

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
Programa de pós-graduação em geologia,
Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, CPMTC-IGC.

Elaine Kelly Ferreira

POTENCIAL AGROGEOLOGÍCO DOS XISTOS DO SUPERGRUPO
RIO DAS VELHAS, ITABIRA, MINAS GERAIS, BRASIL

Belo Horizonte

2025

Elaine Kelly Ferreira

**POTENCIAL AGROGEOLÓGICO DOS XISTOS DO SUPERGRUPO
RIO DAS VELHAS, ITABIRA, MINAS GERAIS, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientadora: Prof^a Dra. Flávia Cristina Silveira Braga.

Coorientador: Dr. Éder de Souza Martins.

Belo Horizonte

2025

F383p
2025

Ferreira, Elaine Kelly.

Potencial agrogeológico dos xistos do Supergrupo Rio das Velhas, Itabira, Minas Gerais, Brasil [manuscrito] / Elaine Kelly Ferreira. – 2025.

73 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientadora: Flávia Cristina Silveira Braga.

Co-orientador: Éder de Souza Martins.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2025.

Bibliografia: f. 58-63.

Inclui apêndices.

1. Calagem dos solos – Teses. 2. Matérias-primas – Teses. 3. Rochas silicosas – Teses. 4. Intemperismo – Teses. 5. Ecologia agrícola – Minas Gerais – Teses. 6. Xistos – Teses. I. Silveira-Braga, Flávia Cristina. II. Martins, Éder de Souza. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 631.8:552.1(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC/UFMG



FOLHA DE APROVAÇÃO

**Potencial Agrogeológico dos Xistos do Supergrupo Rio das Velhas,
Itabira, Minas Gerais, Brasil**

ELAINE KELLY FERREIRA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA (PPGeol), do Instituto de Geociências (IGC), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), como **REQUISITO PARCIAL** para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia do IGC/UFMG.

Aprovada em 14 de agosto de 2025, pela banca constituída pelos membros:

Documento assinado digitalmente
gov.br FLÁVIA CRISTINA SILVEIRA BRAGA
Data: 14/08/2025 18:30:06-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Flávia Cristina Silveira Braga – Orientador(a)
PPGeol/UFMG

Documento assinado digitalmente
gov.br DÉBORA SILVANO MOREIRA
Data: 01/09/2025 18:52:58-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Débora Silvano Moreira
PPGeol/UFMG

Documento assinado digitalmente
gov.br SUZI MARIA DE CORDOVA HUFF THEODORO
Data: 25/09/2025 12:52:10-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Suzi Maria de Cordova Huff Theodoro
UnB

Belo Horizonte, 14 de agosto de 2025.

Dedico este trabalho às minhas filhas, Yasmin Ferreira Trindade de Sousa e Maria Ágata Ferreira Trindade, que são minha maior inspiração e motivação. É por elas que sigo firme na luta pela conservação dos nossos recursos naturais, energéticos e pela proteção do nosso planeta. Que este caminho que trilho seja também um legado de cuidado, consciência e esperança para o futuro de vocês e de todos que virão.

AGRADECIMENTOS

Ao longo da minha trajetória, tive o privilégio de encontrar pessoas e apoio institucional que acreditaram no meu potencial e me impulsionaram a seguir em frente. Este espaço é dedicado a expressar minha sincera gratidão a cada uma delas.

Agradeço à **Pró-reitoria de Pós-graduação (PRPg) da UFMG** e ao **Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências (IGC) da UFMG** pelo apoio institucional, pelas oportunidades de formação acadêmica e pelas condições oferecidas para o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha orientadora, **Profª Drª Flávia Braga**, que, com generosidade e prontidão, aceitou o desafio de orientar um estudo em um tema tão inovador. Sua orientação atenta, paciência e constante disposição foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

Ao meu coorientador, **Dr. Éder Martins**, pela dedicação e entusiasmo com o tema, sempre disposto a compartilhar conhecimento e a colaborar de forma incansável. Estendo meus agradecimentos à equipe da **Embrapa Cerrados, Giuliano Marchi, Ewerton Abrantes e Paula Caroline**, pelo apoio técnico e científico inestimável ao longo da pesquisa.

À **VALE**, pelo fornecimento dos dados da área de estudo e pelo acesso à amostragem, essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

À **Circlua**, pelo incentivo à pesquisa, pela infraestrutura disponibilizada e por todo o suporte técnico ao longo desta jornada.

Ao amigo **Dr. Diniz Ribeiro**, por acreditar neste sonho e, com generosidade e sensibilidade, transformar ideias e intuições em caminhos concretos.

Às amigas **Janaina Braga e Janaina Rodrigues**, por nunca duvidarem do meu potencial e por me incentivarem, com carinho e confiança, a seguir sempre adiante.

À minha família, em especial às minhas filhas, **Yasmin Ferreira Trindade de Sousa e Maria Ágata Ferreira Trindade**, pelo amor que me sustenta e pela inspiração que me move na busca por um futuro melhor. E ao meu esposo, pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Ao **William**, do PPG/UFMG, pela dedicação ao colegiado e disponibilidade constante para resolver com gentileza qualquer questão relativa ao programa de pós-graduação.

Ao **Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa (CPMTC)** e a toda sua equipe de funcionários, pelo suporte técnico e pela infraestrutura imprescindível para a realização deste estudo.

A todos vocês, minha eterna gratidão!

RESUMO

No Quadrilátero Ferrífero, algumas rochas atualmente classificadas como estéreis nas operações de mineração de ferro apresentam potencial para uso como condicionadores ou remineralizadores de solo (REM). Entre elas, destacam-se os xistos do Supergrupo Rio das Velhas, Grupo Nova Lima. Este estudo avaliou o potencial agrogeológico desses xistos como REM e insumo para captura de CO₂ em solos agrícolas. A análise química de uma amostra composta, constituída por três amostras de xistos coletadas na região de Itabira revelou uma soma das bases de 16,36%, SiO₂ de 44,85%, MgO de 7,56%, K₂O inferior a 1% e um potencial teórico de sequestro de 150 kg CO₂ por tonelada aplicada ao solo. A paragênese principal dessas amostras é composta por clorita (~21%), actinolita (~26%), calcita e dolomita (~15%) e quartzo (~18%), plagioclásio (~14%) e anita (~6%). Excetuando o teor de K₂O, que é abaixo de 1%, todos os outros critérios atendem o estabelecido pela Instrução Normativa nº 05/2016 para a classificação como remineralizador. Os teores de CaO e MgO juntos à mineralogia observada, sugerem um elevado potencial para captura de CO₂ pelo processo de intemperismo acelerado. As amostras foram homogeneizadas e moídas até atingirem granulometria inferior a 0,3 mm, com 84% da massa apresentando partículas menores que 0,075 mm. Diferentes doses de pó de rocha foram testadas em quatro tipos de solos, dois argilosos e dois arenosos, para verificar o incremento do pH da mistura solo-rocha em função da dose do material. As doses aplicadas aos solos arenosos foram de 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150 mg do material por 10 g de solo, correspondendo a doses agronômicas de 0, 2,5, 5, 7,5, 10, 12,5 e 15 t ha⁻¹, considerando a profundidade de 0 a 10cm. Nos solos argilosos, as doses foram de 0, 25, 50, 100, 150, 200, 250 e 300 mg por 10 g de solo, equivalentes a 0, 2,5, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 t ha⁻¹ (0 a 10 cm). Os resultados indicaram que com doses entre 50 e 150 mg 10 g⁻¹ de solo, foi possível estabilizar o pH entre 5,5 e 6,5 após 24 e 72 horas de incubação, evidenciando a eficácia dos xistos como corretivos de acidez do solo. Os resultados equivalem às doses agronômicas de 5 e 15 t ha⁻¹, respectivamente, considerando a incorporação na camada de 0-10 cm de solo. O experimento de 90 dias de incubação mostrou que a aplicação de xisto melhorou significativamente as propriedades químicas do solo, aumentando os níveis de cálcio e magnésio, além de corrigir a sua acidez. Portanto, apesar da concentração de K₂O ser inferior a 1%, o material apresenta potencial como condicionador de solo ou matéria-prima para produção de REM através da mistura com outros materiais.

Palavras-chave: calagem; insumo regional; agrominerais silicáticos; intemperismo aprimorado; coprodutos.

ABSTRACT

In the Quadrilátero Ferrífero region, Brazil, certain rocks currently classified as waste in iron mining operations show potential for use as soil conditioners or rock dust remineralizers (REM). Among them, schists from the Rio das Velhas Supergroup, Nova Lima Group, are noteworthy. This study evaluated the agrogeological potential of these schists as soil remineralizers and as inputs for CO₂ capture. Chemical analysis of a composite sample, comprising three schist samples collected in the Itabira region, revealed a base saturation sum of 16.36%, SiO₂ content of 44.85%, MgO of 7.56%, K₂O below 1%, and a theoretical CO₂ sequestration potential of 150 kg CO₂ per ton of material applied to soil. The main paragenesis includes chlorite (~21%), actinolite (~26%), calcite and dolomite (~15%), quartz (~18%), plagioclase (~14%), and annite (~6%). Quartz volume is below 25%, meeting the requirement established by Brazilian Normative Instruction N^o. 05/2016 (Brasil, 2016) for classification as a remineralizer. However, the K₂O content is below the minimum threshold set by the same regulation (<1%). The observed levels of CaO and MgO, together with the mineralogy, suggest a high CO₂ sequestration potential through enhanced weathering. Samples were homogenized and ground to below 0.3 mm, with 84% of the mass composed of particles smaller than 0.075 mm. Different rock powder doses were tested in four soil types, two clayey and two sandy, to assess the pH increase in the soil-rock mixture as a function of application rate. Doses applied to sandy soils ranged from 0 to 150 mg per 10 g of soil (equivalent to 0 to 15 t ha⁻¹, assuming incorporation in the 0–10 cm layer). For clayey soils, doses ranged from 0 to 300 mg per 10 g of soil (equivalent to 0 to 30 t ha⁻¹). Results indicated that doses between 50 and 150 mg per 10 g of soil stabilized pH between 5.5 and 6.5 after 24 and 72 hours of incubation, evidencing the schist's effectiveness in neutralizing soil acidity. These correspond to agronomic doses of 5 to 15 t ha⁻¹ in the 0–10 cm soil layer. The 90-day incubation experiment showed that shale application significantly improved soil chemical properties by increasing calcium and magnesium levels while reducing acidity. Therefore, despite the K₂O concentration being below 1%, the material shows potential for use as a soil conditioner or as a raw material in bler REM formulations.

Keywords: liming; regional input; silicate agrominerals; enhanced weathering; mining co-products.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Estruturação da dissertação	13
1.2 Contexto Geológico	13
1.3 Justificativa	15
1.4 Objetivos	15
1.4.1 Objetivo geral	15
1.4.2 Objetivos específicos	15
2 MATERIAIS E MÉTODOS	16
2.1 Caracterização dos remineralizadores	16
2.2 Ensaio de incubação de solo	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 Arcabouço Regulatório	22
3.2 Histórico da remineralização de solo	24
3.3 Utilização de rochas para captura de carbono	26
4 AVALIAÇÃO DO BANCO DE DADOS QUÍMICOS DE ROCHAS ESTÉREIS	28
5 ARTIGO AGROGEOLOGICAL POTENTIAL OF SCHISTS FROM THE RIO DAS VELHAS SUPERGROUP: A STUDY OF THE WASTE ROCK FROM THE ITABIRA IRON MINE, MG	30
5.1 Abstract	30
5.2 Introduction	31
5.3 Location of the study área	33
5.4 Materials and Methods	34
5.4.1 Characterization of the remineralizers	34
5.4.2 Soil Incubation Test	36
5.5 Results	37
5.5.1 Chemical and mineralogical characterization of the collected Schists	37
5.5.2 Calculation of the theoretical carbon sequestration potential	41

5.5.3 Characterization of the composite schist sample.....	42
5.5.4 Characterization of soil samples.....	44
5.5.5 pH stability tests	46
5.5.6 Soil Incubation test	47
5.6 Discussions	51
5.6.1 Feasibility of using schist as a soil conditioner or remineralizers.....	51
5.6.2 Carbon Sequestration Potential	51
5.6.3 pH stability and soil incubation tests.....	53
5.6.4 Comparative Analysis with Reference Studies: Agronomic Performance of Shist-Based	54
5.7 Conclusions	55
6 CONCLUSÕES.....	57
REFERÊNCIAS	58
APÊNDICE A - Dados do Ensaio de estabilização de pH.	64
APÊNDICE B - Delineamento experimental.	66
APÊNDICE C - Dados do Ensaio de Incubação solo e rocha.....	67

1 INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira enfrenta o desafio de reduzir sua dependência de fertilizantes importados, que atualmente representam cerca de 85% do consumo nacional (ANDA, 2024). Nesse contexto, os remineralizadores de solo (REM) despontam como uma alternativa promissora para promover a segurança alimentar, especialmente diante da ampla disponibilidade de matéria-prima proveniente de subprodutos da mineração. Para o setor minerário, essa alternativa representa também uma oportunidade de agregar valor e fomentar a circularidade de seus resíduos.

Entende-se por REM materiais produzidos a partir da cominuição de rochas silicáticas ricas em elementos alcalinos e alcalinos terrosos como o potássio, cálcio e magnésio. Eles devem apresentar potencial para fornecer macro e micronutrientes às plantas, gerar novas fases minerais funcionais e melhorar os índices de fertilidade do solo (Prado & Martins, 2019). Os REM fazem parte de uma categoria mais ampla de insumos naturais conhecidos como agrominerais, que constituem matérias-primas derivados de rochas com a finalidade de desenvolver insumos para manejo da fertilidade do solo. O uso dos REM visa melhorar a fertilidade do solo por meio do aporte de nutrientes essenciais às plantas, como potássio (K) e fósforo (P), considerados macronutrientes primários. Também são disponibilizados cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), classificados como macronutrientes secundários, além de micronutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal, entre os quais se destacam boro (B), cloro (Cl), cobalto (Co), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo) e zinco (Zn). A esta categoria, é possível incluir, os chamados condicionadores físicos do solo, que atuam na melhoria da aeração, retenção de umidade e estrutura do solo e os corretivos minerais como calcário agrícola, dolomita e rochas silicáticas moídas. Agrominerais silicáticos geram insumos de liberação lenta de nutrientes capazes de fornecer elementos ao solo ao longo do tempo. Os agrominerais são, portanto, definidos como “materiais geológicos de ocorrência natural, em formas processadas ou não processadas, que podem ser utilizados em sistemas agrícolas para aumentar a produtividade do solo” (Van Straaten, 2002), e podem constituir matérias-primas para o desenvolvimento de fertilizantes e REM. Os REM são definidos pela Lei nº Lei nº 12.890/2013 (Brasil, 2013) como: material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos e que altere os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova a

melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo (BRASIL, 2014).

A legislação brasileira tem avançado para regulamentar o uso de REM, como parte de uma estratégia para reduzir a dependência de fertilizantes solúveis importados e incentivar práticas agrícolas mais sustentáveis. O REM pode auxiliar na redução do uso de compostos nitrogenados, especialmente para o grupo dos agricultores familiares (Theodoro & Leonardos, 2006). Em 2021, o Brasil consumiu 46 milhões de toneladas de fertilizantes, sendo que 85% foram importados (ANDA, 2024). O Brasil é único país que tem uma regulamentação estabelecida para registro, comercialização e fiscalização dos REM, que é fundamental para padronizar a aplicação desses insumos e garantir a qualidade dos produtos utilizados. Esta regulamentação foi estabelecida pela Lei nº 12.890/2013 (Brasil, 2013) e, posteriormente, regulamentados pelo MAPA - Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2013) por meio da Instrução Normativa (IN) nº 05/2016, que estabeleceu as condicionantes e garantias mínimas para o seu registro, produção, comercialização e uso. Essa IN estabeleceu as características mínimas para registro do produto (Art. 4º): mínimo de 9% de soma de bases (CaO + MgO + K₂O) e 1% de K₂O, máximo de 15 ppm de As, 10 ppm de Cd, 0,1 ppm de Hg e 200 ppm de Pb, e menos de 25% de SiO₂ livre (quartzo livre), além da comprovada eficiência agrônômica verificada através de ensaios de incubação em casa de vegetação ou em experimento de campo (Viana et al., 2021).

Segundo o relatório da Associação Brasileira dos Produtores de Remineralizadores de Solo e Fertilizantes Naturais – ABREFEN (Martins et al., 2024) a produção brasileira de REM variou entre 1,5 e 1,6 milhões de toneladas por ano entre 2020 e 2023. Em 2022 a produção atingiu cerca de 3,1 milhões de toneladas que pode ser explicada pelo elevado preço de importação de fertilizantes químicos solúveis, impactado pela guerra no leste europeu naquele ano, uma vez que a Rússia é uma grande fornecedora de fertilizantes para o Brasil (BBC, 2022). A projeção do Plano Nacional de Fertilizantes indica que a demanda por REM deverá alcançar 75 milhões de toneladas anuais até 2050, o que exigirá esforços significativos tanto do setor público quanto do privado para expandir a oferta e consolidar o mercado desses insumos. Para atender a essa demanda, será necessário ampliar as fontes de REM, e diversos estudos recentes têm sugerido a utilização de rejeitos de mineração como uma alternativa viável. No Rio Grande do Sul, por exemplo, a exploração de resíduos de pedreiras de basalto tem apresentado resultados promissores (Prado & Martins, 2019).

Minas Gerais se destaca entre os estados brasileiros com maior aplicação de REM (Diário do Comércio, 2023). Na região do Quadrilátero Ferrífero (QF), localizado na porção centro-sudeste do estado, diversas rochas extraídas como estéreis durante a lavra de minério de ferro podem apresentar potencial uso como REM ou condicionadores de solo. Entre essas rochas, destacam-se os filitos das Formações Batatal e Piracicaba, as rochas carbonáticas das Formações Cauê e Gandarela, os xistos do Supergrupo Nova Lima e diques de diabásio xistificados.

Outro grande desafio da atualidade é a redução das emissões de dióxido de carbono (CO_2), um dos principais gases do efeito estufa, que contribui para o aquecimento global e as mudanças climáticas. Uma das formas de mitigar esse problema é a captura e sequestro de carbono, que consiste no processo de retirada de CO_2 da atmosfera e seu armazenamento em reservatórios geológicos, oceânicos ou biológicos por meio do transporte na forma de bicarbonato. A presente pesquisa também avalia a possibilidade do uso dos xistos coletados como mecanismo para capturar CO_2 , baseada no processo de intemperismo acelerado (Renforth, 2012, 2015 & 2019).

Com a crescente demanda por fertilizantes, o uso de pó de rocha ou REM aparece como uma solução alternativa e promissora para suprir a necessidade de nutrientes de maneira natural. Além de ajudar a reduzir a dependência de fertilizantes convencionais, a utilização dos estéreis como insumo agrícola também contribui para a diminuição dos resíduos gerados na mineração e oferece uma opção de baixo impacto ambiental para a fertilização e a melhoria dos solos agrícolas (Theodoro & Leonardos, 2006). A presente pesquisa busca, assim, alternativas para o reaproveitamento de estéreis de mineração do QF, como insumo agrícola, o que contribuirá para um manejo mais sustentável da agricultura no Brasil. Logo, esse trabalho apresenta o objetivo de realizar a caracterização agrogeológica desses materiais estéreis, visando avaliar o potencial de sua aplicação como REM ou condicionadores de solo. Entre os resíduos de mineração avaliados, destacam-se os xistos do Supergrupo Rio das Velhas, Grupo Nova Lima. Além disso, busca-se incentivar a destinação dos subprodutos da mineração à uma finalidade nobre e que contribua para a captura de carbono e mitigação das mudanças climáticas.

1.1 Estruturação da dissertação

A presente dissertação está estruturada em sete capítulos. O primeiro capítulo compreende a introdução, onde são delimitadas a área de estudo, a justificativa e os objetivos da pesquisa. O segundo capítulo descreve os materiais e métodos, detalhando as abordagens analíticas e procedimentos adotados ao longo do estudo. Já o terceiro capítulo é destinado à revisão bibliográfica, abrangendo o arcabouço regulatório, o histórico da remineralização de solos e a aplicação de rochas na captura de carbono, fornecendo o embasamento teórico necessário para contextualizar a pesquisa.

O capítulo quatro trata da avaliação de um banco de dados químicos de rochas estéreis, etapa importante para a seleção de amostras alvo do estudo. O capítulo cinco é composto pelo artigo científico gerado, estruturado nos moldes de publicações internacionais, contendo introdução, materiais e métodos, resultados, discussões.

Por fim, o capítulo seis reúne as conclusões gerais da dissertação, retomando os principais achados e suas implicações para o uso de rochas como remineralizadores e condicionadores de solo. As referências bibliográficas utilizadas ao longo do texto são listadas no capítulo sete. Ao final do trabalho, os apêndices reúnem tabelas com resultados analíticos complementares.

