. 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Protocolo para avaliação da eficiência agrônômica de remineralizadores. Brasília: MAPA, 2019.

BRITO, R. S.; BATISTA, J. F.; MOREIRA, J. G. V.; MORAES, K. N. O.; SILVA, S. O. Rochagem na agricultura: importância e vantagens para adubação suplementar. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, v. 6, n. 1, p. 528-540, 2019.

CAMARA, G. R.; FAITANIN, B. X.; SILVEIRA, L. L. L.; CHIODI FILHO, C.; SANTOS, E. S.. Utilização de rochas ornamentais ricas em minerais potássicos como fonte alternativa de insumo agrícola via rochagem – Parte I. Rio de Janeiro : CETEM/MCTI, 2021. **Série Rochas e Minerais Industriais**, 30. 71p.

CARVALHO, E. B.; LIMA, R. F. S.; PETTA, R. A.; DE SOUZA, L.C. Caracterização de rejeitos provenientes da usina de beneficiamento do minério da mina Brejuí/RN. XIX ENTMME: **Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, v.1, p.75, 2002.

CARVALHO, O.; OLIVEIRA, L. S.; CRUZ, G. ENVIRONMENTAL IMPACTS GENERATED BY MODERNIZATION IN THE WORLD AGRICULTURAL SYSTEM. **Revista SODEBRAS** – Volume 04 N° 160 - 1705 - 2019/3-05.

COLA, G. P. A.; SIMÃO, J. B. P. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, ISSN-e 1981-8203, Vol. 7, N° 4, 2012.

COSTA FILHO, F. C. Estudo de viabilidade técnica do uso de resíduos oriundos do



beneficiamento de scheelita na composição de concretos asfálticos. 2017. 172f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)** - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

COSTA, J. H. B. Panorama dos estudos de aproveitamento de rejeitos de mineração do Estado do Pará de 2010 a 2020. 2022. 55 p. **Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Minas)** - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2022.

DANA, J. D. **Manual de mineralogia**. Livros técnicos e científicos editora, v. 2, p. 421-422, 1974.

DANTAS, M. V. B.; NOGUEIRA, E. S.; VILELA, G. F.; PAIM, F. A. P. POTENCIAL DE USO DE REMINERALIZADORES DE SOLO NO ESTADO DE SÃO PAULO. 16º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – CIIC 2022 30 e 31 de agosto de 2022 ISBN: 978-65-88414-07-1

DUTRA, A. S. F.; NAVONI, J. A.; AMARAL, V. S. Percepção do risco ambiental de uma população exposta à atividade de mineração no semiárido nordestino. **Educação Ambiental em Ação**, n. 67, 2019.

FERNANDES, B.B., MACHADO, A.O., LEITE, J.Y. Lixiviação de scheelita – uma revisão do estado da arte. IV CONNEPI - **Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica**, Belém - PA, 2009.

FRAGA, I. G.; MELLO, J. A. P.; ALEXANDRE, K. C. B. Caracterização química de rochas para serem utilizadas como rochagem ou mineralização do solo. **X Jornada do Programa de Capacitação Institucional – PCI/CETEM – 2021**.

GARCIA JÚNIOR, O. Isolation and characterization of Thiobacillus thiooxidans and Thiobacillus ferrooxidans from mineral mines. **Rev. Bras. Microbiol.** 20, p. 1-6. 1991.

GERAB, A. T. F. de S. C. Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)** - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, p. 123, 2014.

GOMES, A. C. F. ESTUDO DE APROVEITAMENTO DE REJEITO DE MINERAÇÃO. 98 p. **Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas)** - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2017.

GODEIRO, M. L. S.; BORGES Jr., J. P. B.; FERNANDES, B. R. B.; LEITE, J. Y. P. Caracterização de pré-concentrado do rejeito de scheelita da mina brejuí em concentrador



centrífugo. **HOLOS**, Ano 26, v. 5, 2010.

HARLEY, A. D.; GILKES, R. J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. v.56, p. 11-36. 2000.

HILÁRIO, E. F. DINÂMICA DE LIXIVIAÇÃO DE MACRO E MICRONUTRIENTES EM SOLO REMINERALIZADO COM BASALTO. FRANCISCO BELTRÃO - PR 2022

HUISMAN, J., CODD, G. A., PAERL, H. W., IBELINGS, B. W., VERSPAGEN, J. M. H., VISSER, P. M. Cyanobacterial blooms. **Nat. Rev. Microbiol.** 16, 471–483, 2018.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações sobre a economia mineral brasileira**, p.14, 2015.

