

Artigo de Pesquisa

Potencial de captura de CO₂ atmosférico por intemperismo aprimorado em Mato Grosso: estudo de casos

Potential of atmospheric CO₂ capture by enhanced weathering in Mato Grosso: case study

Aline Jôse Santos de Moraes¹, Ronaldo Pierosan^{1,2}, Eder de Souza Martins³, Victória Hayane Silva Assis Muniz⁴, Maurício Faustino de Lima⁴

¹Programa de Pós-Graduação em Geociências, Faculdade de Geociências, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil. E-mail. alinequimica3@gmail.com

²Grupo de Pesquisa Geociências de Mato Grosso - GEOMATO, Faculdade de Geociências, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil. E-mail. ronaldo.pierosan@ufmt.br

³Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Cerrados, Brasília, Brasil. E-mail. eder.martins@embrapa.br

⁴Curso de Graduação em Geologia, Faculdade de Geociências, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil. E-mail. rayanni11@hotmail.com, mauriciofaustino095@gmail.com

Resumo: O uso de remineralizadores de solo (REM) é uma prática antiga que ganha destaque como alternativa sustentável e complementar aos fertilizantes sintéticos. Os REM fornecem gradualmente elementos essenciais para o crescimento das plantas, simulando processos naturais de regeneração do solo. Além de sua eficiência, essa abordagem possui baixos custos e benefícios adicionais, como o aprimoramento do enriquecimento nutricional das culturas, manutenção e o aumento da produção agrícola. No Brasil, onde a agricultura é vital para a economia, a pesquisa e regulamentação dos REM têm avançado, com 77 produtos registrados no Ministério da Agricultura. O agravamento do efeito estufa impulsiona a busca por estratégias de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). A agricultura é uma fonte significativa de emissões de CO₂, particularmente no Brasil, onde as práticas agrícolas contribuem consideravelmente com as emissões de GEE. Assim, é fundamental adotar práticas de manejo sustentáveis para tornar uma agricultura mais competitiva e ambientalmente amigável. O uso de REM, no contexto do Intemperismo Aprimorado (IA), surge como uma técnica promissora de captura de CO₂ atmosférico, estimulando o crescimento de plantas e aumentando o sequestro de carbono no solo. Este estudo analisou duas ocorrências geológicas distintas no estado de Mato Grosso: Grupo Colíder e Complexo Alcalino Planalto da Serra. Os resultados indicam que as amostras possuem grande potencial para remover CO₂ da atmosfera, com valores de 39,53 kgCO₂/t até 96,16 kgCO₂/t. Isso sugere que o IA é uma técnica eficaz para a mitigação das mudanças climáticas e que as rochas estudadas têm um papel crucial nesse processo. No futuro, o IA poderá fazer parte de um conjunto de estratégias de controle das emissões de GEE e combate as mudanças climáticas, com ênfase na utilização de rochas com características semelhantes às desta pesquisa.

Palavras-chave: pó de rocha; insumo mineral; agrogeologia.

Abstract: The use of soil remineralizers (REM), a practice grounded in ancient agricultural techniques, is experiencing a resurgence as a sustainable and complementary alternative to soluble chemical fertilizers. These REM, rich in multiple nutrients, gradually release essential elements necessary for plant growth, emulating the natural regeneration processes of soil. In addition to their effectiveness, this approach offers lower costs and added benefits, such as enhanced crop quality and maintained or increased agricultural yield. In Brazil, where agriculture is a fundamental pillar of the economy, research and regulation of REM have progressed significantly. As of July 2024, this advancement has registered 66 products with the Ministry of Agriculture. As the impacts of the greenhouse effect intensify, there is an urgent need for strategies to reduce greenhouse gas (GHG) emissions. Agriculture, a significant contributor to CO₂ emissions, is particularly impactful in Brazil. Thus, adopting sustainable management practices is essential for making both competitive and environmentally sustainable agriculture. In this context, using REM within the framework of Enhanced Weathering (EW) emerges as a promising method for capturing atmospheric CO₂, promoting plant growth, and enhancing carbon sequestration in the soil. This study examined two geological sites in the state of Mato Grosso: the Colíder Group and Planalto da Serra Alkaline Complex. The findings indicate that the samples from these sites have substantial potential for atmospheric CO₂ removal, with values ranging from 39.53 kg CO₂ t⁻¹ to 496.16 kg CO₂ t⁻¹. This suggests that EW is an effective climate change mitigation technique and that the rocks studied play a vital role in this process. In the future, EW could be an integral component of a broader strategy to control GHG emissions and combat climate change, focusing on using rocks with properties similar to those analyzed in this research.

Keywords: rock powder; mineral input; agrogeology.

1. Introdução

A agrogeologia, uma ciência de interface que reúne bases da geologia e das ciências agrárias, investiga materiais e processos geológicos para melhorar características dos solos e a produtividade agrícola, tem sido cada vez mais estudada (Straaten, 2007). Pesquisas envolvendo o uso de rochas e minerais na fertilização e recuperação dos solos têm se destacado, visando estratégias mais sustentáveis para manter a fertilidade do solo ao longo do tempo. Estudos indicam que o uso de rochas moídas, baseado no conceito de "pão de pedras", tem sido explorado desde o século XIX (Hensel, 1894) e ganhou mais atenção no Brasil no século XX (Theodoro & Leonardos, 2006).

Os fundamentos que balizam o uso de remineralizadores de solos (REM) para fins de nutrição de plantas estavam bem estabelecidos desde o trabalho pioneiro de Hensel (1894): aplicação de rochas silicáticas pulverizadas para adição de múltiplos nutrientes, incluindo elementos traços; crescimento de plantas mais vigoroso e plantas mais resistentes doenças e pragas; produção de frutos e cereais de melhor qualidade; regeneração física do solo; diminuição da necessidade de aplicação de fertilizantes solúveis em contrapartida às menores taxas de dissolução dos silicatos e; diminuição dos custos para produtores rurais. No entanto, a técnica permaneceu abandonada até o trabalho de Keller (1948), quando o tema é retomado em nível global. Straaten (2007) aponta para uma série de trabalhos sobre REM que se tornaram mais comuns entre as décadas de 1960 e 1990, inclusive no Brasil. Nas últimas décadas, o número de publicações sobre REM vem aumentando, especialmente após a década de 2000 quando surgiram os trabalhos demonstrando a eficiência dos REM na regulação do clima global por captura de CO₂

atmosférico (Lenton & Britton, 2006; Schuiling & Krijgsman, 2006; Hartmann & Kempe, 2008).

Diversos pesquisadores evidenciaram o potencial das rochas como fontes de nutrientes essenciais para as plantas, destacando-se sua aplicação em diferentes regiões do mundo, uma alternativa complementar e ambientalmente sustentável no manejo da fertilidade do solo agrícola. Atualmente, várias pesquisas destacam as vantagens do uso de rochas moídas, em especial dos REM, como baixo custo, praticidade de uso e melhorias na produtividade e saúde das plantas (Straaten, 2007; Theodoro & Leonardos, 2006; 2013; Ramos *et al.*, 2014; Churchman *et al.*, 2020).

A liberação lenta de nutrientes por rochas e minerais (Theodoro & Leonardos, 2006), juntamente com o sistema de manejo integrado de nutrientes (Paramesh *et al.*, 2023), representa uma estratégia sustentável para promover a fertilidade do solo. A aplicação de REM em solos agriculturáveis tem sido eficaz no fornecimento de elementos essenciais para o crescimento das plantas. Isso sugere que os remineralizadores de solo (REM) podem se tornar uma alternativa econômica e regional para reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos (Padua, 2012; Silva, 2012; Straaten, 2007).

O Brasil, como país agrícola, enfrenta desafios relacionados à variação dos preços internacionais dos insumos, o que ressalta a importância de fontes locais de nutrientes para a produção agrícola. Estudos realizados no país demonstram que a aplicação de rochas vulcânicas e outros materiais rochosos em solos ácidos e empobrecidos resulta em melhorias significativas na fertilidade e na produtividade das culturas. O país possui uma ampla diversidade de rochas aptas para uso como REM, incluindo basaltos, xistos, granitos, tufos vulcânicos, entre outros. Análises de fertilidade indicam que rochas vulcânicas jovens são especialmente promissoras devido à sua capacidade de fornecer nutrientes ao solo. A regulamentação brasileira já reconhece os REM como fertilizantes comercializáveis, estabelecendo padrões mínimos de qualidade e segurança para sua utilização. Atualmente, existem diversos REM registrados em diferentes estados do país, indicando um interesse crescente nessa prática como uma estratégia sustentável para melhorar a fertilidade do solo e aumentar a produtividade agrícola (Leonardos *et al.*, 1987; 1991; Theodoro & Leonardos, 2006; Ramos *et al.*, 2014; ANDA, 2015; Pillon, 2016; MAPA, 2023).

O agravamento do efeito estufa tem impulsionado a busca por estratégias de redução e controle das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Entre as principais estratégias estão a diminuição do uso de combustíveis fósseis, o controle do desmatamento, a gestão adequada do solo e iniciativas de sequestro de carbono. A agricultura desempenha um papel significativo nas emissões de GEE, contribuindo com cerca de 20% das emissões de dióxido de carbono (CO₂), 60% das emissões de CH₄ e entre 65 e 80% das emissões de N₂O. No Brasil, devido às extensas áreas agrícolas, essa contribuição é ainda mais acentuada, podendo chegar a 75% das emissões de CO₂, 91% de CH₄ e 94% de N₂O (IPCC, 2001; Cerri & Cerri, 2007; Cerri, 2022). A análise precisa das contribuições da agricultura para o agravamento do aquecimento global é complexa, mas estudos apontam que o Brasil ocupa uma posição significativa entre os maiores emissores de GEE devido à agricultura e ao uso da terra. O rápido aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera é um problema latente que ameaça o clima da Terra e a vida no planeta. A busca por soluções rápidas de controle das alterações climáticas se torna cada vez mais necessária (Cerri, 2022). Portanto, é fundamental realizar avaliações detalhadas das emissões de GEE relacionadas à agricultura e implementar práticas de manejo do solo adequadas para promover uma agricultura mais sustentável e competitiva globalmente (IPCC, 2001; LAL, 2004; Cerri & Cerri, 2007; Cerri, 2022).

A preocupação global com as mudanças climáticas devido às emissões de gases do efeito estufa (GEE), como o CO₂, tem impulsionado a busca por estratégias de redução e

controle. Os REM surgem como uma possível solução para aumentar a captura de CO₂ atmosférico. Para avaliar sua eficácia, é necessário calcular o potencial líquido de sequestro de carbono, considerando tanto o sequestro pelo Intemperismo Aprimorado (IA) dos REM nos solos agrícolas, como as emissões associadas à sua produção, transporte e aplicação. O processo pode converter CO₂ em íons bicarbonato e carbonato, os quais são dissolvidos e levados pela água, podendo contribuir para a diminuição do pH de rios e oceanos (LAL, 2004; Cerri, 2022).

Além disso, práticas como o manejo conservacionista do solo e a melhoria na distribuição e estabilização do carbono no solo são essenciais para aumentar os estoques de carbono e reduzir as emissões de CO₂. No Brasil, estudos mostram que as práticas de manejo do solo podem ter efeitos significativos nos estoques de carbono, com diferenças entre diferentes regiões do país. Além do manejo do solo, outras práticas, como o uso de plantas de cobertura, cultivo mínimo e sistemas de plantio direto, são fundamentais para promover o sequestro de carbono. Em um contexto global, o setor agrícola enfrenta o desafio de produzir alimentos de maneira mais sustentável, com menor emissão de gases estufa. Isso requer uma mudança nos sistemas produtivos, priorizando a eficiência no uso dos recursos naturais e a redução das emissões de GEE (LAL, 2004; Moreira & Siqueira, 2006; Soares, 2018; Churchman *et al.*, 2020; Cerri, 2022).

Neste contexto, o presente estudo aborda ocorrências de rochas aflorantes no estado de Mato Grosso e que apresentam características mineralógicas e químicas distintas e com potencial para o IA. Este estudo sugere que a aplicação do IA demonstra ser uma técnica promissora na remoção de CO₂ da atmosfera, bem como as rochas analisadas demonstram grande potencial para serem utilizadas com esta finalidade. O IA poderia ser expandido futuramente como parte de um portfólio de técnicas de controle de emissão de gases do efeito estufa a fim de evitar as mudanças climáticas, e rochas com características semelhantes às deste estudo podem ser consideradas para utilização.

2. Área de Estudo

2.1 Contexto Geológico

Foram definidos dois conjuntos de rochas de características vulcânicas associadas ao Grupo Colíder e plutônicas, além de encaixantes, do Complexo Alcalino Planalto da Serra. A escolha destas se deu pela busca de rochas cujas características mineralógicas e químicas, previamente conhecidas, permitiam seu enquadramento na Instrução Normativa Nº 05, de março de 2016 (IN 05/2016) do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que regulamenta o uso de REM no país. Além disso, as rochas abordadas ocorrem em contextos geológicos distintos e estão distribuídas em diferentes regiões do estado, com diferentes condições de infraestrutura e proximidade de áreas de produção agropecuária.

As rochas abordadas no presente trabalho (Fig. 1) fazem parte das unidades litoestratigráficas do Grupo Colíder, inseridas no contexto da Província Rio Negro Juruena, do Cráton Amazônico, e do Complexo Alcalino Planalto da Serra, formado por corpos alcalinos intrusivos no Grupo Cuiabá, no Domínio Interno da Faixa Paraguai (Tassinari & Macambira, 2004).