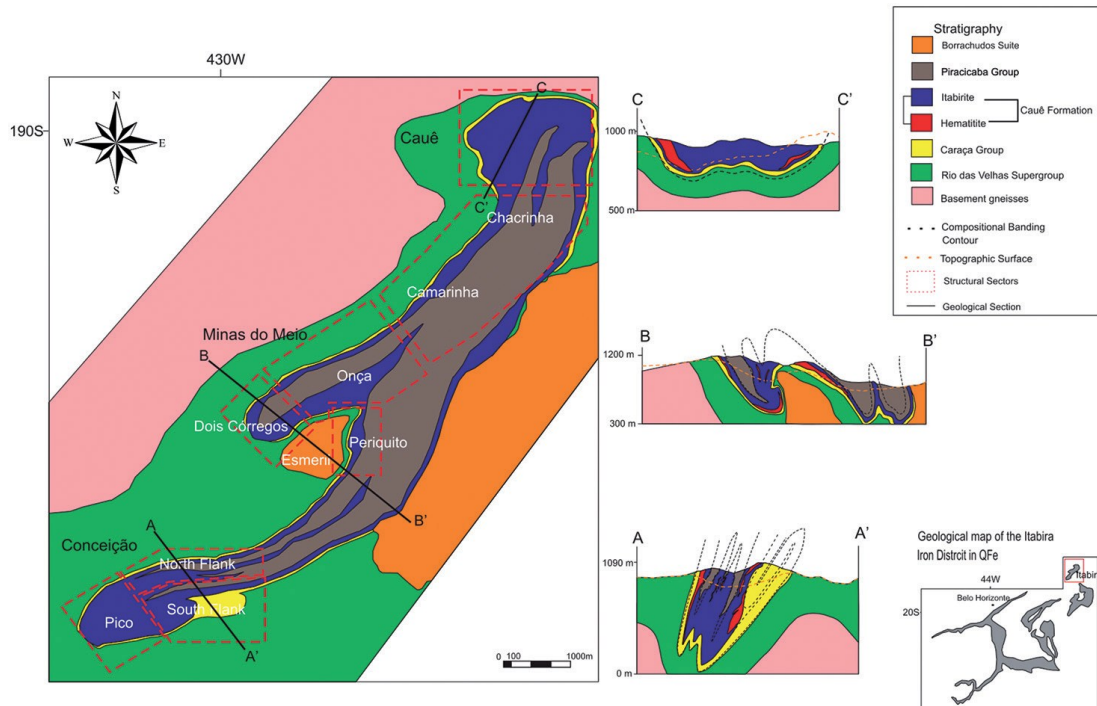
1.2 Contexto Geológico

A Província Mineral do QF localizada geologicamente na porção sudeste do Cráton do São Francisco, e apresenta três domínios lito-estruturais que geralmente aparecem intercalados em padrões de domos e quilhas (Marshak et al., 1992; Alkmim & Marshak, 1998). Os domos são compostos por granitos e gnaisses arqueanos, enquanto as quilhas contêm rochas supracrustais. As supracrustais mais antigas formam o *Greenstone Belt* do Supergrupo Rio das Velhas (Arqueano), o qual é coberto pelo Supergrupo Minas (Paleoproterozoico), depositado em ambiente plataformal de margem passiva, seguido pelos sedimentos aluviais do Grupo Itacolomi (Alkmim & Marshak, 1998; Hippert & Davis, 2000; Lana et al., 2013; Farina et al., 2015a, b; Aguilar et al., 2017). Diques e soleira máficas interceptam toda a sequência (Silva et al., 1995).

No contexto da área de estudo, Minas Distrito Ferrífero de Itabira, as rochas de interesse são aquelas pertencentes ao Supergrupo Rio das Velhas. O Supergrupo Rio das Velhas é

subdividido, da base ao topo, em Grupo Quebra Osso, Grupo Nova Lima e Grupo Maquiné. Na área (Figura 1 e Figura 2) afloram um conjunto de xistos verdes que englobam associações metavulcanossedimentares do Grupo Nova Lima.

Figura 1: Mapa geológico da região do Distrito de Ferro, Minas de Itabira, Vale.



Fonte: (Rossi et al., 2019).

Figura 2: Mapa de localização do Quadrilátero Ferrífero, com destaque para o Distrito Ferrífero de Itabira e para os afloramentos de xisto verde, Grupo Nova Lima na cava de Minas do Meio.



Fonte: Vale, 2025.

1.3 Justificativa

Com a crescente demanda por fertilizantes, o uso de pó de rocha ou REM aparece como uma solução alternativa e promissora para suprir a necessidade de nutrientes de maneira natural. Além de ajudar a reduzir a dependência de fertilizantes solúveis, a utilização dos estéreis derivados da lavra como insumo agrícola também contribui para a diminuição dos resíduos gerados na mineração e oferece uma opção de baixo impacto ambiental para a fertilização e a melhoria dos solos agrícolas (Theodoro, 2021). A presente pesquisa busca, assim, alternativas para o reaproveitamento de estéreis de mineração do Quadrilátero Ferrífero, como insumo agrícola, o que contribuirá para um manejo mais sustentável da agricultura no Brasil. Dessa forma, a pesquisa não só visa aproveitar subprodutos da mineração, mas, também, incentivar uma agricultura mais sustentável e capaz de auxiliar na captura de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

A pesquisa tem como objetivo geral avaliar a viabilidade de utilização de rochas estéreis derivadas das lavras de ferro no Quadrilátero Ferrífero como remineralizadores ou condicionador de solos, mais especificamente rochas hospedeiras da mineralização de ferro na Mina de Itabira, Minas Gerais, Brasil.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa foram:

- 1) Avaliação do banco de dados de análises química por fluorescência de raios X de rochas de estéreis das Minas de Ferro dos Distritos de Itabira, e Minas Centrais (Fábrica Nova e Fazenda) para seleção de litotipos potenciais;
- 2) Caracterização química e mineralógica dos litotipos selecionados;
- 3) Avaliação do potencial de uso das amostras selecionadas como insumo para captura de CO₂.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos remineralizadores

A metodologia utilizada nesta pesquisa incluiu as etapas descritas a seguir:

A Seleção do local de coleta envolveu uma análise detalhada do banco de dados de análises química por fluorescência de raios X de rochas de estéreis das Minas de Ferro dos Distritos de Itabira, e Minas Centrais (Fábrica Nova e Fazendão) optando-se pela seleção os xistos do Supergrupo Rio das Velhas, Grupo Nova Lima, aflorantes da região do Distrito Ferrífero de Itabira.

Coleta e caracterização química e mineralógica de três amostras de estéreis selecionadas (MAT-313, MAT-314 e MAT-315), coletadas no Distrito Ferrífero de Itabira, mas especificamente na região denominada Chacrinha e Minas do Meio, totalizando 60 kg. As amostras foram britadas, homogeneizadas, moídas por completo em gral de ágata, homogeneizadas e quarteadas para obtenção de uma alíquota representativa. Esta alíquota foi peneirada em malha de nylon com abertura #200, e o pó resultante - de granulometria abaixo de ~74 micrômetros e encaminhada para análise química na *SGS Laboratórios LTDA*. As composições totais das amostras foram determinadas por fluorescência de raios X (XRF), utilizando fusão com tetraborato de lítio, onde foram analisados os teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, K₂O, Na₂O, TiO₂, MgO, P₂O₅, MnO, BaO, Cr₂O₃, V₂O₅, além da determinação de Perda ao Fogo (LOI) a 1000°C por gravimetria.

A análise dos elementos traços potencialmente tóxicos (As, Cd, Hg e Pb) foram determinadas por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). A análise de Hg foi realizada por geração de vapor frio, enquanto os demais elementos foram determinados por digestão multielementar com ácido (Ag), (Al), (Ba), (Be), (Bi), (Ca), (Co), (Cr), (Cu), (Fe), (K), (La), (Li), (Mg), (Mn), (Mo), (Na), (Ni), (P), (Pb), (S), (Sb), (Sc), (Sn), (Sr), (Ti), (V), (W), (Y), (Zn) e (Zr). As análises foram conduzidas no laboratório da empresa SGS Geosol, em Vespasiano, Minas Gerais.

A composição mineralógica foi determinada por microscopia óptica em lâminas delgadas, utilizando luz transmitida nos modos de nicóis paralelos e cruzados. As fotomicrografias foram registradas em diferentes aumentos para a identificação dos principais minerais constituintes. A determinação mineralógica baseou-se nas características ópticas, tais como cor de

interferência, pleocroísmo, clivagem, relevo e hábito cristalino. Essas análises permitiram caracterizar as associações mineralógicas e texturais, fundamentais para a interpretação petrográfica das amostras.

No Centro de Pesquisas Professor Manoel Teixeira da Costa (CPMTC), as amostras foram moídas por completo em gral de ágata, homogeneizadas e quarteadas para obtenção de uma alíquota representativa. Esta alíquota foi peneirada em malha de nylon com abertura #200, e o pó resultante - de granulometria abaixo de ~74 micrômetros - foi acondicionado em porta-amostra de alumínio, por montagem do tipo *back-loading*. A caracterização mineralógica das amostras foi feita através do Método do Pó, em difratômetro de raios-x modelo *Panalytical Expert PRO* com goniômetro Θ - Θ (theta-theta) de 240 mm de diâmetro e geometria Bragg-Brentano. Dentro do tubo de raios-x o filamento de tungstênio foi excitado por uma corrente de 45 mA e tensão de 40 kV, sendo os elétrons ejetados direcionados a bombardear um alvo cobre para produção do feixe com comprimento de onda característico ($\text{CuK}\alpha_1 = 1.54060 \text{ \AA}$). Um conjunto de fendas e aberturas fixas foram instaladas para controlar o feixe e limitar a área de incidência no porta-amostra de alumínio. A varredura foi estabelecida no modo contínuo, de $5\text{-}70^\circ 2\Theta$, a um passo de $0,02^\circ$ e tempo de exposição de 1 segundo por passo, totalizando 3250 passos, ou pontos de aquisição, em um tempo total de 54 minutos e 13 segundos por amostra. O detector é do tipo proporcional, consistindo de uma câmara cilíndrica preenchida com uma mistura xenônio/metano e janela de berílio com dimensões de 20 mm x 24 mm. Os difratogramas obtidos foram interpretados no *software HighScore Plus*, licenciado para o laboratório de DRX do CPMTC-IGC-UFMG. A posição e intensidade dos principais picos foram comparadas com fases disponíveis nos bancos de dados COD (Crystallography Open Database) e/ou ICDD (*International Centre for Diffraction Data*). As fases identificadas, constam no capítulo de resultados.

Após a caracterização, as três amostras de xisto (MAT-313, 314 e 315), foram blendadas e resultaram em uma amostra composta, (MAT-447). As três amostras de rocha foram homogenizadas e preparadas utilizando moinho e carga de bolas de 20kg por 30min. A granulometria da amostra MAT-447 foi aferida após a moagem, em equipamento de espectrometria de difração a laser Anton Paar particle size analyzer (PSA) 1190 (líquido – 0,01 μm to 2,5 mm), com a amostra dispersa em água, resultando em uma amostra com 100% < 0,3mm e 84% < 0,075mm).

Para estimar o potencial teórico de captura de CO₂ das amostras estudadas, foi aplicada a fórmula contida no trabalho de Renforth (2012), que considera a presença de silicatos de cálcio e magnésio na rocha (Eq. 1). RCO₂ é o potencial de sequestro em toneladas de CO₂eq por tonelada de rocha; MMgO, MCaO e MCO₂ são as massas moleculares de MgO, CaO e CO₂, respectivamente; %CaO e %MgO correspondem às porcentagens em peso de CaO e MgO na rocha, respectivamente; e ω é um fator que considera o sequestro adicional que ocorre quando os cátions são transportados para os oceanos e permanecem dissolvidos. O valor de ω representa uma constante corretiva que expande o potencial teórico de sequestro de CO₂ ao considerar o destino dos íons Ca²⁺ e Mg²⁺ liberados pelo processo de intemperismo. Neste estudo, foi adotado ω = 1 que considera apenas a reação direta de formação de carbonatos (sem o efeito oceânico). Trabalhos posteriores de Renforth et al. (2015) e Renforth (2019) refinaram esse cálculo, incorporando ao modelo a influência de outros óxidos como SO₃, P₂O₅, Na₂O e K₂O, que podem reduzir a eficiência do processo por reações competitivas ou geração de espécies ácidas durante o intemperismo. Entretanto, a aplicação da equação simplificada permanece justificada em sistemas onde os teores de CaO e MgO são elevados, e as concentrações de SO₃, P₂O₅, Na₂O e K₂O são baixas como observado nas amostras MAT313, MAT314 e MAT315.

$$RCO_2 = \frac{M_{CO_2}}{100} \left(\frac{\%CaO}{M_{CaO}} + \frac{\%MgO}{M_{MgO}} \right) \omega \quad \text{Eq.01}$$

2.2 Ensaio de incubação de solo

Foram coletadas duas amostras de solo da região das minas de Ferro do QF, um arenoso e um argiloso (FAB-ARN e FAB-ARG respectivamente), para realização de testes de estabilização de pH e incubação. Duas outras amostras de solos padrão foram fornecidas pela Embrapa, da região do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC), em Planaltina, Goiás (CPAC-ARN e CPAC-ARG, arenoso e argiloso respectivamente) e coletados em região de mata, podendo ser chamados de solos ultra-ácidos de floresta.

A escolha das doses adequadas para realização dos testes de incubação foi realizada por meio de ensaios de estabilização de pH (ensaio 1), realizados na Embrapa Cerrados, Planaltina. Este ensaio consistiu em misturar 10 g de solo com diferentes doses de pó de xisto da amostra MAT-447, que variaram para 4 tipos de solos. Os solos argilosos receberam as doses de 25, 50, 100, 150, 200, 250 e 300 mg/10g de solo, e os arenosos as doses de 25, 50, 75, 100, 125 mg/10g

solo. Após a etapa de pesagem as medidas de pH da solução (solo + pó de rocha + água deionizada) em suspensão foram medidas em 1h, 24h e 72h.

Para o experimento de incubação, realizado na Embrapa Cerrados, as doses foram determinadas com base em ensaio com a curva de incubação (ensaio 1), com a dose selecionada para cada solo. O experimento foi realizado em recipientes com 40 g de solo, com 4 tratamentos (testemunha; dose de xisto para pH 5,5; dose de xisto para pH 6,0; e dose recomendada de calcário); 4 solos (FAB-ARN, FAB-ARG, CPAC-ARN e CPAC-ARG), e 3 tempos de incubação (30, 60 e 90 dias), com 3 repetições, resultado em um experimento com 144 unidades experimentais em delineamento inteiramente casualizado (DIC).

As doses de xisto aplicadas foram CPAC-ARN: 62,4 mg/40 g para pH 5,5 e 134,4 mg/40 g para pH 6,0; CPAC-ARG: 218,4 mg/40 g para pH 5,5 e 520 mg/40 g para pH 6,0; FAB-ARN: 9,2 mg/40 g para pH 5,5 e 25,6 mg/40 g para pH 6,0 e FAB-ARG: 54,4 mg/40 g para pH 5,5 e 307,2 mg/40 g para pH 6,0. Os recipientes contendo as misturas de solo e pó de rocha foram mantidos semi-abertos em estantes por 90 dias, em temperatura ambiente. A cada 7 dias, as amostras foram umedecidas com água deionizada para manter a umidade do solo próxima à capacidade de campo, com controle a partir da pesagem inicial.

Ao final do período de 90 dias de incubação, as amostras foram secas ao ar, peneiradas e submetidas às análises químicas para determinação do pH (H_2O e $CaCl_2$ 0,01 M), teores de K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , $H+Al$, e a partir destes foram estimados a CTC efetiva (capacidade de troca nas condições atuais do solo - pH natural) e a potencial (capacidade de troca após correção da acidez a pH 7,0 - CTC total), e a saturação por bases. O pH foi determinado em um pHmetro Metler Toledo FiveEasy. O K^+ foi extraído em Mehlich-1, o Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} em KCl 1 M, e o $H+Al$ em acetato de cálcio 0,5 M a pH 7,0. As determinações do K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} foram realizados por absorção atômica Shimadzu AA-6300, e do Al^{3+} e $H+Al$ por titulometria com $NaOH$ 0,025 M.

Delineamento experimental em DIC simples, para diferentes dos de xistos e calcário para cada tipo de solo testado.

Os dados foram submetidos à verificação dos pressupostos de normalidade dos resíduos e homocedasticidade das variâncias utilizando o software SPEED stat 3.4 (Carvalho et al., 2020). Para as variáveis que violaram esses pressupostos, foi aplicada a Transformação por Postos (Rank Transformation – RT) (Carvalho, 2024; Conover & Iman, 1981). Em seguida, foi aplicado o teste de Dunnett para comparar as médias dos tratamentos com um controle, sendo

este teste útil para avaliar a eficácia dos tratamentos em relação ao controle. Nessa análise, a taxa de erro experimental global (EWER) foi controlada, mantendo o erro tipo I geral abaixo de 5%.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O solo é um recurso natural fundamental para a vida e a produção agrícola. No entanto, ao longo do tempo, o solo pode sofrer processos de degradação física, química e biológica, que reduzem sua fertilidade e capacidade produtiva. Uma das formas de restaurar e melhorar a qualidade do solo é a utilização de remineralizadores, que são rochas moídas (popularmente conhecidos como pós de rocha ou farinhas de rocha) que fornecem nutrientes e minerais essenciais para o desenvolvimento das plantas e dos micro-organismos do solo (Theodoro & Leonardos, 2006). Quando usados como matérias-primas para fertilizantes ou diretamente na agricultura, são chamados de agrominerais (Fernandes et al., 2010).

A prática conhecida como rochagem que introduz o conceito de pó de rocha ou rochas moídas em sistemas agrícolas foi introduzida na Europa no final do século XIX por Julius Hensel (Hensel, 1894). Essa prática ganhou destaque no Brasil devido às suas aplicações em solos tropicais, que são frequentemente profundos, intemperizados, e cujos macronutrientes foram, no geral, lixiviados. Como uma solução alternativa aos fertilizantes químicos solúveis, os REM atendem às demandas de uma agricultura menos agressiva e menos dependente de insumos externos, colaborando para políticas públicas de segurança alimentar (Theodoro, 2021).

As rochas moídas aplicadas no solo liberam nutrientes de forma lenta e contínua promovendo uma nutrição multielementar gradualmente para as plantas, melhorando a estrutura do solo e aumentando a capacidade de retenção de água (Martins et al., 2010), ao contrário dos fertilizantes convencionais, que oferecem nutrientes de forma imediata e muitas vezes excessiva. Neste contexto, os REM atuam como um banco de nutrientes de longa duração, suprimindo as necessidades nutricionais de culturas diversificadas com aportes de elementos como o cálcio, magnésio, potássio, fósforo, silício e micronutrientes essenciais. Esse mecanismo ocorre por meio de processos de intemperismo, promovidos por ácidos orgânicos exsudados pelas raízes das plantas e pela atividade microbiana (Leonardos et al. 2000). Essa dinâmica favorece o desenvolvimento sustentável das plantas e reduz a lixiviação de nutrientes em comparação com fertilizantes solúveis (Fyfe, 1989; Hinsinger, 2001).

Os REM têm se consolidado como uma alternativa viável na agricultura regenerativa. Sua capacidade de fornecer nutrientes em longo prazo, associada à sustentabilidade econômica e

ambiental, faz destes insumos regionais uma opção estratégica para a agricultura tropical (Leonardos et al., 2000).

A adição de insumos derivados de agrominerais silicáticos nos sistemas agrícolas melhora a capacidade de troca catiônica, corrige a acidez do solo e estimula o desenvolvimento da estrutura física do solo, promovendo maior retenção de água e aeração (Primavesi, 1988; Theodoro et al., 2021; Van Straaten, 2007). Podem neutralizar a acidez do solo e promover a atividade microbiana, resultando em solos mais saudáveis e produtivos e a revitalização dos solos degradados (Theodoro et al., 2021).

A combinação dos REM com matéria orgânica e microrganismos tem demonstrado ampliar a disponibilidade de nutrientes. Bactérias e fungos solubilizadores de minerais desempenham um papel crucial na liberação de fósforo e potássio, aumentando a eficácia desses insumos (Basak et al., 2021; Setiawati & Mutmainnah, 2016). Essas interações também favorecem a formação de agregados no solo (Churchman et al., 2020), melhorando sua estrutura e aumentando a capacidade de retenção de água. A presença de microrganismos ativos na rizosfera intensifica o processo de intemperismo, acelerando a disponibilização de nutrientes essenciais (Theodoro et al., 2021).

Embora o uso de REM esteja em expansão, desafios ainda permanecem: a conscientização e o acesso a esses insumos, especialmente entre pequenos agricultores, devem ser ampliados; e a integração de políticas públicas, com incentivos econômicos e programas de capacitação, pode acelerar a adoção dessa tecnologia. No futuro, espera-se que os remineralizadores desempenhem um papel central na transição para uma agricultura mais sustentável, integrando aspectos econômicos, ecológicos e sociais (Theodoro, 2021).

3.1 Arcabouço Regulatório

A Lei nº 12.890/2013 (Brasil, 2013), altera a Lei no 6.894, de 16 de dezembro de 1980, passa a incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências e define o remineralizador de solo como sendo “*todo material de origem mineral, que não contenha substâncias prejudiciais ao meio ambiente, substâncias ditas tóxicas, e que apresente reatividade química ou físico-química capaz de promover incrementos nos teores de macro e micronutrientes e na disponibilidade de água no solo*”. E estabelece no Art. 4º que “*pessoas físicas ou jurídicas que produzam ou comercializem fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para*

plantas são obrigadas a promover o seu registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, conforme dispuser o regulamento”.

