

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-graduação em Geologia

Leonardo de Matos Araujo

ZONEAMENTO AGROGEOLÓGICO DO
CHAPADÃO URUCUIA E SEU ENTORNO

BELO HORIZONTE
2025

Leonardo de Matos Araujo

**ZONEAMENTO AGROGEOLÓGICO DO
CHAPADÃO URUCUIA E SEU ENTORNO**

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 Econômica e Aplicada.

Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Orientadora: Prof^ª Flávia Cristina Silveira Braga.

Coorientador: Prof. Éder de Souza Martins.

Belo Horizonte
2025

A663z
2025

Araujo, Leonardo de Matos.

Zoneamento agrogeológico do Chapadão Urucuia e seu entorno [manuscrito] /
Leonardo de Matos Araujo. – 2025.

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

Orientadora: Flávia Cristina Silveira Braga.

Coorientador: Éder de Souza Martins.

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

Bibliografia: f. 75-88.

Inclui anexos.

1. Geologia – Teses. 2. Agricultura – Teses. 3. Zoneamento – Teses. 4.
Geoprocessamento – Teses. 5. Sustentabilidade e meio ambiente – Teses. I.
Silveira-Braga, Flávia Cristina. II. Martins, Éder de Souza. III. Universidade Federal
de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 631.4:55



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC/UFMG



FOLHA DE APROVAÇÃO

Zoneamento agrogeológico do Chapadão Urucuia e seu entorno

LEONARDO DE MATOS ARAUJO

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 18 de março de 2025, pela banca constituída pelos membros:

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

Prof(a). Dr(a). Coralie Heinis Dias
UEMG

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

Belo Horizonte, 18 de março de 2025.

Dedico este trabalho aos meus pais, Wilson de Araujo e Vivian de Matos, cuja dedicação, amor e exemplo foram fundamentais em cada passo da minha trajetória. São, sem dúvida, os maiores responsáveis pelas minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Ao longo desta caminhada, muitas pessoas foram essenciais para a concretização deste trabalho, e é com imensa gratidão que dedico este espaço a reconhecer e agradecer cada uma delas.

À minha orientadora, Prof^a Dr^a Flávia Braga, por acreditar no meu potencial desde o início e por sua paciência e dedicação, especialmente nos momentos em que enfrentei desafios pessoais. Sua experiência e conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa, assim como sua disposição em orientar um estudo em um tema tão inovador.

Ao meu coorientador, Dr. Éder Martins, que prontamente aceitou o convite para contribuir com este estudo e, com seu vasto conhecimento na área, nos orientou e auxiliou de forma inestimável ao longo da pesquisa.

À AIBA, pelo apoio essencial no fornecimento de dados do oeste baiano, permitindo uma base sólida para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Marcos Suita, que me auxiliou na fase inicial do projeto de pesquisa.

Aos meus amigos, que estiveram presentes em todos os momentos, sempre me incentivando e acreditando na minha capacidade, mesmo nos períodos mais desafiadores.

À minha família, em especial à minha mãe, pelo suporte incondicional e pelo amor que me sustentou em cada etapa deste caminho, e ao meu pai (*in memoriam*), que partiu enquanto eu ainda trilhava minha jornada na graduação, mas cujo exemplo de força e determinação permanece vivo em mim.

Ao William, do PPG/UFMG, que sempre esteve disponível e prestativo para nos ajudar com qualquer questão relacionada ao colegiado.

Ao Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa (CPMTC) e seus funcionários, por toda a infraestrutura e apoio técnico fornecido durante a pesquisa.

Ao Sr. Cassiano Mendes, cuja colaboração foi fundamental para o avanço deste estudo.

Ao amigo geólogo Esdras Varjão, pelo compartilhamento de informações valiosas sobre afloramentos, enriquecendo a pesquisa com sua experiência e conhecimento.

Por fim, à FAPEMIG, pelo financiamento e pela bolsa de estudos concedida, permitindo que esta pesquisa se concretizasse e contribuísse para o avanço do conhecimento na área dos remineralizadores.

A todos vocês, o meu mais sincero **muito obrigado!**

RESUMO

O estudo apresenta o Zoneamento Agrogeológico do Chapadão Urucuia e seu entorno, com o objetivo de identificar fontes potenciais de agrominerais e avaliar sua aplicabilidade na agricultura. A área de estudo foi definida a partir de um raio de 300 km ao redor do Chapadão Urucuia, abrangendo formações geológicas com potencial remineralizador nos Estados da Bahia, Piauí, Maranhão, Tocantins, Goiás e Minas Gerais. A metodologia envolveu geoprocessamento, caracterização mineralógica e geoquímica, além da elaboração de mapas qualitativos temáticos de reatividade, que facilitaram a identificação das áreas mais promissoras para exploração. Foram identificadas várias unidades geológicas potenciais, com destaque para o carbonatito do Complexo Metacarbonatítico de Angico dos Dias, rico em fósforo (10,8% de P_2O_5) e cálcio (35,4% de CaO), e o biotita xisto do Grupo Rio Preto, fonte de potássio (6,0% de K_2O) magnésio (7,71% de MgO) e cálcio (4,21% de CaO). O biotita-xisto atendeu aos critérios do MAPA para certificação como remineralizador. O carbonatito revelou-se uma alternativa viável como fonte de fósforo e cálcio, apesar de apresentar baixa concentração de potássio. Além do potencial agronômico, a proximidade dos depósitos minerais às áreas agrícolas do oeste baiano representa um diferencial estratégico, reduzindo custos logísticos e favorecendo a adoção desses insumos. Os resultados obtidos demonstram o potencial da região para reduzir a dependência de fertilizantes importados, promovendo maior autonomia na produção agrícola e incentivando práticas sustentáveis. Pesquisas futuras devem explorar a eficiência agronômica dos materiais em diferentes tipos de solo e culturas agrícolas, garantindo sua adequação às condições edafoclimáticas regionais.

Palavras-chave: agrogeologia; remineralizadores de solo; fertilização natural; biotita-xisto; carbonatito; sustentabilidade agrícola.

ABSTRACT

The study presents the Agrogeological Zoning of the Chapadão Urucuia and its surroundings, aiming to identify potential sources of agrominerals and assess their applicability in sustainable agriculture. The study area was defined within a 300 km radius around Chapadão Urucuia, covering geological formations with remineralization potential in the states of Bahia, Piauí, Maranhão, Tocantins, Goiás, and Minas Gerais. The methodology involved geoprocessing, mineralogical and geochemical characterization, as well as the development of qualitative thematic reactivity maps, which facilitated the identification of the most promising areas for exploration. Several promising geological units were identified, with emphasis on the carbonatite of the Angico dos Dias Metacarbonatitic Complex, rich in phosphorus (10.8% P_2O_5) and calcium (35.4% CaO), and the biotite schist of the Rio Preto Group, a source of potassium (6.0% K_2O), magnesium (7.71% MgO), and calcium (4.21% CaO). The biotite schist met the MAPA certification criteria for remineralizers. The carbonatite proved to be a viable alternative as a phosphorus and calcium source, despite its low potassium concentration. In addition to its agronomic potential, the proximity of these mineral deposits to agricultural areas in western Bahia represents a strategic advantage, reducing logistical costs and encouraging the adoption of these inputs. The results demonstrate the region's potential to reduce dependence on imported fertilizers, promoting greater autonomy in agricultural production and encouraging sustainable practices. Future research should explore the agronomic efficiency of these materials in different soil types and agricultural crops, ensuring their suitability for regional edaphoclimatic conditions.

Keywords: agrogeological zoning; soil remineralizer; natural fertilization; mica-schist; carbonatite; agricultural sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Delimitação da área de estudo e do Grupo Urucuia, que está praticamente todo inserido na região oeste da Bahia.	15
Figura 2 - (a) Campanha de campo Bahia/Piauí; (b) e a Campanha Tocantins/Goiás. Um total de 5.358 km percorridos (Belo Horizonte/MG como ponto de partida e chegada).....	18
Figura 3 - Estrutura hierárquica no Brasil (Brasil, 1988).....	23
Figura 4 - Aplicação de pó de rocha em lavoura utilizando um distribuidor a lanço. Este implemento agrícola é projetado para distribuir grandes volumes de materiais sólidos, como calcário e pó de rocha, de forma uniforme sobre a superfície do solo. Diferente dos fertilizantes químicos sintéticos, que costumam ser aplicados em quantidades menores e com maior frequência (Foto: Revista Cultiva, 2021).	28
Figura 5 - Estrutura para a aplicação de pó de rocha silicática, destacando os principais fatores que afetam a intemperização desses materiais. As relações entre os fatores não são explicitamente ilustradas. (Modificado: Swoboda et al., 2022).	30
Figura 6 - Províncias estruturais do Escudo Atlântico (modificado de Delgado et al., 2003).34	
Figura 7 - Delimitação das Províncias Tocantins e do Cráton do São Francisco e seus principais depósitos de rochas fosfáticas. (1), (2), (3) - Fm. Sete Lagoas;(4), (5), (7), (8) - Fm. Serra da Saudade;(6) - Fm. Rocinha (9) - Unidade Nova América, Fm. Salitre;(10) - Unidade Rio Preto, Fm. Sopa-Brumadinho (Monteiro, 2009).	39
Figura 8 – Mapa geológico simplificado do Cráton do São Francisco (Delgado et al., 2003).	41
Figura 9 - (a) Muscovita-xisto; (b) Muscovita-xisto crenulado. Ambas as amostras pertencem à Formação Formosa, do Grupo Rio Preto.	44
Figura 10 - (a) Afloramento do carbonatito, em Angico dos Dias/BA; (b) Fotografia da amostra coletada no afloramento.....	44
Figura 11 – Anfíbolito (amostra C1P5) encaixados entre a Fm. Formosa e a Fm. Canabrinha. De acordo com o DRX da amostra, a rocha pode ser uma potencial fonte de Mg e Ca.	45
Figura 12 - Mapa de localização da área de estudo. O raio de 300 km foi criado a partir da borda do Grupo Urucuia presente no Estado da Bahia.....	50
Figura 13 - Províncias Tectônicas do Brasil e localização da área de estudo.	51
Figura 14 - Distribuição do uso e ocupação do solo no oeste baiano. Fonte: Plataforma OBahia - Inteligência Territorial e Hídrica para o Oeste da Bahia.....	54