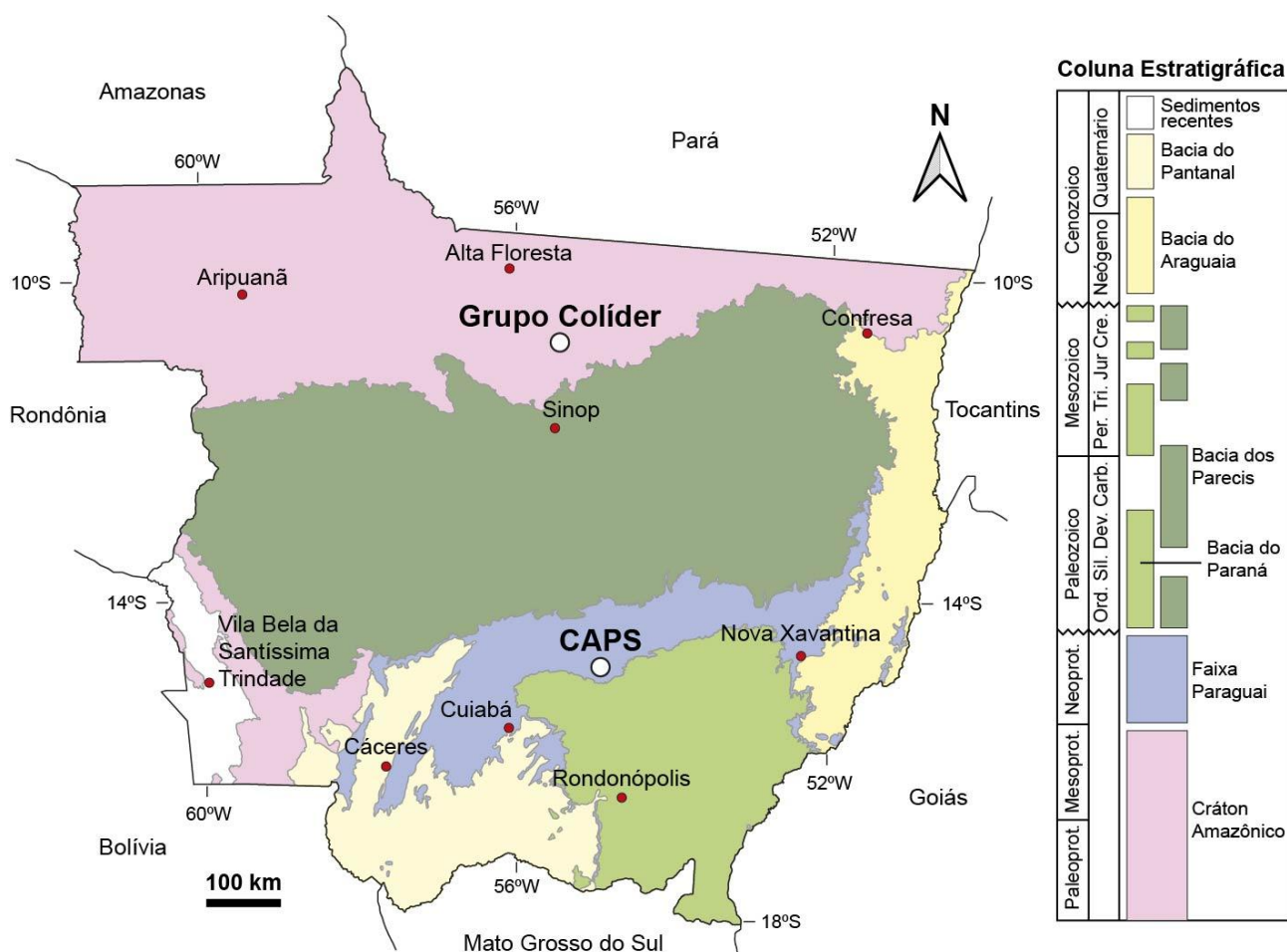


Figura 1. Mapa geotectônico do Estado de Mato Grosso com localização das áreas de estudo (círculos brancos). (adaptado de Lacerda Filho *et al.*, 2004).

Figure 1. Geotectonic map of the Mato Grosso State with location of the study areas (white circles). (adapted from Lacerda Filho *et al.*, 2004).

3. Materiais e Métodos

O presente estudo foi desenvolvido a partir de levantamento bibliográfico e da compilação, reinterpretação e incremento de dados e informações geológicas obtidas em trabalhos prévios do Grupo de Pesquisa “Geociências em Mato Grosso”, conforme descritas a seguir.

3.1. Levantamento bibliográfico

Para a realização deste trabalho foram realizadas pesquisas em relação à aplicação do pó de rocha como alternativa ao uso de fertilizantes químicos convencionais; à utilização de rochas do estado de Mato Grosso com potencial para serem utilizadas como REM; potencial de aumento do sequestro de carbono pela utilização de REM e IA. A princípio efetuou-se levantamento bibliográfico, baseado em publicações de periódicos científicos, teses, dissertações e livros. Foram consultados também, trabalhos de conclusão de curso do curso de Geologia da UFMT. Além disso, foram consultadas as legislações pertinentes à fiscalização da produção e do comércio de REM, bem como os decretos e as instruções normativas. Posteriormente, estes materiais foram organizados, separados e resumidos. Por ser um tema amplo, atual e pouco desenvolvido, as datas de publicação não foram consideradas critério de seleção.

3.3 Compilação e reinterpretação de dados geológicos, geoquímicos e petrográficos

Para a realização deste trabalho foi realizada uma compilação e reinterpretação de dados geológicos, geoquímicos, petrográficos e de difratometria de raios X utilizados na confecção de dois Trabalhos de Conclusão do Curso (TCCs) de Geologia da Universidade Federal de Mato Grosso (Lima, 2019; Muniz, 2023), conduzidos por pesquisadores do Grupo de Pesquisa “Geociências em Mato Grosso”. Estes trabalhos foram selecionados pois apresentam dados de rochas com características petrográficas e geoquímicas contrastantes, ocorrem em contextos geológicos distintos e estão distribuídas em diferentes regiões do Estado, com diferentes condições de infraestrutura e proximidade de áreas de produção agropecuária. Os dados de campo, petrográficos, geoquímicos e de difração de raios X, compilados dos TCCs citados, foram reinterpretados com a finalidade de ser utilizado como REM no IA. Os trabalhos de campo e a confecção de seções delgadas dos três TCCs foram financiados com recursos da UFMT e os dados geoquímicos foram financiados com recursos da Companhia Matogrossense de Mineração (METAMAT). Os dados foram organizados em tabelas para enquadramento na IN 05/2016 e para os cálculos da capacidade de sequestro de carbono das amostras.

3.4 Cálculo da capacidade de sequestro de CO₂

Além da reinterpretação dos dados obtidos nos TCCs citados, os cálculos da capacidade de sequestro de CO₂ foram executados para este trabalho a partir das premissas do potencial de IA utilizando-se fórmula de Steinour modificada, seguindo metodologia de Renforth (2019), conforme eq. 1.

$$E_{\text{pot}} = \frac{M_{\text{CO}_2}}{100} \cdot \left(\alpha \frac{\text{CaO}}{M_{\text{CaO}}} + \beta \frac{\text{MgO}}{M_{\text{MgO}}} + \varepsilon \frac{\text{Na}_2\text{O}}{M_{\text{Na}_2\text{O}}} + \theta \frac{\text{K}_2\text{O}}{M_{\text{K}_2\text{O}}} + \gamma \frac{\text{SO}_3}{M_{\text{SO}_3}} + \delta \frac{\text{P}_2\text{O}_5}{M_{\text{P}_2\text{O}_5}} \right) \cdot 10^3 \cdot \eta \quad (\text{eq. 1})$$

Com esta equação é calculado o potencial máximo de sequestro de CO₂ (E_{pot}) a partir da composição química das rochas, representadas pelos óxidos de Ca, Mg, Na, K, S e P. O teor destes óxidos é dividido pela sua massa molecular e esta razão é multiplicada por coeficientes (α , β , ε , θ , γ e δ) pré-estabelecidos por Renforth (2019) que são dependentes do pH assumido no IA. A disponibilidade de nutrientes para as plantas varia de acordo com o pH do solo, sendo o intervalo entre 6 e 7 o que apresenta bons índices de disponibilidade de nutrientes e baixa disponibilidade de Al, tóxico às plantas (Malavolta, 1992). Dessa forma, neste trabalho, optou-se por assumir os valores dos coeficientes como aqueles equivalentes a pH 6. Na sequência do cálculo são somadas as razões dos óxidos já multiplicadas por seus respectivos coeficientes. Este somatório é multiplicado pela razão entre a massa molar do CO₂ dividida por 100, pela média global das razões molares de CO₂ para cátions divalentes ($\mu = 1,5$) e por 1.000, para fornecer um resultado em kg de CO₂ por tonelada de rocha.

O cálculo do potencial máximo de sequestro de CO₂ por IA foi realizado para todas as amostras de rochas cujos dados geológicos, geoquímicos e petrográficos foram obtidos neste trabalho, mesmo as que não obtiveram um enquadramento na IN 05 do MAPA.

4. Resultados

Os resultados estão apresentados de forma direcionada a uma melhor compreensão da aplicabilidade das rochas como REM e para um maior detalhamento das rochas que podem ser utilizadas como REM. Inicialmente, são apresentados os dados de campo e geoquímicos de todo o conjunto de amostras analisadas, uma vez que os dados geoquímicos são fundamentais para o enquadramento das rochas nos critérios e exigências da IN 05/2016. Em seguida, são apresentados os dados de petrografia e difratometria de raios X somente das amostras que possuem dados geoquímicos que se enquadrem na instrução normativa. Petrografia e difratometria de raios X fornecem informações mineralógicas que também são estabelecidas como critérios e exigências pela IN 05/2016. Além disso, um melhor detalhamento de rochas cujas características geoquímicas são compatíveis com REM permite uma melhor compreensão sobre rochas potenciais para REM. Por fim, são apresentados os resultados dos cálculos de Epot de forma integrada. Dessa forma, essa sequência de apresentação de resultados também pode ser considerada como uma sequência analítica para avaliação de rochas quando ao seu uso como REM.

Os resultados obtidos são referentes a duas ocorrências de REM no estado de Mato Grosso: Grupo Colíder, que ocorrem ao sul da área urbana do município de Colíder e Complexo Alcalino de Planalto da Serra e suas encaixantes, que ocorrem a norte da área urbana do município de Nova Brasilândia e ao sul do município de Planalto da Serra. Os resultados consistem em informações de campo e petrografia, e dados geoquímicos interpretados com a finalidade de avaliar as características naturais das rochas com vistas ao seu enquadramento nas legislações vigentes. Além disso, são apresentados os resultados do cálculo da capacidade de captura de CO₂ para as rochas de cada uma das duas ocorrências.

4.1 Grupo Colíder

4.1.1 Aspectos de campo

Os trabalhos de campo, realizados durante o desenvolvimento dos TCCs, foram direcionados para coletar amostras com potencial prévio para REM e amostras que, mesmo sem indicativos preliminares, pudessem ser utilizadas como REM. Os respectivos pontos de coleta estão ilustrados na Figura 2.

Em campo foram identificados quatro litotipos distintos, todos de origem vulcânica: andesitos (amostras VM-01A e VM-05A); traquiandesitos (amostras VM-04A; VM-06A; VM-07A); tufos cineríticos (amostras VM-03A; VM-08A; VM-09A); e riolito (VM-12A). Ocorrem como afloramentos de blocos e matacões, andesitos e traquiandesitos estão espacialmente próximos e, em alguns locais, parcialmente cobertos por tufos cineríticos. O riolito ocorre de forma isolada, não sendo possível estabelecer relação estratigráfica com as demais rochas devido à escassez de afloramentos próximos.

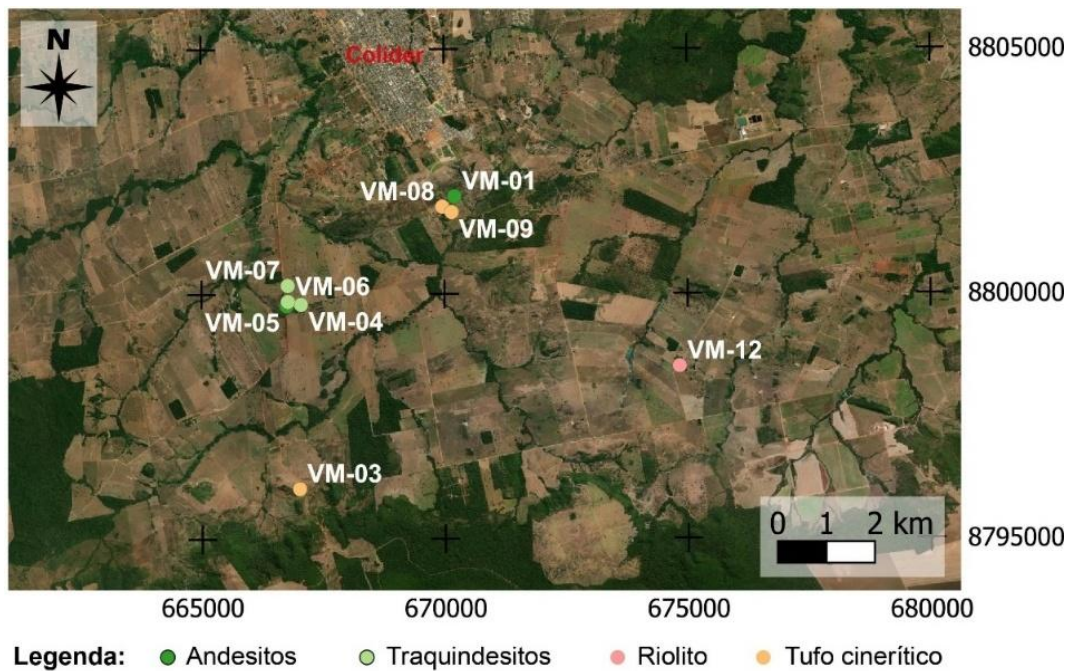


Figura 2. Mapa de pontos amostrados do Grupo Colíder.

Figure 2. Map of sampled points of the Colíder Group.

4.1.2. Petrografia e difratometria de raios X

Os andesitos e traquiandesitos são rochas de estrutura maciça, textura variando de afanítica e porfírica com fenocristais de tamanho fino a grosso. As rochas afaníticas e a matriz das rochas porfíricas são similares, indicando uma origem em comum entre as mesmas (Figs. 3 e 4). Esta matriz é composta predominantemente por minerais máficos muito finos cujas cores de interferência e pleocroísmo sugerem se tratar de anfibólios e biotita. O quartzo ocorre associado a matriz, em proporções inferiores a 5%. Parte da matriz é composta por plagioclásio, também em menor abundância. Nas rochas porfíricas ocorrem fenocristais subédricos a anédricos de plagioclásio (<2,5 mm), anfibólios (<1,75 mm) e raramente clinopiroxênio (<0,8 mm). Os fenocristais de anfibólio consistem de hornblende parcialmente substituída por anfibólios da série tremolita-actinolita e clorita, os de plagioclásio por mica e epidoto, e os fenocristais de clinopiroxênio por tremolitaactinolita. Localmente ocorrem vesículas menores que 1,0 mm e preenchidas por quartzo, clorita e argilominerais.



Figura 3. Amostras de traquiandesitos e andesitos afaníticos (A) e porfíricos (B e C) do Grupo Colíder.

Figure 3. Samples of trachyandesites and aphanitic (A) and Porphyritic (B and C) andesites of the Colíder Group.