No Brasil, os REM foram estabelecidos pela Lei nº 12.890/2013 (Brasil, 2013) e, posteriormente, regulamentados pelo Decreto nº 8.384/2014 (Brasil, 2014), que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura. Em seguida, o MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2016) publicou a Instrução Normativa nº 05/2016, que estabeleceu as condicionantes e garantias mínimas para o seu registro, produção, comercialização e uso. Essa IN definiu as características mínimas para registro do produto, Art. 4º: mínimo de 9% de soma de bases (CaO + MgO + K₂O) e 1% de óxido de potássio, máximo de 15 ppm de As, 10 ppm de Cd, 0,1 ppm de Hg e 200 ppm de Pb, e menos de 25% de SiO₂ livre, além da comprovada eficiência agrônômica (Viana et al., 2021). No mesmo documento, são apresentadas as especificações de natureza física dos remineralizadores: Granulometria – farelado (100% < 4,8 mm), pó (100% < 2 mm) ou filler (100% < 0,3 mm).

A legislação vigente define as categorias, as características, os critérios de classificação, as garantias mínimas, as embalagens, os rótulos, as análises e as fiscalizações dos remineralizadores de solo. Além disso, o MAPA mantém um cadastro nacional dos produtos registrados e autorizados, que pode ser consultado em seu site oficial (Sipeagro) disponível em: <https://mapa-indicadores.agricultura.gov.br/publico/extensions/Fertilizantes/Fertilizantes.html>.

A regulamentação dos remineralizadores de solo - Instrução Normativa nº 05/2016 - visa garantir a sua qualidade, segurança e eficiência, bem como orientar os produtores, consumidores e órgãos públicos sobre as suas especificidades e benefícios. Essa estrutura legal tem impulsionado a adoção dos remineralizadores em larga escala, criando um mercado crescente e favorecendo o acesso a estes produtores. Além disso, incentiva a pesquisa e o desenvolvimento de novas formulações para atender as cadeias emergentes (Ministério do Desenvolvimento Indústria Comércio e Serviços, 2022).

3.2 Histórico da remineralização de solo

Um dos primeiros a divulgar os benefícios dos REM foi o químico alemão Julius Hensel, que publicou em 1894 o livro "Paes de Pedra", no qual relatava suas experiências com o uso de pós de rochas na produção de alimentos mais saudáveis e nutritivos (Hensel, 1894). Hensel defendia que as rochas eram a fonte original de todos os elementos necessários para a vida, e que a sua aplicação no solo poderia restaurar o equilíbrio natural e prevenir doenças e pragas (Van Straaten, 2007).

No Brasil, desde a década de 1950, (Ilchenko, 1955) iniciou estudos a respeito da aplicação das rochas moídas como fertilizantes naturais. Na pesquisa supracitada foi utilizado sienito com nefelina de Poços de Caldas com adição de calcário dolomítico e tratamento térmico por calcinação. Os resultados das pesquisas indicaram que a calcinação e a adição de calcário dolomítico aumentaram a liberação de K do sienito nefelínico para o solo e que os melhores resultados obtidos foram na proporção de mistura de 1:1, quando calcinados nas temperaturas de 1.000 e 1.100 °C.

Posteriormente, na década de 1970, (Leonardos & Theodoro, 1999) avançaram significativamente nesse campo. Suas pesquisas destacaram a eficiência dos REM, promovendo o uso sustentável dos recursos minerais do Brasil. Na década de 2000, Theodoro (2000, 2005), Theodoro & Leonardos (2006) e Fyfe et al. (2006) seguiram essa linha de investigação, consolidando a importância da rochagem. Estes estudos utilizaram diversas rochas silicáticas provenientes de pedreiras ou resíduos da mineração como fonte de nutrientes para a agricultura, incluindo basaltos, granitos, tufos vulcânicos, piroxenitos e fosfato natural, com os experimentos conduzidos em diferentes regiões do Brasil (MG, BA, RS e DF). A pesquisa seguiu por 12 anos e foi desenvolvida pela equipe da UnB junto a agricultores familiares assentados, quilombolas e ribeirinhos. Em campo, todos os solos que receberam o pó de rocha (ou os rejeitos das minerações) apresentavam baixos índices de fertilidade, carências significativas dos principais macronutrientes e níveis de pH bastante ácidos. Os resultados foram satisfatórios, uma vez que apresentaram aumento da produtividade, especialmente em culturas de ciclo longo, como cana-de-açúcar e mandioca, e em culturas de ciclo curto, especialmente o milho. Houve ainda melhoria na fertilidade do solo, evidenciada pelo aumento do pH e disponibilidade de nutrientes (Ca, Mg, P e K) e redução da acidez do solo com a diminuição dos teores de alumínio. Os autores supracitados registraram ainda uma melhoria no

desenvolvimento das plantas, com maior enraizamento, perfilhamento e massa verde, bem como uma maior retenção de umidade no solo, favorecendo a agricultura em períodos de estiagem.

No trabalho de Theodoro & Leonardos (2006) é citado a vantagem de se utilizar resíduos da mineração, uma vez que eles já se encontram cominuídos em granulometria variada (argila, área e até cascalhos). Essa vantagem granulométrica, além de evitar o gasto energético para moagem, tem a função de melhorar as características de permo-porosidade do solo. Além disso, potencializa a oferta de macro e microelementos por mais tempo.

(Van Straaten, 2007) destacou a importância dos REM na melhoria da estrutura e fertilidade do solo, bem como na promoção da atividade microbiana saudável. Van Straaten também foi pioneiro na pesquisa sobre a liberação gradual e contínua de nutrientes das rochas, demonstrando como essa prática pode contribuir para solos mais produtivos e resilientes. Além disso, ele trouxe à luz a relevância do uso das rochas silicáticas não apenas para a fertilização do solo. Posteriormente, pesquisadores britânicos (Manning et al., 2013,2023; Renfort (2012, 2019) e Beerling et al., 2018, 2020) sugerem estes materiais como uma alternativa eficaz para a captura de carbono, ajudando a mitigar as mudanças climáticas.

Trabalhos conduzidos por Martins et al. (2008, 2010, 2017, 2019), focaram especificamente nos agrominerais provenientes de rochas silicáticas, comprovando sua eficiência como REM em solos brasileiros. A aplicação de diferentes tamanhos de partículas tem se mostrado eficaz para ajustar os tempos de liberação de nutrientes e melhorar a porosidade dos solos (Basak et al., 2020).

Estudos recentes têm refinado os critérios de seleção das rochas Martins et. al. (2022), destacando a importância de características como granulometria, teor de Ca, Mg e K trocáveis e ausência de elementos potencialmente tóxicos (EPTs). Corrêa and Oliveira, (2024) propõe critérios mineralógicos e geoquímicos e sugere subdivisões na classificação do REM ricos em determinados elementos em: Primários, para K e/ou P; Secundários, para Ca e/ou Mg; Integrais, para os que atendem a todas as características dos primários e secundários; e universais, para os que atendem aos critérios mínimos da legislação, mas que não possuem altos teores de nenhum macronutriente.

3.3 Utilização de rochas para captura de carbono

Um dos aspectos mais recentes e promissores é o uso potencial dos REM para sequestrar carbono atmosférico. O intemperismo das rochas silicáticas contribui para a formação de carbonatos pedogênicos e agregados no solo, reduzindo as emissões de CO₂. Estudos indicam que práticas como a rochagem, podem sequestrar de 2 a 4 toneladas de CO₂ por hectare em até cinco anos (Beerling et al., 2020; Kelland et al., 2020).

O potencial teórico de sequestro de CO₂ por minerais silicáticos foi inicialmente sistematizado por Renforth (2012), que propôs uma fórmula simplificada baseada exclusivamente nos teores de CaO e MgO, principais óxidos capazes de fixar CO₂ na forma de carbonatos estáveis (Eq. 1). Trabalhos posteriores de Renforth et al. (2015) e Renforth (2019) refinaram esse cálculo, incorporando ao modelo a influência de outros óxidos como SO₃, P₂O₅, Na₂O e K₂O, que podem reduzir a eficiência do processo por reações competitivas ou geração de espécies ácidas durante o intemperismo. Entretanto, a aplicação da equação simplificada permanece justificada em sistemas onde os teores de CaO e MgO são elevados, e as concentrações de SO₃, P₂O₅, Na₂O e K₂O são baixas.

$$RCO_2 = \frac{M_{CO_2}}{100} \left(\frac{\%CaO}{M_{CaO}} + \frac{\%MgO}{M_{MgO}} \right) \omega \quad \text{Eq. 01}$$

Esse cálculo pode ser feito em função dos teores de CaO e MgO dos minerais silicáticos e estimativa da emissão de gás carbônico associada ao processo produtivo de extração, moagem e transporte do produto. R_{CO₂} é o potencial de sequestro em toneladas de CO₂_{eq} por tonelada de rocha; M_{MgO}, M_{CaO} e M_{CO₂} são as massas moleculares de MgO, CaO e CO₂, respectivamente; %CaO e %MgO correspondem às porcentagens em peso de CaO e MgO na rocha, respectivamente; e ω é um fator que considera o sequestro adicional que ocorre quando os cátions são transportados para os oceanos e permanecem dissolvidos.

Um estudo publicado por Lefebvre et al. (2019) utiliza essa metodologia para o cálculo de remoção de CO₂ da atmosfera através do uso de REM a base de basalto no estado de São Paulo. No artigo são citadas duas técnicas ou rotas de cálculo para sequestro de gás carbônico da atmosfera. As duas técnicas consideram a lixiviação do CaO e MgO presentes nos silicatos (piroxênios, anfibólios e filossilicatos, principalmente a biotita). A primeira rota que é denominada *Carbonation* – CB, o potencial de captura de CO₂ por meio da carbonatação é

calculado com base no teor de CaO e MgO da rocha, assumindo a precipitação dos cátions associados (isto é, Ca^{2+} e Mg^{2+}) em minerais carbonáticos (como calcita e magnesita). Na segunda rota, denominada Intemperismo Acelerado ou Aprimorado (*Enhanced Rock Weathering – ERW*) assume-se que todos os cátions resultantes da dissolução da rocha permanecem dissolvidos e, por meio da circulação de fluidos, são transferidos para o oceano (Beerling et al. 2018).

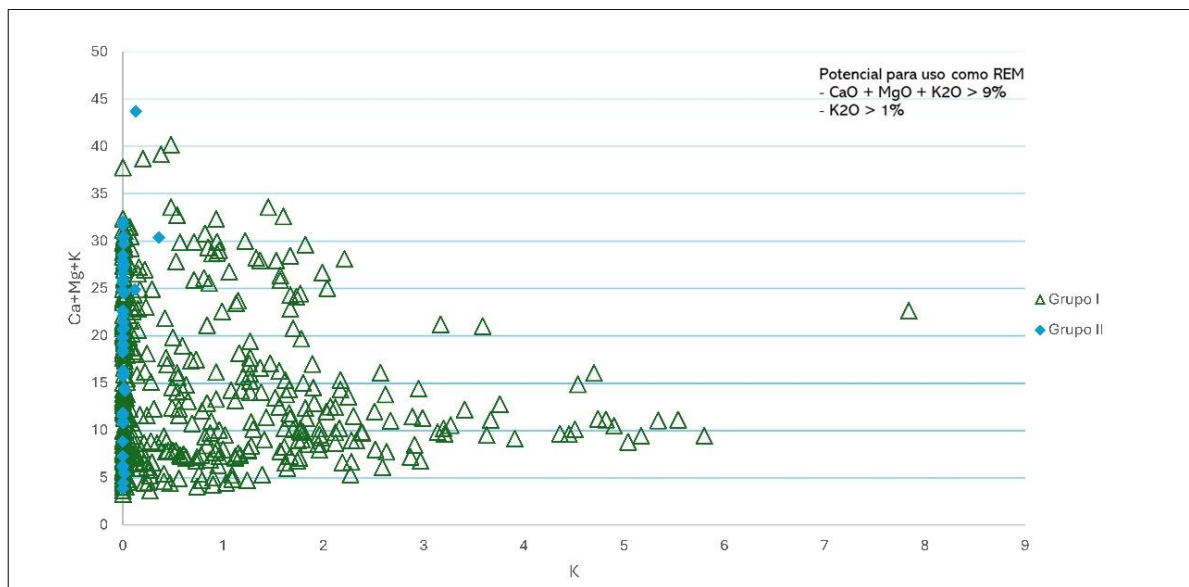
Além disso, Lefebvre et al. (2019) calcularam o balanço de CO_2 relacionado às atividades e operações logísticas para aquisição da matéria-prima (mineração, moagem, distribuição e aplicação). Os resultados do experimento indicam que a aplicação desses materiais pode reduzir entre 10-30% das emissões em função das reações relacionadas à neoformação de carbonatos pedogênicos e bicarbonatos, que podem permanecer no solo, ser transportados até o oceano ou absorvidos pela biomassa vegetal (Theodoro, 2021).

Beerling et al. (2024) demonstraram, através de um experimento de longo prazo no Cinturão do Milho dos Estados Unidos, que o REM remove carbono de forma contínua. O estudo mostrou aumento da fertilidade do solo, produtividade agrícola e eficiência na remoção de CO_2 pelo uso do intemperismo acelerado das rochas (ERW).

4 AVALIAÇÃO DO BANCO DE DADOS QUÍMICOS DE ROCHAS ESTÉREIS

A partir da compilação do banco de dados de 1771 amostras, os resultados foram individualizados em dois grupos: Grupo I: compostos pelos xistos e filitos aflorantes na região de Itabira, Brucutu, Serra do Tamanduá e Morro Agudo; Grupo II: composto por talco xisto (serpentinito), aflorantes na região das minas de Fábrica Nova e Fazendão em Mariana (Figura 3).

Figura 3: Gráfico do potencial das rochas serem fontes de Cálcio, Magnésio e Potássio.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

As rochas dos Grupos II apresentaram elevadores teores de óxidos de Mg e Ca (CaO + MgO variando de 3,06 a 43,6%), no entanto possuem pouco potencial para fornecimento do potássio (K variando de 0,0 a 0,4%). Já o Grupo I apresenta expressivos teores de Ca e Mg (CaO + MgO variando de 3,25 a 40,18) e maior intervalo de teores de potássio (K variando de 0,0 a 7,84%).

Foi realizado ainda o cálculo do potencial teórico de sequestro de CO₂ dos Grupos, conforme Renfoth (2012), (Tabela 1).

Tabela 1- cálculo do potencial teórico de sequestro de CO₂ dos Grupos, conforme Renfoth (2012). Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Grupo	MgO + CaO	RCO ₂ (kg CO ₂ eq/t)
I	21,36	207,11
II	28,55	302,20

Para o Grupo I, o potencial de sequestro de CO₂ foi considerado alto (207 kg CO₂eq/t). O material apresenta clorita e actinolita majoritariamente em sua composição, associados a sequência dos xistos verdes do Supergrupo Rio das Velhas. Os elevados teores de potássio acima de 1% estão associados aos filitos do Supergrupo Minas.

No Grupo II, o potencial de sequestro de CO₂ foi maior em comparação ao Grupo I (302 kg CO₂eq/t), principalmente por ter maior concentração de Mg, associadas aos talcos xistos e serpentinitos do Supergrupo Rio das Velhas, no entanto, a disponibilidade de material nas cavas destas minas (Fábrica Nova e Fazendão) é limitada, necessitando de um levantamento mais detalhado para avaliar a viabilidade de exploração. Por outro lado, há um grande volume dos xistos verdes em Itabira, o que significa promissora viabilidade de aplicação.

Para estudos subsequentes, optou-se pelo Grupo I (xistos compactos de Itabira) devido aos seus teores significativos de soma de bases, aliado à maior oferta de material na mina ser movimentado entre 2026 e 2050 e ao benefício do sequestro de carbono associado.

5 ARTIGO AGROGEOLOGICAL POTENTIAL OF SCHISTS FROM THE RIO DAS VELHAS SUPERGROUP: A STUDY OF THE WASTE ROCK FROM THE ITABIRA IRON MINE, MG

5.1 Abstract

In the Quadrilátero Ferrífero region, Brazil, certain rocks currently classified as waste in iron mining operations show potential for use as soil conditioners or rock dust remineralizers (REM). Among them, schists from the Rio das Velhas Supergroup, Nova Lima Group, are noteworthy. This study evaluated the agrogeological potential of these schists as soil remineralizers and as inputs for CO₂ capture. Chemical analysis of a composite sample, comprising three schist samples collected in the Itabira region, revealed a base saturation sum of 16.36%, SiO₂ content of 44.85%, MgO of 7.56%, K₂O below 1%, and a theoretical CO₂ sequestration potential of 150 kg CO₂ per ton of material applied to soil. The main paragenesis includes chlorite (~21%), actinolite (~26%), calcite and dolomite (~15%), quartz (~18%), plagioclase (~14%), and annite (~6%). Quartz volume is below 25%, meeting the requirement established by Brazilian Normative Instruction N°. 05/2016 (Brasil, 2016) for classification as a remineralizer. However, the K₂O content is below the minimum threshold set by the same regulation. The observed levels of CaO and MgO, together with the mineralogy, suggest a high CO₂ sequestration potential. Samples were homogenized and ground to below 0.3 mm, with 84% of the mass composed of particles smaller than 0.075 mm. Different rock powder doses were tested in four soil types, two clayey and two sandy, to assess the pH increase in the soil-rock mixture as a function of application rate. Doses applied to sandy soils ranged from 0 to 150 mg per 10 g of soil (equivalent to 0 to 15 t ha⁻¹, assuming incorporation in the 0–10 cm layer). For clayey soils, doses ranged from 0 to 300 mg per 10 g of soil (equivalent to 0 to 30 t ha⁻¹). Results indicated that doses between 50 and 150 mg per 10 g of soil stabilized pH between 5.5 and 6.5 after 24 and 72 hours of incubation, evidencing the schist's effectiveness in neutralizing soil acidity. These correspond to agronomic doses of 5 to 15 t ha⁻¹ in the 0–10 cm soil layer. The 90-day incubation experiment showed that shale application significantly improved soil chemical properties by increasing calcium and magnesium levels while reducing acidity. Therefore, despite the K₂O concentration being below 1%, the material shows potential for use as a soil conditioner or as a raw material in blended REM formulations.

Keywords: liming; regional input; silicate agrominerals; enhanced weathering; mining co-products.

5.2 Introduction

Brazilian agriculture faces the challenge of reducing its dependency on imported fertilizers, which currently account for approximately 80% of national consumption (ANDA, 2024). In this context, soil remineralizers have emerged as a promising alternative to enhance food security, especially given the wide availability of raw materials derived from mining by-products. For the mining sector, this approach also represents an opportunity to add value to its waste streams and promote circular economy practices.

Soil remineralizers (REM) are defined as materials produced from the comminution of silicate rocks that are rich in alkali and alkaline earth elements such as potassium, calcium, and magnesium. These materials should demonstrate the potential to supply macro- and micronutrients to plants, generate new functional mineral phases, and improve soil fertility indicators (Prado & Martins, 2019). REMs belong to a broader category of natural inputs known as agrominerals, which aim to enhance soil fertility by providing essential nutrients to plants, including potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), and phosphorus (P), as well as key micronutrients such as boron (B), chlorine (Cl), cobalt (Co), copper (Cu), iron (Fe), manganese (Mn), molybdenum (Mo), and zinc (Zn). This category also includes physical soil conditioners that improve soil aeration, water retention, and structure, and mineral amendments such as agricultural lime, dolomite, and ground silicate rocks, in addition to slow-release nutrient inputs capable of supplying elements over extended periods. Agrominerals are thus defined as “naturally occurring geological materials, either processed or unprocessed, that can be used in agricultural systems to improve soil productivity” (Van Straaten, 2002). REMs, specifically, are defined by Brazilian Decree No. 8.384/2014 as mineral materials that have undergone only size reduction and classification by mechanical processes, and that improve soil fertility through the addition of macro- and micronutrients, while also enhancing the physical, physico-chemical, or biological properties of the soil (Brasil, 2014).

Brazilian legislation has advanced in regulating the use of REMs as part of a broader strategy to reduce reliance on synthetic fertilizers and promote more sustainable agricultural practices. REMs can also contribute to reducing the need for nitrogen-based fertilizers,

particularly within smallholder farming systems (Theodoro & Leonardos, 2006). In 2021, Brazil consumed 40 million tonnes of fertilizers, 85% of which were imported (BBC, 2022). Regulatory frameworks are essential to standardize the application of these materials and ensure the quality of products used. Brazil is currently the only country with a well-established regulatory framework for the registration, commercialization, and oversight of REMs. This framework was instituted by Law No. 12.890/2013 (Brasil, 2013) and later regulated by the Ministry of Agriculture, Livestock and Food Supply (MAPA) through Normative Instruction (IN) No. 05/2016. This IN defines the minimum requirements for product registration (Art. 4°): a minimum of 9% base sum ($\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}$), 1% potassium oxide (K_2O), and maximum levels of 15 ppm As, 10 ppm Cd, 0.1 ppm Hg, and 200 ppm Pb, with less than 25% free SiO_2 . Furthermore, agronomic efficiency must be demonstrated through greenhouse incubation trials or field experiments (Viana et al., 2021).