Figura 15 - Mapa com a distribuição dos pontos amostrados e selecionados para análises geoquímicas (esferas amarelas), afloramentos da plataforma GeoSGB (esferas verdes), malha equidistante criada para o estudo (esferas brancas), área de estudo e o Grupo Urucuia em destaque.	55
Figura 16 - (a) Mapa do grau de reatividade de rochas fosfatadas; (b) Geologia da região de Irecê/BA; (c) Região sul do Estado do Piauí; (d) Porção central do Estado do Tocantins (d). Os locais exatos das amostragens feitas por terceiros são apenas aproximados.....	60
Figura 17 - (a) Mapa do grau de reatividade de rochas potássicas; (b) Mapa geológico da região de Guanambi/BA, com foco no Batólito Guanambi; (c) Mapa geológico com foco no Grupo Rio Preto; (d) Formação Serra da Saudade, no setor noroeste do estado de Minas Gerais.....	62
Figura 18 - (a) Mapa do grau de reatividade de rochas cálcicas, (b) Mapa do grau de reatividade de rochas magnesianas; (c) Mapa geológico da região oeste do Piauí; (d) Mapa geológico da região norte de Minas Gerais.....	64
Figura 19 - Fotomicrografia do biotita-xisto, luz transmitida, nicóis descruzados, com objetiva de 10x, onde é possível visualizar biotita (Bt) e quartzo (Qtz).	65
Figura 20 - Curva granulométrica referente à análise de fertilidade e corretivo das amostras do biotita-xisto (cor laranja) e carbonatito (cor azul).	66
Figura 21 - Difratoograma da amostra do biotita-xisto, com quantificação mineralógica obtida pelo método de Rietveld.	67
Figura 22 - Diagrama ternário PKCa-Mg representando os grupos e subgrupos dos remineralizadores, com base nos macronutrientes primários (P e K) e secundários (Ca e Mg). Os integrais, localizados no centro do diagrama, apresentam concentrações elevadas desses nutrientes. Fonte: Modificado de Côrrea & Oliveira (2024).	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teores mínimos do macronutriente fósforo e de micronutrientes que podem ser declarados nos remineralizadores.....	24
Tabela 2 - Anexo III da Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016, que especifica a natureza física dos remineralizadores.....	26
Tabela 3 - Constantes de taxa de dissolução de minerais silicatados (25°C, pH = 0). Para fins comparativos, as taxas de dissolução relativas expressam a taxa de dissolução de um mineral em relação à do feldspato potássico (K-feldspato).....	28
Tabela 4 - Aplicações de variadas rochas em diferentes regiões e solos do Brasil	31
Tabela 5 - Revisão da matriz de estudos sobre pó de rocha silicática, incluindo as características mais relevantes de cada estudo. As abreviações de minerais e rochas são baseadas em Whitney e Evans (2010): Ep – Epidoto, Kfs – Feldspato potássico, Bt – Biotita, Glt – Glauconita, Mc – Microclínio, Ms – Moscovita, Ne – Nefelina, Phl – Flogopita, Qz – Quartzo, Znw – Zinwaldita. Os experimentos estão ordenados de acordo com a sequência em que aparecem na Seção 3..	32
Tabela 6 - Conceito estratigráfico da Bacia do Parnaíba.....	36
Tabela 7 - Resumo das ocorrências de fosfato na Província Parnaíba.	36
Tabela 8 - Áreas que possuem maior potencial para utilização como agromineral ou remineralizador de solos no Estado do Tocantins.....	38
Tabela 9 - Relação de parte das amostras coletadas nas duas etapas de campo. A estimativa mineralógica foi baseada na análise macroscópica.	43
Tabela 10 - Produção agrícola, em hectares, das principais culturas no oeste baiano. Apenas o algodão tem sua produtividade em arroba/hectare.....	53
Tabela 11 - Diferentes Taxas de Dissolução de minerais relevantes para utilização como agrominerais..	56
Tabela 12 - Resultado da análise de fertilização e corretivo do biotita-xisto.....	62
Tabela 13 - Análise química de FRX dos óxidos maiores e dos elementos menores analisados da amostra do biotita-xisto (LQ = abaixo do limite quantificável).	64
Tabela 14 - Resultado da análise de fertilização e corretivo do carbonatito.	65
Tabela 15 - Comparação dos teores de K ₂ O, K disponível, MgO e CaO do biotita-xisto estudado com dados de pesquisas publicadas que analisaram o mesmo resíduo e diferentes rochas em pó.	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Localização da área de estudo	15
1.2	Objetivos.....	15
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
1.3	Metodologia.....	16
1.3.1	Geoprocessamento.....	16
1.3.2	Reconhecimento de campo e amostragem.....	17
1.3.3	Caracterização mineralógica.....	17
1.3.4	Análises químicas	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Agrogeologia	20
2.2	Remineralizadores – Conceito e histórico	21
2.3	Regulamentação dos remineralizadores	22
2.4	Aspectos relevantes da aplicação do pó de rocha.....	26
2.5	Testes agronômicos	29
3	GEOLOGIA REGIONAL	34
3.1	A Província do Parnaíba	34
3.1.1	Recursos minerais.....	36
3.2	A Província Tectônica Tocantins	36
3.2.1	Recursos minerais.....	37
3.3	A Província Tectônica do Cráton do São Francisco.....	39
3.3.1	Recursos minerais.....	40
4	LEVANTAMENTO DE CAMPO	43
5	ARTIGO – Zoneamento agrogeológico do Chapadão Urucuia e seu entorno.....	46

5.1	Introdução.....	48
5.2	Localização da área de estudo	49
5.3	Contexto geológico.....	49
5.4	Demanda regional de fertilizantes	53
5.5	Materiais e métodos.....	54
5.5.1	Geoprocessamento.....	54
5.5.2	Amostragem e preparação	56
5.5.3	Procedimentos analíticos	57
5.6	Resultados.....	59
5.6.1	Mapeamento agrogeológico	59
5.6.2	Caracterização química e mineralógica das amostras coletadas	61
5.7	Discussões	63
5.7.1	Mapeamento agrogeológico	63
5.7.2	Possibilidades de aplicação	67
5.7.3	Comparações com outros estudos.....	69
5.8	Conclusões.....	71
6	CONCLUSÕES.....	73
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICES.....	92

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a busca por fontes alternativas de nutrientes para o solo tem ganhado relevância tanto no Brasil quanto no cenário internacional (Resende et al., 2012; Silva et al., 2012; Souza, 2014; Chiwona et al., 2020; Manning & Theodoro, 2020). Esse interesse crescente decorre não apenas dos impactos negativos associados ao manejo convencional do solo, que comprometem sua saúde e sustentabilidade (Kluthcouski et al., 2000; Darolt, 2001; Soares, 2010; Da Silva et al., 2011; Costa & Silva, 2012; Inagaki et al., 2018), mas também da vulnerabilidade da economia brasileira às flutuações do mercado global de fertilizantes, altamente concentrado em poucos fornecedores. Em 2021, por exemplo, o Brasil dependeu fortemente de países como Marrocos (28,5%), China (17,7%) e Rússia (17,6%) para a importação de fosfato, enquanto o potássio foi majoritariamente fornecido por Rússia (30,4%), Canadá (30,3%) e Bielorrússia (19,7%) (GlobalFert, 2022).

A intensificação da produção agrícola em escala global, marcada pelo aumento da produtividade por hectare de diversas culturas nas últimas quatro décadas, foi impulsionada principalmente pelo uso intensivo de fertilizantes, aliado a avanços tecnológicos e ao desenvolvimento de novas variedades agrícolas (Tilman et al., 2002). Entre 1960 e 1995, por exemplo, o consumo de fertilizantes nitrogenados aumentou sete vezes, enquanto o de fósforo cresceu 3,5 vezes. No entanto, existe uma preocupação de longa data de que, se não houver uma melhoria significativa na eficiência do uso desses insumos, projeta-se que o consumo de ambos triplique até 2050 (Tilman et al., 2002).

O manejo eficiente dos fertilizantes é essencial para a sustentabilidade agrícola. Segundo Bruulsema et al. (2012), a aplicação deve ser feita com o nutriente certo, na dose adequada, no local apropriado e no momento ideal. Os nutrientes necessários às plantas são classificados em macronutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio), macronutrientes secundários (cálcio, magnésio e enxofre) e micronutrientes (ferro, manganês, zinco, cobre, boro e molibdênio) (Son et al., 2024). O uso excessivo de fertilizantes sintéticos, associado a práticas agrícolas inadequadas, vem causando degradação do solo, desequilíbrios químicos e poluição ambiental, comprometendo a sustentabilidade agrícola (Tilman et al., 2002).

Nesse contexto, a utilização de rochas cominuídas como fontes de nutrientes representa uma alternativa viável para reduzir a dependência de fertilizantes químicos de alta solubilidade, como os formulados em NPK – nitrogênio, fósforo e potássio (Pinheiro & Barreto, 1996). Essa prática pode reduzir os custos de produção em até 50% (Theodoro et al., 2021) e apresenta

benefícios adicionais, como o reaproveitamento de resíduos, a geração de produtos com melhor custo-benefício e a expansão do mercado de fertilizantes minerais (Son et al., 2024).

A remineralização do solo, técnica que envolve a aplicação de pós de rochas como basalto, granito e calcário, tem sido amplamente estudada como uma estratégia sustentável para a reposição de nutrientes. Esses materiais liberam nutrientes de forma gradual por meio de processos como intemperismo mineral, troca catiônica e atividade microbiana (Leonardos et al., 2000; Son et al., 2024). A liberação lenta de nutrientes, como cálcio, magnésio e micronutrientes, promove um equilíbrio nutricional no solo, melhorando sua fertilidade e produtividade a longo prazo (Gillman et al., 2001; Ramos et al., 2015).

Além disso, a micronização de rochas vulcânicas tem se mostrado uma técnica eficaz para aumentar a eficiência na liberação de nutrientes. A redução do tamanho das partículas para a escala micrométrica ou nanométrica amplia a superfície de contato entre o mineral e o solo, facilitando a liberação de nutrientes de forma mais rápida e eficiente (Son et al., 2024). Estudos recentes demonstram que a aplicação de rochas micronizadas pode melhorar a capacidade de retenção de água no solo, reduzir a lixiviação de nutrientes e aumentar a atividade microbiana, contribuindo para a saúde geral do solo (Plata et al., 2021).

No entanto, a aplicação de rochas cominuídas também apresenta desafios significativos. A liberação de nutrientes tende a ser lenta e está diretamente condicionada por fatores como as características do solo, o clima e a atividade microbiana, o que demanda monitoramento contínuo e ajustes periódicos nas dosagens (Blum et al., 1989; Bolland & Baker, 2000). Além disso, a viabilidade econômica dessa prática em larga escala pode ser comprometida pela disponibilidade limitada de rochas adequadas e pelos custos elevados relacionados à extração, processamento e transporte — sendo este último um dos fatores mais críticos quando se trata da utilização de pó de rocha (Swoboda et al., 2022).

Os agrominerais, que incluem materiais como calcários, fosfatos e remineralizadores, são regulamentados no Brasil pela Lei nº 12.890/2013 (Brasil, 2013). Esses insumos são submetidos apenas à redução de partículas e visam melhorar a fertilidade do solo por meio da adição de nutrientes e da melhoria de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas (Martinazzo et al., 2022). Para integrar informações sobre solos agrícolas e agrominerais, a realização do Zoneamento Agrogeológico (ZAGEO) é fundamental, embora ainda exista uma lacuna significativa de estudos detalhados em escalas regionais, o que limita a aplicação mais ampla dessa ferramenta (Martins et al., 2016; Prado; Martins, 2019).

O presente estudo tem como objetivo realizar o ZAGEO na região do Chapadão Urucuia, localizada predominantemente no oeste da Bahia, e seu entorno (em um raio de 300 km a partir dos limites do Urucuia), com ênfase na identificação de potenciais fontes de fósforo e potássio. A escolha do raio se deve ao fato de que, dentro desta distância, há uma maior probabilidade dos possíveis depósitos de agrominerais atenderem à demanda agrícola regional, uma vez que o uso de remineralizadores tem alcance regional, devido a questões econômicas e logísticas (Martins et al., 2023). Geologicamente, o Chapadão Urucuia está inserido no Grupo Urucuia, uma unidade litoestratigráfica do Neocretáceo composta principalmente por arenitos, conglomerados e siltitos (Sgarbi et al., 2001; Barbosa, 2016). A região integra o MATOPIBA (acrônimo de Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), uma das principais fronteiras agrícolas do Brasil, destacando-se na produção de culturas como soja, milho e algodão, o que reforça a relevância de estudos que visem à otimização do uso de recursos minerais para a sustentabilidade agrícola.