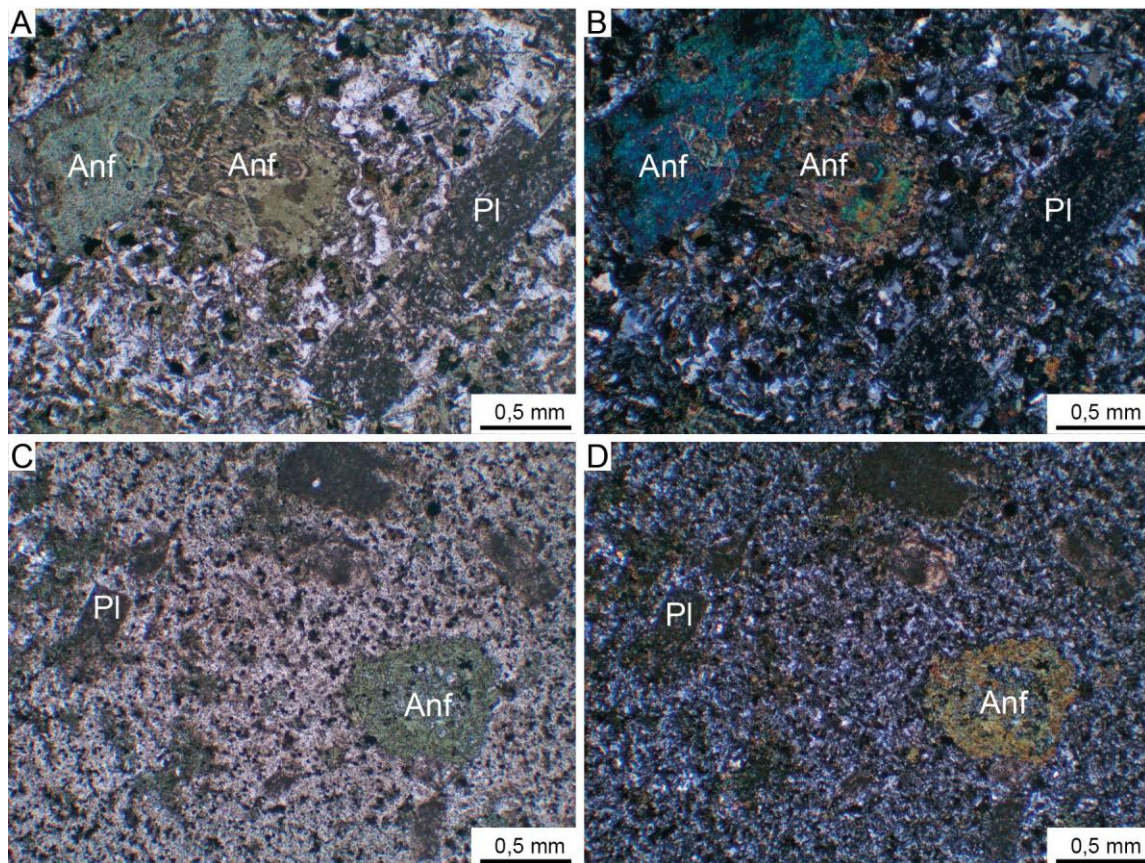


Figura 4. Fotomicrografias das amostras de traquiandesitos porfíricos (A e B) e afaníticos (C, D) do Grupo Colíder. Abreviações: Anf = anfibólio; Pl = plagioclásio.

Figure 4. Photomicrographs of porphyritic (A, B) and aphanitic (C, D) trachyandesites of the Colíder Group. Abbreviations: Anf = amphibole; Pl = plagioclase.

Os dados de difratometria de raios X, para as amostras de andesitos e traquiandesitos, indicam a presença de fases primárias e secundárias. As fases primárias consistem em microclinio, ortoclásio, anfibólios (magnesiopargassita, ferropargassita), biotita (fluoranita) e quartzo. Albita, vermiculita, clorita (clinocloro) anfibólios (cummingtonita, actinolita) compõem as fases secundárias. Difractogramas representativos estão apresentados na figura 5.

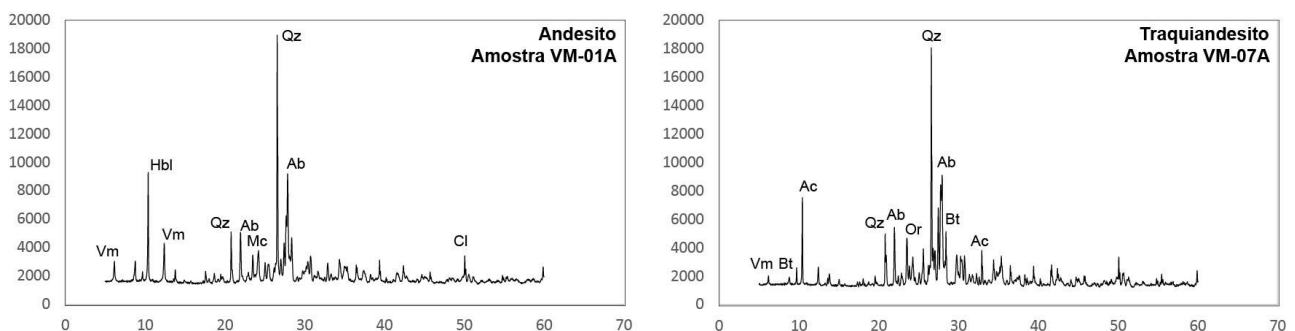


Figura 5. Difractogramas das amostras de andesito (A) e traquiandesito (B). Abreviações: Ac = actinolita; Ab = albita; Bt = biotita; Cl = clorita; Hbl = hornblenda; Mc = microclinio; Or = ortoclásio; Qz = quartzo; Vm = vermiculita.

Figure 5. Difractograms of the andesite (A) and trachyandesite (B) samples. Abbreviations: Ac = actinolite; Ab = albite; Bt = biotite; Cl = chlorite; Hbl = hornblende; Mc = microcline; Or = orthoclase; Qz = quartz; Vm = vermiculite.

4.1.3. Geoquímica

Os dados geoquímicos foram utilizados para enquadramento das amostras nos critérios e exigências da IN 05/2016, e para o cálculo do potencial de captura de CO₂ por IA (E_{pot}). Estes resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados químicos e de potencial de remoção de CO₂ para as amostras do Grupo Colíder.

Table 1. Chemical data and the CO₂ removal potential for samples of the Colíder Group.

Amostra	VM 01A	VM 03A	VM 03B	VM 04A	VM 05A	VM 06A	VM 07A	VM 08A	VM 09A	VM 12A
Elementos maiores (% peso)										
SiO ₂	56,35	73,45	75,66	61,32	58,33	59,52	55,66	57,57	82,55	69,1
Al ₂ O ₃	15,4	14,88	13,48	16,39	14,73	15,66	17,52	22,67	12,53	12,65
Fe ₂ O ₃ ⁱ	8,66	1,29	1,66	6,8	8,97	7,34	10,02	5,61	1,63	3,74
MnO	0,14	0,06	0,05	0,12	0,16	0,13	0,16	0,02	0,01	0,2
MgO	3,98	0,8	0,81	1,92	4,96	2,98	4,09	0,85	0,52	1,29
CaO	6,26	0,05	0,07	4,63	6,1	5,43	7,05	0,04	0,05	3,62
Na ₂ O	3,11	0,06	0,69	3,25	2,7	3,34	3,38	0,15	0,04	1,34
K ₂ O	2,55	3,86	5,04	3,83	3,31	3,57	2,79	7,01	4,29	4,43
TiO ₂	0,75	0,13	0,19	0,94	0,85	0,89	1,07	0,71	0,21	0,62
P ₂ O ₅	0,25	0,01	0,02	0,34	0,29	0,34	0,48	0,05	0,03	0,13
P.F.	1,12	3,3	2,12	0,91	1,06	0,9	1,12	3,5	1,77	4,49
Total	97,45	94,59	97,67	99,54	100,40	99,20	102,22	94,68	101,86	97,12
Soma de Bases	12,79	4,71	5,92	10,38	14,37	11,98	13,93	7,90	4,86	9,34
Micronutrientes na forma elementar (ppm)										
Li	15	1	2	13	17	12	21	1	<1	5
Mo	0,74	0,09	0,14	0,46	0,25	0,55	0,35	0,12	<0,05	0,33
Cu	78,4	3,3	3	19,5	18,2	137,9	22	31,4	1,1	1,5
S	200	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Zn	46	5	4	77	53	45	61	4	2	59
Ni	20,8	0,5	0,7	8,9	32,8	7,8	12,2	14	<0,5	0,8
Se	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
B	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Cr	22	<1	2	23	87	24	13	13	<1	2
Co	16,8	0,3	0,2	12,2	16,2	10,4	17,2	2,8	0,2	2,3
Elementos potencialmente tóxicos na forma elementar (ppm)										
Pb	10,3	5,9	4,4	16	5,2	9,4	7,1	7,9	6,7	5,7
As	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Cd	0,07	0,01	0,01	0,17	0,07	0,14	0,07	<0,01	<0,01	0,03
Hg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Potencial de remoção de CO₂										
E _{pot}	189,31	41,36	56,72	146,63	204,34	172,55	204,44	65	39,53	108,77

Abreviações: P.F. = perda ao fogo; E_{pot} = potencial de remoção de CO₂.

Para a Soma de Bases (CaO+MgO+K₂O), a instrução normativa exige valor maior ou igual a 9%. As amostras VM-01A, VM-04A, VM-05A, VM-06A, VM-07A e VM-12A, atendem a normativa em relação a soma de bases, apresentando valores de 12,79, 10,38, 14,37, 11,98, 13,93 e 9,34%, respectivamente. Em relação ao teor mínimo exigido de óxido de potássio (K₂O), a normativa que exige valor maior ou igual a 1%. Todas as amostras analisadas atendem este critério, apresentando valores entre 2,55 e 7,01%. Para o conteúdo de elementos potencialmente tóxicos, todas as amostras se enquadraram dentro da normativa com valores abaixo do limite máximo estabelecido pela instrução normativa.

Em relação aos micronutrientes, as amostras não apresentam os teores de Boro (B), Molibdênio (Mo) e Selênio (Se) o suficiente para serem declarados. O teor mínimo de Cobalto (Co) para ser declarado é atendido nas amostras VM-01A, VM-04A, VM-05A, VM-06A e VM-07A, assim como o de Cobre (Cu) é atendido pelas amostras VM-01A, e VM-06A, e o de Níquel (Ni) pelas amostras VM-01A, VM-04A, VM-05A, VM-06A, VM-07A e VM-08A. O Zinco (Zn) poderia ser declarado apenas nas amostras VM-04A, VM-05A e VM-07A. As amostras VM-03A, VM-03B, VM-08A e VM-09A (tufos cineríticos) não obtiveram os teores mínimos exigidos para soma de bases, 4,71, 5,92, 7,9 e 4,86%, respectivamente.

4.1.4 Capacidade de captura de CO₂

Foi determinado o potencial de captura de carbono por IA (Epot). O cálculo foi realizado para todas as amostras e está apresentado na Tabela 1. As amostras VM-01A, VM-04A, VM-05A, VM-06A e VM-07A apresentam bons valores de Epot, de 189,31, 146,63, 204,34, 172,55 e 204,44 kgCO₂/t de rocha. Sendo estas amostras também as que atendem as exigências e critérios da IN 05/2016. As rochas pertencem aos grupos dos traquiandesitos, com texturas variando de porfíritica (VM-01A e VM-04A) a afanítica (VM-05A, VM-06A e VM-07A), sendo estes os que apresentaram os melhores resultados. As amostras VM-03A, VM-03B, VM-08A e VM-09A, todas caracterizadas como tufos cineríticos, e que não atendem à IN 05/2016 em relação à soma de bases também não apresentaram bons valores de Epot. A amostra VM-12A, riolito, apresentou um potencial de IA mediano, sendo ele 108,77 kgCO₂/t de rocha. Esta rocha, diferente das demais, se enquadrou na soma das bases da instrução normativa com um valor muito aproximado do mínimo exigido, além de possuir baixos teores de CaO e MgO, mas conseguindo um resultado positivo por possuir teores elevados de K₂O.

4.2 Complexo Alcalino Planalto da Serra e encaixantes

Na região onde ocorre o Complexo Alcalino Planalto da Serra foram definidos alvos exploratórios por empresas, denominados Chibata-Denizar, Lau-Massao, Big Valley, Mutum, AM1, AM2 e AM3. Destes alvos, somente o Chibata-Denizar e o Lau-Massao possuem afloramento de rochas alcalinas. Assim, os estudos se concentraram na coleta de amostras nestes dois alvos.

4.2.1. Aspectos de campo

Os trabalhos de campo foram direcionados para coletar amostras de rochas alcalinas, com potencial prévio já comprovado por Lima *et al.* (2018), e as rochas encaixantes afetadas pelas intrusões alcalinas que, mesmo sem indicativos preliminares, pudessem ser utilizadas como REM. Os respectivos pontos de coleta estão ilustrados nas Figuras 6 e 7.

No Alvo Chibata-Denizar, foram coletadas rochas alcalinas (MFL-09A e MFL-10A), fenitos (MFL-08A), hornfelses (MFL-35A e MFL-38A). As rochas alcalinas ocorrem como diques métricos a decamétricos e os fenitos consistem das encaixantes mais próximas das intrusões e possuem mineralogia que sugere ser proveniente da alteração hidrotermal provocada pela intrusão alcalina. Em áreas um pouco mais distantes afloram os hornfelses, cujas características texturais permitem sua distinção das rochas do Grupo Cuiabá que ocorrem na área de estudo (metassiltitos e diamictitos), porém, não são identificados afloramentos de rochas alcalinas em suas proximidades.