According to the Brazilian Association of Soil Remineralizer and Natural Fertilizer Producers (ABREFEN) report (Martins et al., 2024), Brazilian REM production ranged between 1.5 and 1.6 million tonnes per year from 2020 to 2023. In 2022, production reached approximately 3.1 million tonnes, which can be attributed to the high cost of imported soluble chemical fertilizers, exacerbated by the war in Eastern Europe, as Russia is a major fertilizer supplier to Brazil (BBC, 2022). The National Fertilizer Plan projects that REM demand could reach 75 million tonnes annually by 2050, which will require significant efforts from both public and private sectors to expand supply and consolidate this input market. To meet this projected demand, it will be necessary to broaden REM sources, and recent studies have proposed the use of mining waste as a viable alternative. In the state of Rio Grande do Sul, Brazil, for example, the reuse of basalt quarry residues has shown promising results (Prado & Martins, 2019). Minas Gerais stands out among Brazilian states for its extensive application of REMs (Diário do Comércio, 2023). In the Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero, QF), located in the south-central portion of the state, various rock types classified as mining waste during iron ore extraction have shown potential use as soil remineralizers or conditioners. These include phyllites from the Batatal and Piracicaba Formations, carbonate rocks from the Cauê and Gandarela Formations, schists from the Nova Lima Supergroup, and sheared diabase dikes. In this study, schists sourced from an iron mine in the municipality of Itabira, northeastern QF, were analyzed. The project's goal is to perform an agrogeological characterization of these waste materials to evaluate their potential application as REMs or soil conditioners.

Another major contemporary challenge is the reduction of carbon dioxide (CO₂) emissions, a principal greenhouse gas that contributes to global warming and climate change. One mitigation strategy is carbon capture or sequestration, which involves the removal of atmospheric CO₂ and its storage in geological, oceanic, or biological reservoirs. This research also explores the potential of using the collected schists as a mechanism for CO₂ capture through the process of enhanced weathering (Renforth, 2012).

Given the increasing global demand for fertilizers, the use of rock powders or REMs presents a promising alternative solution for naturally meeting plant nutrient requirements. In addition to decreasing reliance on conventional fertilizers, the use of mining waste as agricultural inputs contributes to waste minimization and offers an environmentally sound option for soil fertilization and improvement (Theodoro & Leonardos, 2006). This study thus seeks to explore alternative strategies for the reuse of mining waste from the QF as agricultural inputs, promoting more sustainable agricultural practices in Brazil. In doing so, the research not only aims to valorize mining by-products but also to promote a more nature-based approach to agriculture, with the potential to contribute to carbon capture and climate change mitigation.

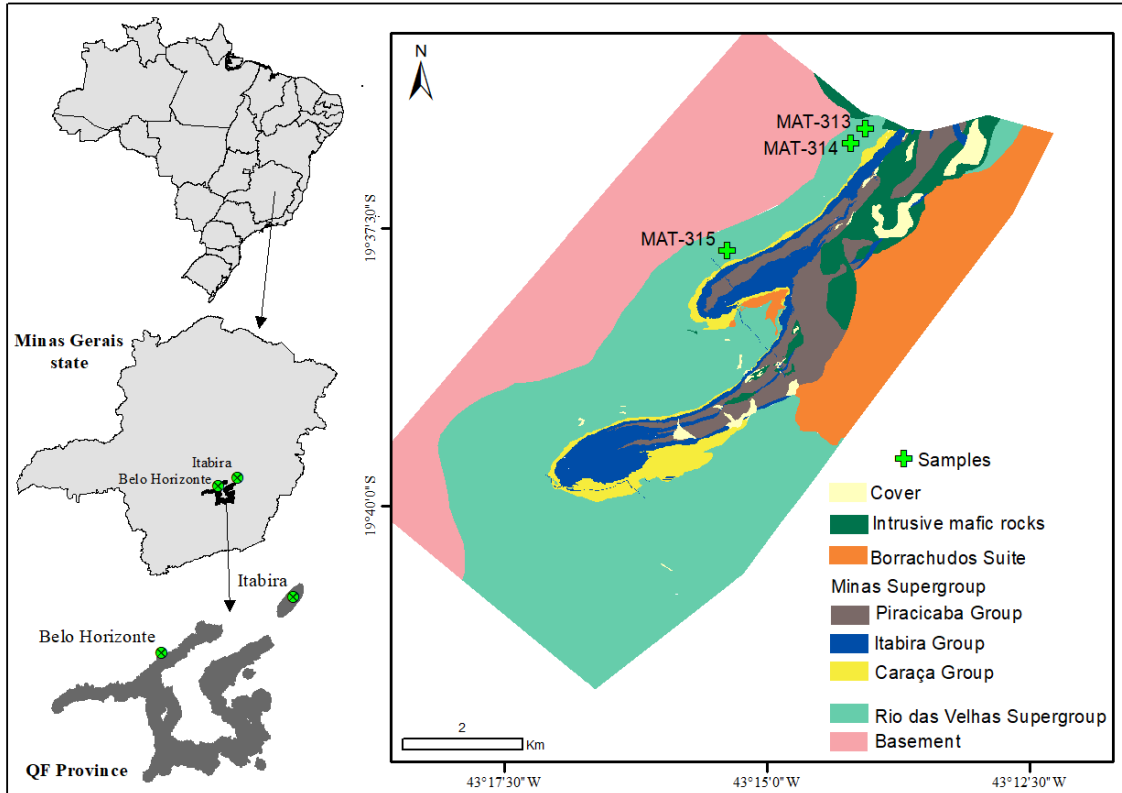
5.3 Location of the study área

The study area is located in the Iron Quadrangle (QF), a major mineral province in the south-central region of Minas Gerais State, Brazil. The QF is bounded by the municipalities of Ouro Preto, Mariana, Congonhas, Caeté, and Itabira. The specific focus of this study is the northeasternmost portion of QF, known as the Itabira Iron District (Figure 4). Geologically, the QF lies within the southeastern portion of the São Francisco Craton and comprises three litho-structural domains that typically appear in dome-and-keel patterns (Alkmim & Marshak, 1998). The domes are composed of Archean granites and gneisses, while the keels host supracrustal rocks. The oldest supracrustal units constitute the greenstone belt of the Rio das Velhas Supergroup (Archean), which is overlain by the Minas Supergroup (Paleoproterozoic), deposited in a passive margin platformal environment, and subsequently by the alluvial sediments of the Itacolomi Group (Alkmim & Marshak, 1998; Aguilar et al., 2017). Mafic dikes and sills intrude the entire sequence (Silva et al., 1995).

Within the context of the study area, the rocks of interest belong to the Rio das Velhas Supergroup. This supergroup is subdivided, from base to top, into the Quebra Osso Group, the

Nova Lima Group, and the Maquiné Group. In the study area, outcrops of green schists are present, representing metavolcano-sedimentary associations of the Nova Lima Group.

Figure 4: Map showing the location of the study area and sampling sites. Adapted from Rossi et al. (2019).



Source: Prepared by the author, 2025.

5.4 Materials and Methods

5.4.1 Characterization of the remineralizers

Three selected waste rock samples (totaling 60 kg) were collected and subjected to chemical and mineralogical characterization. These samples were crushed, homogenized, ground, and then conducted to chemical analysis. The three rock samples were homogenized and prepared using a ball mill with a 20 kg charge for 30 minutes.

Total compositions of the samples were determined by X-ray fluorescence (XRF), using lithium tetraborate fusion. The following oxides were analyzed: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, K₂O, Na₂O, TiO₂, MgO, P₂O₅, MnO, BaO, Cr₂O₃, V₂O₅, along with loss on ignition (LOI) at 1000 °C determined by gravimetry. Potentially toxic trace elements (As, Cd, Hg, and Pb) were analyzed

by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). Mercury (Hg) was determined by cold vapor generation, whereas the remaining elements were analyzed after multi-acid digestion. The complete set of elements analyzed included Ag, Al, Ba, Be, Bi, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Sc, Sn, Sr, Ti, V, W, Y, Zn, and Zr. All analyses were performed at the SGS Geosol laboratory in Vespasiano, Minas Gerais, Brazil.

Mineralogical composition was determined by optical microscopy in thin section and by powder X-ray diffraction (XRD), in Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa (CPMTC) of Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). For the XRD analysis the sample was passed through a 200 mesh sieve, i.e., granulometry below 0.074 mm. The powder was mounted by back-loading a flat aluminum sample holder. The analysis was carried out in a PANalytical X'Pert PRO diffractometer, with a 240 mm Bragg-Brentano θ/θ geometry, with a copper tube. The instrument set up at the incident beam side was as follows: Soller slit 0.04 rad; fixed divergent slit 1°; beam mask 15 mm. The setup at the diffracted beam side was as follows: antiscatter slit 1°; receiving slit 0.5° opening; Soller slit 0.04 rad; curved graphite monochromator, and xenon/methane-filled proportional detector. The scan was set to range from 5 to 70° (in 2θ range), 40 kV, 45 mA, 0.02° step size, and 1 second counting time per step, in continuous mode. The software HighScore Plus (HSP), published by PANalytical Inc., was used to process the XRD raw data, phase identification, and further calculation of weight fractions, through Rietveld analysis. Peak positions and intensities were compared with reference phases in the COD (Crystallography Open Database) and/or ICDD (International Centre for Diffraction Data) databases.

Following characterization, the three schist samples (MAT-313, MAT-314, and MAT-315) were blended to produce a composite sample (MAT-447). Particle size distribution of MAT-447 was assessed after grinding using a laser diffraction particle size analyzer (Anton Paar PSA 1190, range: 0.01 μm to 2.5 mm) with water dispersion.

To estimate the theoretical CO₂ sequestration potential of the studied samples, the formula proposed by Renforth (2012) was applied, considering the content of calcium and magnesium silicates in the rock (Eq. 1). RCO_2 is the sequestration potential in tons of CO₂ equivalent per ton of rock; MMgO , MCaO , and MCO_2 are the molar masses of MgO, CaO, and CO₂, respectively; %CaO and %MgO are the weight percentages of CaO and MgO in the rock; and ω is a factor that accounts for additional sequestration when cations are transported to the

ocean and remain dissolved. In this study, $\omega = 1$ was adopted. Subsequent work by Renforth et al. (2015) and Renforth (2019) refined this calculation by incorporating into the model the influence of other oxides such as SO_3 , P_2O_5 , Na_2O , and K_2O , which can reduce the efficiency of the process through competitive reactions or the generation of acidic species during weathering. However, the application of the simplified equation remains justified in systems where the levels of CaO and MgO are high, and the concentrations of SO_3 , P_2O_5 , Na_2O , and K_2O are low.

$$RCO_2 = \frac{M_{CO_2}}{100} \left(\frac{\%CaO}{M_{CaO}} + \frac{\%MgO}{M_{MgO}} \right) \omega \quad \text{Eq. 1}$$

5.4.2 Soil Incubation Test

For further analysis, four soil samples were collected. Two soil samples were collected from the iron mining region of the QF, one sandy and one clayey (FAB-ARN and FAB-ARG, respectively), to conduct pH stabilization and incubation tests. Two standard soil samples were also obtained from Embrapa's Cerrados Research Center (CPAC), located in Planaltina, Goiás (CPAC-ARN and CPAC-ARG, sandy and clayey, respectively), collected in forest areas and classified as ultra-acidic forest soils.

The selection of appropriate application rates for incubation experiments was based on preliminary pH stabilization tests, conducted at Embrapa Cerrados. These tests involved mixing 10 g of soil with different doses of schist powder from sample MAT-447, with the following ranges for each soil type: 25, 50, 100, 150, 200, 250, and 300 mg/10 g for clayey soils, and 25, 50, 75, 100, and 125 mg/10 g for sandy soils. The pH was measured at 1 h, 24 h, and 72 h after mixing the soil, rock powder, and deionized water.

For the incubation experiment (also conducted at Embrapa Cerrados), the application rates were defined based on a pH response curve, selecting the doses that raised soil pH to 5.5 and 6.0. The experiment used 40 g of soil in each pot, with four treatments (control; schist dose to reach pH 5.5; schist dose to reach pH 6.0; and recommended dose of agricultural lime), four soil types (FAB-ARN, FAB-ARG, CPAC-ARN, and CPAC-ARG), and three incubation periods (30, 60, and 90 days), with three replicates, totaling 144 experimental units. The applied shale powder doses were: CPAC-ARN: 62.4 mg/40 g to reach pH 5.5 and 134.4 mg/40 g to reach pH 6.0; CPAC-ARG: 218.4 mg/40 g to reach pH 5.5 and 520 mg/40 g to reach pH 6.0;

FAB-ARN: 9.2 mg/40 g to reach pH 5.5 and 25.6 mg/40 g to reach pH 6.0 and FAB-ARG: 54.4 mg/40 g to reach pH 5.5 and 307.2 mg/40 g to reach pH 6.0. The containers with soil and rock powder mixtures were kept semi-open on shelves for 90 days at room temperature. Every seven days, the samples were moistened with deionized water to maintain soil moisture near field capacity, with control by weight. At the end of the incubation period, the samples were air-dried, sieved, and submitted for chemical analyses to determine pH (H₂O and 0.01 M CaCl₂), contents of K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, and H⁺Al. Based on these results, the effective cation exchange capacity (ECEC), the potential CEC at pH 7.0, and base saturation (V%) were calculated. The pH was measured using a Mettler Toledo Five Easy pH meter. K⁺ was extracted with Mehlich-1; Ca²⁺, Mg²⁺, and Al³⁺ with 1 M KCl; and H⁺Al with 0.5 M calcium acetate at pH 7.0. The K⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺ concentrations were determined by atomic absorption spectrophotometry (Shimadzu AA-6300), while Al³⁺ and H⁺Al were determined by titration with 0.025 M NaOH. All analyses were conducted at the Soil Analytical Chemistry Laboratory of Embrapa Cerrados, in Planaltina, Goiás.

The data were subjected to verification of the assumptions of residual normality and homoscedasticity of variances using SPEED stat 3.4 (Carvalho et al., 2020). For variables that violated these assumptions, Rank Transformation (RT) was applied (Carvalho, 2024; Conover & Iman, 1981). Subsequently, Dunnett's test was applied to compare the means of the treatments with a control, which is useful for assessing treatment effectiveness relative to the control. In this analysis, the experimental-wise error rate (EWER) was controlled, keeping the overall type I error below 5%.

5.5 Results

5.5.1 Chemical and mineralogical characterization of the collected Schists

The three samples were collected from the Itabira mine, including the pits of Minas do Meio and a region known as Chacrinha. These areas were carefully selected to provide a comprehensive representation of the material available at the mine (Figure 5).

Figure 5: Photograph of the Minas do Meio Pit, located in the Industrial Complex of Itabira, Minas Gerais state. Captured by photographer Gustavo Rosa, the image highlights the exposure of fresh, unaltered schist from the Nova Lima Group, visible in the greenish-gray rocks within the pit.



Source: Vale, 2025.

Samples MAT-313, MAT-314, and MAT-315 exhibit base saturation ranging from 16.36% to 21.4%. However, they show low potassium content (0.03% to 0.3%), which does not meet the requirements for classification as soil remineralizers, which demand potassium content above 1%. Nevertheless, the high base saturation observed allows these samples to be classified as potential sources of calcium (Ca) and magnesium (Mg), in addition to being a potential source of silicon (Si), (Table 2).

Table 2: Chemical composition of the samples, determined by X-ray fluorescence and ICP-OES. Source: Prepared by the author, 2025.

Element / oxide	Unit	MAT313	MAT314	MAT315
Al ₂ O ₃	%	10.2	7.81	12.7
BaO	%	<0.01	<0.01	<0.01
CaO	%	8.08	8.69	8.89
Cr ₂ O ₃	%	0.16	0.29	0.04
Fe ₂ O ₃	%	11.5	12.2	11.5
K ₂ O	%	0.1	0.03	0.3
MgO	%	12.6	18.7	6.81
MnO	%	0.18	0.2	0.16
Na ₂ O	%	1.17	0.15	2.03
P ₂ O ₅	%	0.04	0.04	0.1
SiO ₂	%	51.6	46.2	44.3
TiO ₂	%	0.42	0.5	0.94
V ₂ O ₅	%	0.05	0.04	0.05

LOI	%	2.7	4.03	10.81
Hg	ppm	<0.05	<0.05	<0.05
As	ppm	<3	<3	<3
Cd	ppm	<0.5	<0.5	<0.5
Co	ppm	59	75	42
Cr	ppm	583	642	154
Cu	ppm	51	6	86
Fe	%	8.21	8.71	8.03
Mn	ppm	1462	1585	1297
Mo	ppm	<1	<1	<1
Ni	ppm	241	912	119
Pb	ppm	18	18	41
S	%	<0.01	<0.01	0.06
V	ppm	154	139	188
Zn	ppm	83	135	99

A comparison of the main criteria established by MAPA for classification as a soil remineralizer (REM) with the chemical results obtained for samples MAT-313, MAT-314, and MAT-315 is presented. The main trace elements identified in the samples, Fe, Mn, Ni, and Co, range from 8.03% to 8.71%, 1,297 to 1,585 ppm, 119 to 912 ppm, and 42 to 75 ppm, respectively. These concentrations are suitable for use as micronutrient sources, except for the cobalt content in sample MAT-315, which falls below the reference threshold (50 ppm). The levels of potentially toxic elements are below the limits established by MAPA (Table 3).

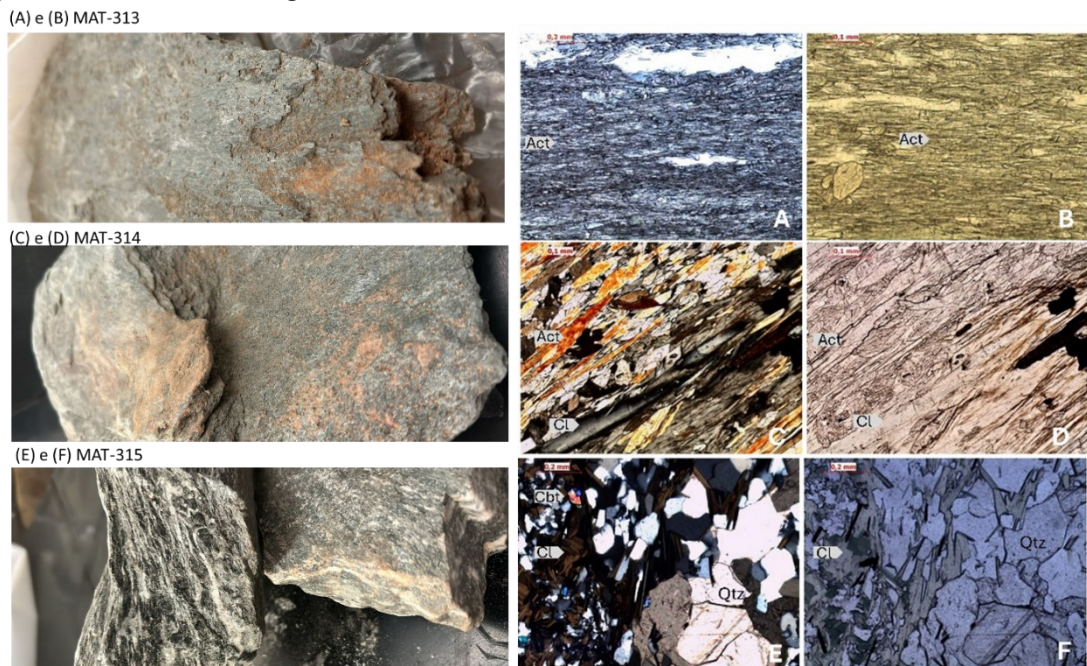
Table 3: Comparison between the criteria established by MAPA for classifying materials as soil remineralizers (REMs) and the results obtained for three schist samples. Source: Prepared by the author, 2025.

Method	Element/oxide	(IN) No. 05/2016 Limits	MAT 313	MAT 314	MAT 315
FRX e ICP-EOS	K ₂ O+CaO+MgO (%)	>9%	20.78%	27.42%	16%
	Cd (ppm)	<10 ppm	<0.5	<0.5	<0.5
	Pb (ppm)	<200 ppm	18	18	41
	As (ppm)	<15 ppm	<3	<3	<3
	Hg (ppm)	<0.1 ppm	<0.05	<0.05	<0.05
	K ₂ O (%)	> 1%	0.1%	0.03%	0.3%
DRX	Quartz (%)	<25% (vol)	11.8%	0	26.6%

Petrographic analysis of thin sections revealed the following mineralogical compositions: sample MAT-313 consists of actinolite (80% ± 5%), quartz (15% ± 5%), and chlorite (5% ± 5%) (Figure 6A); sample MAT-314 is composed of actinolite (50% ± 5%) and

chlorite ($50\% \pm 5\%$); and sample MAT-315 contains quartz ($25\% \pm 5\%$), chlorite ($35\% \pm 5\%$), carbonates ($35\% \pm 5\%$), plagioclase ($10 \pm 5\%$) and actinolite ($5\% \pm 5\%$) (Figure 6B e C).

Figure 6: Samples and Photomicrographs of the collected samples. (A) and (B) MAT-313, (C) and (D) MAT-314, and (E) and (F) MAT-315. Abbreviations: Qtz – quartz; Act – actinolite; Cl – chlorite; Cbt – carbonate. On the left, crossed nicols; on the right, uncrossed nicols.



Source: Prepared by the author, 2025.

X-ray diffraction (XRD) analysis identified chlorite as the main carrier of Al, Fe, and Mg, while carbonates and actinolite are the main Ca-bearing minerals. Quartz occurs in amounts below 26.6 vol% of the rock (Table 4).