A estrutura deste trabalho está organizada em seis capítulos principais, conforme descrito a seguir:

- **Introdução:** Apresenta o contexto geral da pesquisa, localização da área, objetivos e metodologia.
- **Referencial Teórico:** Reúne a fundamentação bibliográfica pertinente aos temas de remineralizadores e agrogeologia, oferecendo embasamento teórico para o desenvolvimento da pesquisa.
- **Geologia Regional:** Descreve as características geológicas das principais unidades litoestratigráficas presentes na área de estudo, com foco em sua relevância para o Zoneamento Agrogeológico.
- **Levantamento de Campo:** Detalha as atividades realizadas durante a etapa de campo, incluindo procedimentos metodológicos, coleta de amostras e registros observacionais.
- **Artigo Científico:** Apresenta o artigo submetido à Revista Brasileira de Geografia Física.
- **Conclusões:** Resume as principais conclusões obtidas a partir do estudo, destacando suas contribuições e sugestões para trabalhos futuros.
- **Referências Bibliográficas:** todas as referências citadas no corpo do texto deste trabalho.

1.1 Localização da área de estudo

A área de estudo da presente pesquisa compreende um raio de 300 km no entorno do Chapadão do Urucuia, abrange seis estados brasileiros: Bahia (BA), Piauí (PI), Maranhão (MA), Tocantins (TO), Goiás (GO) e Minas Gerais (MG) (**Figura 1**).

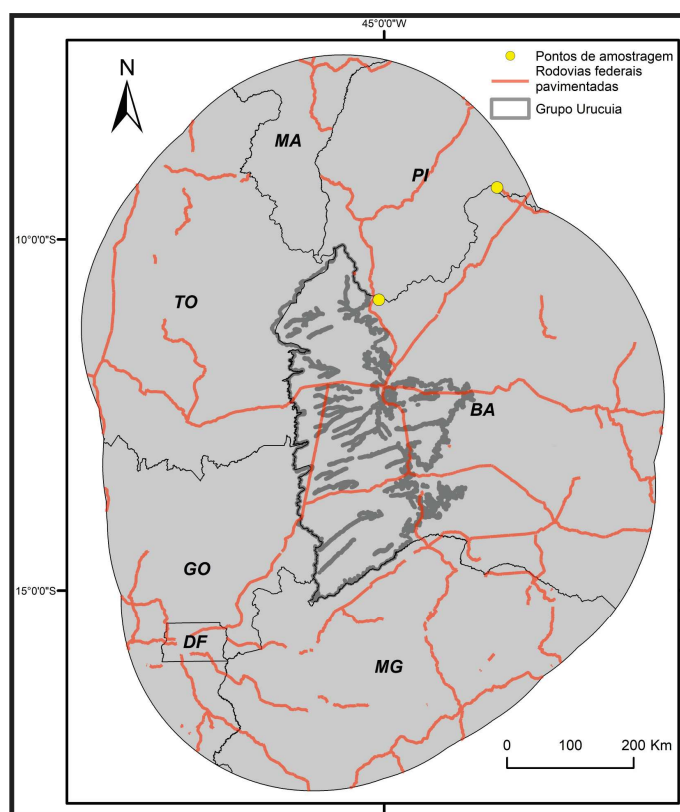


Figura 1 – Delimitação da área de estudo e do Grupo Urucuia, que está praticamente todo inserido na região oeste da Bahia.

O Chapadão do Urucuia, presente em seis estados brasileiros (Bahia, Tocantins, Minas Gerais, Piauí, Maranhão e Goiás), ocupa uma área estimada em 120.000 km², sendo que cerca de 75 a 80% desta área se localiza na Bahia (Bonfim & Gomes, 2004).

1.2 Objetivos

A presente dissertação de mestrado tem como objetivo investigar o potencial agrogeológico do Chapadão Urucuia e seu entorno, em um raio de até 300 quilômetros (**Figura 1**), produzir mapas do ZAGEO, além de expor os resultados e conclusões. Por meio do ZAGEO,

busca-se identificar e caracterizar fontes de agrominerais na região, visando contribuir para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis. Este estudo pretende preencher lacunas no conhecimento sobre as possibilidades de aproveitamento de recursos minerais para a agricultura nessa importante fronteira agrícola.

1.2.1 Objetivo geral

Realizar o Zoneamento Agrogeológico (ZAGEO) do domínio geológico conhecido como Chapadão Urucuia e em seu entorno, em um raio de até 300 quilômetros, e caracterizar possíveis fontes de agrominerais.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atender o objetivo geral traçado, foram delimitados os seguintes objetivos específicos:

- 1 Levantamento dos dados de demanda agrícola da área de estudo;
- 2 Delimitação de áreas alvos que contenham litologias passíveis de serem fontes de nutrientes para o solo, com base em acervos de dados geológicos;
- 3 Descrição de campo e amostragem dos alvos potenciais selecionados;
- 4 Caracterização mineralógica e geoquímica dos alvos amostrados;
- 5 Comparação dos resultados obtidos nos alvos caracterizados com dados de remineralizadores e fertilizantes de solos presentes na literatura;
- 6 Geração de mapas qualitativos de reatividade dos principais agrominerais de nutrientes primários e secundários.

1.3 Metodologia

1.3.1 Geoprocessamento

Para a elaboração dos mapas de capacidade de reatividade das rochas e dos nutrientes disponíveis na área de estudo, foi definida uma malha de pontos com espaçamento regular de 25 km, visando assegurar a representatividade e a distribuição uniforme dos dados coletados. A análise foi conduzida utilizando o software Esri ArcGis® 10.7.

Em cada ponto da malha, foram identificadas a unidade geológica e a litologia a partir do mapa geológico na escala de 1:1.000.000, disponibilizado pela plataforma GeoSGB®. Além disso, foram integrados ao banco de dados os pontos de afloramentos geológicos, que incluem descrições litológicas detalhadas fornecidas pela mesma plataforma. Este banco de dados foi posteriormente enriquecido com observações de campo realizadas durante o trabalho de campo, descritas no capítulo seguinte.

A avaliação da reatividade potencial das rochas em cada ponto foi realizada com base nos critérios qualitativos estabelecidos por Côrrea & Oliveira (2024), que classificam os agrominerais conforme seus diferentes graus de reatividade. Mais detalhes sobre esta metodologia são apresentados no Capítulo 4.

Com o banco de dados consolidado, os dados foram submetidos a um processo de interpolação por Krigagem Ordinária. Este processamento resultou na geração de quatro mapas temáticos, representando a distribuição e o grau de reatividade de rochas fosfatadas, magnesianas, cálcicas e potássicas.

1.3.2 Reconhecimento de campo e amostragem

Para a amostragem de áreas potenciais identificadas na etapa de geoprocessamento, a etapa de campo foi organizada em duas campanhas principais: a campanha Bahia/Piauí (**Figura 2a**), na qual foram percorridos 2.518 km, e a campanha Tocantins/Goiás (**Figura 2b**), com um total de 2.840 km percorridos.

Diversas amostras foram coletadas nos Estados da Bahia, Piauí, Tocantins e Goiás. A partir da análise macroscópica, foi possível estimar o percentual de minerais presentes nas rochas, permitindo a seleção das amostras para as análises geoquímicas subsequentes.

1.3.3 Caracterização mineralógica

Todas as amostras coletadas foram submetidas a análises de DRX (difração de raios-X) realizadas no CPMTC (Centro de Pesquisas Professor Manuel Teixeira da Costa) da UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais).

As amostras foram acondicionadas em porta-amostras de alumínio, utilizando a técnica de montagem do tipo *back-loading*. A caracterização mineralógica foi conduzida pelo Método do Pó, utilizando um difratômetro de raios X Panalytical Expert PRO, equipado com

goniômetro Θ - Θ (theta-theta) de 240 mm de diâmetro e configuração Bragg-Brentano. No tubo de raios X, o filamento de tungstênio foi excitado com uma corrente de 45 mA e uma voltagem de 40 kV. Os elétrons ejetados foram direcionados para bombardear um alvo de cobre, produzindo um feixe com comprimento de onda característico ($\text{CuK}\alpha 1 = 1,54060 \text{ \AA}$). Um conjunto de fendas e aberturas fixas foi utilizado para controlar o feixe e limitar a área de incidência no porta-amostra.

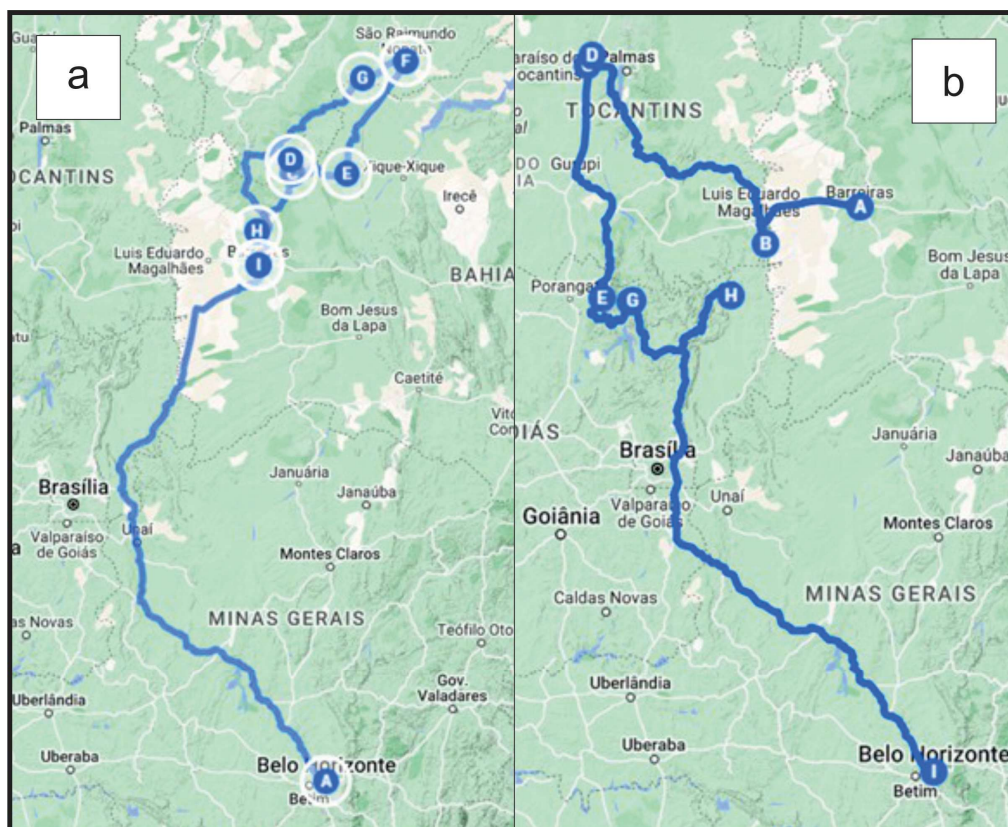


Figura 2 - (a) Campanha de campo Bahia/Piauí; (b) e a Campanha Tocantins/Goiás. Um total de 5.358 km percorridos (Belo Horizonte/MG como ponto de partida e chegada).

Os difratogramas obtidos foram interpretados por meio do software *HighScore Plus*. A identificação das fases minerais foi realizada por comparação com os bancos de dados COD (*Crystallography Open Database*) e ICDD (*International Centre for Diffraction Data*). Foi realizada a descrição petrográfica em lâmina delgada de uma das amostras coletadas (biotita-xisto), por ser o único material potencial adequado em termos de dureza.