KELLAND, M. E., WADE, P. W., LEWIS, A. L., TAYLOR, L. L., SARKAR, B., ANDREWS, M. G., LOMAS, M. R., COTTON, T. E. A., KEMP, S. J., JAMES, R. H., PEARCE, C. R., HARTLEY, S. E., HODSON, M. E., LEAKE, J. R., BANWART, S. A., BEERLING, D. J. Increased yield and CO₂ sequestration potential with the C₄ cereal *Sorghum bicolor* cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil. **Glob. Chang. Biol.** 26 (6), 3658–3676, 2020.

KOPPEN, W. P. Grundriss der Klimakunde. Berlin: **Walter de Gruyter**, p. 388, 1931.

LANI, J. L.; GOMES, M. A.; RODRIGUES, K. R.; AMARAL, E. F. PLANEJAMENTO DO USO DA TERRA NO PLANTIO DA TOONA. **Revista Ensino, Educação & Ciências Exatas**, v. 01, p. 27-43, 2022.

LIMA, R. C. A.; SOUSA, J. L.; MEDEIROS, M. F. Recuperação de áreas degradadas pela mineração de scheelita em Currais Novos, Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Mineração*, v. 2, n. 1, p. 45-52, 2002.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. FERTILIDADE DO SOLO E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA. SBCS, Viçosa, 2007. Fertilidade do Solo, 1017 p.

LUCHESE, A. V.; MISSIO, R. F.; ALGERI, S.; GIARETTA, L.; LUDWIG, F.; POTRICH, D. C. Disponibilidade e absorção de nutrientes liberados por remineralizador em duas classes de solo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 17, n. 4, 2024.

MIRANDA, E. A luz vem do oriente. *Raízes*, 7: 22-29, 1982.

MARTINS, É. D. S.; OLIVEIRA, C. G. D.; RESENDE, Á. V. D.; MATOS, M. S. F. D. Agrominerais-rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. 17 p.



MME. **Ministério de Minas e Energia. Boletim Informativo do Setor Mineral.** 2018. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/36108/406012/Boletim+Informativo+do+Setor+Mineral+2018+-+English+Version.pdf / 67707fd3-fd82-9e87-c9ca-86fadff93be0](http://www.mme.gov.br/documents/36108/406012/Boletim+Informativo+do+Setor+Mineral+2018+-+English+Version.pdf/67707fd3-fd82-9e87-c9ca-86fadff93be0)>. Acesso em: 14 de jul de 2023.

MINÉRIOS & MINERALES. Dedicated to Cost Reduction, Productivity, Industrial Maintenance at the Mine and Plant. **Rev. Minérios & Minerale**s, n. 365, 2014.

MURPHY, C. P. 1986. Thin Section Preparation of Soils and Sediments. **Academic Publishing**, Berkhamsterd, p. 145.

NIST. National Institute of Standards and Technology. 2002. **Standard Reference Materials** -SRM 2709, 2710 and 2711.

OLIVEIRA, M. P; MALAGOLLI G. A.; CELLA, D. FERTILIZERS MARKET: dependence of imports from Brazil. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 1, 2019.

OLIVEIRA, V. S. USO DE TÉCNICAS SUSTENTÁVEIS PARA REMINERALIZAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 2021.

OLIVEIRA; W. S.; BINO, J. L. V. C. RESULTADOS ANALÍTICOS DO MONITORAMENTO DAS ÁREAS DE DEMONSTRAÇÃO DE USO DE PÓ DE ROCHA EM SOLOS MANEJADOS POR AGRICULTORES FAMILIARES EM MEDICILÂNDIA, PARÁ. Castanhal, Pará, 2023.

OLSEN, S. R.; SOMMERS, L. E. Phosphorus. In: Page, A. L. (ed.) Methods of soil analysis, chemical and microbiological properties. Madison: Soil Science Society of America, p. 403- 430, 1982.

PAJOLLA, M. Agronegócio foi responsável por 97% do desmatamento no Brasil em 2021. Brasil de Fato, 2022.

PAULA; R. T.; ROCHA, G. C. Caracterização Física e Mineralógica de Materiais Intempéricos na Área Urbana de Juiz de Fora – MG, através de Análise Macroscópica, Difrátômetro de Raios-X (DRX) e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). **Revista Brasileira de Geografia Física** v.14, n.03 (2021) 1787-1804.

PEREZ, D. V.; BREFIN, M. L. M.; POLIDORO, J. C. Solo, da origem da vida ao alicerce das civilizações: uso, manejo e gestão. *Pesq. agropec. bras.* 51 (9). Set 2016.

RAMOS FILHO, R. E. B. Estudo da combinação de resíduo de scheelita, pó de pedra



e manipueira com aglomerantes para produção de tijolos ecológicos. **Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais)**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Natal / RN, 2021.