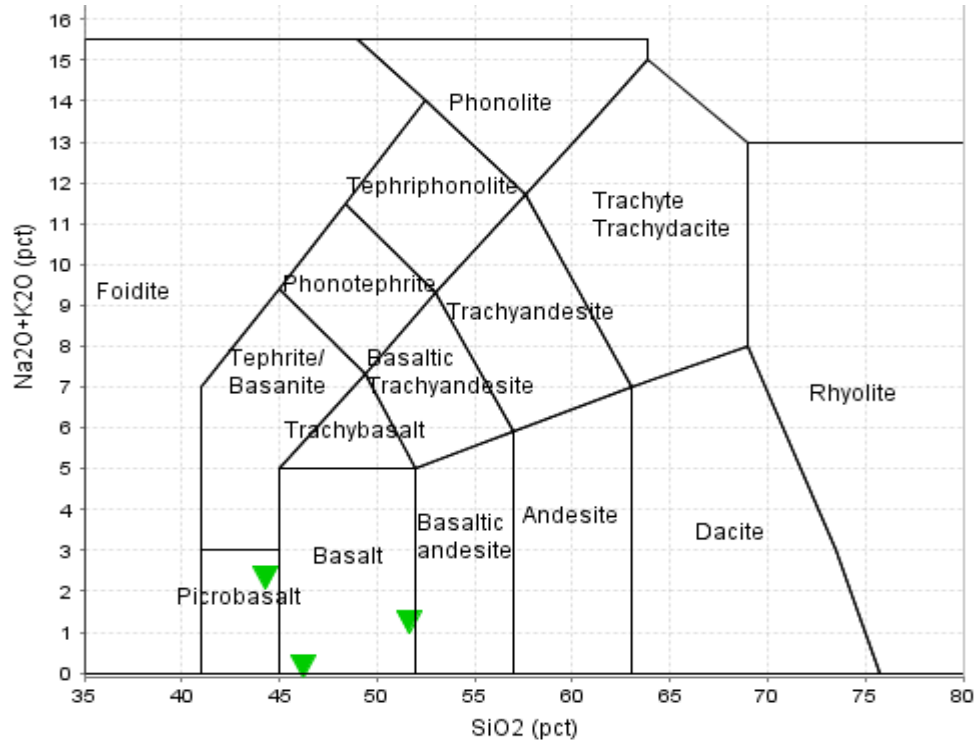
Table 4: Mineralogical analysis results obtained by X-ray diffraction (XRD). Source: Prepared by the author, 2025.

Sample	Albite	Actinolite	Chlorite	Calcite	Dolomite	Plagioclase	Quartz	Annite
MAT-313	12.1	63.3	12.8				11.8	
MAT-314		55.6	44.4					
MAT-315		4.3	16.6	5.7	18.8	19.5	26.6	8.6

The plotting of chemical data on igneous rock classification diagrams (Figure 7) highlights the geochemical origin of the samples from the volcanosedimentary sequence of the Rio das Velhas Supergroup. Although they exhibit chloritization and metamorphism characteristic of the greenschist facies, their chemical signature predominantly indicates a

composition ranging from basic to ultrabasic rocks, varying from tholeiitic basalts to basaltic komatiites, with low alkali (K and Na) contents.

Figure 7: TAS classification diagram (total alkalis vs. silica), (Middlemost 1994). IOGAS software.



Source: Prepared by the author, 2025.

5.5.2 Calculation of the theoretical carbon sequestration potential

The theoretical CO₂ sequestration potential of samples MAT-313, MAT-314, and MAT-315 was calculated according to Renforth (2012), (Table 5). The calculation was based on the total contents of CaO and MgO present in silicate minerals.

Table 5- Calculation of the theoretical CO₂ sequestration potential of the Groups, according to Renforth (2012). Source: Prepared by the author, 2025.

Sample	MgO + CaO	RCO ₂ (kg CO ₂ eq/t)	RCO ₂ (kg CO ₂ eq/t) _silicates
MAT313	20.68	202.09	202.09
MAT314	27.39	273.98	273.98
MAT315	15.7	144.76	24.35

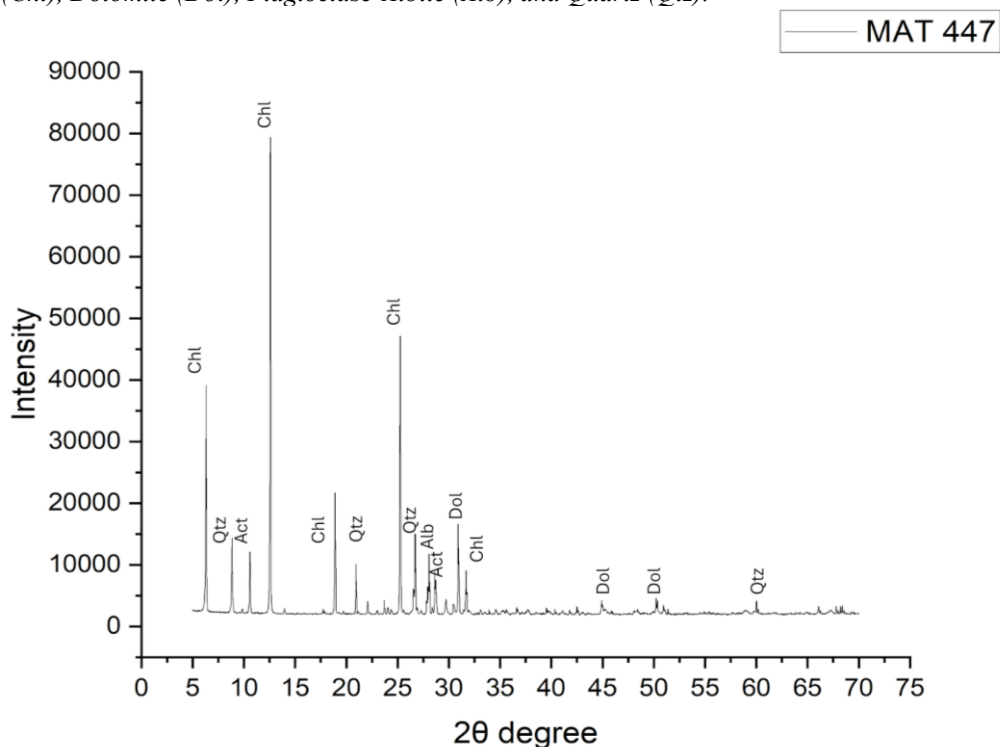
For samples MAT-313 and MAT-314, the CO₂ sequestration potential was considered high (202 and 274 kg CO₂eq/t, respectively). The material is predominantly composed of chlorite and actinolite. In sample MAT-315, the CO₂ sequestration potential was lower compared to MAT-313 and MAT-314 (144 kg CO₂eq/t), mainly due to its lower Mg content.

When considering the pre-carbonated fraction of sample MAT-315 (24.5%), corresponding to the percentage of carbonate identified by XRD, the CO₂ sequestration potential decreases from 144 kg to 24 kg of CO₂ per ton of rock.

5.5.3 Characterization of the composite schist sample

For the subsequent stages, a composite sample (designated MAT-447) was prepared from the three schist samples in the following proportions: 20% MAT-313, 17% MAT-314, and 63% MAT-315, based on the availability of sampled material and the visual representativeness of the outcropping rock in the pit. The XRD results of the composite sample indicated the presence of chlorite (21%), actinolite (26%), quartz (18%), plagioclase (14%), carbonates (15%), and annite (~6%) as the predominant mineral phases (Figure 8).

Figure 8: X-ray diffractogram of sample MAT-447, indicating peaks corresponding to Actinolite (Act), Chlorite (Chl), Dolomite (Dol), Plagioclase-Albite (Alb), and Quartz (Qtz).



Source: Prepared by the author, 2025.

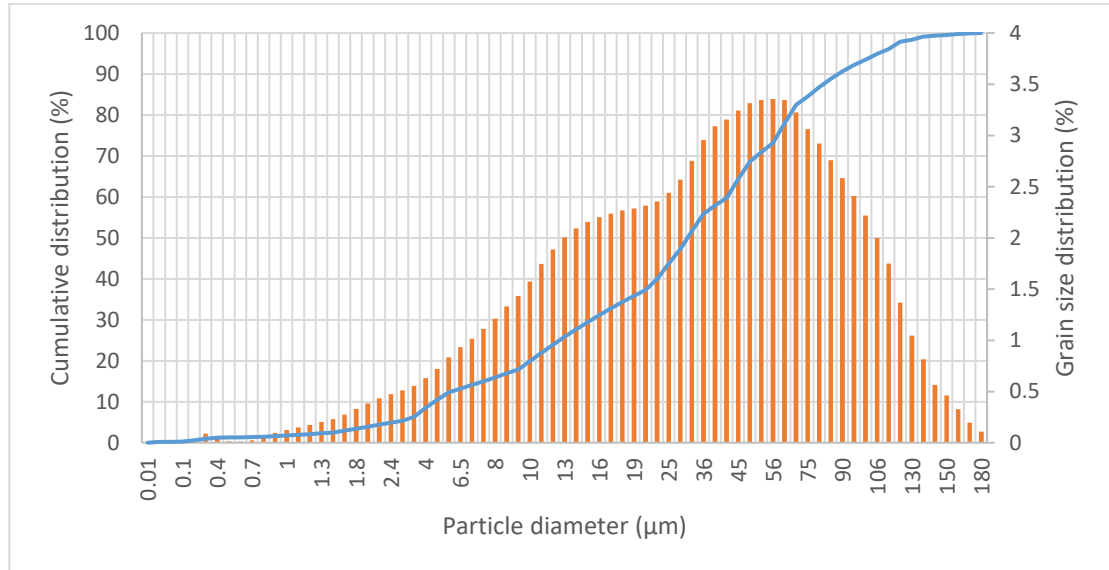
The XRF analysis of the composite sample showed a CaO content of 8.5%, MgO of 7.6%, K₂O of 0.2%, and a base saturation of 16.36% (Table 6). The SiO₂ content was 44.8%, of which only 18% is contained in the quartz mineral, according to XRD data.

Table 6: XRF analysis of sample MAT-447. Source: Prepared by the author, 2025.

Element/oxide	MAT447 (%)
SiO ₂	44.85
Al ₂ O ₃	11.67
Fe ₂ O ₃	11.54
CaO	8.57
MgO	7.56
TiO ₂	0.83
P ₂ O ₅	0.07
Na ₂ O	1.81
K ₂ O	0.23
MnO	0.15
LOI	9.78

The composite sample was ground to 100% passing 0.3 mm. In the cumulative particle size distribution graph (particle percentage vs. diameter), it is possible to observe that approximately 16% of the particles have a size larger than 0.075 mm. The particle size distribution graph (percentage of particles vs. particle diameter) shows a uniform distribution of the ground particles, which correlates with the sample mineralogy, where chlorite is the predominant mineral and the harder quartz is present in smaller amounts. The predominance of intermediate particle sizes, ranging from 20 to 80 μm , indicates efficient comminution, with limited generation of ultrafine material ($<2 \mu\text{m}$) and coarse fractions ($>150 \mu\text{m}$). This distribution suggests that the grinding process produced a relatively homogeneous material, favoring subsequent mineralogical and geochemical analyses. The narrower range of particle sizes also minimizes potential biases in dissolution or leaching experiments, as surface area effects become more consistent across the sample (Figure 9).

Figure 9: Particle size distribution and cumulative distribution graph of the composite sample MAT-447 (blend of MAT-313, 314, and 315) by laser diffraction spectrometry.



Source: Prepared by the author, 2025.

5.5.4 Characterization of soil samples

In the results of soil fertility parameters, the clayey soil sample of mine, FAB-ARG presents a water pH of 5.5, which can be classified as an acidic soil, whereas the sandy soil (FAB-ARN) shows a water pH of 6.3. The soils exhibit very low base sum (SB) values, or exchangeable base content (calcium, magnesium, potassium, and sodium), with $SB = 0.1$, which supports their classification as deep, highly leached Oxisols. The base saturation (V%) is below 50%, indicating that the soil exchange sites are predominantly occupied by H^+ or Al^{3+} , highlighting the need for soil amendment (Sobral et al., 2015).

The analyses of soils from CPAC indicate a strongly acidic environment (pH 4.6 and 4.8), with low base saturation (V% of 12 and 16) and low levels of essential macronutrients Ca^{2+} and Mg^{2+} , and K^+ , as well as low contents of P, S. These soils were collected from forested areas, and their organic matter, upon incubation, undergoes oxidation, leading to a further decrease in pH. Therefore, they can be classified as ultra-acidic forest soils (Table 7).

Table 7: Soil fertility results. The clayey soils (CPAC-ARG) showed higher values of aluminum saturation (m%), Al^{3+} , and $H^+ + Al^{3+}$ due to their higher cation exchange capacity (CEC), mineralogy composed of kaolinite, Fe and Al oxides, and organic matter content, which favor the retention of Al^{3+} . Source: Prepared by the author, 2025.

Attribute	Unit	CPAC- Cerrado Agricultural Research Center		Degraded Area Fábrika Mine	
		Clayey	Sandy	Clayey	Sand
		CPAC-ARG	CPAC-ARN	FAB-ARG	FAB-ARN
pH (H ₂ O)		4.6	4.8	5.52	6.34
P	mg/dm ⁻³	13.0	13.2	1.4	10.3
Ca ²⁺	cmol _c /dm ⁻³	0.4	0.4	<0.1	0.1
Mg ²⁺	cmol _c /dm ⁻³	0.2	0.2	<0.1	<0.1
K ⁺	cmol _c /dm ⁻³	0.11	0.10	10	9
Na ⁺	cmol _c /dm ⁻³	0.02	0.02	4	<3.36
Al ³⁺	cmol _c /dm ⁻³	1.2	0.5	1.1	<0.1
H+Al	cmol _c /dm ⁻³	5.4	3.7	2.7	<0.7
SB	cmol _c /dm ⁻³	0.7	0.7	0.1	0.1
CTC a pH 7.0	cmol _c /dm ⁻³	6.1	4.4	2.8	0.4
V%		12	16	4	25
m%		62	41	92	0
PST%		3	3	1	2
M.O.	g/kg ⁻¹	22.2	7.1	<2.4	<2.4
B	mg/dm ⁻³	0.26	0.31	-	-
Cu	mg/dm ⁻³	1.32	1.16	-	-
Fe	mg/dm ⁻³	86.8	144.8	-	-
Mn	mg/dm ⁻³	3.6	2.3	-	-
Zn	mg/dm ⁻³	2.04	1.59	-	-
S	mg/dm ⁻³	21.1	8.9	13.8	9.6

5.5.5 pH stability tests

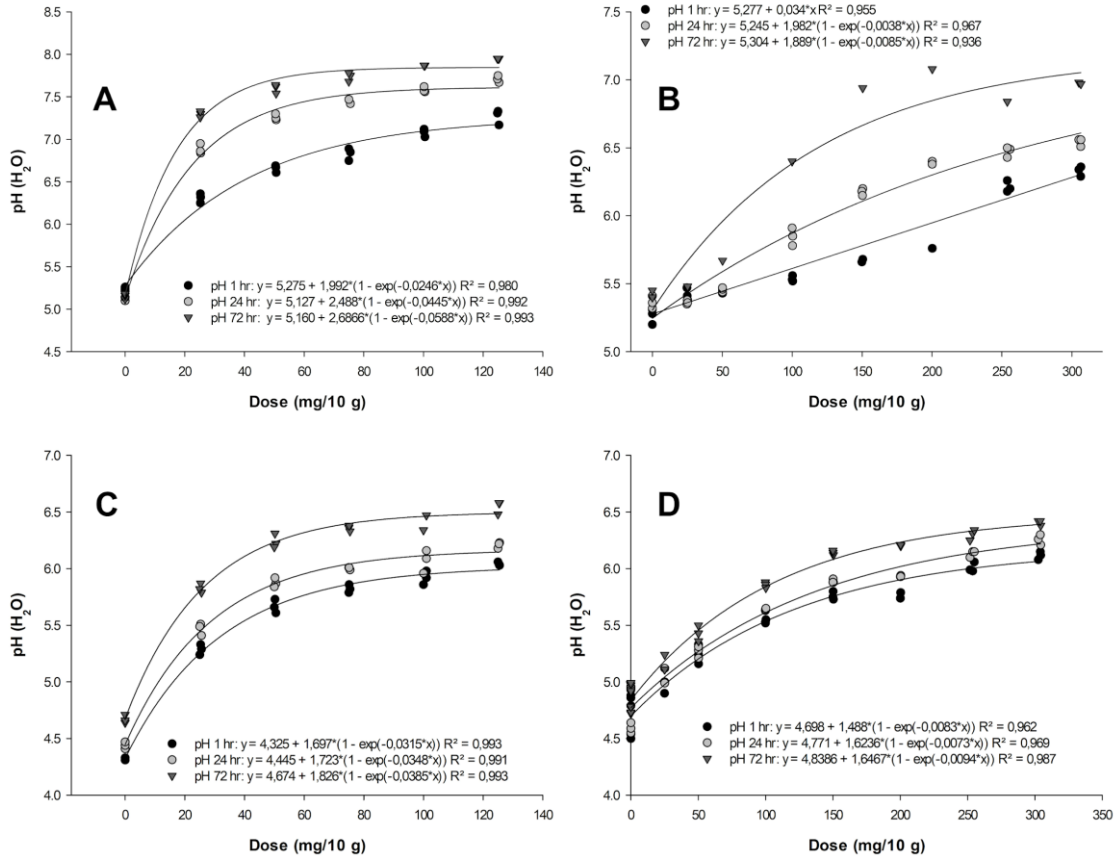
To support the definition of the dose to be used in the incubation experiment, a pH stability test was carried out by applying the powdered composite sample (MAT447) to the four types of soil sampled. The pH (H₂O) values obtained at three measurement intervals (1 h, 24 h, and 72 h) were fitted using quadratic and exponential models to estimate the minimum dose required to stabilize the pH within the target range of 5.5 to 6.5.

Analysis of the graphs presented (Figure 10) shows that the pH increase is most pronounced within the first 24 to 72 hours after application. The magnitude of pH variation in response to the applied dose differed among the soils, with greater efficiency observed in sandy soils (ARN), particularly in the CPAC-ARN soil (Figure 10C), where increases of up to 2 pH units were achieved at the highest doses. This likely reflects the lower buffering capacity of this soil compared to clayey soils (ARG), as shown in Figures 10B and 10D.

The results indicated that pH stabilization was achieved with different doses in sandy and clayey soils. In FAB-ARN soil, pH elevation at 1 h, 24 h, and 72 h was observed at doses close to 60 mg per 10 g of soil, equivalent to 6 t ha⁻¹. However, the stabilization plateau became evident only in the 24 h and 72 h curves (Figure 10A). For FAB-ARG soil, the pH stabilization plateau at 1 h, 24 h, and 72 h was not clearly observed; based on the curve projection, stabilization tends to occur at doses above 300 mg per 10 g of soil, equivalent to 30 t ha⁻¹ (Figure 10B).

For the CPAC soils (ultra-acidic forest soils with initial pH values ranging from 4.6 to 4.8), the results indicated that doses between 50 and 150 mg per 10 g of soil were sufficient to stabilize the pH between 5.5 and 6.5 after 24 and 72 hours, demonstrating the effectiveness of the schists as soil acidity correctives. These results correspond to agronomic doses of 5 to 15 t ha⁻¹, considering incorporation into the 0–10 cm soil layer (Figures 10C and 10D).

Figure 10: Graphs of the pH stabilization test conducted with different doses of schists in various soils. A (FAB-ARN), B (FAB-ARG), C (CPAC-ARN), and D (CPAC-ARG).



Source: Prepared by the author, 2025.

5.5.6 Soil Incubation test

The effects of schist powder and limestone application on soil fertility parameters are presented in Figures 11A, 11B, 12C, and 12D. In Figure 11A, means followed by asterisks (*) differ statistically from the respective control treatment (no rock powder applied). The incubation experiments demonstrated positive effects on soil chemistry, notably the increase in pH, reduction of exchangeable acidity ($H^+ + Al^{3+}$), and increases in Ca^{2+} and Mg^{2+} contents.

Schist powder application resulted in a significant increase in soil pH across all evaluated soils. The schist doses increased soil pH (H₂O), with the highest dose reaching values of 4.48 (CPAC-ARN), 4.93 (CPAC-ARG), 5.69 (FAB-ARN), and 5.5 (FAB-ARG). In CPAC-ARN and CPAC-ARG soils, the pH increase was evident as early as 30 days and was maintained through 90 days with both doses tested. Limestone application also promoted pH increases similar to or greater than those induced by schist. In the FAB-ARN soil, a significant

pH increase was observed from 60 days onward, but only with schist dose 2, showing a pattern similar to that of limestone. In the FAB-ARG soil, the response to schist was more modest, although the higher dose led to a significant pH increase at 60 days.