Além disso, através do método Rietveld, foi possível determinar o percentual de SiO_2 , fator relevante na caracterização das rochas como remineralizadores, uma vez que a legislação vigente estabelece um limite máximo de 25% para o teor desse componente. A conformidade

ou não com esse limite influencia diretamente a aprovação do material como remineralizador de solo, conforme estabelecido pela Instrução Normativa MAPA nº 5, de 10 de março de 2016.

Também foi feita uma lâmina delgada do biotita-xisto, do qual foi analisada pelo microscópio óptico de luz plano polarizada. A partir daí foi possível obter uma estimativa visual do percentual dos minerais identificados na lâmina, assim como características texturais.

1.3.4 Análises químicas

Duas amostras coletadas (biotita xisto e carbonatito) foram submetidas a análises químicas de fertilidade no Laboratório Terra, em Goiânia/GO, seguindo os protocolos estabelecidos pelo MAPA (2017). A preparação das amostras envolveu abertura química com uma solução de ácido tartárico a 5% combinada com fluoreto de sódio (0,5% NaF), um método eficiente para a dissolução de minerais silicatados e carbonáticos, permitindo a extração de nutrientes e elementos-traço.

As análises permitiram a determinação de macronutrientes essenciais (P_2O_5 , K_2O , CaO , MgO), micronutrientes (Cu, Zn, Mn, Fe, B, Mo, Co) e elementos potencialmente tóxicos (Cd, Pb), conforme exigências para remineralizadores de solo. Foi possível identificar que alguns elementos potencialmente tóxicos, como As, Hg e Cr, não foram detectados, garantindo maior segurança na aplicação desses materiais como remineralizadores de solo.

Foi realizada a análise química por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX). Da amostra de biotita xisto no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI), utilizando um espectrômetro WDS Bruker S8 Tiger, equipado com tubo de Rh. A calibração dos óxidos maiores (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , SO_3) seguiu o pacote GeoQuant M® da Bruker, com padrões de rochas e minerais naturais. Detalhes sobre a preparação para a análise química são apresentados no capítulo 4.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo visa fornecer uma base teórica sólida para o desenvolvimento do estudo proposto. Primeiramente, são abordados os conceitos e histórico de utilização dos remineralizadores de solo. Em seguida, é discutida a regulamentação do uso desses materiais, destacando os aspectos legais e normativos pertinentes. Além disso, uma análise detalhada sobre a agrogeologia é apresentada, enfatizando sua importância na promoção da sustentabilidade agrícola. Por fim, são examinadas as principais litologias presentes no contexto geológico regional.

2.1 Agrogeologia

A agrogeologia é uma área interdisciplinar que integra conhecimentos de geologia, agronomia, química e ciências ambientais para estudar a aplicação de minerais na agricultura. Este campo emergente visa melhorar a produtividade agrícola e a saúde do solo, utilizando recursos geológicos para otimizar os aspectos químicos e físicos dos solos agrícolas (Silva & Souza, 2019). A agrogeologia foca especialmente no uso de remineralizadores de solo, materiais geológicos aplicados diretamente ao solo para fornecer nutrientes essenciais às plantas (Van Straaten, 2006).

De uma maneira geral, a agrogeologia considera o sistema solo-planta-atmosfera como um conjunto integrado. A aplicação de remineralizadores não apenas fornece nutrientes essenciais às plantas, mas também melhora a estrutura física do solo, aumenta a retenção de água e promove a atividade biológica, resultando em solos mais saudáveis e produtivos, capazes de sustentar a produção agrícola a longo prazo (Van Straaten, 2006).

O primeiro grande projeto agrogeológico foi o Projeto Tanzânia-Canadá, iniciado em 1989, com o propósito de aumentar a produtividade dos solos no sul da Tanzânia por meio do uso de matérias-primas locais (Van Straaten & Fernandes, 1995). Desde então, a agrogeologia tem avançado significativamente, com destaque para o Brasil, que desponta como um dos principais produtores de pesquisas e publicações sobre remineralizadores de solo (Corrêa & Oliveira, 2024).

Os benefícios da agrogeologia incluem a redução do uso de fertilizantes químicos, a melhoria da saúde do solo e a promoção de práticas agrícolas mais sustentáveis. Contudo, a adoção de remineralizadores enfrenta desafios, como a necessidade de altas quantidades de

aplicação e a liberação lenta de nutrientes. Mesmo assim, a agrogeologia oferece uma alternativa promissora para a agricultura sustentável, especialmente em solos pobres em nutrientes (Silva & Souza, 2019).

Segundo Kerek et al. (2010), a agrogeologia pode ser dividida em seis tarefas principais:

- Descrição agrogeológica detalhada e especificação de terras agrícolas;
- Estudo dos fatores geológicos que contribuem para a degradação do solo;
- Análise das propriedades agrogeológicas e do regime hídrico do sistema solo-saprólito-água subterrânea;
- Previsão e eliminação de efeitos nocivos do uso do solo;
- Investigação dos aspectos geológicos da regulação da água e irrigação;
- Definição, exame e caracterização da sequência geológica formadora do solo real.

O futuro da agrogeologia é promissor, com potencial para revolucionar a agricultura em termos de sustentabilidade e eficiência. A pesquisa contínua e a inovação tecnológica são essenciais para superar os desafios atuais e maximizar os benefícios dos remineralizadores de solo. A colaboração entre cientistas, agricultores e formuladores de políticas será crucial para integrar plenamente a agrogeologia nas práticas agrícolas convencionais (Van Straaten, 2006).

2.2 Remineralizadores – Conceito e histórico

O livro "*Bread from Stones*", escrito por Julius Hensel em 1894, é um marco histórico no estudo e na aplicação de remineralizadores na agricultura. Hensel, um químico agrícola, propôs o uso de pó de rocha (como granito, basalto e outras rochas primárias) como fertilizante natural, em oposição ao uso de fertilizantes químicos sintéticos que começavam a ganhar popularidade na época. Ele argumentava que as rochas pulverizadas contêm todos os minerais essenciais necessários para o crescimento saudável das plantas, incluindo micronutrientes frequentemente negligenciados. Hensel acreditava que a remineralização do solo com pó de rocha não apenas restauraria a fertilidade do solo, mas também produziria alimentos mais nutritivos e resistentes a pragas e doenças (Hensel, 1898).

Apesar das ideias inovadoras de Hensel, a prática de remineralização do solo não ganhou popularidade imediata, principalmente devido ao surgimento e à popularização dos fertilizantes químicos sintéticos. A "Lei do Mínimo" de Justus von Liebig, formulada em 1860, que enfatizava a importância de elementos como nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) para a produtividade agrícola, tornou-se a base para a agricultura moderna (Lopes & Guilherme,

2007). Essa abordagem, focada em poucos nutrientes essenciais, dominou a agricultura por décadas, relegando a remineralização a um papel secundário.

O interesse pelos remineralizadores ressurgiu nas últimas décadas do século XX, impulsionado por preocupações ambientais e pela busca por práticas agrícolas mais sustentáveis. Estudos realizados por Theodoro et al. (2006) demonstraram a eficácia do uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes, destacando os benefícios econômicos e ambientais dessa prática. A pesquisa mostrou que a rochagem poderia reduzir a dependência de fertilizantes químicos importados e melhorar a fertilidade do solo de forma sustentável.

Atualmente, a pesquisa sobre remineralizadores é conduzida por diversas instituições acadêmicas e de pesquisa, incluindo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Diversos estudos têm explorado a combinação de remineralizadores com técnicas de biofertilização, utilizando microrganismos para acelerar a disponibilização de nutrientes para as plantas (Van Schöll et al., 2008; Gadd, 2010; De Andrade et al., 2011; Silva et al., 2011; Cara et al., 2012; Silva 2018; Oliveira, 2022). Esta abordagem integrada tem mostrado resultados promissores, tanto em termos de produtividade agrícola quanto de sustentabilidade ambiental (Martins et al., 2008).

Os remineralizadores têm o potencial de transformar a agricultura, especialmente em regiões tropicais onde os solos são frequentemente pobres em nutrientes devido ao intenso intemperismo. Além disso, a aplicação de remineralizadores está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente os ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 6 (Água Potável e Saneamento) e ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) (Blaskowski et al., 2016).

No setor empresarial, várias companhias registradas no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) têm se destacado na produção de remineralizadores, como a Triunfo Mineração do Brasil LTDA e a BRITAMIL, em Minas Gerais, e a Mistel Mineração Santa Terezinha Ltda, em Goiás, que produzem insumos derivados de rochas como o basalto e o granulito (Viana et al., 2021).

2.3 Regulamentação dos remineralizadores

A legislação brasileira sobre remineralizadores teve seu marco inicial com a Lei 6.894 de 1980, que estabeleceu diretrizes para a produção, comercialização, controle e fiscalização de fertilizantes, corretivos, inoculantes e outros insumos agrícolas no Brasil, e que foi

posteriormente alterada pela Lei 12.890 de 2013. Esta última introduziu oficialmente o termo "remineralizador" na legislação brasileira, definindo-o 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, 2013). Esta definição foi um passo importante para o reconhecimento legal dos remineralizadores como insumos agrícolas, abrindo caminho para sua regulamentação mais detalhada.

A regulamentação dos remineralizadores de solo no Brasil segue uma estrutura hierárquica bem definida, que estabelece diretrizes para a produção, comercialização e aplicação desses materiais. Segundo Coelho (2016), essa hierarquia inclui a Constituição Federal, Leis Complementares, Leis Ordinárias, Decretos, Instruções Normativas, Portarias, Normas Internas e Atos (**Figura 3**). Cada nível normativo desempenha um papel crucial na garantia da qualidade e segurança dos remineralizadores utilizados na agricultura.

A regulamentação atual é baseada na Instrução Normativa nº 5 de 10 de março de 2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Esta instrução estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, registro de produto, autorizações, embalagem, rotulagem, documentos fiscais, propaganda e tolerâncias dos remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura (Brasil, 2016).



Figura 3 - Estrutura hierárquica no Brasil (Brasil, 1988).

De acordo com o artigo 4º da Instrução Normativa MAPA 05/2016, os parâmetros exigidos para os remineralizadores incluem:

- **Especificação de natureza física:** O remineralizador deve estar na forma de filler, pó ou farelado, conforme detalhado no Anexo I da Instrução Normativa.
- **Soma de bases (CaO, MgO e K₂O):** A soma das bases (óxido de cálcio - CaO, óxido de magnésio - MgO e óxido de potássio - K₂O) deve ser igual ou superior a 9% (nove por cento) em peso/peso.
 - Pelo menos **50% em peso** das partículas devem passar pela peneira de **0,3 mm (malha 50)**.
 - Pelo menos **90% em peso** das partículas devem passar pela peneira de **2,0 mm (malha 10)**.

Tabela 1 - Teores mínimos do macronutriente fósforo e de micronutrientes que podem ser declarados nos remineralizadores.

Nutriente	Teor Total Mínimo (% em peso/peso)
Fósforo (P ₂ O ₅)	1
Boro (B)	0,03
Cloro (Cl)	0,1
Cobalto (Co)	0,005
Cobre (Cu)	0,05
Ferro (Fe)	0,1
Manganês (Mn)	0,1
Molibdênio (Mo)	0,005
Níquel (Ni)	0,005
Selênio (Se)	0,03
Silício (Si)	0,05
Zinco (Zn)	0,1

- **Teor de nutrientes:** Deve conter nutrientes para as plantas ou outros elementos benéficos ao solo.
- **Teor de óxido de potássio (K₂O):** deve ser igual ou superior a **1% em peso**.
- **Potencial Hidrogeniônico (pH):** O **pH de abrasão** (parâmetro que mede o pH de uma suspensão aquosa formada por partículas finamente moídas de agrominerais em contato com água deionizada ou destilada) deve estar conforme o valor declarado pelo registrante. Esse parâmetro é importante na análise química de agrominerais por indicar sua reatividade química, potencial de alteração do pH do solo e compatibilidade com diferentes tipos de solos.