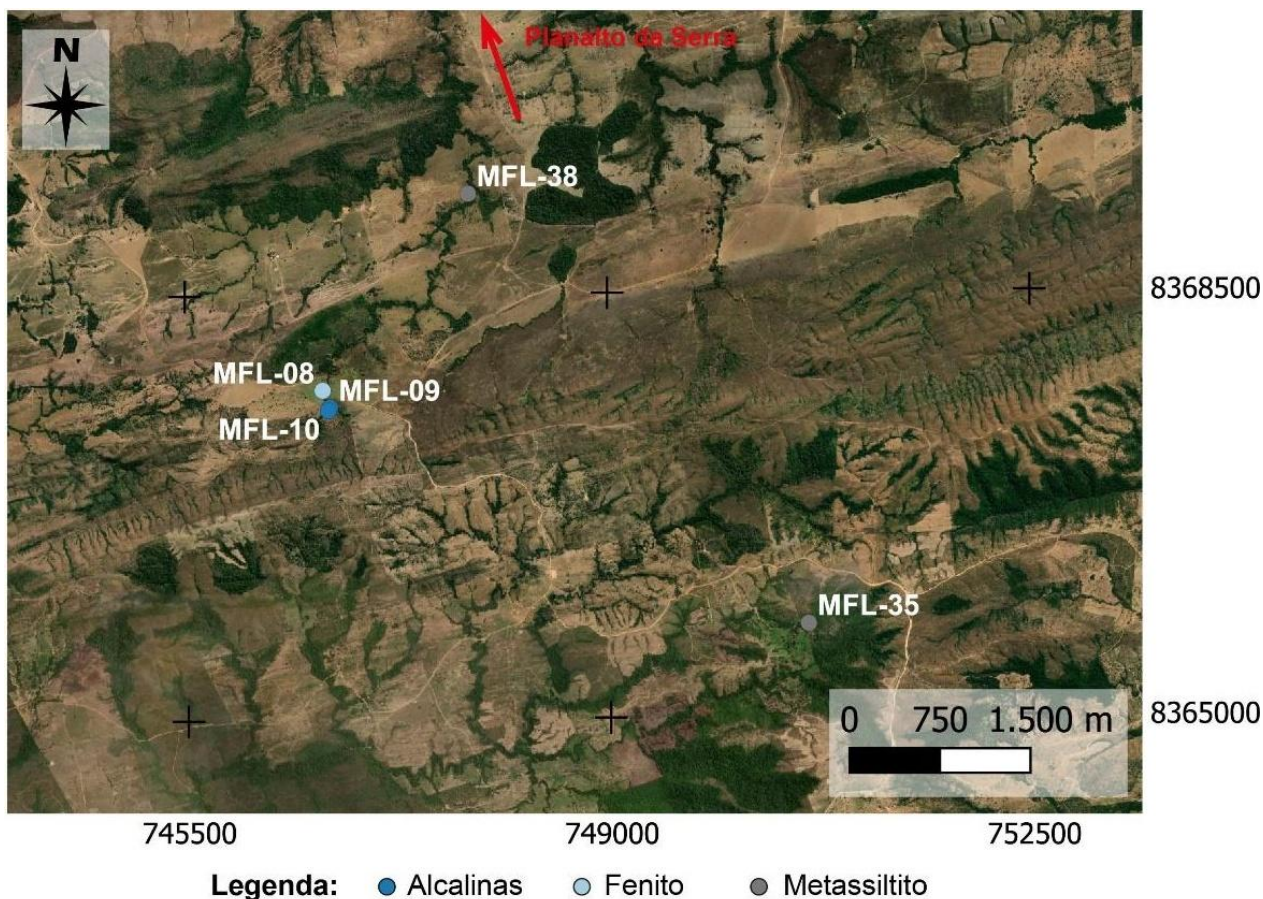


Figura 6. Mapa de pontos amostrados do Complexo Alcalino Planalto da Serra e suas encaixantes, alvo Chibata-Denizar.

Figure 6. Map of sampled points of the Planalto da Serra Alkaline Complex and its host rocks, Chibata-Denizar target.

No Alvo Lau-Massao, foram amostradas rochas alcalinas (MFL-29A e MFL-30A), fenito (MFL-28A) e metassiltitos (MFL-26BI e MFL-31A). O contexto geológico é semelhante ao que ocorre no Alvo Chibata-Denizar, com intrusões alcalinas na forma de diques métricos a decamétricos intrinsecamente associadas com os fenitos e metassiltitos. Os fenitos se caracterizam por apresentar mineralogia que sugere ser proveniente da alteração pela intrusão alcalina, no entanto, os metassiltitos não possuem evidências texturais e mineralógicas que sugerem estar afetados pelas intrusões alcalinas.

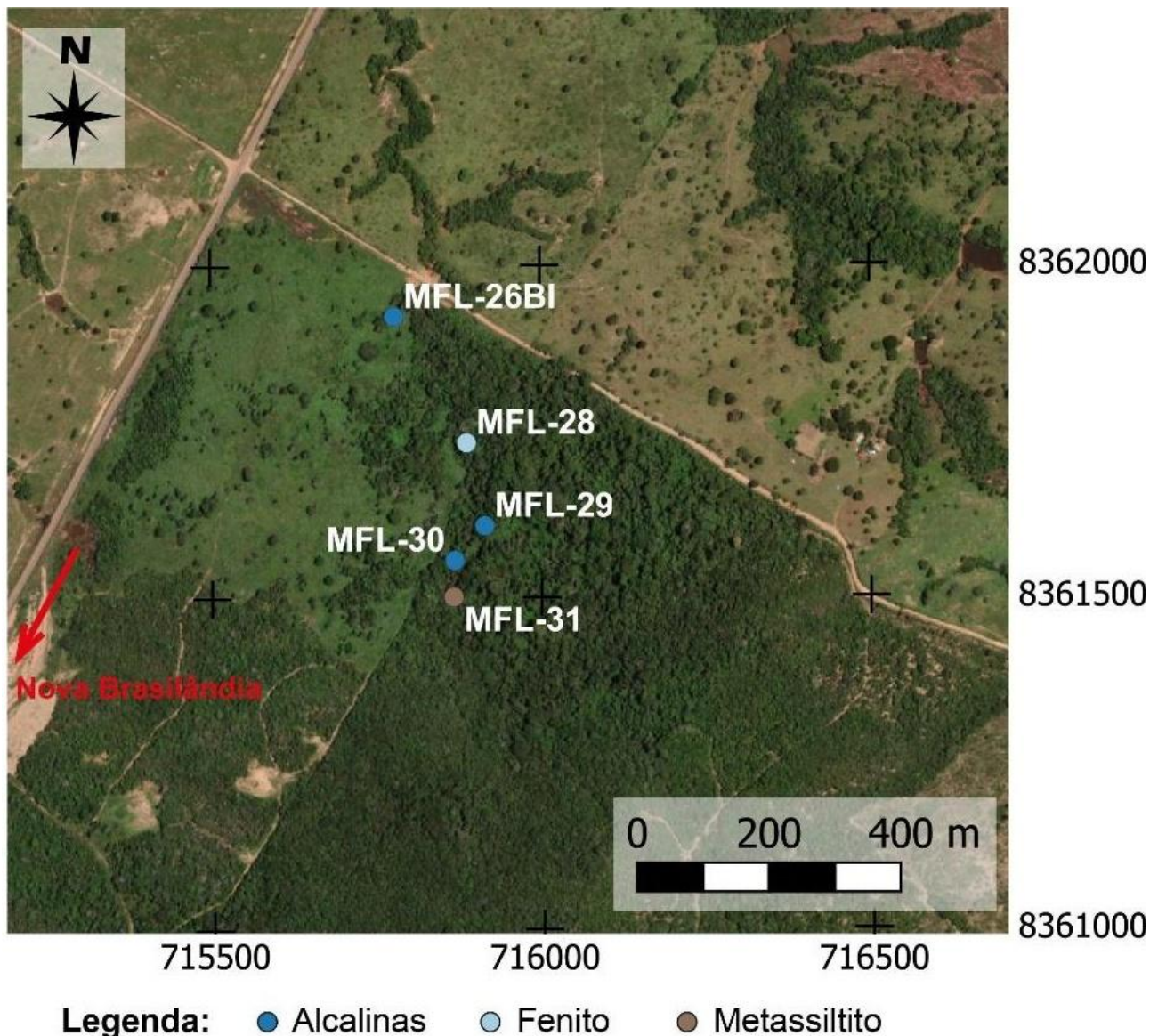


Figura 7. Mapa de pontos amostrados do Complexo Alcalino Planalto da Serra e suas encaixantes, alvo Lau-Massao.

Figure 7. Map of sampled points from the Planalto da Serra Alkaline Complex and its host rocks, Lau-Massao target.

4.2.2 Petrografia e difratometria de raios X

No Alvo Chibata-Denizar, as rochas alcalinas são faneríticas inequigranulares com tamanhos de grãos de fino a médio. A mineralogia é composta por flogopita (~45%), lizardita (~30%), calcita (~10%), perovskita (~5%), granada (~5%) e minerais opacos (~5%). Os cristais de flogopita são subédricos a anédricos, com tamanhos médios de 1,0 mm, até 1,8 mm e apresentam golfos de corrosão, além de inclusões de perovskita, granada e minerais opacos. A lizardita ocorre como cristais microcristalinos lamelares com cores de interferência características de primeira ordem. A calcita é anédrica intersticial, de até 2,0 mm e possui inclusões frequentes de granada e perovskita. Granada e perovskita ocorrem como grãos subédricos a euédricos de dimensões menores de 0,5 mm (Fig. 8).

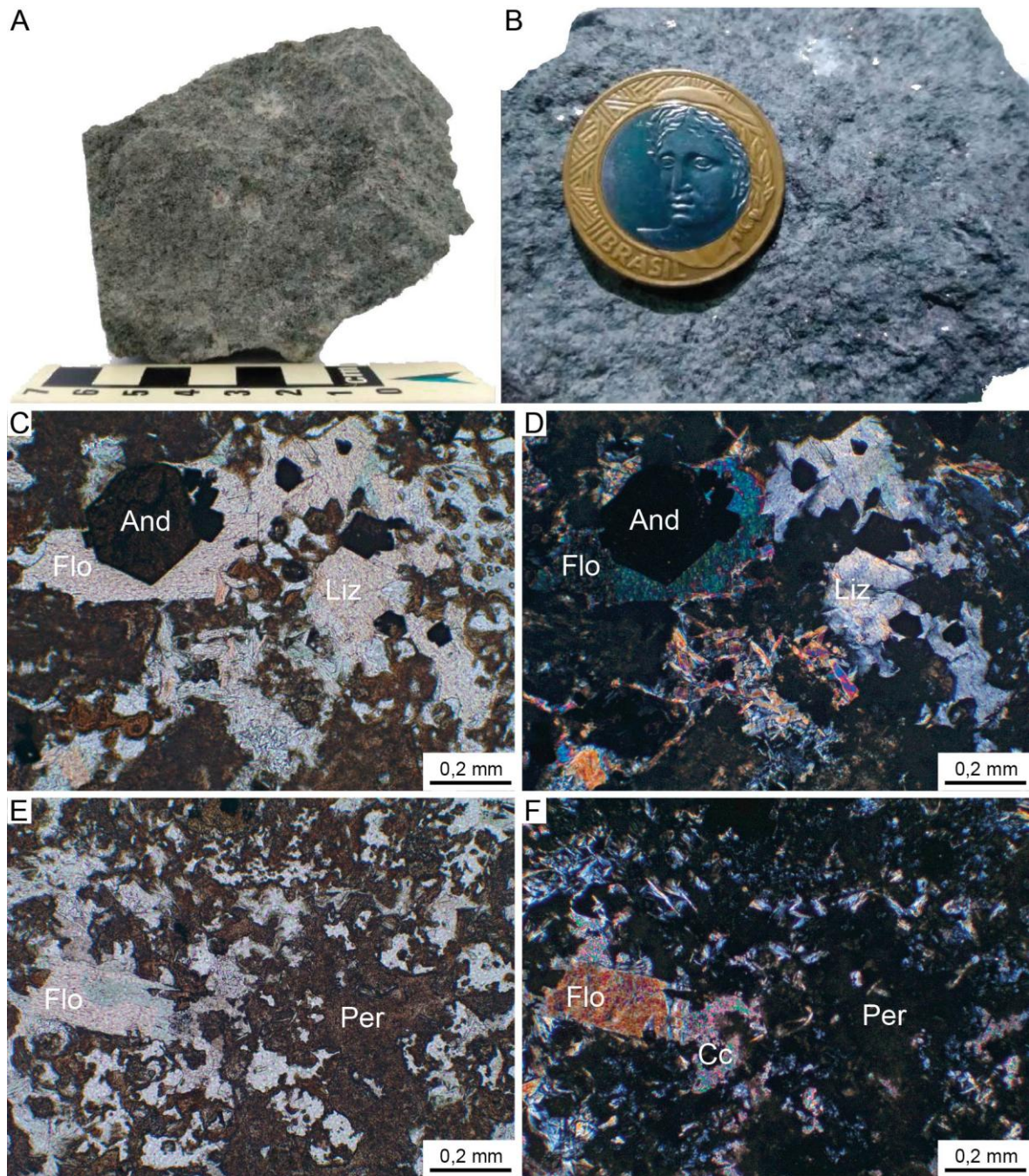


Figura 8. Rochas alcalinas do Complexo Alcalino Planalto da Serra, alvo Chibata-Denizar. (A e B) amostras de mão. (C e D) Fotomicrografias evidenciando a presença de andradita, flogopita e lizardita. (E e F) Fotomicrografias evidenciando a presença de perovskita, calcita e flogopita. Abreviações: And = andradita; Flo = flogopita; Liz = lizardita; Per = perovskita; Cc = calcita.

Figure 8. Alkaline rock of the Planalto da Serra Alkaline Complex, Chibata-Denizar target. (A and B) hand specimen. (C and D) Photomicrographs showing andradite, phlogopite and lizardite. (E and F) Photomicrographs showing perovskite, calcite and phlogopite. Abbreviations: And = andradite; Flo = phlogopite; Liz = lizardite; Per = perovskite; Cc = calcite.

Os hornfelses possuem estrutura reliquiar preservada, do tipo laminação plana, e granulometria muito fina, compatível com silte e argila. A mineralogia primária está intensamente substituída por óxidos/hidróxidos de ferro, anédricos e de granulometria também fina. Os poucos minerais primários preservados consistem em quartzo subarredondado a anguloso, parcialmente recrystalizado e algumas vezes atingindo até 0,8

mm. e mica branca subédrica. Estas características permitem sugerir que o protólito era um siltito.

O fenito é caracterizado por clastos subarredondados a angulosos, imersos em uma matriz tamanho silte e argila, sendo que a matriz e os clastos estão completamente substituídos por minerais secundários. Os minerais secundários estão todos mal cristalizados e com dimensões inferiores a 0,1 mm. Consistem em minerais do grupo da clorita, com pleocroísmo verde claro a verde amarelado ou cinza claro a escuro, actinolita acicular em arranjo degussado e calcita anédrica microcristalina, além de óxidos/hidróxidos de ferro e 50 grafita microcristalinos e dispersos preferencialmente na matriz. Estas características e a intrínseca relação espacial com as rochas alcalinas permitem sugerir que o protólito era um diamictito que foi intensamente hidrotermalizado por fluidos provenientes das intrusões alcalinas (Fig. 9).