RIBEIRO, G. M. Caracterização de pós de rochas silicáticas, avaliação da solubilidade em ácidos orgânicos e potencial de liberação de nutrientes como remineralizadores de solos agrícolas. Tese de Livre Docência. Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina, 2018.

SANTOS, R. A. PÓ DE ROCHA DE NEFELINA - SIENITO COMO FONTE POTÁSSICA: EFEITOS NA SOJA E NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, 2022.

SCOLARI, D. D. G. **Produção agrícola mundial: o potencial do Brasil**. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/160161/1/Producao-agricola-mundial.pdf>. Acesso em: 29 de jul. de 2023.

SILVA, A. B. Uso de pó de basalto como fertilizante no desenvolvimento inicial de *Pinus taeda*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

SILVA FILHO, G. N.; VIDOR, C. Atividade de microrganismos solubilizadores de fosfatos na presença de nitrogênio, ferro, cálcio e potássio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 12, 1495-1508 p. 2001.

SILVA, L. C. S.; MARINHO, D. Y.; SILVA FILHO, C. M.; SILVA, E. C. S.; ESPINOSA, J. W. M. Gestão de resíduos industriais: um estudo do aproveitamento de rejeitos na mineração. In: **SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE**, 9., 2017, São Cristóvão. Anais eletrônicos. São Cristóvão: DEPRO/UFS, 2017, p. 260-274.

SILVA, N. S. Dinâmicas populacionais de espécies que interagem e se dispersam: um estudo de caso em reflorestamento amazônico. Dissertação apresentada ao Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica da Universidade Estadual de Campinas, sp, 2023a.

SILVA, R. J. A. B. PEDOGÊNESE INICIAL DE TECNOSSOLOS ORIGINADOS DE REJEITOS DA MINERAÇÃO DE SCHEELITA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. [Dissertação]. Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de



Pernambuco, 2023b.

SILVEIRA, C. A. P., FERREIRA, L. H. G., PILLON, C. N. GIACOMINI, S. J. E SANTOS, L. C. 2010. Efeito da combinação de calcário de xisto e calcário dolomítico sobre a produtividade de grãos de dois sistemas de rotação de culturas. **Anais do I Congresso Brasileiro de Rochagem**. Brasília. Embrapa. Brasília/ DF. pp. 215 – 219.

SOUZA, F. N. S.; OLIVEIRA, C. G.; MARTINS, E. S.; ALVES, J. M. Efeitos condicionador e nutricional de um remineralizador de solo obtido de resíduos de mineração. *Agri-Environmental Sciences*, v. 3, n. 1, p. 1-14, 2017.

SOUZA, F. N. S.; AGUIAR NETO, C. A. M.; ALVES, J. M. Avaliação da solubilidade de um remineralizador e seus efeitos sobre a fertilidade do solo. **Revista Agri-Environmental Sciences**, Palmas-TO, v. 9, Ed. Especial, e023021, 2023.

SOUZA, G. V. L. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DO PÓ DE ROCHA BASÁLTICA COMO REMINERALIZADOR DE SOLOS. Jaboticabal, 2022.

STADLER, T. D. Plínio, o velho: nos caminhos da história natural [recurso eletrônico]. Campo Mourão: **FECILCAM**, 2021. ISBN: 978-65-88090-06-0

STAMFORD, N.P.; LIMA, R.A.; LIRA, M.A. & SANTOS, C.E.R.S. Effectiveness of phosphate and potash rocks with *Acidithiobacillus* on sugarcane yield and their effects in soil chemical attributes. **World J. Microbiol. Biotechnol.** p. 2061-2066. 2008.

SWOBODA, P., DÖRING, T. F., HAMER, M. Remineralizing soils: The agricultural usage of silicate rock powders: A review. **Science of the Total Environment** 807, 2022.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMAM, G.K.; TEIXEIRA, W.G. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília, DF: **Embrapa**, 2017. 573 p.

THEODORO, S. M. C. H.; LEONARDOS, O. H.; ROCHA, E. L.; REGO, K. G. Experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes. *Espaço e Geografia (UnB)*, v. 9, n.2, p. 263-292, 2006.

VAN STRAATEN, P. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **An. Acad. Bras. Ciênc.**, v. 78 (4), p. 731–747, 2006.

VEGRO, C. L. R.; ANGELO, J. A. Diversificação nas Origens de Fertilizantes Importados Suplanta a Escassez Causada pelo Conflito Russo-Ucraniano. *Análises e Indicadores do Agronegócio*, São Paulo, v. 18, n. 4, p. 1-8, mar. 2023.

VENDRAMINI, T. C. PRODUZIR: O RECADO ESSENCIAL. **AgroANALYSIS**, 2022, p 47.