- **Declaração de macronutrientes e micronutrientes:** Quando o remineralizador contiver naturalmente macronutriente fósforo ou micronutrientes (boro, cloro, cobalto, cobre, ferro, manganês, molibdênio, níquel, selênio, silício e zinco), seus teores podem ser declarados. Contudo, esses teores somente podem ser informados caso sejam iguais ou superiores aos valores mínimos estabelecidos no Anexo II da Instrução Normativa (**Tabela 1**).

Os parâmetros indesejáveis para remineralizadores, conforme disposto no § 2º do Artigo 4º da Instrução Normativa MAPA nº 05/2016, estabelecem as condições que impedem o registro, a produção, a importação e a comercialização de remineralizadores no Brasil. Esses produtos são vedados caso apresentem os seguintes parâmetros:

- **Teor de SiO₂ Livre:** Não deve exceder 25% (vinte e cinco por cento) em volume de sílica livre (SiO₂) presente no produto.
- **Teores Máximos de Elementos Potencialmente Tóxicos:** Os teores de elementos tóxicos presentes no produto não podem ultrapassar os seguintes limites:
 - **Arsênio (As):** até 15 ppm.
 - **Cádmio (Cd):** até 10 ppm.
 - **Mercúrio (Hg):** até 0,1 ppm.
 - **Chumbo (Pb):** até 200 ppm.

Além disso, a instrução normativa estabelece tolerâncias para desvios entre os resultados analíticos encontrados e as garantias registradas ou declaradas (Artigo 6º):

- **Soma dos óxidos:** até 10% para menos, sem ultrapassar 1,5 unidade;
- **Nutrientes garantidos ou declarados:** até 25% para menos, sem ultrapassar 1 unidade;
- **pH de abrasão:** até 1 unidade para menos;
- **Especificação de natureza física:** conforme Anexo III da Instrução Normativa (**Tabela 2**).

É importante ressaltar que, embora todo remineralizador seja considerado um pó de rocha, nem todo pó de rocha pode ser classificado como remineralizador, devido às especificações mencionadas acima.

A regulamentação dos remineralizadores no Brasil tem evoluído significativamente nos últimos anos, com a criação de um marco legal específico e detalhado. Esta estrutura regulatória visa garantir a qualidade e eficácia desses produtos, promovendo seu uso seguro e eficiente na agricultura brasileira. No entanto, é um campo em constante evolução, e futuras atualizações

na legislação podem ocorrer para acompanhar os avanços científicos e as necessidades do setor agrícola.

Tabela 2 - Anexo III da Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016, que especifica a natureza física dos remineralizadores.

Especificação de natureza física	Peneira	Tolerância
Filler	0,3 mm (ABNT no 50)	Até 5 unidades para menos no mínimo passante
	2,0 mm (ABNT no 10)	Até 5 unidades para menos no mínimo passante
	0,84 mm (ABNT no 20)	Até 5 unidades para menos no mínimo passante
Pó	0,3 mm (ABNT no 50)	Até 5 unidades para menos no mínimo passante
	4,8 mm (ABNT no 4)	Até 2 unidades para menos no mínimo passante
Farelado	2,8 mm (ABNT no 7)	Até 5 unidades para menos no mínimo passante
	0,84 mm (ABNT no 20)	Até 5 unidades para menos no mínimo passante

2.4 Aspectos relevantes da aplicação do pó de rocha

O uso de pó de rocha na agricultura depende de uma série de fatores inter-relacionados que influenciam sua eficiência no solo. Esses fatores incluem o tipo de rocha e mineral, tamanho das partículas, quantidade aplicada, tipo de solo, espécie vegetal, condições climáticas e meteorológicas, duração dos experimentos e possíveis modificações físicas, químicas ou biológicas. Swoboda et al. (2022) destacaram os seguintes fatores:

1. **Tipo de Rocha e Mineral:** Os minerais silicáticos apresentam variações significativas em suas estruturas e composições elementares, resultando em diferentes taxas de dissolução (**Tabela 3**). Em geral, rochas máficas e ultramáficas, como basaltos, possuem minerais mais suscetíveis ao intemperismo quando comparadas a rochas félsicas, como granitos (Deer et al., 2013 & Swoboda et al., 2022). Essa diferença se deve à maior presença de minerais ricos em cálcio, magnésio e ferro nas rochas máficas, que apresentam dissolução mais rápida e maior disponibilidade de nutrientes para as plantas (Manning & Theodoro, 2020). Assim, a escolha da rocha deve considerar não apenas o teor dos nutrientes disponíveis, mas também a taxa de liberação desses elementos no solo.

2. **Tamanho das Partículas:** O tamanho das partículas influencia diretamente a área superficial reativa do material aplicado ao solo. À medida que as partículas são moídas em tamanhos menores, a superfície de contato com a solução do solo aumenta, favorecendo a dissolução dos minerais e a liberação de nutrientes (Palandri & Kharaka, 2004). Ensaios demonstram que partículas com diâmetro inferior a 150 µm apresentam maior solubilidade inicial, promovendo melhor disponibilização de nutrientes (van Straaten, 2007). No entanto, estudos indicam que essa diferença tende a se estabilizar após algumas semanas, pois a dissolução não ocorre de forma homogênea em todas as partículas (White & Brantley, 2003).

Tabela 3 - Constantes de taxa de dissolução de minerais silicatados (25°C, pH = 0). Para fins comparativos, as taxas de dissolução relativas expressam a taxa de dissolução de um mineral em relação à do feldspato potássico (K-feldspato) (Palandri & Kharaka, 2004; Manning & Theodoro, 2020).

Família mineral	Mineral	Fórmula	Nutrientes	Conteúdo típico (wt %)	Taxa de dissolução (mol.m ⁻² .s ⁻¹)	Taxa de dissolução relativa
<i>Silicatos potássicos</i>						
K-feldspato	Ortoclásio	KAlSi ₃ O ₈	K	14,1	-10,05	1
Feldspatoide	Leucita	KAlSi ₂ O ₆	K	17,4	-6,00	11,500
Feldspatoide	Nefelina	(Na,K)AlSiO ₄	K	4,2	-2,73	21,400,000
Mica	Muscovita	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	K	9,1	-11,85	0,016
Mica	Biotita	K(Fe,Mg) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	K, Mg	7,5;3,6	-9,84	1,66
Mica	Glauconita	K(Fe ³⁺ ,Al,Mg) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	K, Mg	7,5;3,0	-4,80	182,000
<i>Outros silicatos</i>						
Plagioclásio	Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Ca	13,6	-3,50	3.630,000
Plagioclásio	Albita	NaAlSi ₃ O ₈	Na	8,7	-10,16	0,794
Olivina	Forsterita	Mg ₂ SiO ₄	Mg	33,6	-6,85	1,620
Piroxênio	Wollastonita	CaSiO ₃	Ca	33,6	-5,37	49,000
Piroxênio	Diopsídio	CaMgSi ₂ O ₆	Ca, Mg	18,6	-6,36	5,010
Piroxênio	Enstatita	Mg ₂ Si ₂ O ₆	Mg	35,0	-9,02	11
Anfibólio	Hornblenda	Ca ₂ (Mg,Fe) ₄ Al[Si ₂ AlO ₂₂](OH) ₂	Ca, Mg	8,6;7,8	-7,00	1,150
Turmalina	Dravita	NaMg ₃ Al ₆ B ₃ Si ₆ O ₃₀ (OH)	Mg, B	7,8;3,5	-6,50	3,630

3. **Quantidade Aplicada:** A dosagem ideal de pó de rocha ainda não é um consenso na literatura. Estudos indicam que a aplicação pode variar de menos de 1 tonelada por hectare até mais de 100 toneladas por hectare, dependendo das condições do solo e do tipo de rocha utilizada (Bolland & Baker, 2000). Doses excessivas podem resultar em desequilíbrios nutricionais, especialmente quando o pó de rocha fornece majoritariamente um único nutriente (Pryono & Gilkes, 2008). Em razão da alta dosagem indicada, em comparação com os fertilizantes sintéticos, o método de aplicação costuma ser diferente (**Figura 4**). Ensaios agrônômicos sugerem que aplicações entre 1 e 20 toneladas por hectare são eficientes, apresentando bons resultados na melhoria da fertilidade do solo e na produtividade das culturas (Manning & Theodoro, 2020).

4. **Tipos de Solos:** Os solos altamente intemperizados, como os oxissolos e latossolos encontrados em regiões tropicais, são particularmente adequados ao uso de remineralizadores (Swoboda et al., 2022). Esses solos apresentam baixa capacidade de troca catiônica (CTC), alto grau de lixiviação e deficiência severa de nutrientes, tornando essencial a adoção de fontes alternativas de fertilização (Baligar & Bennett, 1986). Estudos apontam que a aplicação de pós de rocha nesses ambientes pode contribuir para a reposição de macronutrientes e micronutrientes, além de atuar na melhoria da estrutura do solo (Sanchez, 2019). Por outro lado, em solos temperados, que possuem maior reserva mineral, os efeitos podem ser menos significativos (Swoboda et al., 2022).
5. **Espécie Vegetal:** As plantas influenciam o intemperismo das rochas silicáticas por meio da atividade radicular e da exsudação de compostos orgânicos que aceleram a dissolução dos minerais (Hinsinger et al., 2001). Algumas espécies vegetais, como o milho (*Zea mays*), apresentam maior capacidade de liberar nutrientes como potássio e ferro, devido à produção de fitossideróforos e ácidos orgânicos na rizosfera (Römheld & Marschner, 1990). Ensaio demonstram que gramíneas e leguminosas apresentam respostas diferenciadas ao uso de pós de rocha, sendo que algumas espécies, como a soja (*Glycine max*), podem apresentar maior taxa de dissolução dos minerais devido à liberação de H^+ durante a fixação biológica de nitrogênio (Akter & Akagi, 2005).



Figura 4 - Aplicação de pó de rocha em lavoura utilizando um distribuidor a lanço. Este implemento agrícola é projetado para distribuir grandes volumes de materiais sólidos, como calcário e pó de rocha, de forma uniforme sobre a superfície do solo. Diferente dos fertilizantes químicos sintéticos, que costumam ser aplicados em quantidades menores e com maior frequência (Foto: Revista Cultiva, 2021).