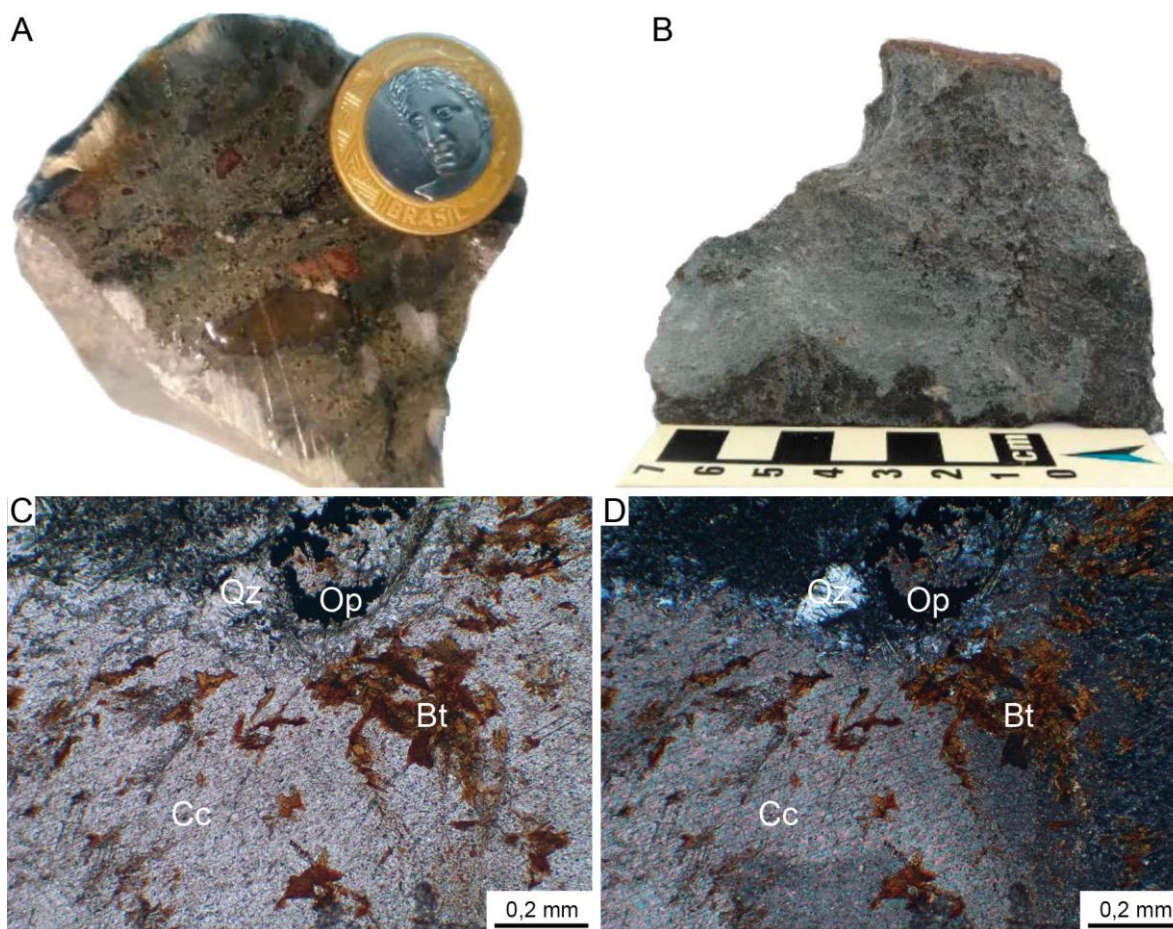


Figura 9. Fenitos do Complexo Alcalino Planalto da Serra, alvo Chibata-Denizar. (A e B) amostras de mão. (C e D) Fotomicrografias evidenciando a alteração hidrotermal para calcita, biotita e opacos, além de quartzo. Abreviações: Cc = calcita; Bt = biotita; Op = opaco; Qz = quartzo.

Figure 9. Phenites of the Planalto da Serra Alkaline Complex, Chibata-Denizar target. (A and B) hand specimen. (C and D) Photomicrographs showing hydrothermal alteration of calcite, biotite and opaque, and quartz. Abbreviations: Cc = calcite; Bt = biotite; Op = opaque; Qz = quartz.

Os dados de difratometria de raios X para as amostras do Alvo Chiabata-Denizar indicam a presença de granada (andradita), flogopita, perovskita e fluorapatita como fases primárias e lizardita como fase secundária nas rochas alcalinas. O fenito analisado é composto por albita, tremolita e flogopita, enquanto o hornfels contém quartzo e muscovita (Fig. 10).

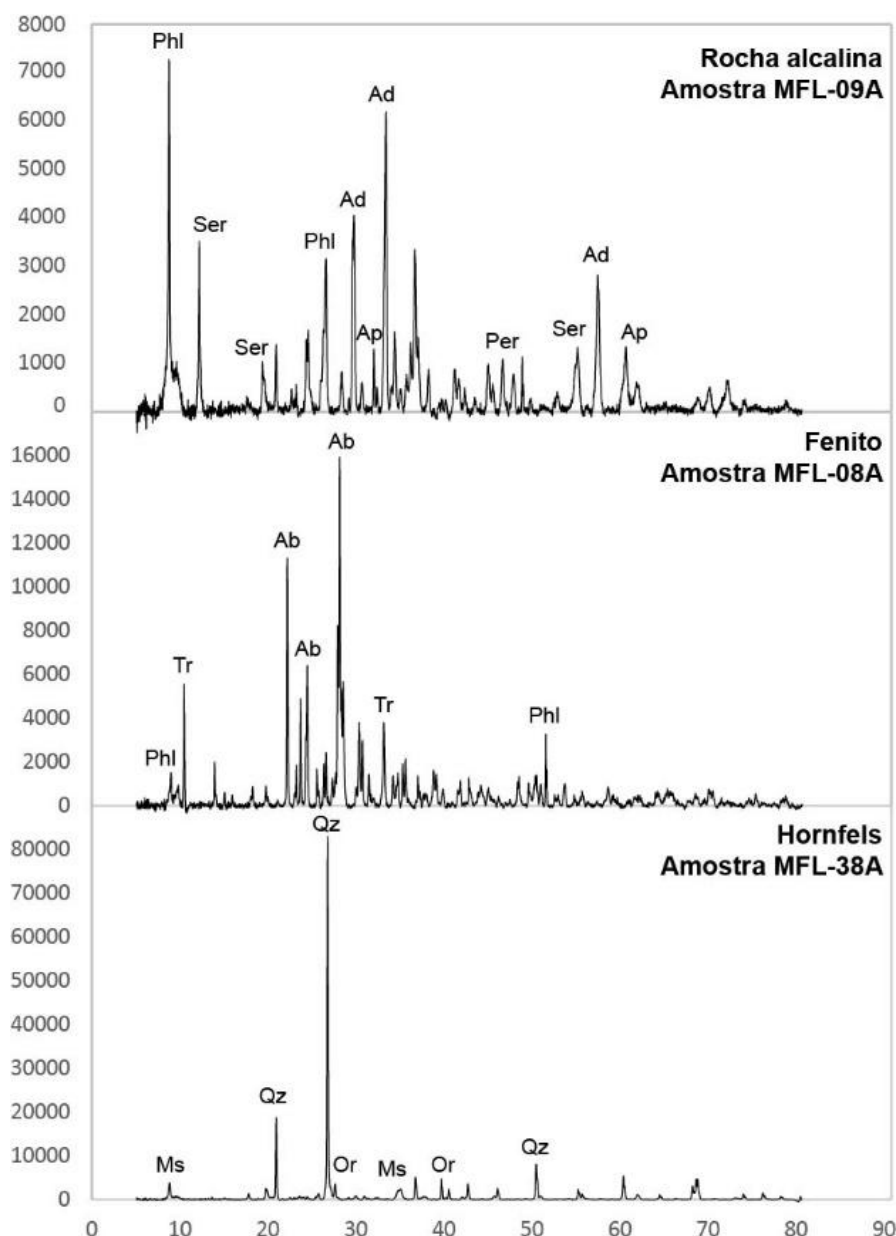


Figura 10. Difratomogramas da rocha alcalina (A), fenito (B) and hornfels (C) do alvo Chibata-Denizar. Abreviações: Ab = albita; Ad = andradita; Ap = apatita; Ms = muscovita; Or = ortoclásio; Per = perovskita; Phl = flogopita; Qz = quartzo; Ser = serpentina; Tr = tremolita.

Figure 10. Diffractograms of the alkaline rock (A), phenite (B) and hornfels (C) of the Chibata-Denizar target. Abbreviations: Ab = albite; Ad = andradite; Ap = apatite; Ms = muscovite; Or = orthoclase; Per = perovskite; Phl = flogopite; Qz = quartz; Ser = serpentine; Tr = tremolite.

No Alvo Lau-Massao, as rochas alcalinas são faneríticas inequigranulares, médias e finas, compostas por flogopita, lizardita, tremolita, calcita e minerais opacos. A flogopita é o mineral mais abundante, perfazendo cerca de 40% da rocha, ocorrendo como cristais anédricos a subédricos de até 5,0 mm ou microcristalina anédrica e menor que 0,2 mm. A tremolita (~25%) consiste em cristais subédricos aciculares, de tamanhos menores que 0,7 mm e está formando textura degussada. A lizardita (~20%) ocorrem como grãos anédricos com dimensões geralmente inferiores a 0,8 mm. A calcita (~10%) é anédrica com dimensões inferiores a 0,5 mm. Minerais opacos ocorrem em proporções menores que 5%, possuem formas anédricas a subédricas e dimensões de até 0,3 mm (Fig. 11).

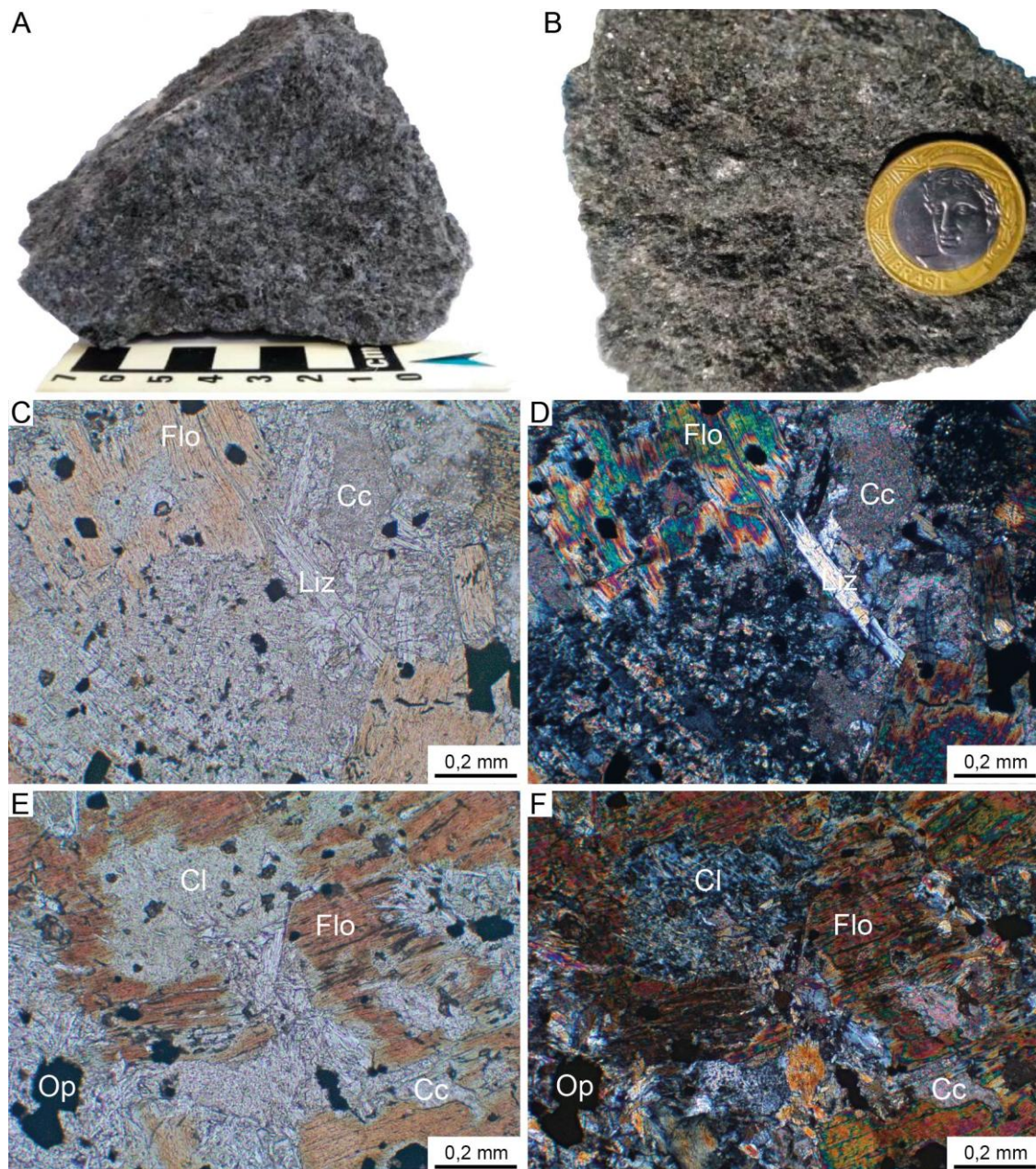


Figura 11. Rochas alcalinas do Complexo Alcalino Planalto da Serra, alvo Lau-Massao. (A e B) amostras de mão. (C e D) Fotomicrografias evidenciando a presença de flogopita, lizardita e calcita. (E e F) Fotomicrografias evidenciando a presença de opacos e clorita, além de flogopita e calcita. Abreviações: Flo = flogopita; Liz = lizardita; Cc = calcita; Cl = clorita; Op = opacos.

Figure 11. Alkaline rocks of the Planalto da Serra Alkaline Complex, Lau-Massao target. (A and B) hand specimen. (C and D) Photomicrographs showing phlogopite, lizardite and calcite. (E and F) Photomicrographs showing opaque and chlorite, and phlogopite and calcite.

Os fenitos possuem características estruturais e texturais variadas, geralmente obliterando completamente as feições da rocha primária e algumas vezes preservando poucas feições, como uma laminação planar que sugere uma origem relacionada a siltitos. Como minerais primários é possível identificar o quartzo, subarredondado a anguloso e com feições de recristalização. Os minerais provenientes da alteração hidrotermal formam uma massa relativamente homogênea e consistem em muscovita, clinoclóro, dolomita e chamosita, todos de hábito anédrico e dimensões inferiores a 0,2 mm (Fig. 12).