The levels of Al^{3+} , $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$, and aluminum saturation were reduced, with the highest dose resulting in Al^{3+} contents of $0.11 \text{ cmolc dm}^{-3}$ (CPAC-ARN), $0.18 \text{ cmolc dm}^{-3}$ (CPAC-ARG), $0.02 \text{ cmolc dm}^{-3}$ (FAB-ARN), and $0.03 \text{ cmolc dm}^{-3}$ (FAB-ARG) (Figure 11B). Exchangeable Al^{3+} was significantly reduced in both schist and limestone treatments, especially in CPAC-ARG and FAB-ARN soils, where schist dose 2 lowered Al^{3+} levels to values similar to or lower than those obtained with limestone. In FAB-ARG soil, Al^{3+} levels were already very low at the outset, with minimal response to treatments. In contrast, in CPAC-ARN soil, Al^{3+} was significantly reduced in all treatments, highlighting the effectiveness of the corrective in neutralizing soil acidity.

Schist application also increased the contents of exchangeable cations, effective and potential cation exchange capacity (CEC), sum of bases, and base saturation. Figures 12C and 12D show the treatment effects on calcium (Ca^{2+}) and magnesium (Mg^{2+}) levels, respectively. In all soils, Ca^{2+} levels increased significantly with schist application, especially at the higher dose. The most pronounced response was observed in CPAC-ARG and FAB-ARN soils, where schist dose 2 resulted in Ca^{2+} levels comparable to or even higher than those observed with limestone: $0.72 \text{ cmolc dm}^{-3}$ (CPAC-ARN), $1.84 \text{ cmolc dm}^{-3}$ (CPAC-ARG), $1.26 \text{ cmolc dm}^{-3}$ (FAB-ARN), and $0.30 \text{ cmolc dm}^{-3}$ (FAB-ARG).

As for Mg^{2+} (Figure 12D), all soils showed significant increases with the treatments, with schist dose 2 yielding results very close to or equal to those of limestone, particularly in CPAC-ARN and CPAC-ARG soils. At the highest dose (134.4 mg, 320 mg, 25.6 mg, and 307.2 mg per 40 g of soil), Mg^{2+} levels reached $0.39 \text{ cmolc dm}^{-3}$ (CPAC-ARN), $0.91 \text{ cmolc dm}^{-3}$ (CPAC-ARG), $0.58 \text{ cmolc dm}^{-3}$ (FAB-ARN), and $0.12 \text{ cmolc dm}^{-3}$ (FAB-ARG), respectively.

Figure 11: Incubation test results. (A) Statistical significance of schist doses versus the control for the pH (H₂O) variable in the 4 soils analyzed; and (B) statistical significance of schist doses versus the control for the exchangeable acidity (Al³⁺) variable. Source:

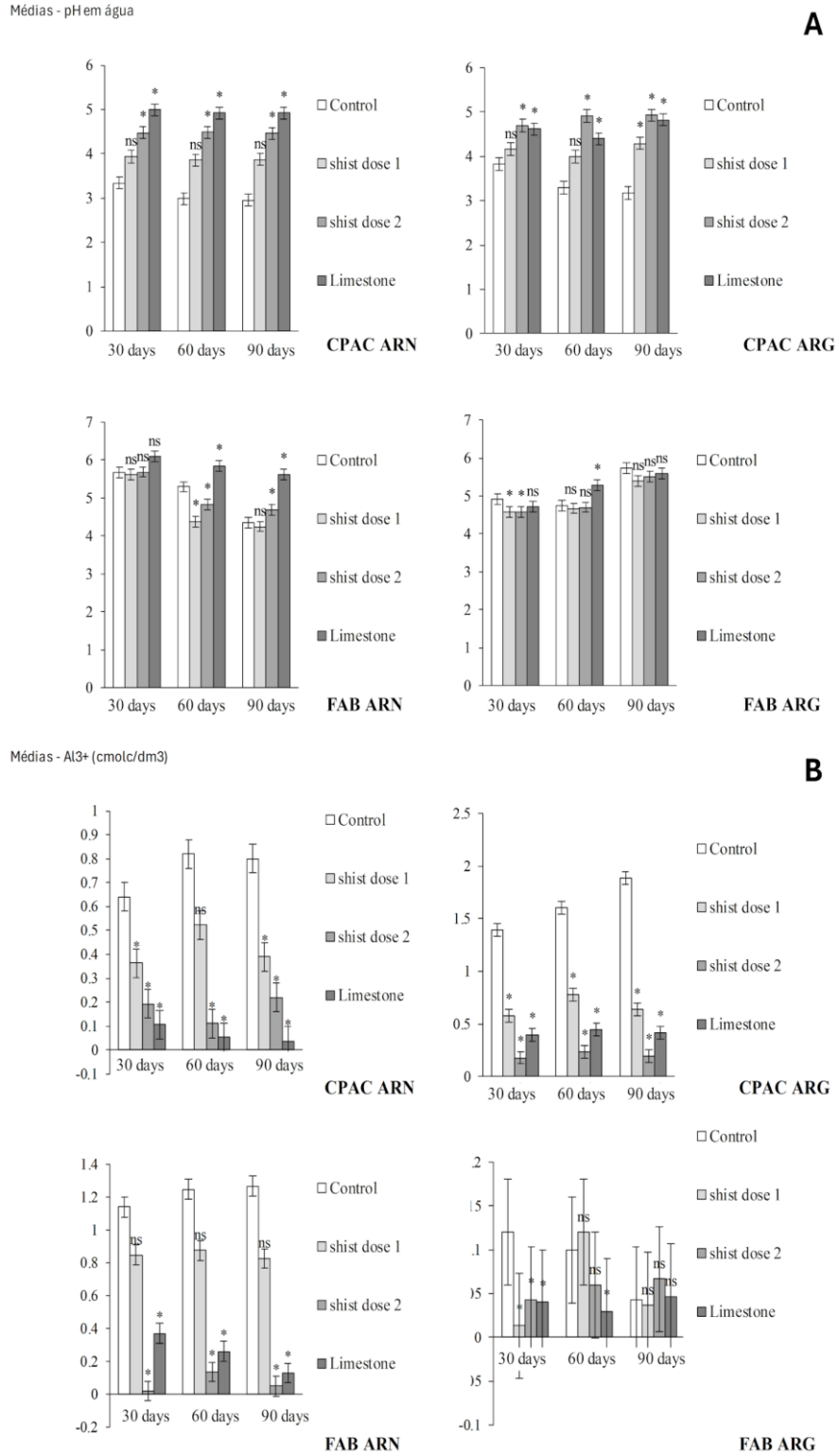
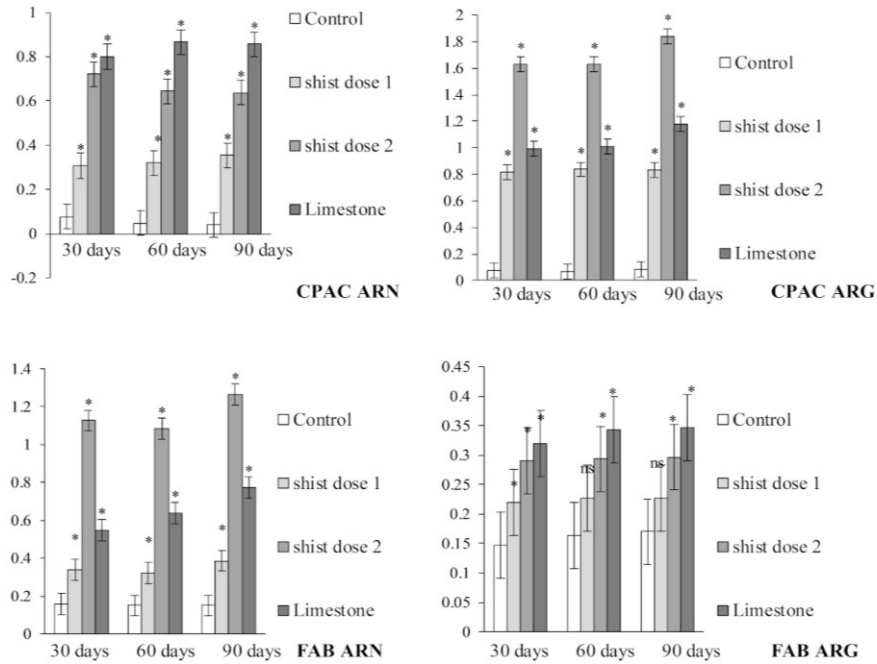


Figure 12: Incubation test results. (C) Statistical significance of schist doses versus the control for the Ca variable in the 4 soils analyzed; and (D) statistical significance of schist doses versus the control for the Mg variable

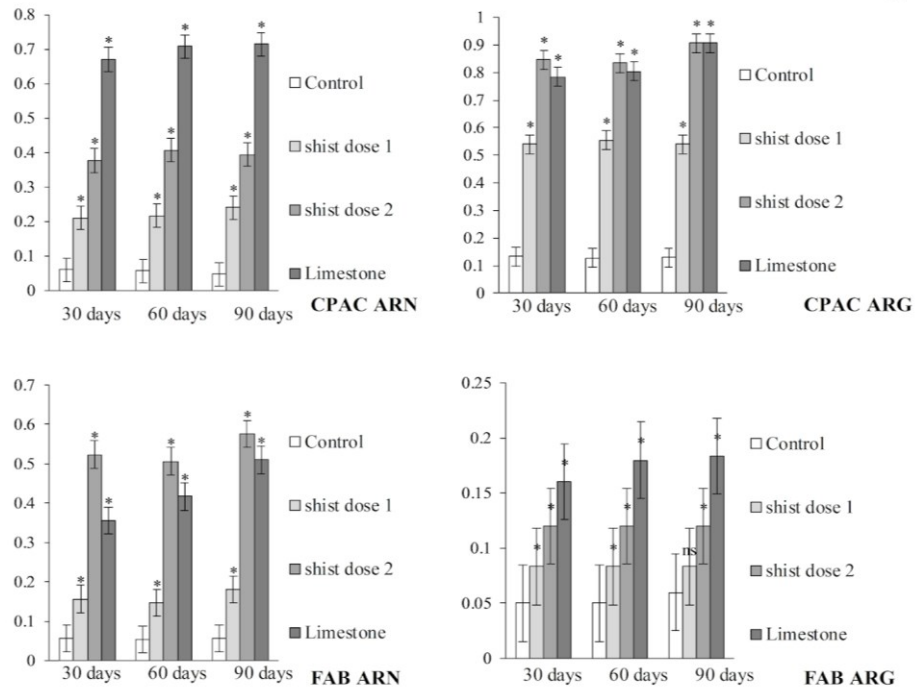
Médias - Ca (cmolc/dm³)

C



Médias - Mg (cmolc/dm³)

D



Source: Prepared by the author, 2025.

5.6 Discussions

5.6.1 Feasibility of using schist as a soil conditioner or remineralizers

From the granulometric perspective, the milling process proved highly effective. The composite sample was ground to 100% below 0.3 mm. Laser granulometry analysis indicated that after grinding, 84% of the material was below 0.075 mm, which, according to the Agronomic Testing Protocol (Silveira et al., 2019), corresponds to a theoretical reactivity efficiency of up to 95% after comminution.

For a REM to be approved by the Brazilian Ministry of Agriculture (MAPA), the concentrations of macronutrients and oxides must comply with established regulatory limits. Chemical analyses of samples MAT-313, MAT-314, MAT-315, as well as the composite sample MAT-447, revealed that CaO and MgO contents are adequate to promote soil fertility improvement. However, the K₂O content was below the recommended threshold.

The main trace elements identified in the samples include iron (Fe), manganese (Mn), nickel (Ni), and cobalt (Co), with concentrations ranging from 8.03 to 8.71% Fe, 1297 to 1585 ppm Mn, 119 to 912 ppm Ni, and 42 to 75 ppm Co. All of these elements, except for cobalt in sample MAT-315 (which is slightly below the 50 ppm reference threshold), could potentially be utilized as plant micronutrients. It is essential to ensure that these elements contribute not only to plant nutrition but also to soil chemical balance, avoiding toxicity due to excess accumulation.

According to the mineralogical and geochemical criteria proposed by Corrêa & Oliveira (2024), the analyzed samples would fall under the classification of a Secondary REM (rich in Ca and Mg) and could alternatively be used as a soil acidity corrective.

5.6.2 Carbon Sequestration Potential

One of the most recent and promising advances in research on soil remineralizers is their potential use in atmospheric carbon sequestration. The weathering of silicate rocks contributes to the formation of pedogenic carbonates and stable soil aggregates, thus playing a role in reducing CO₂ emissions. Studies have shown that practices such as rock dust application ("rocks

for crops") can sequester between 2 to 4 tons of CO₂ per hectare over a period of up to five years (Beerling et al., 2020; Kelland et al., 2020).

Lefebvre et al. (2019) published a study on CO₂ removal from the atmosphere through the use of basalt-based remineralizer in the state of São Paulo, Brazil. The article describes two techniques or calculation pathways for estimating carbon sequestration. Both techniques consider the leaching of CaO and MgO from silicate minerals (mainly pyroxenes, amphiboles, and phyllosilicates such as biotite). The first pathway, referred to as Carbonation (CB), calculates the CO₂ capture potential based on the CaO and MgO contents in the rock, assuming that the associated cations (i.e., Ca²⁺ and Mg²⁺) precipitate as carbonate minerals (such as calcite and magnesite). The second pathway, known as Enhanced Rock Weathering (ERW), assumes that all cations resulting from rock dissolution remain in solution and are transported via fluid circulation to the ocean (Beerling et al., 2018).

Additionally, Lefebvre et al. (2019) evaluated the CO₂ balance associated with activities and logistics operations involved in raw material sourcing (mining, grinding, distribution, and application). The results indicate that the application of such materials can reduce emissions by 10–30%, depending on reactions associated with the neoformation of pedogenic carbonates, which may remain in the soil, be transported to the ocean, or be absorbed by plant biomass (Theodoro, 2021).

Beerling et al. (2024) demonstrated, through a long-term experiment in the U.S. Corn Belt, that remineralizers continuously remove carbon. The study reported increases in soil fertility, crop productivity, and CO₂ removal efficiency through the use of enhanced rock weathering (ERW).

The values presented are theoretical estimates, representing the maximum carbon sequestration potential of a given rock. Silicate rocks containing primarily amphibole and phyllosilicate group minerals (such as the analyzed samples containing actinolite and chlorite) generally exhibit medium to low dissolution rates (Corrêa & Oliveira, 2024).

Based on the chemical composition, the CO₂ sequestration potential of sample MAT-447 was calculated following Renforth (2012). The result was 150 kg t⁻¹ CO₂eq. When the carbonate phase is excluded, this value decreases to 80 kg t⁻¹ CO₂eq. The calculation was based on total CaO and MgO contents in silicate minerals, without accounting for the solubility of each specific mineral phase.

5.6.3 pH stability and soil incubation tests

Regarding the pH stabilization test, the data indicated that variable application rates were required to achieve the target pH levels, and that both dosage and incubation time influenced the pH response. Notably, at 24 and 72 hours, the pH curves showed a trend toward stabilization.

Thus, the application of silicate-based rock powders containing Ca or Mg can raise soil pH through silicate hydrolysis, which releases hydroxyl groups (OH^-) that neutralize soil H^+ ions (Souza et al., 2008). These findings are consistent with other studies showing that remineralizers can act as soil acidity correctives (de Carvalho Ribeiro et al., 2025).

A significant reduction in exchangeable Al^{3+} was also observed, reaching near-zero levels by the end of the experiment, which highlights the corrective effect of the treatments. Silicon in soil interacts with Al^{3+} by releasing species such as $(\text{HSiO}_4)^{3-}$ and OH^- , which form stable complexes or hydroxides with Al^{3+} , thus reducing its toxic forms (de Carvalho Ribeiro et al., 2025).

Soil remineralizers can also improve cation exchange capacity (CEC) by providing Ca^{2+} , Mg^{2+} , and K^+ . Although nutrient release from remineralizers is gradual and residual in nature, many studies support their positive long-term effects for agricultural use (Escosteguy & Klamt, 1998; de Silveira Toscani & Campos, 2017).

Applying rock powders to highly weathered tropical soils is especially beneficial, improving soil chemical properties and offering a high residual effect. In the CPAC-ARG (initial pH 4.6) and CPAC-ARN (initial pH 4.8) soils, which initially exhibited higher acidity, the effects of schist application were particularly evident. Application of schist at dose 2 (520 mg and 134 mg per 40 g of soil, respectively) promoted significant pH increases over 90 days, with performance comparable to that of agricultural lime.

In contrast, the FAB-ARG (initial pH 5.52) and FAB-ARN (initial pH 6.34) soils showed less pronounced effects, likely due to lower initial acidity and degree of weathering (as these samples were collected from saprolite) as well as greater buffering capacity. Additionally, these soils are atypical, collected from a degraded mining area. For example, FAB-ARG exhibited less statistically significant pH changes, and Al^{3+} levels were already naturally low. Nevertheless, both FAB-ARG and FAB-ARN showed consistent increases in Ca^{2+} and Mg^{2+}

levels following shist application, indicating the material's potential as a nutrient source, even in less acidic soils.

Based on the results, schist demonstrates clear potential as a soil conditioner, particularly in acidic, low-fertility environments. Its liming effect, comparable to that of limestone in more acidic soils, along with its ability to supply calcium, magnesium, and essential micronutrients, supports its agronomic viability. However, application strategies must consider soil variability and appropriate dosing to achieve desired outcomes, particularly for acidity neutralization and potassium supply, which was found to be limited.

5.6.4 Comparative Analysis with Reference Studies: Agronomic Performance of Shist-Based

The results obtained with the schists from the Nova Lima Group, evaluated in this study, indicated significant potential for use as soil amendments, particularly due to their capacity to raise soil pH, supply calcium and magnesium, and contribute to CO₂ capture. Comparatively, Castro et al. (2022) assessed the agronomic performance of a remineralizer derived from mica-schist of the Araxá Group, along with another mica-schist-based remineralizer registered with MAPA, both showing similar efficiency in a pearl millet–soybean succession system across two Cerrado soil types. Although the K₂O content in the material studied by Castro et al. was higher (3.47%) compared to the schists evaluated here (less than 1%), the agronomic performance of the mica-schist required increased application rates to match the performance of potassium chloride (KCl), a soluble source. Similarly to the Nova Lima Group schists, sandy soils were more responsive than clayey soils.

In the present study, although the K₂O content was below the minimum required for registration as a remineralizer (REM) under IN 05/2016, the CaO (up to 8.89%) and MgO (up to 18.7%) contents were significantly higher than those reported by Castro et al., justifying the observed efficacy in soil acidity correction and the increase in Ca²⁺ and Mg²⁺ availability, especially in the most acidic soils (CPAC-ARG and CPAC-ARN). Thus, while the mica-schist evaluated by Castro et al. proved to be more effective as a potassium source, the Nova Lima Group schists stood out as efficient soil acidity correctives and sources of calcium and magnesium.

Additionally, Krahl et al. (2022) analyzed nutrient availability over seven successive maize cultivation cycles using biotite-schist and biotite-syenite. The authors observed

continuous release of K, Ca, Mg, Fe, and Mn from the dissolution of minerals such as biotite, chlorite, and clinopyroxene, a paragenesis similar to that observed in this study, which identified actinolite, chlorite, and plagioclase as dominant minerals. Krahl's approach highlights that nutrient release in continuous cropping systems can be sustained by remineralizers with favorable mineralogy, even if they initially present low solubility.

Therefore, although the rocks and experimental approaches differ, the comparison reveals that schists from the Nova Lima Group align with the trend observed by Castro and Krahl, indicating that metamorphic rocks rich in mafic or ferromagnesian minerals can serve as sustainable agricultural inputs, particularly in acidic and base-deficient soils. The limitation regarding K_2O content can be overcome through formulation of blends or complementary use with potassium-rich sources.

5.7 Conclusions

Despite the low potassium content, the analyzed schist samples exhibit excellent potential as soil conditioners, providing macronutrients and potentially contributing to the improvement of soil structure and fertility. According to the mineralogical and geochemical criteria established by Corrêa & Oliveira (2024), the analyzed samples would be classified as Secondary Remineralizer (rich in Ca and Mg) and could also be considered an alternative soil acidity corrector.

The incubation test results revealed increases in Ca^{2+} and Mg^{2+} levels comparable to those obtained with limestone, as well as effective correction of soil acidity, evidenced by the rise in pH and reduction in exchangeable acidity (Al^{3+}). The effectiveness was more pronounced in sandy soils and moderate in clayey soils, likely due to the higher buffering capacity of soils with greater clay content. These findings are promising, indicating that schist may serve as a viable alternative to traditional soil conditioners such as limestone. The strict control of Type I error imparted a confirmatory character to the research, validating the effectiveness of schist as a soil improver.

Furthermore, the potential use of this material as an input for carbon capture is noteworthy, aligning with climate change mitigation strategies. The application of these materials, previously discarded by mining operations, has the potential to transform

environmental liabilities into agricultural and climate assets, promoting a more sustainable and low-impact agriculture.

It is concluded that, although schist powder shows promising potential, especially in sandy soils, the choice between schist and limestone should consider factors such as soil characteristics, the dose required for pH stabilization, and economic feasibility. Additional studies and field-scale experiments are essential for a more comprehensive assessment and for optimizing the application rates of both materials.

6 CONCLUSÕES

Os testes de incubação mostraram que a aplicação de xisto aumentou os níveis de Ca^{2+} , Mg^{2+} , pH do solo e diminuiu a acidez trocável (Al^{3+}), semelhante ao efeito do calcário. Também elevaram cátions trocáveis, CTC efetiva e potencial, soma de bases e saturação por bases.