6. **Clima e Condições Meteorológicas:** As condições climáticas exercem forte influência no intemperismo das rochas silicáticas. A temperatura elevada e a alta umidade favorecem a dissolução mineral e a liberação de nutrientes no solo (Lasaga et al., 1994). Estudos indicam que os efeitos do pó de rocha são mais pronunciados em regiões tropicais úmidas, onde a combinação de temperatura e precipitação elevada acelera a decomposição dos minerais (Sanchez, 2019). A presença de umidade é essencial para os processos de intemperismo químico, sendo um fator determinante para a eficiência do pó de rocha como fontes alternativas de fertilizantes (Weil & Brady, 2017).
7. **Duração dos Ensaios:** O pó de rocha atua como fertilizante de liberação lenta, promovendo efeitos a médio e longo prazo. Ensaios de curta duração podem não captar adequadamente os benefícios desses materiais, uma vez que os processos de dissolução mineral ocorrem de maneira gradual (Manning, 2010). Estudos indicam que a melhora da fertilidade do solo e do rendimento das culturas pode se manifestar ao longo de vários anos, como observado em experimentos florestais de longa duração (Taylor et al., 2021). No entanto, o tempo necessário para a obtenção de efeitos positivos pode variar conforme o tipo de solo, o clima e a composição mineralógica da rocha aplicada (Ramezani et al., 2015).
8. **Modificações do Pó de Rocha:** Diversas estratégias têm sido exploradas para aumentar a taxa de dissolução dos minerais silicáticos e melhorar a eficiência agronômica do pó de rocha (**Figura 5**). Métodos físicos, como a moagem de alta energia, podem aumentar a reatividade dos minerais e acelerar sua liberação de nutrientes (Kleiv & Thornhill, 2007). Processos químicos, como a fusão alcalina com Ca(OH)_2 ou NaOH , também têm demonstrado potencial para melhorar a disponibilidade de potássio e outros elementos essenciais (Ciceri et al., 2017). Além disso, modificações biológicas, como a inoculação com microrganismos solubilizadores de silicato, podem intensificar a liberação de nutrientes e melhorar a absorção pelas plantas (Meena et al., 2016).

2.5 Testes agronômicos

Os estudos sobre a aplicação de pó de rocha silicatados na agricultura têm mostrado potencial significativo para melhorar a fertilidade do solo e aumentar a produtividade agrícola.

Oliveira et al. (2023) apresentaram diversos trabalhos de ensaios realizados em diferentes rochas, regiões e solos do Brasil (Escosteguy & Klamt, 1998; Resende et al., 2006; Lopes et al., 2014; Coelho, 2017 & Toscani; Campos, 2017; Alovisei et al., 2020; Aquino et al., 2020; Tebar et al., 2021; Viana et al., 2021; Höfig et al., 2023) (**Tabela 4**). Esses ensaios são importantes pois a eficiência desse processo depende de fatores como granulometria da rocha, tipo de solo e espécie vegetal cultivada, o que sugere a necessidade de abordagens específicas para cada condição agrícola.

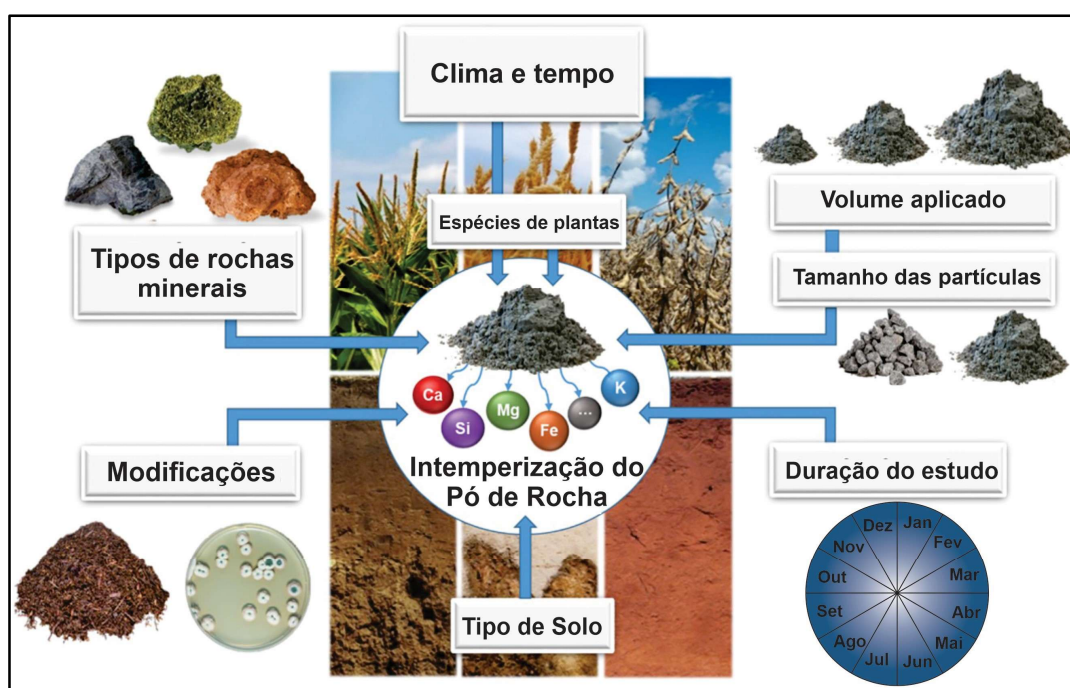


Figura 5 - Estrutura para a aplicação de pó de rocha silicática, destacando os principais fatores que afetam a intemperização desses materiais. As relações entre os fatores não são explicitamente ilustradas. (Modificado: Swoboda et al., 2022).

Swoboda et al. (2022) também apresentaram vários estudos de aplicações do pó de rocha em diferentes condições (**Tabela 5**). Dentre os minerais investigados nos ensaios, os feldspatos e feldspatoides têm recebido destaque devido à sua capacidade de liberar potássio lentamente para o solo, sendo uma alternativa sustentável aos fertilizantes solúveis convencionais. Estudos indicam que os feldspatos, apesar de conterem uma quantidade significativa de potássio, apresentam taxas de dissolução relativamente baixas em comparação com outros minerais, como os feldspatoides, que liberam esse nutriente de forma mais eficiente (Manning, 2018). Isso reforça a importância da escolha criteriosa dos materiais a serem utilizados para maximizar os benefícios agrônômicos da remineralização dos solos. Swoboda et al. (2022) chamam a atenção que a aplicação de pó de rocha tem sido investigada como estratégia para o sequestro

de carbono atmosférico. O intemperismo químico desses materiais contribui para a fixação de CO₂ na forma de bicarbonatos dissolvidos, reduzindo a concentração desse gás na atmosfera e mitigando os efeitos das mudanças climáticas. Entretanto, apesar dos resultados promissores, há desafios a serem superados, como a necessidade de estudos de longa duração e a avaliação do impacto econômico da adoção dessa técnica em larga escala.

Tabela 4 - Aplicações de variadas rochas em diferentes regiões e solos do Brasil ([1] Escosteguy & Klamt, 1998; [2] Resende et al., 2006; [3] Lopes et al., 2014; [4] Coelho, 2017; [5] Toscani & Campos, 2017).

Rocha	Local	Solos	Doses	Cultura	Período	Análises	Resultados
^[1] Basalto microcristalino e olivina-basalto.	Porto Alegre/RS	Latossolo vermelho escuro; podzólico vermelho amarelo.	0, 10, 25, 50 e 100 ton/ha		30, 150 e 300 dias	pH, CTC e concentrações de H+Al, K, Ca, Mg e P	Liberação de nutrientes variou apenas com período de incubação, exceto para Ca e P (maior liberação com olivina-basalto).
^[2] Brecha alcalina, biotita xisto e ultramáfica alcalina.	Casa de vegetação	Latossolo vermelho-amarelo distrófico.	-	Milho	-	Solo e planta	Maior liberação de potássio pelo biotita xisto, e produção de matéria seca do milho semelhante entre os tratamentos.
^[3] Basalto.	Araras/SP	Latossolo vermelho; neossolo quartzarênico	0, 2,0 e 4,0 ton/ha	-	-	Solo e vinhaça	Camada superficial do solo obteve teores maiores de Ca, Mg e K no solo argiloso tratado com vinhaça e pó de rocha.
^[4] Biotita e resíduo mineral de siderúrgica	Sete Lagoas/MG	Latossolo vermelho	75, 150 e 300 ton/ha	Milho e soja	4 safras (2006/07 ; 2007/08; 2008/09; 2009/10)	Produtividade	Milho e soja tiveram maior produção com uso do pó de rocha. Com resíduo mineral de siderúrgica houve queda de produção.
^[5] Fosforito e dolomito fosfatado (Fm. Sete Lagoas); basalto (Fm. Serra Geral).	Brasília/DF	Latossolo vermelho distrófico	NPK; NPK+Calagem ; 120 ton/ha (fosforito); 120 kg/ha (fosf.) e cal.; 60 kg/ha (fosf.) e 80 kg/ha (basalto); 60 kg/ha (fosf.) + 80 kg/ha (bas.) e cal.; 20 kg/ha (fosf.) e 80 kg/ha (bas.); 20 kg/há	Feijoeiro comum	Safras 2014-2016	pH e fertilidade do solo	Onde foi aplicado apenas remineralizador, a disponibilidade do potássio e fósforo foi 2,14 vezes maior do que apenas com calagem.

Tabela 5 - Revisão da matriz de estudos sobre pó de rocha silicática, incluindo as características mais relevantes de cada estudo. As abreviações de minerais e rochas são baseadas em Whitney e Evans (2010): Ep – Epidoto, Kfs – Feldspato potássico, Bt – Biotita, Glt – Glauconita, Mc – Microclínio, Ms – Moscovita, Ne – Nefelina, Phl – Flogopita, Qz – Quartzo, Znw – Zinwaldita (Modificado de Swoboda et al., 2022).

Rocha/mineral	Planta	Quantidade aplicada (t ha ⁻¹)	Solo (pH)	Tamanho das partículas (µm)	Duração (meses)	Tipo de experimento	Principais resultados	Fonte
Gnaise, esteatito (+vermicomposto)	Milho	6.6 (+43.4)	Latossolo (5.1)	>106 < 212	1 ½	Vaso	Aumento do crescimento das plantas e de minhocas. O gnaise atuou como fonte de Zn, enquanto o esteatito liberou metais pesados.	de Souza et al., 2019
a) Gnaise b) Kfs	Azevém	a) 25–100 b) 5–20	Areia argilosa (4.8), areia (5.0)	–	12	Vaso	Rochas moídas com alta energia aumentaram a produtividade, o pH do solo, e os teores de K e Si nas plantas.	Priyono e Gilkes, 2008
Basalto/Andesito	Gramínea	40	Areia argilosa (6.2)	30% > 2000 70% < 2000	36	Campo	Nenhum efeito na produtividade, na química do solo ou na microbiologia.	Campbell, 2009
Basalto, andesito	Azevém, trigo, trevo	5–50	Turfa (6.8), argila (6.9), areia (6.3)	30% > 2000 70% < 2000	36	Vaso	Nenhum efeito na produtividade, composição nutricional ou biologia do solo.	Ramezani et al., 2013
Basalto, andesito	Azevém, trevo	50	Areia argilosa (5.4), silte argiloso (5.5)	30% > 2000 70% < 2000	24	Vaso	Aumento da produtividade da gramínea apenas no primeiro ano. Sem efeito significativo no trevo.	Ramezani et al., 2015
Basalto, andesito	Mistura trevo-gramínea	50	Silte argiloso (4.8), areia argilosa (5.2)	30% > 2000 70% < 2000	12	Vaso	Aumento do crescimento do trevo, sem efeito na gramínea.	Dahlin et al., 2015
Andesito	Eucalipto	3.3–6.6	Argissolo	100% < 74	5	Campo	Fornecimento de K, mas sem crescimento significativo da planta. Mistura 50% SRP + 50% NPK superou 100% NPK.	Dalmora et al., 2020
Rocha dacítica	Aveia-preta, milho	1–7.2	Latossolo (~5)	100% < 2000 57% < 300	2 × 2 ½	Vaso	Aumento da produtividade, pH do solo e teores de K, P, Ca, além de redução da toxicidade por Al.	Ramos et al., 2019
Basalto	Cacau	5–20	Latossolo (4.3)	100% < 250 53% < 50	24	Campo	Aumento da produtividade e dos teores de K, Ca, Mg, Si e Na no solo. Redução da toxicidade por Al e Mn.	Anda et al., 2013
a) Basalto b) Tufo	Amendoim	5–50	Solo calcário (7.8)	a) 1–250 b) 100–1000	1	Vaso	Aumento do teor de Fe na planta, porém efeito reduzido na segunda colheita.	Barak et al., 1983
Basalto (+esterco)	a) Gramínea b) Milho	3.2 (+12.8)	Solo arenoso (5.3)	Ø = 24	a) 5 b) 4	Campo	Redução das emissões de NH ₃ do esterco, aumento da produtividade e da recuperação de N do esterco.	Shah et al., 2018
Seis tipos de rochas ¹	Arroz	2.5–40	Latossolo	125–1000	4	Vaso	Efeitos variados na produtividade, pH e teores de micro e macronutrientes. Rochas ultramáficas tiveram os melhores resultados.	Silva et al., 2014
Basalto, diabásio, bentonita	Faia, abeto, pinheiro	4.7	Solos florestais (3.8), (5.8), (2.8)	–	36	Campo	Aumento do pH em todos os solos, efeitos variados na biologia do solo.	Mersi et al., 1992
Dunito	Milho	0.04–1.5	Latossolo argiloso (5.2), Latossolo arenoso (5.4)	–	–	Vaso	Aumento da produtividade, biomassa e teores de Mg e Si.	Crusciol et al., 2019
Dunito	Soja	0.04–1.5	Latossolo argiloso (5.2), Latossolo arenoso (5.4)	–	–	Vaso	Aumento da produtividade, pH do solo e teores de Si e Mg nas plantas e no solo.	Moretti et al., 2019
Mistura de rochas ² (+palha de arroz)	Tomate	10	(5.13)	<2000	2	Vaso	Aumento da produtividade, pH do solo, Ca e Mg. Redução da resistência a doenças e dos teores de Mn e Zn no solo.	Li e Dong, 2013
Mistura de rochas ³ (+composto)	Maçã	10.4 (+15.6)	Areia argilosa (7.5)	<2000	24	Campo	Aumento da produtividade e qualidade dos frutos. Estímulo à microbiologia do solo e do composto.	Li et al., 2020
Basalto, pórfiro, grauvaque	Cevada, aveia, colza, trevo	150–600	Areia (5.3), argila (7.6)	60% < 63	1 ½–5	Vaso/campo	Fornecimento de nutrientes e aumento da produtividade em solos arenosos, efeito insignificante em solos argilosos.	Kahnt et al., 1986