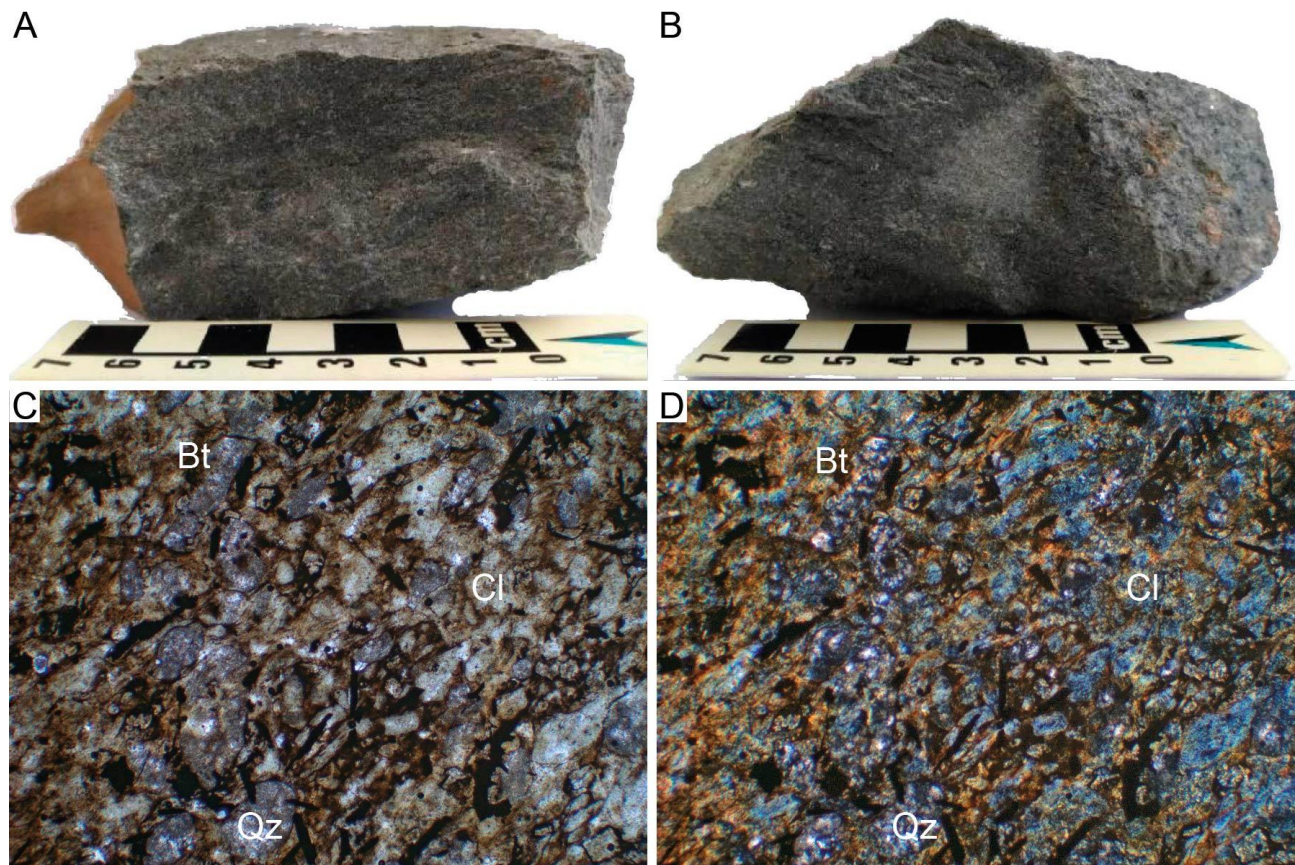


Figura 12. Fenitos do Complexo Alcalino Planalto da Serra, alvo Lau-Massao. (A e B) amostras de mão. (C e D) Fotomicrografias evidenciando a alteração hidrotermal para clorita e biotita, e grãos arredondados de quartzo recristalizados. Abreviações: Cl = clorita; Bt = biotita; Qz = quartzo.

Figure 12. Phenites of the Planalto da Serra Alkaline Complex, Lau-Massao target. (A and B) hand specimen. (C and D) Photomicrographs showing hydrothermal alteration of chlorite and biotite, and rounded grains of recrystallized quartz. Abbreviations: Cl = chlorite; Bt = biotite; Qz = quartz.

Os dados de difratometria de raios X para as amostras do Alvo Lau-Massao mostram a presença de granada (andradita), anfibólio (pargasita), biotita, flogopita e titanita como fases primárias das rochas alcalinas. Anfibólio (tremolita), talco e clorita (clinocloro) são as fases secundárias. Os fenitos possuem anfibólio (tremolita), flogopita, clorita (clinocloro) e carbonato (anquerita), enquanto os metassiltitos são compostos por quartzo, microclinio, albita, muscovita e clorita (clinocloro), conforme representados nos difratogramas da Figura 13.

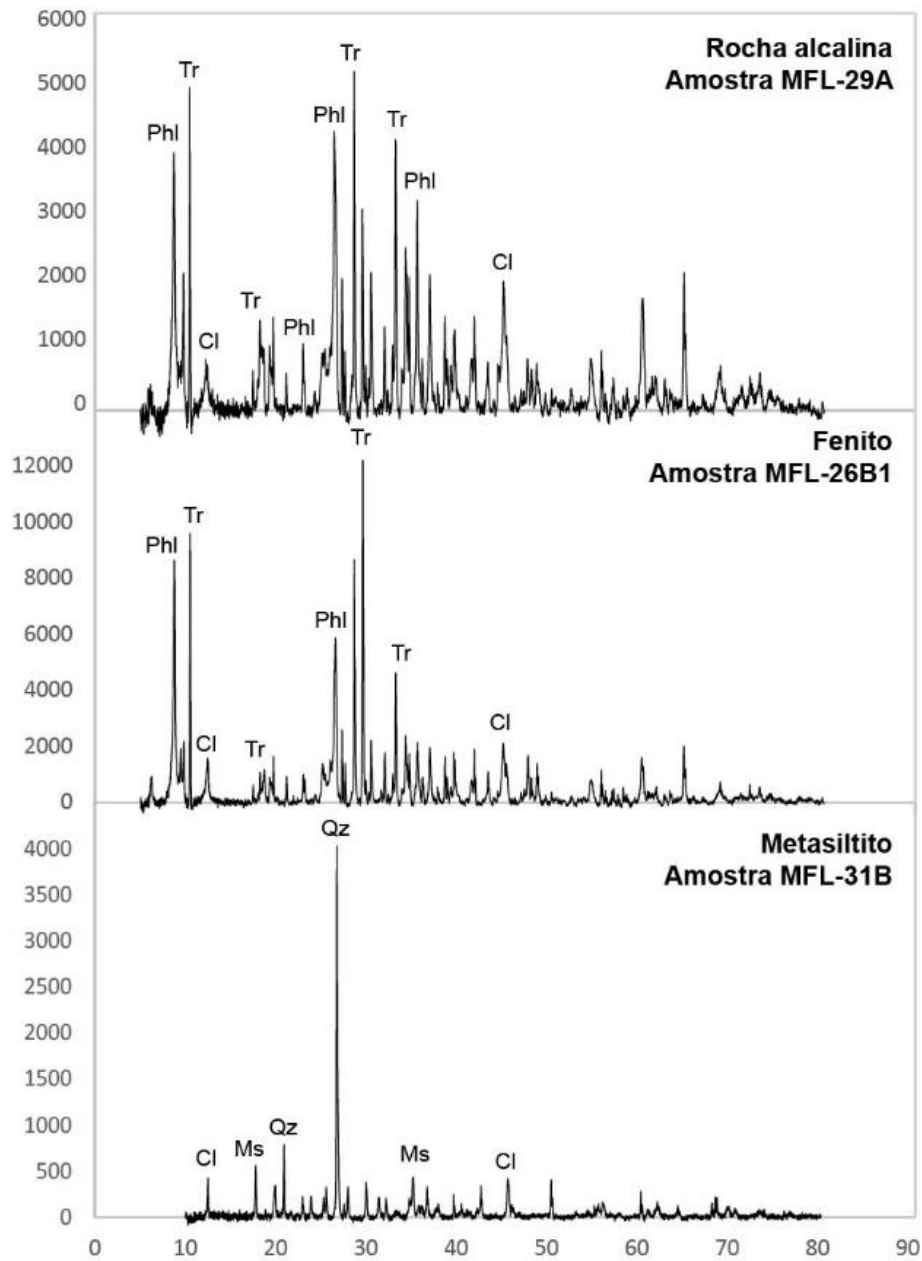


Figura 13. Difrátogramas das amostras de rocha alcalina (A), fenito (B) e metassilito (C). Abreviações: Cl = clorita; Ms = muscovita; Phl = flogopita; Qz = quartzo; Tr = tremolita.

Figure 13. Difrátogramas of the alkaline rock (A), phenite (B) and metasilite (C). Abbreviations: Cl = chlorite; Ms = muscovite; Phl = phlogopite; Qz = quartz; Tr = tremolite.

4.2.3. Geoquímica

Os dados geoquímicos foram utilizados para enquadramento das amostras nos critérios e exigências da IN 05/2016, e para o cálculo do potencial de captura de CO₂ por IA (E_{pot}). Estes resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Dados químicos e de potencial de remoção de CO₂ para as amostras do Complexo Alcalino Planalto da Serra e suas encaixantes.

Table 2: Chemical data and of CO₂ removal potential for samples of the Planalto da Serra Alkaline Complex and its host rocks.

Alvo	Chibata-Denizar					Lau-Massao				
Amostra	MFL 08A	MFL 09A	MFL 10A	MFL 35A	MFL 38A	MFL 26BI	MFL 28A	MFL 29A	MFL 30A	MFL 31A
Elementos maiores (% peso)										
SiO ₂	58,90	32,70	33,20	66,4	65,9	34,60	27,90	36,70	30,90	55,30
Al ₂ O ₃	15,3	5,92	6,1	9,14	9,41	6,93	6,91	6,46	5,11	10,7
Fe ₂ O _{3t}	8,9	13,3	13	0,65	0,59	12,6	10,9	12,8	11,4	2,21
MnO	1,54	0,22	0,2	<0,01	<0,01	0,18	0,19	0,2	0,2	0,04
MgO	3,57	16,5	16,2	1,04	1,18	17,6	9,2	19,8	18,2	5,94
CaO	2,71	17,5	17,2	0,11	0,07	11,4	16,3	9,39	15,2	7,59
Na ₂ O	7,62	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	0,1	<0,1	1,65
K ₂ O	0,82	2,5	2,31	3,97	3,87	3,27	1,19	3,23	2,86	4,42
TiO ₂	1,43	2,91	2,9	0,77	0,75	2,99	3,24	2,94	2,38	0,45
P ₂ O ₅	0,16	1,51	1,46	0,08	0,08	1,18	1,67	1,05	0,87	0,14
P.F.	0,2	6,34	5,59	18	18,98	7,67	21,88	6,04	11,88	11,92
Total	100,95	93,06	92,57	82,16	81,85	90,85	77,50	92,67	87,12	88,44
Soma de Bases	7,10	36,50	35,71	5,12	5,12	32,27	26,69	32,42	36,26	17,95
Micronutrientes na forma elementar (ppm)										
Li	<3	18	28	24	25	139	126	128	56	26
Mo	<3	<3	<3	20	18	<3	<3	<3	<3	<3
Cu	134	86	51	16	13	95	119	88	29	16
S	1,12	0,03	0,04	0,15	0,11	0,22	0,63	0,08	0,05	0,08
Zn	78	78	87	16	18	81	58	92	74	54
Ni	131	322	325	44	38	465	402	553	496	13
Se	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
B	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Cr	23	171	148	92	95	183	240	262	222	10
Co	47	56	56	<8	<8	64	88	69	60	<8
Elementos potencialmente tóxicos na forma elementar (ppm)										
Pb	<8	<8	<8	29	26	8	<8	<8	<8	15
As	<10	<10	<10	25	24	<10	100	<10	<10	<10
Cd	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
Hg	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Potencial de remoção de CO₂										
E _{pot}	176,92	491,41	481,75	47,03	48,16	443,77	348,17	456,15	496,16	234,87

Abreviações: P.F. = perda ao fogo; E_{pot} = potencial de remoção de CO₂; n.a. = não analisado.

Para a soma de bases, se enquadram as rochas alcalinas (MFL-29A = 32,42; MFL-09A = 36,5; MFL-10A = 35,71; MFL-30A = 36,26), um fenito (MFL-28A = 26,69) e os metassiltitos (MFL-26BI = 32,27; MFL-31A = 17,95). As amostras MFL-35A (hornfels) e MFL-38A (fenito) possuem soma de bases inferior a 9%, apresentando valores de 5,12, 5,12 e 7,1%, respectivamente. Em relação ao teor mínimo exigido de óxido de potássio

(K₂O), a normativa que exige valor maior ou igual a 1%. Somente a amostra MFL-08A não possui o teor mínimo exigido do óxido, com 0,82%. Todas as demais atendem a IN 05/2015, com teores variando de 1,19 a 4,42%. Para o conteúdo de elementos potencialmente tóxicos, todas as amostras se enquadraram dentro da normativa com valores abaixo do limite máximo indicado pela instrução normativa para Cádmio (Cd) e Chumbo (Pb), porém, as amostras MFL-28A, MFL-35A e MFL-38A apresentaram teores de Arsênio (As) acima do limite permitido, com 100, 25 e 24 ppm, respectivamente. Em relação aos micronutrientes, todas as amostras possuem teores maiores do que os mínimos exigidos para se declarar os elementos Cobalto (Co), Ferro (Fe), Níquel (Ni) e Selênio (Se). Em contrapartida, nenhuma amostra possui o teor mínimo exigido para declarar de Zinco (Zn). As amostras MFL-31A, MFL-35A e MFL-38A não possuem o teor mínimo de Manganês (Mn) e Cobre (Cu) para se declarar. A amostra MFL-30A também não possui o teor mínimo de Cobre (Cu) para se declarar. Para o micronutriente Molibdênio (Mo), somente as amostras MFL-35A e MFL-38A possuem o teor exigido pela IN para se declarar o micronutriente.

4.2.4. Capacidade de captura de CO₂

Foi determinado o potencial de captura de carbono por IA (E_{pot}). O cálculo foi realizado para todas as amostras e estão apresentados na Tabela 2, tendo sido realizado mesmo para as amostras que não atenderam aos critérios da IN 05/2016. As amostras MFL-08A, MFL-09A, MFL-10A, MFL-26BI, MFL-28A, MFL-29A, MFL-30A e MFL-31A apresentaram ótimos resultados no potencial de captura de CO₂ por IA apresentando valores entre 176,92 e 496,16 KgCO₂/t de rocha, sendo as amostras de rochas alcalinas as que possuem valores mais elevados. Sendo estas amostras também as mais compatíveis com as exigências da instrução normativa, com exceção para a soma de bases da amostra MFL-08A, que não atende a normativa. As amostras MFL-35A e MFL-38A, caracterizadas como hornfels, demonstraram baixo potencial de captura de carbono. Este resultado já era previsto devido suas menores concentrações dos óxidos de cálcio (CaO) e magnésio (MgO), mesmo sendo um pouco compensados pela presença do óxido de potássio (K₂O).