A eficiência foi mais pronunciada nos solos arenosos e moderada nos solos argilosos, o que pode estar relacionado à maior capacidade tampão dos solos com maior teor de argila. Estes resultados são promissores, indicando que o xisto pode ser uma alternativa viável aos tradicionais condicionadores de solo, como o calcário. O controle rigoroso do erro tipo I conferiu à pesquisa um caráter confirmatório, validando a eficácia do xisto como melhorador de solos.

Conclui-se que, embora o pó de xisto apresente potencial promissor, especialmente em solos arenosos, a escolha entre xisto e calcário deve considerar fatores como a natureza do solo, a dose necessária para estabilização do pH e a viabilidade econômica. Estudos adicionais e experimentos em condições de campo são essenciais para uma avaliação mais abrangente e para a otimização das doses de aplicação de ambos os materiais.

REFERÊNCIAS

Aguilar, C.; Alkmim, F. F.; Lana, C.; Farina, F. Palaeoproterozoic assembly of the São Francisco Craton, SE Brazil: new insights from U–Pb titanite and monazite dating. *Precambrian Research*, v. 289, p. 95-115, 2017.

Alkmim, F. F.; Marshak, S. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, v. 90, n. 1-2, p. 29-58, 1998.

Alkmim, F. F.; Martins-Neto, M. A. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco Craton, Eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, v. 33, p. 127-139, 2012.

Almeida, F. F. M.; Amaral, G.; Cordani, U. G.; Kawashita, K. The Precambrian evolution of the South America cratonic margin South of the Amazon River. In: Nairn, A. E. M.; Stehli, F. G. (eds.). *The ocean basins and margins*. New York: Plenum Publishing, p. 411-446, 1973.

Almeida, F. F. M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B. B.; Fuck, R. A. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Sciences Reviews*, v. 17, p. 1-29, 1981.

Anda – Associação Nacional para Difusão de Adubos. Relatório sobre o mercado de fertilizantes. 2024. Disponível em: http://anda.org.br/pesquisa_setorial/. Acesso em: 16 maio 2025.

Babinski, M.; Chemale Jr., F.; Van Schmus, W. R. The Pb/Pb ages of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Precambrian Research*, v. 72, p. 235-245, 1995.

Basak, B. B.; Sarkar, B.; Naidu, R. Environmentally safe release of plant available potassium and micronutrients from organically amended rock mineral powder. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00677-1>.

Beerling, D. J. et al. Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature*, v. 583, p. 242-248, 2020. DOI: 10.1038/s41586-020-2448-9.

Beerling, D. J. et al. Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. *Nature Plants*, v. 4, p. 138-147, 2018. DOI: 10.1038/s41477-018-0108-y.

Beerling, D. J. et al. Enhanced weathering in the U.S. Corn Belt delivers carbon removal with agronomic benefits. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 121, n. 9, e2319436121, 2024. DOI: 10.1073/pnas.2319436121.

BBC Brasil. Guerra na Ucrânia: por que o Brasil depende tanto dos fertilizantes da Rússia? 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-60596334>. Acesso em: 16 maio 2025.

Brasil. Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. Altera a lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/112890.htm. Acesso em: 16 maio 2025.

Brasil. Presidência da República. Decreto nº 8.384, de 2014. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2014/Decreto/D8384.htm#art1. Acesso em: 16 maio 2025.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 05, de 10 de março de 2016. Disponível em:

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. Acesso em: 16 maio 2025.

Carvalho, A. M. X. Estatística experimental e observacional: uma nova abordagem sobre os métodos clássicos. Uberlândia: Navegando Publicações, 2024. ISBN: 978-65-6070-035-2.

Carvalho, A. M. X.; Mendes, F. Q.; Tavares, L. F. SPEED Stat: a free, intuitive, and minimalist spreadsheet program for statistical analyses of experiments. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v. 20, n. 3, e327420312, 2020. DOI: 10.1590/1984-70332020v20n3s46.

Cavalcanti, J. A. D.; Silva, M. S.; Schobbenhaus, C.; Atencio, D.; Mota de Lima, H. Geoconservation of geological and mining heritage related to banded iron formation of Itabira Group, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: a challenging issue. *International Journal of Geoheritage and Parks*, v. 11, n. 1, p. 118-148, 2023. DOI: 10.1016/j.ijgeop.2022.12.002.

CODEMIG – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero na escala 1:50.000. Belo Horizonte, 2005.

Conover, W. J.; Iman, R. L. Rank transformations as a bridge between parametric and nonparametric statistics. *The American Statistician*, v. 35, n. 3, p. 124-129, 1981.

Corrêa, R. de S. G.; Oliveira, C. G. Stonemeal classification. *Geologia USP - Série Científica*, v. 24, n. 2, p. 23-37, 2024. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v24-222452.

Castro, J. P. V. et al. Eficiência agronômica de remineralizador do solo de micaxisto na sucessão milheto-soja. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 14, e76111435864, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i14.35864.

Churchman, G. J.; Singh, M.; Schapel, A.; Sarkar, B.; Bolan, N. Clay minerals as the key to the sequestration of carbon in soils. *Clays and Clay Minerals*, v. 68, p. 135-143, 2020. DOI: 10.1007/S42860-020-00071-Z.

De Carvalho Ribeiro, M. et al. Residual effect of silicate agromineral application on soil acidity, mineral availability, and soybean anatomy. *Agronomy*, v. 15, n. 1, p. 5, 2024. DOI: 10.3390/agronomy15010005.

De Silveira Toscani, R. G.; Campos, J. E. G. Uso de pó de basalto e rocha fosfatada como remineralizadores em solos intensamente intemperizados. *Geociências*, v. 36, n. 2, p. 259-274, 2017.

Diário do Comércio. Minas lidera produção de remineralizadores do solo e fertilizantes. 2023. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/agronegocio/minas-fertilizantes-lidera-producao/>. Acesso em: 16 maio 2025.

Escosteguy, P. A. V.; Klamt, E. Basalto moído como fonte de nutrientes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 11-20, 1998. DOI: 10.1590/S0100-06831998000100002.

Fernandes, F. R. Chaves; Luz, A. B. Da; Castilhos, Z. C. Agrominerais para o Brasil. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2010.

Fyfe, W. S.; Leonardos, O. H. Global tectonics and resources for man: minerals and agriculture. *Jornal de Mineralogia*, v. 7, p. 51-58, 1978.

Fyfe, W. S. Soil and global change. *Episodes*, v. 12, n. 4, p. 249-254, 1989.

Hartmann, J. et al. Intemperismo químico acelerado como estratégia de geoengenharia para reduzir o dióxido de carbono atmosférico, fornecer nutrientes e mitigar a acidificação oceânica. *Reviews of Geophysics*, v. 51, n. 2, p. 113–149, 2013. DOI: 10.1002/rog.20004.

Hensel, J. Bread from stones: a new and rational system of land fertilization and physical regeneration. New York: A. J. Tafel, 1894.

Hinsinger, P. Bioavailability of inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*, v. 237, p. 173–195, 2001. DOI: 10.1023/A:1013351617532.

Ilchenko, W. Os tufos da Mata da Corda e seu emprego na agricultura. Belo Horizonte: Dep. Prod. Vegetal, Boletim Agricultura, n. 9-10, p. 39–71, 1955.

Kelland, M. E. et al. Increased yield and CO₂ sequestration potential with the C4 cereal Sorghum bicolor cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil. *Global Change Biology*, 2020. DOI: 10.1111/gcb.15089.

Krahl, L. L. et al. Dissolution of silicate minerals and nutrient availability for corn grown successively. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 57, e01467, 2022. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.01467.

Leão, M. F.; Barroso, E. V.; Polivanov, H.; Marques, E. A. G.; Vargas Jr., E. A.; Figueiredo, V. D. Aspectos mineralógicos, químicos e físicos de frente de intemperismo em filito da Formação Batatal, Quadrilátero Ferrífero. *Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ*, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/321926314>.

Leonardos, O. H.; Theodoro, S. H. Fertilizer tropical soils for sustainable development. In: *Proceedings International Workshop on Science for Sustainable Development in Latin America and Caribe*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciência, p. 143-153, 1999.

Leonardos, O. H.; Theodoro, S. H.; Assad, M. L. Remineralization for sustainable agriculture: a tropical perspective from a Brazilian viewpoint. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 56, n. 1, p. 3–9, 2000. DOI: 10.1023/A:1009855409700.

Lefebvre, D. et al. Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through life cycle assessment: a case study for Sao Paulo State, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 233, n. 2, p. 468–481, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.099.

Lichts, T.; Sander, A.; Carames, M. G. da S.; Daubermann, B. B.; Decker, J. T.; Modolo, R. C. E. A utilização de resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais de uma marmoraria de

São Leopoldo com a finalidade de remineralização de solos. In: *Anais do XI Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia*, Bento Gonçalves, 2019.

Machado, R. V.; Ribeiro, R. C. C.; Andrade, F. V. Nutrição mineral e a utilização de resíduos de rochas ornamentais. In: *Anais da XVII Jornada de Iniciação Científica*, UFES-CETEM. Vitória, p. 130–136, 2008.

Martins, É. S.; Oliveira, C. G. de; Resende, A. V. de; Matos, M. S. F. Agrominerais – rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. In: Luz, A. B.; Lins, A. F. (eds.). *Rochas & Minerais Industriais*. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 205–222, 2008.

Martins, É. S.; Resende, A. V.; Oliveira, C. G.; Furtini Neto, A. E. Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solo. In: Fernandes, F. R. C.; Luz, A. B.; Castilhos, Z. C. (eds.). *Agrominerais para o Brasil*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 89–104, 2010. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/907/1/cap5.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2023.

Martins, É. S. Construindo o solo agrícola com agrominerais regionais – Apresentação feita na Vale em 2018. Embrapa – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2018.

Martins, É. S.; Martins, E. de S.; Haridoim, P. R. Princípios geoquímicos, mineralógicos e biológicos do manejo de remineralizadores de solo. p. 26–39, 2022.

Martins, É. S.; Theodoro, S. H.; Gonçalves, B. F. F.; Vaghetti, L. A.; Silva, S. D.; Antônio, T.; Antônio, A.; C. J. C. D. Produção Brasileira de Remineralizadores. *Revista Novo Solo*, Abrefen-Ed6, p. 14–29, 2024.

Middlemost, E. A. K. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, v. 37, p. 215–224, 1994.

Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. *Plano Nacional de Fertilizantes 2025*. Brasília: s.n., 2022.

Prado, E. M. G.; Martins, É. S. *Zoneamento agrogeológico do Brasil*. Brasília: s.n., 2019.

Primavessi, A. *Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais*. São Paulo: Ed. Nobel, 1988. 550 p. ISBN 85-213-0004-2.

Renforth, P. The potential of enhanced weathering in the UK. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 10, p. 229–243, 2012. DOI: 10.1016/j.ijggc.2012.06.011.

Renforth, P.; Pogge Von Strandmann, P. A. E.; Henderson, G. M. The dissolution of olivine added to soil: implications for enhanced weathering. *Applied Geochemistry*, v. 61, p. 109–118, 2015. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.05.016.

Renforth, P. The negative emission potential of alkaline materials. *Nature Communications*, v. 10, art. 1401, 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-09475-5.

VALE. *Relatório Aproveitamento de Rochas Estéreis como Remineralizadores de Solo*, 2019.

VALE. *Relatório Planejamento Estratégico – Vale Master Plan*, 2024.

Renger, F. E. et al. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma. de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, 1994.

Rossi, D. Q.; Endo, I.; Gabriel, E. G. Structural framework of the iron district of Itabira, iron quadrangle, Minas Gerais. *Revista Escola de Minas*, v. 72, p. 39–45, 2019. DOI: 10.1590/0370-44672017720108.

Silveira, A. P. L. B. A. et al. *Protocolo para avaliação da eficiência agronômica de remineralizadores de solo – primeira versão*. Embrapa, 2019.

Setiawati, T. C.; Mutmainnah, L. Solubilization of potassium containing mineral by microorganisms from sugarcane rhizosphere. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, v. 9, p. 108–117, 2016. DOI: 10.1016/j.aaspro.2016.02.134.

Silva, A. M. et al. Mafic dyke swarms of the Quadrilátero Ferrífero and Espinhaço range, MG, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 25, p. 124–137, 1995.

Sobral, L. F. et al. *Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos*. Embrapa Tabuleiros Costeiros, 15 p., 2015. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1042994>. Acesso em: 01 ago. 2023.

Souza, R. F. D. et al. Atributos químicos de solos influenciados pela substituição do carbonato por silicato de cálcio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 1563–1572, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000400020.

Teixeira, P. C.; Donagemma, K.; Fontana, A.; Geraldês, W. *Revisão e ampliada*. Embrapa, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br>.

Theodoro, S. H.; Leonardos, O. H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 78, n. 4, p. 721–730, 2006. DOI: 10.1590/S0001-37652006000400007.

Theodoro, S. H.; Leonardos, O. H. Rochagem: uma questão de soberania nacional – XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica, Gramado, RS, 2011. p. 337–340.

Theodoro, S. H. et al. Soil remineralization and recovery of degraded areas: an experience in the tropical region. *Journal of South American Earth Sciences*, 2021. DOI: 10.1016/j.jsames.2020.103014.

Theodoro, S. H. *Anais IVCBR 2021: Ressignificando a Rochagem*, p. 15, 2021.

Van Straaten, P. *Rocks for crops: agrominerals of sub-Saharan Africa*. Nairobi: ICRAF, 2002. 338 p.

Van Straaten, P. *Agrogeology: the use of rocks for crops*. Enviroquest Ltd., 2007.

Viana, L. S. B.; Caitano, T. B. S.; Pontes, A. N. A remineralização de solos como iniciativa ao desenvolvimento sustentável. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 14, p. 1–11, 2021.

APÊNDICE A - DADOS DO ENSAIO DE ESTABILIZAÇÃO DE PH.

Solo	Dose (mg)	Aplicado (mg)	Rep	pH-1hr	pH-24hr	pH-72hr	pH-72hr
A-CPAC Arn	0	0,0	1	4,31	4,41	4,64	4,37
A-CPAC Arn	0	0,0	2	4,31	4,44	4,66	4,39
A-CPAC Arn	0	0,0	3	4,33	4,47	4,71	4,36
A-CPAC Arn	25	25,6	1	5,29	5,41	5,79	5,51
A-CPAC Arn	25	25,3	2	5,33	5,51	5,87	5,58
A-CPAC Arn	25	25,0	3	5,24	5,49	5,82	5,61
A-CPAC Arn	50	50,5	1	5,61	5,87	6,22	6,1
A-CPAC Arn	50	50,2	2	5,73	5,92	6,31	6,09
A-CPAC Arn	50	50,0	3	5,66	5,84	6,19	6,07
A-CPAC Arn	75	75,0	1	5,79	6,01	6,36	6,2
A-CPAC Arn	75	75,4	2	5,82	5,99	6,33	6,19
A-CPAC Arn	75	75,1	3	5,86	6,01	6,38	6,24
A-CPAC Arn	100	101,0	1	5,98	6,16	6,47	6,35
A-CPAC Arn	100	101,0	2	5,92	6,09	6,47	6,36
A-CPAC Arn	100	100,0	3	5,86	5,96	6,34	6,2
A-CPAC Arn	125	125,0	1	6,06	6,18	6,48	6,41
A-CPAC Arn	125	125,5	2	6,03	6,23	6,58	6,47
A-CPAC Arn	125	125,3	3	6,04	6,22	6,58	6,49
A-CPAC Arn	CALC	21,5	1	6,08	6,38	6,69	6,62
A-CPAC Arn	CALC	21,6	2	6,11	6,36	6,71	6,62
A-CPAC Arn	CALC	21,5	3	6,15	6,36	6,71	6,7
B-CPAC-Arg	0	0,0	1	4,5	4,55	4,72	4,2
B-CPAC-Arg	0	0,0	2	4,5	4,59	4,73	4,14
B-CPAC-Arg	0	0,0	3	4,54	4,64	4,78	4,12
B-CPAC-Arg	25	25,4	1	5,12	5,12	5,24	4,4
B-CPAC-Arg	25	25,7	2	4,9	5,00	5,11	4,43
B-CPAC-Arg	25	25,5	3	5,00	4,99	5,11	4,45
B-CPAC-Arg	50	50,2	1	5,16	5,21	5,36	4,75
B-CPAC-Arg	50	51,2	2	5,24	5,28	5,43	4,86
B-CPAC-Arg	50	51,4	3	5,33	5,31	5,5	4,91
B-CPAC-Arg	100	102,7	1	5,53	5,63	5,88	5,5
B-CPAC-Arg	100	100,5	2	5,52	5,64	5,86	5,48
B-CPAC-Arg	100	100,7	3	5,55	5,65	5,83	5,5
B-CPAC-Arg	150	153,4	1	5,73	5,88	6,12	5,89
B-CPAC-Arg	150	153,7	2	5,8	5,91	6,14	5,94
B-CPAC-Arg	150	149,7	3	5,75	5,88	6,16	5,91
B-CPAC-Arg	200	201,1	1	5,74	5,93	6,21	6,08
B-CPAC-Arg	200	199,2	2	5,73	5,94	6,2	6,11
B-CPAC-Arg	200	200,3	3	5,79	5,93	6,21	6,07
B-CPAC-Arg	CALC	30,5	1	5,8	5,93	6,1	5,99
B-CPAC-Arg	CALC	30,4	2	5,88	5,99	6,25	6,14
B-CPAC-Arg	CALC	30,5	3	5,76	5,95	6,25	6,12

C-FAB-Arn	0	0,0	1	5,26	5,1	5,12	5,08
C-FAB-Arn	0	0,0	2	5,22	5,1	5,16	5,11
C-FAB-Arn	0	0,0	3	5,24	5,14	5,18	5,04
C-FAB-Arn	25	25,3	1	6,32	6,84	7,3	7,11
C-FAB-Arn	25	25,2	2	6,36	6,86	7,26	7,24
C-FAB-Arn	25	25,2	3	6,25	6,95	7,33	7,26
C-FAB-Arn	50	50,6	1	6,61	7,23	7,54	7,52
C-FAB-Arn	50	50,5	2	6,67	7,25	7,62	7,62
C-FAB-Arn	50	50,4	3	6,69	7,3	7,64	7,62
C-FAB-Arn	75	75,0	1	6,75	7,47	7,68	7,63
C-FAB-Arn	75	75,5	2	6,85	7,42	7,75	7,65
C-FAB-Arn	75	75,0	3	6,89	7,47	7,78	7,7
C-FAB-Arn	100	100,5	1	7,03	7,56	7,87	7,79
C-FAB-Arn	100	101,0	2	7,09	7,57	7,87	7,82
C-FAB-Arn	100	100,2	3	7,12	7,62	7,87	7,78
C-FAB-Arn	125	124,2	1	7,17	7,67	7,95	7,86
C-FAB-Arn	125	124,9	2	7,31	7,71	7,95	7,74
C-FAB-Arn	125	125,9	3	7,33	7,75	7,95	7,74
C-FAB-Arn	CALC	3,6	1	6,14	6,87	7,33	7,39
C-FAB-Arn	CALC	3,5	2	6,27	6,93	7,36	7,48
C-FAB-Arn	CALC	3,5	3	6,28	7,03	7,38	7,53
D-FAB-Arg	0	0,0	1	5,57	5,32	5,4	4,36
D-FAB-Arg	0	0,0	2	5,41	5,41	5,54	4,3
D-FAB-Arg	0	0,0	3	5,31	5,36	5,47	4,27
D-FAB-Arg	25	24,0	1	5,47	5,35	5,46	4,48
D-FAB-Arg	25	25,5	2	5,41	5,38	5,46	4,52
D-FAB-Arg	25	26,4	3	5,38	5,36	5,48	4,5
D-FAB-Arg	50	52,1	1	5,47	5,44	5,61	5,27
D-FAB-Arg	50	53,5	2	5,43	5,46	5,67	5,47
D-FAB-Arg	50	52,5	3	5,43	5,47	5,64	5,31
D-FAB-Arg	100	98,2	1	5,56	5,78	6,3	6,39
D-FAB-Arg	100	98,7	2	5,52	5,85	6,26	6,34
D-FAB-Arg	100	102,1	3	5,53	5,91	6,4	6,44
D-FAB-Arg	150	153,6	1	5,68	6,2	6,94	6,78
D-FAB-Arg	150	153,6	2	5,66	6,18	6,86	6,8
D-FAB-Arg	150	152,5	3	5,55	6,15	6,95	6,88
D-FAB-Arg	200	202,0	1	5,73	6,4	7,17	7,02
D-FAB-Arg	200	202,5	2	5,76	6,4	7,08	7,00
D-FAB-Arg	200	201,4	3	5,72	6,38	7,19	7,04
D-FAB-Arg	CALC	17,0	1	5,67	5,84	6,13	6,28
D-FAB-Arg	CALC	17,0	2	5,56	5,72	6,04	6,15
D-FAB-Arg	CALC	16,8	3	5,53	5,72	5,89	5,79

APÊNDICE B - DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.