Tabela 5 - (continuação)

Rocha/Mineral	Planta	Quantidade Aplicada (t ha ⁻¹)	Solo (pH)	Tamanho das Partículas (µm)	Duração (meses)	Tipo de Experimento	Principais Resultados	Fonte
Plagioclásio	Quiabo	1.4	Argila (7.7)	-	24	Campo	Aumento na produção. Feldspato + ácido giberélico apresentou efeito similar ao NPK	Abdel-Mouty & El-Greadly, 2008
Plagioclásio	Cebola	0.9–2.6	Argila arenosa argilosa (7.8)	-	3.5	Campo	Aumento na produção com a dosagem, 15% menor que K ₂ SO ₄	Ali & Taalab, 2008
K-feldspato	Tomate	1.3-4	Solo arenoso	125–250	5	Campo	K-feldspato insignificante, K-feldspato + composto: aumento na absorção e produção	Badr, 2006
Plagioclásio	Cana-de-açúcar	0.4-1.2	Solo calcário (8.4)	<2000	2 x 7	Campo	Aumento na produção. Kfs + composto superou o K ₂ SO ₄	Hellal et al., 2013
Plagioclásio	Capim	1.1	Oxisol (4.2)	<150	14	Campo	Insignificante para absorção e produção de K	Scovino & Rowell, 1998.
Fonolito	Café	0.9–3.7	Oxisol (pH 4.9)	-	24	Campo	Aumento na absorção de K e Si. Crescimento semelhante ao KCl	Mancuso et al., 2014
Fonolito (+composto)	Capim	5.4 (±3.3)	Oxisol	-	2 ½	Campo	Produção insignificante, aumento no teor de Si no solo, K e Na	Tavares et al., 2018
Glauconita	Trigo duro	2	(6.0)	<2000	4	Campo	Aumento na produção, elevação do cálcio e pH do solo, redução do magnésio do solo e maior teor de esmectita.	Rudmin et al., 2019
Verdete	Eucalipto, milho, capim	0.6 – 2.6	Oxisol (5.6)	<150	3–4	Vaso	Aumento na produção apenas para a grama. Rochas modificadas apresentaram rendimento e fornecimento de K semelhantes ao KCl.	Santos et al., 2016
Granito e diorito	Trigo	20	Solo arenoso (4.7)	45-90	2	Vaso	Nenhum efeito, granito aumentou a absorção e fornecimento de K	Hinsinger et al., 1996
Gnaiss	Azevém	30	Solo arenoso (7.2) e areia pura	90% < 40.8	2	Vaso	Pequeno mas estatisticamente insignificante aumento na absorção e fornecimento de K	Gunnarsson et al., 1989
Gnaiss, esteatita (+vermicomposto)	Milho	0.6–2.5 (+10–12)	Oxisol (5.0)	150–53	2 ½	Vaso	Aumento na produção e efeitos adicionais com vermicomposto.	de Souza et al., 2013
Gnaiss (+vermicomposto)	Milho	4 (+16)	Oxisol (6.2)	>106 < 212	2	Campo	Aumento na produção e absorção de K, Ca, Mg, K + Ni, Cr, Pb	de Souza et al., 2018

¹ Brecha, biotita, biotita xisto, rochas ultramáficas, flogopita, minério de manganês. ² Olivina, plagioclásio, quartzo, k-feldspato e biotita.

3 GEOLOGIA REGIONAL

A área de estudo abrange principalmente três importantes províncias geológicas (Parnaíba, Tocantins e Cráton do São Francisco – **Figura 6**), cujas características principais e recursos minerais, com ênfase nos agrominerais, serão brevemente descritos a seguir. A compreensão da evolução geológica e do potencial mineral destas províncias é fundamental para o planejamento estratégico do setor mineral e para o uso sustentável dos recursos naturais.



Figura 6 - Províncias estruturais do Escudo Atlântico (modificado de Delgado et al., 2003).

3.1 A Província do Parnaíba

A Província Parnaíba, também denominada Província Sedimentar do Meio-Norte, abrange aproximadamente 600.000 km² nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, englobando parte dos estados da Bahia, Maranhão, Piauí, Ceará, Tocantins e Pará (**Figura 6**). Trata-se de uma bacia intracratônica do tipo sinéclise, reconhecida como uma das principais bacias sedimentares do Fanerozoico brasileiro, cuja formação e evolução ocorreram durante estágios de transição e estabilidade da Plataforma Sul-Americana (Almeida et al., 2000).

Góes (1995) propôs a subdivisão da extensa área da bacia com base na evolução policíclica e na compartimentação tecto-sedimentar. Dessa forma, a Província Parnaíba foi segmentada em quatro bacias distintas: Bacia do Parnaíba, localizada na porção centro-sul e leste, de idade Siluriano-Triássica; Bacia das Alpercatas, de idade Jurássico-Eocretácea, situada na região central; Bacia do Grajaú, de idade Cretácea, na porção norte; e Bacia do Espigão-Mestre, também Cretácea, no extremo sul da província (Góes, 1995). Essa compartimentação reflete a complexidade do quadro tectono-sedimentar da região, com diferentes gêneses, estilos tectônicos e preenchimentos sedimentares ao longo do tempo.

Vaz et al. (2007), com base em dados de subsuperfície, estabeleceram uma divisão estratigráfica da Bacia do Parnaíba em cinco supersequências deposicionais (**Tabela 6**). A primeira, de idade siluriana, corresponde ao Grupo Serra Grande. A segunda, mesodevoniano-eocarbonífera, é equivalente ao Grupo Canindé. A terceira, neocarbonífera-eotriássica, refere-se ao Grupo Balsas. A quarta, de idade jurássica, está associada à Formação Pastos Bons. Por fim, a quinta supersequência, de idade cretácea, engloba as formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru. Além dessas sequências deposicionais, os autores destacam a presença de eventos magmáticos na evolução estratigráfica da bacia, incluindo os derrames vulcânicos e as intrusões magmáticas das formações Mosquito (Jurássico) e Sardinha (Cretáceo).

Os limites estruturais da Província Parnaíba são bem definidos: ao norte, pelo Arco Ferrer-Urbano Santos; a oeste, pela Faixa de Dobramento Paraguai-Araguaia; a noroeste, pelo Arco Tocantins; a leste, pela Província Borborema; e ao sul, pela Faixa de Dobramento Brasília e Arco São Francisco (Aguiar, 1969; Góes, 1995; Hasui et al., 2010). Adicionalmente, Nunes (1993) aponta que o substrato da província é composto por maciços arqueanos, crátons sinbrasilianos e cinturões orogênicos brasileiros, sobre os quais se desenvolveram estruturas grabeniformes durante os períodos Mesoproterozoico, Neoproterozoico e Fanerozoico (Cambro-Ordoviciano).

A morfologia da Província Parnaíba apresenta uma forma elíptica arredondada, com o maior eixo orientado no sentido NE-SW, inscrito em uma geometria hexagonal. Essa conformação resulta da tectônica linear predominante, caracterizada por falhamentos, flexuras e lineamentos que configuram um mosaico de blocos escalonados (Carozzi et al. 1975). A evolução da Bacia do Parnaíba e de suas áreas adjacentes está diretamente ligada ao desenvolvimento da Plataforma Sul-Americana nos estágios finais da formação do Paleocontinente Gondwana. De acordo com Oliveira e Mohriak (2003), esse contexto inicial está associado ao término do ciclo Pan-Africano/Brasiliano, no chamado Estágio de Transição, que ocorreu entre o final do Cambriano e o Meso-Ordoviciano (490–420 Ma).

Tabela 6 - Conceito estratigráfico da Bacia do Parnaíba. (Vaz et al., 2007).

Supersequência	Período Máximo
Formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru	Cretácea
Fm. Pastos Bons	Jurássica
Grupo Balsas	Neocarbonífera-eotriássica
Grupo Canindé	Mesodevoniano-eocarbonífera
Grupo Serra Grande	Siluriana

3.1.1 Recursos minerais

A Província Tectônica do Parnaíba é rica em diversos recursos minerais, destacando-se principalmente os hidrocarbonetos, fosfato, calcário, gipsita e argilas. Estes recursos são de grande importância econômica e têm potencial para contribuir significativamente para o desenvolvimento da região (Vaz et al., 2007; Bizzi et al., 2003).

Os depósitos de hidrocarbonetos na Província do Parnaíba possuem grande relevância econômica (Vaz et al., 2007). Além desses recursos, a região apresenta significativo potencial para agrominerais, especialmente fosfato (**Tabela 7**). De acordo com Sachs et al. (2013), ocorrem depósitos desse mineral nos Grupos Canindé, especificamente nas formações Longá e Pimenteiras. Remédio (2022) também identifica a presença de fosfato no Grupo Balsas, mais precisamente na Formação Pedra de Fogo. Esse mesmo autor destaca que os folhelhos da Formação Longá podem apresentar teores de P_2O_5 de até 26,5%.

Tabela 7 - Resumo das ocorrências de fosfato na Província Parnaíba.