5. Discussão

A liberação de nutrientes a partir de minerais silicáticos e sua consequente formação de bicarbonato estão fundamentadas nos conceitos de Ebelmen (1845) e podem ser expressos, para fins de exemplificação, em equações como a de dissolução da anortita: $2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, apresentada por West *et al.* (2005). A equação demonstra a dissolução de anortita em condições atmosféricas, na presença de água e dióxido de carbono, produzindo bicarbonato dissolvido em água, caulinita e liberando cálcio. Ao ajustar esta equação para sistemas mais complexos, com diferentes tipos de silicatos, serão gerados diferentes argilominerais formadores de solo e liberados diferentes nutrientes para as plantas. Porém, a formação de bicarbonato decorrente da captura de dióxido de carbono da atmosfera irá sempre ocorrer, o que tem sido um dos mecanismos de controle do clima global ao longo do tempo geológico (Walker *et al.*, 1981; Berner, 1991; Suchet & Probst 1993; West *et al.*, 2005). No entanto, as taxas de dissolução de silicatos variam durante o intemperismo químico e são afetadas por fatores como a espécie mineral, a área superficial do material, clima, topografia e tempo de exposição na superfície (White e Blum, 1995; Mortatti & Probst, 2003; Deepthy & Balakrishnan, 2005). Consequentemente, estes fatores também irão afetar a eficiência com que o IA captura CO₂ da atmosfera.

Franke & Teschner-Steinhardt (1994) demonstram, através de experimentos em laboratório, que as taxas de dissolução de olivina podem variar de 200 a 400, de hornblenda de 26 a 30 mg/m²/dia, de piroxênio de 14 a 25 mg/m²/dia e de biotita de 1,5 a 1,8 mg/m²/dia. Estes autores também demonstram que as taxas variam de acordo com a acidez, com taxas mais altas em pH mais ácidos (=4,0) e mais baixas em pH menos ácidos (=5,5). De forma semelhante, as taxas de dissolução de minerais máficos e de feldspatos apresentadas por Brantley e Chen (1995) e Blum e Stillings (1995), respectivamente, são mais elevadas em pH ácidos do que em pH menos ácidos. Para os diferentes minerais, as taxas de dissolução são, em geral, mais elevadas para os minerais máficos do que para feldspatos: olivina (-12,7 a -13,9 moles/cm²/s) > piroxênio (-13,3 a -14,9 moles/cm²/s) > hornblenda (-14,8 a 15,6 moles/cm²/s) > plagioclásio cálcico (-10,0 a -15,5 moles/cm²/s) > plagioclásio sódico (-15,4 a -16,2 moles/cm²/s) > feldspato potássico (-15,6 a -16,6 moles/cm²/s). Vanderginste *et al.* (2024) apresenta uma síntese sobre taxas de dissolução de diversos minerais silicáticos com valores de -3,50 moles/m²/s para plagioclásio cálcico, -6,85 moles/m²/s para olivina, -7,00 moles/m²/s para hornblenda, -9,02 moles/m²/s para piroxênio e -9,84 moles/m²/s para biotita. Em linhas gerais, os dados de laboratório confirmam as premissas de Goldich (1938).

Considerando este contexto e a composição mineralógica das rochas estudadas, é possível realizar uma avaliação prévia do potencial de liberação de nutrientes e consequente captura de CO₂ atmosférico. As rochas máficas do Grupo Colíder são constituídas predominantemente por anfibólios, plagioclásio e biotita, contendo quartzo, albita, vermiculita e clorita em quantidades subordinadas. As rochas alcalinas do Complexo Alcalino Planalto da Serra contêm, preferencialmente, flogopita, biotita, calcita, lizardita e tremolita, com menores quantidades de granada, talco, clorita e minerais opacos. As rochas encaixantes são compostas predominantemente por tremolita, clorita, flogopita, calcita, muscovita e quartzo. Em trabalho de revisão, Wilson (2004) aponta que o intemperismo avançado de minerais máficos forma argilominerais do grupo das esmectitas, além de óxidos de Fe, promovendo a liberação de cátions de Fe, Mg e Ca, enquanto os feldspatos formam caulinita do tipo halloysita e liberam cátions de Ca e Na (plagioclásios) e K (ortoclásio). O intemperismo expressivo da biotita forma caulinita e disponibiliza cátions de K, e cloritas formam caulinita e óxidos de Fe e liberam Fe e Mg. Dessa forma, os minerais dominantes nas duas unidades promovem, quando intemperizados, a liberação de cátion divalentes (Ca²⁺, Mg²⁺) e monovalentes (K⁺) relevantes para a nutrição de plantas. As taxas de liberação de nutrientes apresentam valores intermediários, conforme os dados anteriormente citados, evidenciando um bom potencial para utilização como REM.

A abordagem inicial, em termos geoquímicos, para escolha de uma rocha para ser utilizada como REM se baseia na soma de bases e no seu teor de potássio, critérios da normativa 05/2016 do MAPA, porém outros nutrientes podem e devem ser utilizados nos critérios de seleção. A remoção de CO₂ estimada tem relação direta com a concentração de minerais que são encontrados nas rochas. Assim como mostra os gráficos da figura 14, o potencial de captura de CO₂ por IA (E_{pot}) aumenta quanto maior for a Soma de Bases e os conteúdos de MgO e CaO, para as amostras de todas as unidades investigadas. No que se refere ao conteúdo de K₂O, observa-se que o E_{pot} varia consideravelmente para as amostras do Complexo Alcalino Planalto da Serra e diminui com o aumento de K₂O para as amostras do Grupo Colíder.

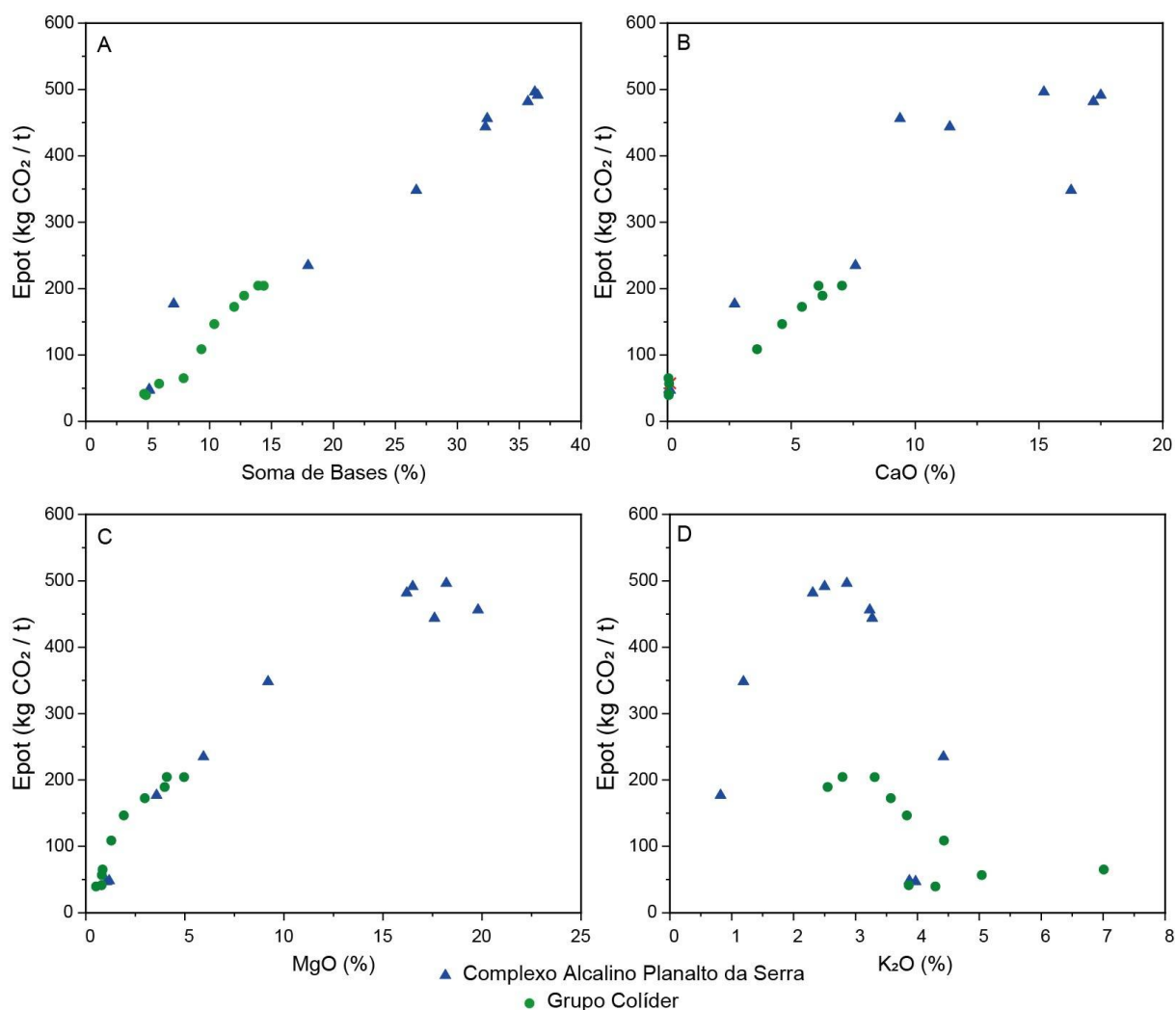


Figura 14. Diagramas do potencial de remoção de CO₂ comparados com os conteúdos de Soma de Bases (A), CaO (B), MgO (C) e K₂O (D).

Figure 14. Diagrams of CO₂ removal potential compared with CaO (A) and K₂O (B) contents.

Ficou evidenciado neste estudo que as amostras que melhor se enquadraram na IN 05 de 2016 foram as que resultaram em melhores potenciais teóricos para a captura de CO₂ por IA. A validação completa de um material para ser registrado e comercializado como remineralizador de solo exige a realização de ensaios de desempenho agrônomo, seja em casa de vegetação ou em ensaio de campo. Testes para a validação da capacidade de remoção de CO₂ são mais complexos desafiadores. Neste estudo, foram avaliadas amostras de rochas de duas áreas geológicas distintas do estado de Mato Grosso, Grupo Colíder e Complexo Alcalino Planalto da Serra. Na região de Colíder, foram avaliadas dez amostras do Grupo Colíder, que foram classificadas como andesitos, traquiandesitos e riolito. As amostras apontam para um potencial de remoção de CO₂ por IA de até 204,44 kgCO₂/t. Aproximadamente 60% das amostras atendem a IN do MAPA. Na região entre Nova Brasilândia e Planalto da Serra, as amostras enquadradas no Complexo Alcalino Planalto da Serra são identificadas como tufo cineríticos, alilikitos, metassiltitos, hornfelses e fenitos. Os cálculos apontam para uma remoção de CO₂ de até 496,16 kgCO₂/t. Estas são as amostras que melhor se enquadram dentro das exigências da IN, sendo que 70% das amostras se enquadram nas exigências da normativa. Diante dos estudos fica evidente que as rochas analisadas apresentam grande potencial para serem estudadas e utilizadas

na captura de carbono da atmosfera. São necessários estudos práticos e experimentais para se comprovar a real capacidade de sequestro de carbono e avaliar possíveis impactos ambientais de sua utilização. A quantidade de carbonato mineral que se forma no solo pode ser quantificado utilizando-se isótopos de Carbono e Oxigênio, demonstrando-se o processo de formação de mineral carbonático (Wasbourne *et al.*, 2015; Jorat *et al.*, 2019).

No entanto, com o aumento do intemperismo das rochas, mesmo que seja possível quantificar as rochas que foram adicionadas ao solo, não é viável recolher e analisar uma amostra do solo para se determinar o intemperismo ocorrido pelo tratamento utilizado. O fato de se tratar de um sistema aberto denota que, os produtos do intemperismo e precipitados minerais de carbonatos podem se mover pelo perfil do solo, adentrando águas subterrâneas e tecidos vegetais. Desta forma, compreende-se que os produtos do intemperismo se dispersariam sobre a geosfera e biosfera, dificultando sua quantificação precisa. Em geral, os REM são indicados para uso em quantidades de até 20 toneladas por hectare de solo agriculturável, com valores médios entre 5 e 10 toneladas por hectare. A utilização de quantidades muito maiores do que esta pode resultar em uma camada espessa do pó de rocha no solo, e não há estudos sobre a velocidade de incorporação dessa matéria ao solo ou, sobre as possíveis perdas por processos de erosão, lixiviação e transporte eólico. Além disso, também são desconhecidos ainda os possíveis impactos consequentes de uma utilização exacerbada dos REM na biota do solo (Swoboda *et al.*, 2022). Dessa forma, considerando o Epot médio, a aplicação de pó de rocha a partir das rochas do Alvo Chibata-Denizar poderiam remover entre 1,25 e 2,49 toneladas de CO₂ por hectare, enquanto as rochas do Alvo Lau-Massao removeriam entre 1,98 e 3,96 toneladas de CO₂ por hectare. De forma semelhante, o Epot médio das rochas com melhor capacidade de remoção indica, para o Grupo Colíder, uma capacidade de remoção entre 0,92 e 1,83 toneladas de CO₂ por hectare. No mercado global, segundo o Observatório de Bioeconomia da Fundação Getúlio Vargas (FGV), o preço médio estimado do crédito de carbono é de US\$ 37,00/tCO₂ (FGV, 2023). Considerando as dosagens de 5 e 10 t/ha de pó de rocha e os respectivos potenciais médios de remoção de CO₂, é possível estimar os seguintes rendimentos para as rochas investigadas: Alvo Chibata-Denizar entre 46,07 e 92,15 US\$/ha; Alvo Lau-Massao entre 73,23 e 146,45 US\$/ha; Grupo Colíder entre 33,94 e 67,88 US\$/ha. Dada as grandes áreas utilizadas para agricultura no Brasil, os atuais programas de gestão de terras agrícolas e de restauração de pastagens degradadas, o uso dos REM demonstra ser uma alternativa significativa também na mitigação das emissões de CO₂ provenientes da agricultura, resultando assim em uma combinação de benefícios desde a restauração dos solos de forma sustentável e de baixo custo à participação nas taxas de captura de carbono da atmosfera (Silva *et al.*, 2023). A utilização do intemperismo intensificado como método de captura de carbono no solo exige muitos estudos para se efetivar como técnica de maneira global. Seriam necessários modelos de alterações dos fluxos dos materiais e do sistema terrestre, capazes de prever possíveis consequências do intemperismo em escalas regional e global. Uma abordagem sistêmica se faz de grande importância para identificação e avaliação de cadeias causais plausíveis e consequências resultantes de diferentes técnicas de IA em ambientes específicos. Uma análise minuciosa dos impactos ecológicos, sociais e conflitos internos e internacionais com base na plausibilidade e relevância dos acontecimentos pode incluir limites relacionados ao pH, elementos presentes ou específicos a determinados solos ou ecossistemas, para a implementação de ações com regras e regulamentos, que devem ser seguidos e monitorados (Hartmann *et al.*, 2013).