Tratamento	Dose Xisto (mg/40 g)	Dose calcário (mg/40 g)	ID Lab 30d			ID Lab 60d			ID Lab 90d		
A CPAC ARN Testemunha	-	-	1	2	3	13	14	15	25	26	27
A CPAC ARN pH 5,5	62,4	-	4	5	6	16	17	18	28	29	30
A CPAC ARN pH 6,0	134,4	-	7	8	9	19	20	21	31	32	33
A CPAC ARN Calcário	-	42,8	10	11	12	22	23	24	34	35	36
B CPAC ARG Testemunha	-	-	1	2	3	13	14	15	25	26	27
B CPAC ARG pH 5,5	218,4	-	4	5	6	16	17	18	28	29	30
B CPAC ARG pH 6,0	520	-	7	8	9	19	20	21	31	32	33
B CPAC ARG Calcário	-	60,8	10	11	12	22	23	24	34	35	36
C FAB ARN Testemunha	-	-	1	2	3	13	14	15	25	26	27
C FAB ARN pH 5,5	9,2	-	4	5	6	16	17	18	28	29	30
C FAB ARN pH 6,0	25,6	-	7	8	9	19	20	21	31	32	33
C FAB ARN Calcário	-	7,2	10	11	12	22	23	24	34	35	36
D FAB ARG Testemunha	-	-	1	2	3	13	14	15	25	26	27
D FAB ARG pH 5,5	54,4	-	4	5	6	16	17	18	28	29	30
D FAB ARG pH 6,0	307,2	-	7	8	9	19	20	21	31	32	33
D FAB ARG Calcário	-	34	10	11	12	22	23	24	34	35	36

APÊNDICE C - Dados do Ensaio de Incubação solo e rocha.

Amostras	Al - trocável (Titulometria)	Ca (Absorção Atômica)	H+Al - Acidez Titulável (Titulometria)	K (Fotômetro de Chama)	Mg (Absorção Atômica)	pH em água	pH em CaCl2
	me/100cc	me/100cc	me/100cc	mg/l	me/100cc		
1 - A1	0,62	0,13	2,25	27,83	0,08	3,36	3,56
2 - A2	0,59	0,06	3,27	33,38	0,05	3,44	3,53
3 - A3	0,71	0,04	3,74	36,12	0,05	3,22	3,49
4 - A4	0,37	0,31	4,3	41,58	0,21	3,85	3,79
5 - A5	0,35	0,31	3,63	33,29	0,22	3,91	3,87
6 - A6	0,37	0,3	3,55	35	0,2	4,05	3,88
7 - A7	0,26	0,65	3,25	45,79	0,4	4,34	4,26
8 - A8	0,23	0,9	3,25	41,72	0,35	4,49	4,32
9 - A9	0,09	0,61	2,27	42,89	0,38	4,59	4,38
10 - A10	0,15	0,7	2,72	37,24	0,59	4,86	4,64
11 - A11	0,12	0,8	2,4	29,31	0,69	4,98	4,81
12 - A12	0,05	0,9	1,93	28,71	0,73	5,12	4,94
13 - A13	0,82	0,06	4,18	34,12	0,07	3,07	3,39
14 - A14	0,75	0,04	3,8	29,11	0,05	2,95	3,37
15 - A15	0,89	0,04	3,35	32,15	0,05	2,93	3,33
16 - A16	0,61	0,32	3,53	36,38	0,21	3,79	3,76
17 - A17	0,49	0,31	3,27	33,47	0,21	3,88	3,79
18 - A18	0,47	0,33	3,63	38,7	0,23	3,89	3,75
19 - A19	0,08	0,6	3,07	42,36	0,37	4,39	4,23
20 - A20	0,14	0,63	2,98	43,73	0,38	4,46	4,27
21 - A21	0,11	0,7	2,78	39,31	0,47	4,59	4,28
22 - A22	0,11	0,88	2,72	30,92	0,69	4,79	4,64
23 - A23	0,02	0,85	3,09	31,56	0,71	4,95	4,72
24 - A24	0,03	0,87	2,46	32,49	0,72	5,01	4,81
25 - A25	0,83	0,06	3,92	30,1	0,06	2,97	3,39
26 - A26	0,79	0,03	3,31	30,28	0,04	2,93	3,32
27 - A27	0,78	0,03	4,55	30,92	0,04	2,96	3,34
28 - A28	0,39	0,36	3,23	36,74	0,24	3,82	3,74
29 - A29	0,37	0,33	3,33	32,62	0,22	3,89	3,77
30 - A30	0,41	0,37	3,76	29,44	0,26	3,91	3,79
31 - A31	0,25	0,65	2,92	36,87	0,39	4,38	4,22
32 - A32	0,25	0,57	2,86	31,02	0,35	4,47	4,27
33 - A33	0,16	0,69	2,98	35,88	0,44	4,53	4,24
34 - A34	0,05	0,83	2,64	24,24	0,72	4,82	4,59
35 - A35	0,03	0,83	2,6	24,57	0,68	4,92	4,69
36 - A36	0,03	0,91	2,33	24,6	0,74	5,02	4,82
37 - B1	1,33	0,09	8,49	32,75	0,14	3,91	3,51
38 - B2	1,38	0,07	8,51	27,9	0,13	3,79	3,51
39 - B3	1,48	0,07	8,47	36,16	0,13	3,79	3,52

40 - B4	0,59	0,8	7,37	31,55	0,54	4,18	3,95
41 - B5	0,52	0,86	7,39	29,14	0,55	4,16	3,96
42 - B6	0,63	0,8	7,35	33,76	0,53	4,14	3,93
43 - B7	0,31	1,54	6,56	44,66	0,8	4,65	4,39
44 - B8	0,09	1,73	5,87	39,91	0,85	4,69	4,46
45 - B9	0,14	1,61	5,87	65,15	0,89	4,75	4,51
46 - B10	0,51	0,9	6,66	36,59	0,74	4,59	4,22
47 - B11	0,28	1,12	7,04	37,93	0,84	4,63	4,29
48 - B12	0,41	0,96	6,41	41,77	0,77	4,63	4,26
49 - B13	1,65	0,07	8,77	38,08	0,13	3,32	3,45
50 - B14	1,6	0,06	8,53	34,62	0,12	3,26	3,45
51 - B15	1,55	0,08	8,69	38,45	0,13	3,31	3,45
52 - B16	0,75	0,89	7,71	54,23	0,6	3,99	3,85
53 - B17	0,78	0,83	7,47	48,28	0,54	4,01	3,96
54 - B18	0,81	0,79	7,41	48,94	0,52	3,99	3,82
55 - B19	0,52	1,44	6,29	55,5	0,76	5,02	4,64
56 - B20	0,1	1,73	5,87	66,08	0,93	4,88	4,64
57 - B21	0,1	1,71	6,23	63,67	0,81	4,84	4,57
58 - B22	0,61	0,81	7,33	38,05	0,66	4,35	3,99
59 - B23	0,37	0,98	6,82	37,2	0,8	4,38	3,08
60 - B24	0,37	1,24	6,74	47,84	0,95	4,46	4,23
61 - B25	1,74	0,07	8,73	38,37	0,12	3,21	3,43
62 - B26	1,98	0,1	8,97	39,37	0,14	3,13	3,39
63 - B27	1,94	0,08	8,93	41,59	0,13	3,19	3,42
64 - B28	0,61	0,84	7,59	48,4	0,55	3,92	3,84
65 - B29	0,59	0,85	7,61	48,16	0,54	4,65	3,69
66 - B30	0,7	0,81	7,65	51,73	0,53	4,32	3,66
67 - B31	0,2	1,82	6,21	79,73	0,88	4,85	4,36
68 - B32	0,2	1,79	6,8	70,86	0,89	4,95	4,49
69 - B33	0,2	1,91	6,29	70,8	0,95	4,99	4,56
70 - B34	0,38	1,2	7,29	42,31	0,95	4,87	4,31
71 - B35	0,51	1,19	7,33	46,9	0,88	4,82	4,23
72 - B36	0,37	1,15	7,31	41,07	0,89	4,79	4,17
73 - C1	1,15	0,18	0,81	8,7	0,06	5,68	4,32
74 - C2	1,18	0,15	0,67	9,04	0,06	5,71	4,23
75 - C3	1,09	0,14	0,55	10,86	0,05	5,64	4,28
76 - C4	0,88	0,33	0,51	10,91	0,15	5,67	4,85
77 - C5	0,77	0,35	0,16	9,25	0,16	5,59	4,98
78 - C6	0,89	0,33	0,77	12,93	0,16	5,57	5,04
79 - C7	0,02	1,18	0,49	11,56	0,55	5,58	5,58
80 - C8	0,01	1,12	0,59	14,6	0,51	5,69	5,69
81 - C9	0,03	1,08	0,59	11,23	0,51	5,79	5,71
82 - C10	0,37	0,54	0,24	18,43	0,35	5,98	6,02
83 - C11	0,39	0,54	0,39	8,84	0,35	6,11	6,06
84 - C12	0,35	0,57	0,28	9,94	0,37	6,18	6,23
85 - C13	1,29	0,15	0,75	10,48	0,06	5,39	4,26

86 - C14	1,18	0,15	0,63	7,96	0,05	5,29	4,15
87 - C15	1,27	0,15	0,69	11,1	0,05	5,21	4,13
88 - C16	0,89	0,31	0,77	10,5	0,14	5,09	4,46
89 - C17	0,92	0,33	0,83	13,63	0,15	4,02	4,66
90 - C18	0,82	0,33	0,67	10,96	0,15	4,04	4,69
91 - C19	0,15	1,07	0,39	10,9	0,52	4,59	5,27
92 - C20	0,14	1,14	0,41	12,1	0,53	4,88	5,51
93 - C21	0,12	1,04	0,49	11,88	0,47	4,99	5,61
94 - C22	0,38	0,56	0,26	9,01	0,35	5,89	6,01
95 - C23	0,15	0,77	0,43	11,17	0,52	5,77	6,24
96 - C24	0,25	0,59	0,22	11,02	0,38	5,89	6,28
97 - C25	1,27	0,15	0,41	10,26	0,06	4,59	4,34
98 - C26	1,33	0,15	0,69	12,05	0,05	4,24	4,28
99 - C27	1,2	0,15	0,41	8,33	0,06	4,19	4,22
100 - C28	0,88	0,34	0,59	12,32	0,15	4,27	4,57
101 - C29	0,77	0,46	0,73	9,6	0,22	4,23	4,58
102 - C30	0,83	0,36	0,69	10,28	0,17	4,24	4,66
103 - C31	0,03	1,27	0,63	11,89	0,58	4,46	5,47
104 - C32	0,05	1,22	0,61	11,86	0,55	4,69	5,57
105 - C33	0,07	1,3	0,75	11,72	0,6	4,92	5,64
106 - C34	0,11	0,75	0,65	10,99	0,51	5,38	5,87
107 - C35	0,07	0,9	0,32	9,28	0,6	5,69	6,18
108 - C36	0,21	0,67	0,45	10,71	0,42	5,79	6,21
109 - D1	0,14	0,15	3,15	21,83	0,05	5,05	3,74
110 - D2	0,07	0,14	3,11	21,28	0,05	4,97	3,71
111 - D3	0,15	0,15	2,9	17,46	0,05	4,72	3,71
112 - D4	0,01	0,21	2,78	17,31	0,08	4,59	3,84
113 - D5	0,01	0,23	2,72	14,35	0,09	4,59	3,83
114 - D6	0,02	0,22	2,78	17,33	0,08	4,57	3,76
115 - D7	0,02	0,29	1,44	34,23	0,12	4,49	4,49
116 - D8	0,04	0,29	1,08	30,45	0,12	4,58	5,08
117 - D9	0,07	0,29	1,02	27,19	0,12	4,67	5,82
118 - D10	0,06	0,31	2,23	16,58	0,16	4,73	4,11
119 - D11	0,03	0,31	2,03	14,81	0,15	4,69	4,15
120 - D12	0,03	0,34	1,97	18,34	0,17	4,72	4,05
121 - D13	0,08	0,16	2,86	14,77	0,05	4,81	3,69
122 - D14	0,11	0,16	3,02	15,87	0,05	4,75	3,71
123 - D15	0,11	0,17	2,9	16	0,05	4,69	3,69
124 - D16	0,15	0,23	2,29	18,47	0,08	4,69	3,78
125 - D17	0,1	0,23	2,6	18,78	0,08	4,66	3,78
126 - D18	0,11	0,22	3,07	17,48	0,09	4,67	3,81
127 - D19	0,06	0,3	1,95	30,26	0,12	4,61	5,19
128 - D20	0,06	0,29	1,02	24,92	0,12	4,72	5,51
129 - D21	0,06	0,29	1,26	25,63	0,12	4,77	5,24
130 - D22	0,03	0,34	2,07	15,62	0,18	4,81	4,23
131 - D23	0,03	0,34	1,66	15,93	0,18	5,42	4,01

132 - D24	0,03	0,35	1,97	17,63	0,18	5,59	3,99
133 - D25	0,03	0,17	3,15	15,45	0,06	5,94	3,37
134 - D26	0,05	0,17	3,13	16,43	0,06	5,73	3,41
135 - D27	0,05	0,17	3,31	15,09	0,06	5,54	3,46
136 - D28	0,03	0,22	2,68	16,71	0,08	5,44	3,58
137 - D29	0,04	0,23	2,31	16,32	0,09	5,49	3,56
138 - D30	0,04	0,23	2,07	18,62	0,08	5,26	3,56
139 - D31	0,03	0,3	1,24	29,57	0,12	5,42	3,69
140 - D32	0,06	0,3	0,95	30,78	0,12	5,49	3,71
141 - D33	0,11	0,29	0,89	27,58	0,12	5,59	3,75
142 - D34	0,03	0,31	1,44	12,8	0,17	5,62	4,67
143 - D35	0,07	0,39	1,3	18,84	0,2	5,58	4,61
144 - D36	0,04	0,34	1,42	14,34	0,18	5,55	4,69

Amostras	CTC (total) (Ca+Mg+(K/3 91) +(H+Al)	CTC (efetiva) (Ca+Mg+(K/3 91) +Al)	SB (Ca+Mg+(K/3 91))	V% (100 x SB/CTC (total)
1 - A1	2,53	0,9	0,28	11,07
2 - A2	3,46	0,78	0,19	5,55
3 - A3	3,91	0,89	0,18	4,59
4 - A4	4,93	0,99	0,62	12,65
5 - A5	4,25	0,96	0,61	14,42
6 - A6	4,15	0,96	0,6	14,4
7 - A7	4,41	1,42	1,16	26,39
8 - A8	4,61	1,59	1,36	29,51
9 - A9	3,37	1,18	1,1	32,58
10 - A10	4,11	1,54	1,39	33,85
11 - A11	3,97	1,69	1,57	39,59
12 - A12	3,63	1,75	1,7	46,89
13 - A13	4,4	1,03	0,22	4,95
14 - A14	3,96	0,91	0,16	4,15
15 - A15	3,51	1,05	0,16	4,64
16 - A16	4,16	1,23	0,62	15,03
17 - A17	3,87	1,09	0,6	15,56
18 - A18	4,3	1,13	0,66	15,44
19 - A19	4,15	1,16	1,08	26,1
20 - A20	4,1	1,26	1,12	27,28
21 - A21	4,05	1,38	1,27	31,38
22 - A22	4,37	1,76	1,65	37,82
23 - A23	4,73	1,66	1,64	34,73
24 - A24	4,12	1,69	1,67	40,41
25 - A25	4,12	1,02	0,2	4,83
26 - A26	3,46	0,94	0,15	4,43
27 - A27	4,7	0,93	0,15	3,26
28 - A28	3,92	1,08	0,69	17,65
29 - A29	3,97	1	0,64	16,09
30 - A30	4,47	1,12	0,71	15,93
31 - A31	4,06	1,38	1,14	28
32 - A32	3,86	1,24	1	25,85
33 - A33	4,21	1,38	1,22	29,08
34 - A34	4,25	1,65	1,61	37,87
35 - A35	4,16	1,59	1,57	37,61
36 - A36	4,05	1,74	1,72	42,38
37 - B1	8,8	1,64	0,31	3,55
38 - B2	8,77	1,64	0,27	3,05
39 - B3	8,75	1,76	0,29	3,28
40 - B4	8,79	2	1,42	16,13
41 - B5	8,87	2	1,48	16,71
42 - B6	8,77	2,05	1,42	16,19
43 - B7	9,02	2,76	2,46	27,27
44 - B8	8,55	2,77	2,68	31,36
45 - B9	8,54	2,81	2,67	31,31
46 - B10	8,4	2,24	1,74	20,7
47 - B11	9,1	2,33	2,05	22,56

48 - B12	8,26	2,25	1,84	22,3
49 - B13	9,06	1,94	0,29	3,25
50 - B14	8,79	1,86	0,27	3,04
51 - B15	8,99	1,85	0,31	3,39
52 - B16	9,34	2,38	1,63	17,45
53 - B17	8,96	2,27	1,49	16,67
54 - B18	8,85	2,25	1,44	16,3
55 - B19	8,63	2,85	2,34	27,09
56 - B20	8,7	2,93	2,84	32,59
57 - B21	8,91	2,77	2,68	30,05
58 - B22	8,9	2,17	1,57	17,62
59 - B23	8,71	2,25	1,88	21,65
60 - B24	9,05	2,68	2,31	25,54
61 - B25	9,02	2,03	0,29	3,24
62 - B26	9,31	2,31	0,34	3,64
63 - B27	9,25	2,25	0,32	3,42
64 - B28	9,11	2,13	1,52	16,68
65 - B29	9,12	2,1	1,51	16,56
66 - B30	9,13	2,17	1,47	16,14
67 - B31	9,12	3,1	2,91	31,87
68 - B32	9,66	3,06	2,86	29,63
69 - B33	9,33	3,23	3,04	32,55
70 - B34	9,55	2,63	2,26	23,66
71 - B35	9,52	2,69	2,19	22,99
72 - B36	9,45	2,51	2,14	22,67
73 - C1	1,08	1,41	0,26	24,54
74 - C2	0,9	1,41	0,23	25,87
75 - C3	0,77	1,31	0,22	28,62
76 - C4	1,02	1,38	0,51	50,06
77 - C5	0,7	1,31	0,54	76,85
78 - C6	1,29	1,4	0,52	40,2
79 - C7	2,25	1,78	1,76	78,32
80 - C8	2,25	1,68	1,66	73,87
81 - C9	2,21	1,65	1,62	73,3
82 - C10	1,19	1,31	0,94	79,5
83 - C11	1,29	1,29	0,91	70,13
84 - C12	1,26	1,32	0,97	77,38
85 - C13	0,99	1,52	0,24	23,97
86 - C14	0,85	1,4	0,22	26,19
87 - C15	0,92	1,49	0,23	24,91
88 - C16	1,25	1,37	0,48	38,38
89 - C17	1,35	1,43	0,52	38,26
90 - C18	1,18	1,32	0,51	43,11
91 - C19	2	1,76	1,62	80,74
92 - C20	2,11	1,84	1,7	80,72
93 - C21	2,03	1,66	1,54	76
94 - C22	1,2	1,31	0,93	77,96
95 - C23	1,74	1,46	1,31	75,5
96 - C24	1,22	1,25	1	81,75
97 - C25	0,64	1,5	0,23	36,18
98 - C26	0,93	1,56	0,24	25,57

99 - C27	0,63	1,42	0,23	36,02
100 - C28	1,11	1,4	0,52	47,01
101 - C29	1,43	1,47	0,7	49,01
102 - C30	1,24	1,38	0,55	44,41
103 - C31	2,51	1,91	1,88	74,95
104 - C32	2,41	1,85	1,8	74,73
105 - C33	2,68	1,99	1,93	71,97
106 - C34	1,94	1,4	1,29	66,56
107 - C35	1,85	1,59	1,52	82,44
108 - C36	1,56	1,32	1,12	71,44
109 - D1	3,41	0,4	0,26	7,72
110 - D2	3,35	0,31	0,25	7,38
111 - D3	3,15	0,39	0,25	7,88
112 - D4	3,11	0,34	0,33	10,71
113 - D5	3,07	0,36	0,35	11,47
114 - D6	3,13	0,36	0,35	11,11
115 - D7	1,94	0,52	0,5	25,78
116 - D8	1,56	0,52	0,49	31,14
117 - D9	1,49	0,54	0,48	32,03
118 - D10	2,75	0,57	0,51	18,74
119 - D11	2,52	0,52	0,49	19,55
120 - D12	2,52	0,58	0,56	21,99
121 - D13	3,11	0,33	0,25	8,11
122 - D14	3,28	0,36	0,26	7,83
123 - D15	3,16	0,36	0,26	8,13
124 - D16	2,65	0,5	0,36	13,45
125 - D17	2,96	0,45	0,36	12,14
126 - D18	3,42	0,46	0,35	10,37
127 - D19	2,45	0,55	0,5	20,35
128 - D20	1,48	0,52	0,47	31,51
129 - D21	1,73	0,53	0,48	27,41
130 - D22	2,62	0,58	0,55	21,04
131 - D23	2,23	0,59	0,56	25,25
132 - D24	2,54	0,6	0,57	22,57
133 - D25	3,41	0,29	0,26	7,72
134 - D26	3,39	0,31	0,27	7,82
135 - D27	3,57	0,31	0,27	7,43
136 - D28	3,03	0,38	0,35	11,57
137 - D29	2,67	0,39	0,35	13,22
138 - D30	2,43	0,39	0,36	14,68
139 - D31	1,73	0,52	0,49	28,43
140 - D32	1,45	0,55	0,49	34,14
141 - D33	1,37	0,59	0,48	34,91
142 - D34	1,95	0,54	0,51	26,23
143 - D35	1,94	0,71	0,64	33,06
144 - D36	1,97	0,59	0,55	27,89