O monitoramento contínuo dos resultados da aplicação do IA se faz de extrema importância, sendo uma informação crítica para a aprendizagem e melhoria nos processos. Devem ser monitoradas possíveis consequências previstas, e indicadores ambientais

devem ser cuidadosamente reavaliados. Informações coletadas por programas de monitoramento ambiental e pelos processos de estudo pode ser uma porta para outras situações e análise de contexto, formando um ciclo de avaliação, desenvolvimento e gestão; visto que com os resultados do aprendizado e o processo de avaliação, a gestão pode se tornar mais eficaz (Hartmann *et al.*, 2013). Devem ser monitoradas possíveis consequências previstas, e indicadores ambientais devem ser cuidadosamente reavaliados, a fim de se implementar e corrigir protocolos de regras, ações e regulamentos (Hartmann *et al.*, 2013). Considerando a importância da agricultura no Brasil e os esforços atuais em gestão de terras e restauração de pastagens degradadas, o uso de REM emerge como uma alternativa valiosa para mitigar as emissões de CO₂ provenientes do setor. Isso não apenas impulsiona a sustentabilidade agrícola e a restauração dos solos, mas contribui também para a captura de carbono da atmosfera (Cerri, 2022). Atualmente há pouca análise ética sobre as tecnologias de emissão negativa (NET - Negative Emission Technologies). Há espaço para a produção de trabalhos que reflitam sobre o clima futuro, produzidos por modelagem recente, implicando custos, riscos e benefícios éticos diferentes. O que se pode observar é a necessidade de se difundir as tecnologias a curto e médio prazo, devido ao tempo envolvido nos processos. Há muita divergência entre o cenário encontrado na literatura e o cenário prático, o que demanda urgência no desenvolvimento das NET'S para que seja possível se aproximar das metas esperadas (Aitken *et al.*, 2022). As incertezas e os riscos associados à utilização das NETs não são de fácil e rápida resolução. São necessários cenários exploratórios, a fim de que se possa conceber políticas e estratégias de implementação, o que inclui riscos, mas certamente, oportunidades. É necessário arriscar em tecnologias com estratégias adaptativas e evolutivas, em especial as que apresentam interessantes proporções entre custo-risco-potencial (Minx *et al.*, 2018).

6. Conclusões

A técnica de IA, que envolve a aplicação de rochas moídas ricas em bases, como os remineralizadores em solos desgastados, oferece promissoras oportunidades de remoção de CO₂ da atmosfera, especialmente na forma inorgânica. A pesquisa revelou que as rochas estudadas possuem grande potencial para serem utilizadas para a técnica do IA, a fim de realizarem sequestro de carbono. Os resultados apontaram que a eficácia desse método está diretamente ligada aos teores e tipos de minerais presentes nas rochas, com um destaque para rochas ricas em CaO e baixos teores de K₂O. No entanto, fica evidenciado também que quando o teor alcalino total das rochas, que inclui a somatória das bases: Na₂O, K₂O, MgO e CaO é alto, a capacidade de remoção de CO₂ das rochas é alta, mesmo para aquelas que apresentam altos teores de K₂O e consequentemente baixos teores de CaO. Essas constatações representam um passo importante no desenvolvimento de tecnologias para o sequestro de carbono e pode contribuir significativamente para a implementação de protocolos de redução de emissão de GEE's nas mudanças climáticas. No entanto, a utilização em escala comercial de rocha para o IA ainda requer ações adicionais, como uma ampla amostragem geológica e análise geográfica e socioeconômica, avaliações experimentais e reais do processo de intemperismo, e uma análise abrangente dos possíveis impactos ecológicos, sociais e conflitos internos e internacionais. O monitoramento contínuo dos resultados da aplicação do IA se faz de extrema importância, sendo uma informação crítica para a aprendizagem e melhoria nos processos. Com o desenvolvimento contínuo dessas iniciativas, as rochas estudadas podem desempenhar um papel crucial na sustentabilidade do sistema agroalimentar mato-grossense e brasileiro, fornecendo nutrientes essenciais ao solo e ajudando a combater as emissões de gases de efeito estufa.

Agradecimentos: Os autores agradecem à Faculdade de Geociências (FAGEO/UFMT) pelo financiamento dos trabalhos de campo e disponibilização dos laboratórios de laminação e de preparação de amostras, à Companhia Matogrossense de Mineração (METAMAT) pelo financiamento dos dados geoquímicos e ao Laboratório Multiusuário de Técnicas Analíticas (LAMUTA) da FAGEO/UFMT pela aquisição dos dados de difratometria de raios-x. Agradecem também ao Programa de Pós-Graduação em Geociências pelo apoio e suporte durante o desenvolvimento da dissertação de mestrado da primeira autora. Ao projeto FINEP – Fundo Setorial Mineral “Rede de PD&I sobre remineralizadores e agrominerais (1541/2022).

Contribuições dos Autores: análise formal, pesquisa, escrita do artigo, revisão: A.J.S. Moraes e R. Pierosan; concepção, validação, aquisição de financiamento, recursos: R. Pierosan; validação, revisão: E.S. Martins; preparação de dados: V.H.S.A. Muniz e M.F. Lima. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito".

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

- Aitken, M.; Amann, M.; Anderson, K.; Van Asselt, H.; Bertram, C.; Bosetti, V.; Broderick, M.; Victor, D.; Voss, J.; Zhang, J. 2022. Ethical considerations of negative emission technologies. *Nature Climate Change*, 12(1): 21-29.
- ANDA – Associação Nacional para a Difusão de Adubos. 2015. *Anuário estatístico 2015*. 175 p.
- Berner, R.A. 1991. A model for atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. *American Journal of Science*, 291(4): 339-376. <https://doi.org/10.2475/ajs.291.4.339>
- Blum, A.E. & Stillings, L.L. 1995. Feldspar dissolution kinetics. In: White, A.F.; Brantley, S.L. (Eds.). *Chemical weathering rates in silicate minerals*. Reviews in Mineralogy, 31, Mineralogical Society of America. p. 291-351.
- Brantley, S.L. & Chen, Y. 1995. Chemical weathering rates of pyroxenes and amphiboles. In: White, A.F.; Brantley, S.L. (Eds.). *Chemical weathering rates in silicate minerals*. Reviews in Mineralogy, 31, Mineralogical Society of America. p. 119-172.
- Cerri, C.E.P. 2022. *Sequestro de Carbono no Solo*. Revista Novo Solo, Ano 1, Edição 1, ABREFEN: 33-37.
- Cerri, C.C. & Cerri, C.E.P. 2007. *Agricultura e aquecimento global*. Boletim Informativo – SBCS, 23: 40-44.
- Churchman, G.J.; Singh, M.; Schapel, A.; Sarkar, B.; Bolan, N. 2020. Clay Minerals as the key to the Sequestration of Carbon in Soils. *Science of the Total Environment*, 739: 138488. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138488>
- Deepthy, R. & Balakrishnan, S. 2005. Climatic control on clay mineral formation: evidence from weathering profiles developed on either side of the Western Ghats. *Journal of Earth System Science*, 114: 545-556. <https://doi.org/10.1007/BF02702030>
- Ebelmen, J. 1845. Sur les produits de la décomposition des especes minérales de famille des silicates. *Ann. Mines.*, 7: 3-66.
- FGV - Fundação Getúlio Vargas . 2023. *Relatório de seção. Power BI*. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoibWZkNjc0NTAtYTVjMi00OTc1LWJhZTctYWQxY2M0YzdjMGM0IiwidCI6ImRINGNIMThjLTUyMTQtNDA2OS04MTg4LTFiOGZiNDJlM2NjZSJ9&pageName=ReportSection8563bbab36110c9ec008>.
- Franke, W.A. & Teschner-Steinhardt, R. 1994. An experimental approach to the sequence of the stability of rock-forming minerals towards chemical stability. *Catena*, 21(2-3): 279-290. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90018-3)
- Goldich, S.S. 1938. A study in rock weathering. *Journal of Geology*, 46(1): 1097-1103. <https://doi.org/10.1086/624619>
- Hartmann, J. & Kempe, S. 2008. What is the maximum potential for CO₂ sequestration by “stimulated” weathering on the global scale? *Naturwissenschaften*, 95: 1159-1164. <https://doi.org/10.1007/s00114-008-0434-4>
- Hartmann, J.; Weste, A.J.; Renforth, P.; Köhler, P.; Rocha, C.L.; Wolfigladrow, D.A.; Dürr, H.H.; Scheffran, J. 2013. Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide,

supply nutrients and mitigate ocean acidification. *Reviews of Geophysics*, 51(2): 113-149. <https://doi.org/10.1002/rog.20004>

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Jorat, M.E.; Goddard, M.A.; Manning, P.; Lau, H.K.; Ngeow, S.; Sohi, S.P.; Manning, D.A.C. 2019. Passive CO₂ removal in urban soils: Evidence from brownfield sites. *Science of the Total Environment*, 664: 1312-1323. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.027>

Keller, W.D. 1948. Native rocks and minerals as fertilizers. *Science Monthly*, 66(2): 122-130. <https://www.jstor.org/stable/19331>

Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1-2): 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.0>

Lenton, T.M. & Britton, C. 2006. Enhanced carbonate and silicate weathering accelerates recovery from fossil fuel CO₂ perturbations. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(3): GB3009. <https://doi.org/10.1029/2005GB002678>

Lima, M.F. 2019. *Geologia de campo, Petrografia e Difratometria de Raios X do Complexo Alcalino Planalto da Serra – MT: Rochas Alcalinas e suas Encaixantes*. Monografia (Graduação em Geologia). Faculdade de Geociências – Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, Mato Grosso. 59 p.

Lima, T.M.; Menezes, R.G.; Silva, G.D.; Bahia, R.B.C.; Souza Júnior, L.C.; Resende, Á.V.; Souza Martins, É.; Saes, G.S.; Pinho, F.E.C.; Neder, R.D.; Santos, A.A.; Santos Júnior, W.A.; Gomes, L.P.; Silva S.N.; Ormond, M.M.; Ganzer, E.B.; Faleiro, A.S.G.; José, M.R.; Muniz, D.H.F.; Freitas, L.L.; Pinheiro, J.M. 2008. *Avaliação de Rochas Calcárias e Fosfatadas para Insumos Agrícolas do Estado de Mato Grosso*. Cuiabá: CPRM: METAMAT. 178 p.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. 2023. *Portal de dados aberto*. Sistema Integrado de Produtos e Estabelecimentos Agropecuários - SIPEAGRO. Dados referentes ao registro e cadastro dos Estabelecimentos e Produtos Agropecuários, tais como pedidos de registro de estabelecimentos e produtos, solicitações de alteração diversas relacionadas com estabelecimentos e produtos agropecuários. Disponível em: <https://dados.agricultura.gov.br/dataset/sipeagro/resource/e0bbc9d5-f161-448b-a6d4-c7beb312ec33>. Acesso em 30/08/2023.

Minx, J.C.; Lamb, W.F.; Callaghan, M.W.; Fuss, S.; Hilaire, J.; Creutzig, F.; Amann, T.; Beringer, T.; Garcia, W. O.; Hartmann, J.; Khanna, T.; Lenzi, D.; Luderer, G.; Nemet, G.F.; Rogelj, J.; Smith, P.; Vicente, J.L.V.; Wilcox, J.; Dominguez, M.M.Z. 2018. Negative emissions - Part 1: Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters*, 13(6): 063001–. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b>

Moreira, F.M.S. & Siqueira, J.O. 2006. *Microbiologia e bioquímica do solo*. 2 ed. Lavras: Editora UFLA. 729 p.

Muniz, V.H.S.A. 2023. *Prospecção de remineralizadores de solo na região sul do município de Colíder (MT): Dados de Campo, Petrografia e Geoquímica*. Monografia (Graduação em Geologia). Faculdade de Geociências – Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, Mato Grosso. 35 p.

Padua, E.J. 2012. *Rochagem como adubação complementar para culturas oleaginosas*. 90 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) Universidade Federal de Lavras, MG, 2012. 91 p.

Paramesh, V.; Kumar, R.M.; Rajanna, G.A.; Gowda, S.; Nath, A.J.; Madival, Y.; Jinger, D.; Bhat, S.; Toraskar, S. 2023. Integrated nutrient management for improving crop yields, soil properties, and reducing greenhouse gas emissions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7: 1173258. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1173258>

Pillon, C.N. 2016. Dos pós de rocha aos remineralizadores: passado, presente e desafios. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Clima Temperado. *Anais do III Congresso Brasileiro de Rochagem*. 15-22 p.

Ramos, C.G.; Mello, A.G.; Kautzmann, R.M.A. 2014. A preliminary study of acid volcanic rocks for stonemeal application. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 1-2: 30-35. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2014.03.002>

Renforth, P. 2019. The negative emission potential of alkaline materials. *Nature Communications*, 10(1): 1401. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09475-5>

- Schuiling, R.D. & Krijgsman, P. 2006. Enhanced weathering: an effective and cheap tool to sequester CO₂. *Climatic Change*, 74, 349-354. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-3485-y>
- Silva, D.R.G. 2012. *Caracterização e avaliação agrônômica de rochas silicáticas com potencial de uso como fontes alternativas de nutrientes e corretivos da acidez do solo*. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília – UnB, Brasília, 2012. 173 p.
- Silva, C.R.S.; Silva, L.A.; Melo, G.S.; Santos, M.L.; Silva, R.R.; Silva, M.S. 2023. Remineralizadores de solo como estratégia para sequestro de carbono e mitigação das emissões de CO₂ provenientes da agricultura. *Ambiente & Sociedade*, 26(1): 1-20.
- Soares, G.J. 2018. *Influência da Rochagem no desenvolvimento de sistemas agroflorestais e na captura de Dióxido de Carbono atmosférico*. Dissertação (Mestrado em meio ambiente e Desenvolvimento Rural) Universidade de Brasília – UnB, Brasília. 101 p.
- Suchet, P.A. & Probst, J.L. 1993. Modelling of atmospheric CO₂ consumption by chemical weathering of rocks: application to Garonne, Congo and Amazon basins. *Chemical Geology*, 107(3–4): 205-210. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90174-H](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90174-H)
- Swoboda, A.R.; Dantas, M.V.B.; Nogueira, E.S.; Paim, F.A.P. 2022. Remineralizadores de solo: uma revisão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 46(2), 129- 137. <https://doi.org/10.1590/1806-9657rbcsv46.22.0010>
- Tassinari, C.C.G. & Macambira, M.J.B. 2004. O Cráton Amazônico: evolução geotectônica e recursos minerais. In: Ramos, M.C.B.; Tassinari, C.C.G.; Campos, L.M.A. (Eds.). *Geologia do Brasil*. Rio de Janeiro: CPRM. p. 131-170.
- Theodoro, S.H. & Leonardos, O.H. 2006. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 78 (4): 721-730. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000400008>
- Walker, J.C.G.; Hays, P.B.; Kasting, J.F. 1981. A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, 86(C10): 9776-9782. <https://doi.org/10.1029/JC086iC10p09776>
- West, A.J.; Galy, A.; Bickle, M. 2005. Tectonic and climatic controls on silicate weathering. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(1–2): 211-228. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.03.020>
- White, A.F. & Blum, A.E. 1995. Effects of climate, chemical_ weathering in watersheds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(9): 1729-1747. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00078-E](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00078-E)