Unidade Geológica	Teor de P_2O_5	Fonte
Formação Pimenteira	25%	Sachs et al., 2013
Formação Cabeças	Até 10%	Sachs et al., 2013
Formação Longá	Até 10% ¹ ; Até 26,5% ²	^[1] Sachs et al., 2013; ^[2] Remédio. 2022
Formação Pedra de Fogo	-	Remédio, 2022

3.2 A Província Tectônica Tocantins

A Província Tectônica Tocantins (**Figura 6**) localiza-se na porção central do Brasil, abrangendo os estados de Tocantins, Goiás, Distrito Federal e parte de Minas Gerais. Essa província é caracterizada por uma complexa evolução tectônica, marcada pela colisão de diferentes blocos crustais durante o Neoproterozoico (Fuck et al., 1994).

A Faixa Brasília, localizada na porção sul da Província Tocantins, é uma extensa faixa de dobramentos e empurrões que se formou durante a convergência e colisão entre os crátons

Amazônico, São Francisco e o bloco Paranapanema (Fuck et al., 1994). Essa faixa é composta por rochas metassedimentares, metavulcânicas e intrusões graníticas, com idades entre 2.0 Ga e 630 Ma (Pimentel et al., 2011). O metamorfismo na Faixa Brasília varia de fácies xisto verde a granulito, com pico metamórfico datado em cerca de 630-620 Ma (Baldwin; Brown, 2008).

3.2.1 Recursos minerais

Na Faixa Brasília, destacam-se importantes depósitos minerais, incluindo ouro, presente nas províncias auríferas de Porto Nacional, Dianópolis-Natividade, Arraias, Aurumina, Mara Rosa, Greenstone Belts e Arenópolis (Rizzotto et al., 2022). Além disso, a região abriga fosfato (**Figura 7**), identificado em localidades como Coromandel, Rocinha e Lagamar, e associado a formações do Grupo Canastra e Grupo Paranoá (Pimentel et al., 2001; Prado, 2019). Outros depósitos de relevância incluem cobre e zinco, concentrados nas jazidas de Morro Agudo e Vazante, e nióbio, conforme descrito por Dardenne (2000).

O fosforito de Paraisópolis/MG está localizado na porção meridional da Faixa de Dobramentos Brasília, abrangendo unidades geológicas como os Grupos Araxá, Canastra, Bambuí e o Complexo Campos Gerais. Esse depósito é predominantemente associado a uma sequência metassedimentar do Grupo Bambuí, onde ocorre principalmente em metassiltitos e brechas tectônicas enriquecidas em fosfato, originando fosforitos e foscretes. A mineralização fosfática, hospedada nesses litotipos, sugere condições favoráveis para a formação e preservação de depósitos economicamente exploráveis (Leme et al., 2024).

Na Faixa Araguaia, destacam-se importantes depósitos minerais, incluindo ouro, concentrado na província aurífera de Poconé-Baixada Cuiabana, além de jazidas de sulfetos polimetálicos, cromita e níquel laterítico (Rizzotto et al., 2022). A cromita ocorre em corpos ofiolíticos, enquanto o níquel laterítico se desenvolve em perfis lateríticos sobre serpentinitos. Além disso, há mineralizações auríferas relacionadas a processos metamórficos e deformacionais (Silva et al., 2014).

Fuck et al. (1994) destacaram outros importantes depósitos de agrominerais, como os depósitos de Campos Belos (GO) e Arraias (TO), denominados Coité 1, Coité 2 e São Bento. Esses depósitos estão localizados na porção basal da Formação Sete Lagoas, do Grupo Bambuí, de idade Neoproterozoica. Os tipos de minérios incluem fosforito primário estratificado, fosforito brechado, fosforito pedogênico e siltito fosfatado. A mineralização é composta principalmente por fluorapatita, com quartzo associado (Monteiro, 2009). Segundo o autor

supracitado, a Formação Sete Lagoas é composta por espessos pacotes (aproximadamente 120 metros) de siltitos estratificados, intercalados com bancos de margas calcíferas na base, seguidos por calcários e dolomitos em direção ao topo. As rochas mineralizadas em fosfato ocorrem interdigitadas com siltitos, próximo ao embasamento granítico.

Brod & Blaskowki (2024) citam diversas unidades geológicas localizadas no contexto da Faixa Tocantins, Estado do Tocantins, como potenciais para aplicação de agrominerais (**Tabela 8**), onde destacam-se os xistos com biotita e flogopita dos Complexos Rio dos Mangues e Almas-Cavalcante, como fontes potenciais de K, Mg, Ca, Fe, Si e Mn. A pesquisa foi baseada na análise química e mineralógica de 326 amostras coletadas em diferentes contextos geológicos do estado, identificando rochas silicáticas e não silicáticas com potencial para fornecimento de macronutrientes e micronutrientes essenciais à agricultura (Brod & Blaskowski, 2024).

O calcário é amplamente distribuído na Província Tocantins, especialmente na Faixa Brasília e na Faixa Araguaia. O calcário é uma importante fonte de cálcio e magnésio, essenciais para a correção da acidez do solo e para a nutrição das plantas (Alcarde, 2005). Os depósitos de calcário em Xambioá e Dianópolis são exemplos significativos dessas formações (Demito, 2011).

Tabela 8 - Áreas que possuem maior potencial para utilização como agromineral ou remineralizador de solos no Estado do Tocantins (Brod & Blaskowski, 2024).

Rochas	Unidades Geológicas	Local	Nutrientes
Biotita-flogopita xistos e esmectita	Unidade Morro de Aquiles do Complexo Rio dos Mangues	Monte Santo/TO	K, Mg, Ca, Fe, Si e Mn
Biotititos e flogopititos	Complexo Almas-Cavalcante	São Valério da Natividade/TO	K, Mg, Fe e Si
Basalto	Fm. Mosquito	Palmeiras do Tocantins e Filadélfia/TO	Ca, Mg, K, Fe, Si, Ni e Mn
Muscovita-biotita gnaisse	Fm. Xambioá (Grupo Baixo Araguaia)	Araguaína/TO	K, Mg, Ca, Si e Fe
Xistos e gnaisses	Fm. Xambioá (Grupo Baixo Araguaia)	Bandeirantes do Tocantins e Xambioá/TO	K, Ca e Mg
Anfibólio-biotita gnaisse tonalítico e muscovita-biotita gnaisse sienogranítico	Corpo Lajeado – Granito São José Pequeno	Peixe/TO	Ca, K, Fe e Si

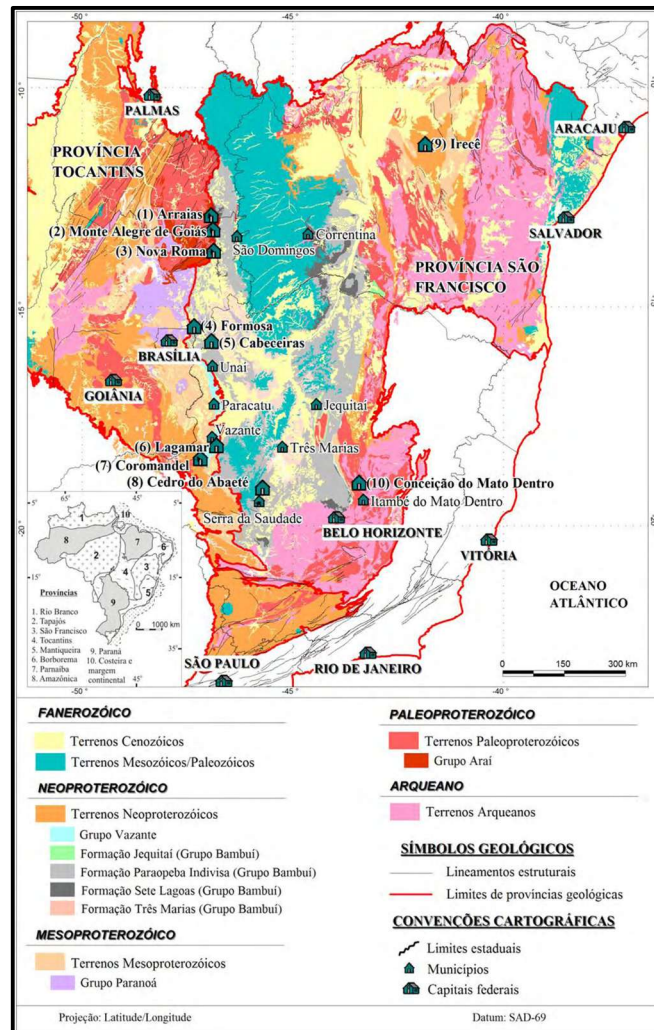


Figura 7 - Delimitação das Províncias Tocantins e do Cráton do São Francisco e seus principais depósitos de rochas fosfáticas. (1), (2), (3) - Fm. Sete Lagoas; (4), (5), (7), (8) - Fm. Serra da Saudade; (6) - Fm. Rocinha (9) - Unidade Nova América, Fm. Salitre; (10) - Unidade Rio Preto, Fm. Sopa-Brumadinho (Monteiro, 2009).

3.3 A Província Tectônica do Cráton do São Francisco

O Cráton do São Francisco localiza-se na região centro-leste do Brasil, abrangendo os estados da Bahia, Minas Gerais, Sergipe, Pernambuco e Goiás (**Figuras 6, 7 e 8**). Essa região apresenta uma rica história geológica que remonta ao Arqueano e Paleoproterozoico, sendo marcada por eventos de formação e fragmentação de supercontinentes (Barbosa et al., 2003).

O Cráton do São Francisco faz parte do Cráton do Congo-São Francisco, que se formou durante a amalgamação do supercontinente Rodínia há aproximadamente 1,1 bilhão de anos (Alkmim & Martins-Neto, 2001). Posteriormente, durante a formação do supercontinente Gondwana, há cerca de 700 milhões de anos, o cráton foi incorporado a essa nova massa continental. Com a fragmentação do Gondwana no Jurássico-Cretáceo, o Cráton do São

Francisco foi separado do Cráton do Congo, dando origem aos crátons homônimos na América do Sul e África (Alkmim & Martins-Neto, 2001).

O cráton é margeado por cinturões orogênicos Brasileiros, como as faixas Araçuaí, Ribeira, Brasília, Rio Preto, Riacho do Pontal e Sergipana. Esses cinturões foram formados durante os eventos colisionais que levaram à amalgamação do Gondwana no Neoproterozoico (Barbosa et al., 2003).

Internamente, o Cráton do São Francisco é composto por um embasamento Arqueano e Paleoproterozoico, incluindo sequências do tipo *greenstone belt*. Esse embasamento é recoberto por coberturas sedimentares e vulcanossedimentares, como o Supergrupo Espinhaço e o Grupo Bambuí, depositadas durante o Mesoproterozoico e Neoproterozoico, respectivamente (Sabaté & Marinho, 1982).

O cráton foi afetado por uma importante glaciação no Neoproterozoico, parte do evento conhecido como *Snowball Earth*, representada pelos sedimentos glacio-continentais e glacio-marinhos do Grupo Macaúbas. Esse evento de glaciação foi seguido por sucessivos episódios colisionais que moldaram a configuração atual do cráton (Barbosa et al., 2003).

3.3.1 Recursos minerais

O Cráton do São Francisco abriga importantes depósitos minerais, incluindo ouro, presente no Quadrilátero Ferrífero, Cinturão Mineiro, Serra de Jacobina e *greenstone belt* do Rio Itapicuru, além de ferro, com destaque para o Quadrilátero Ferrífero. Além desses metais, a região contém jazidas expressivas de diamante, manganês, bauxita e rochas ornamentais, que desempenham um papel fundamental na economia regional (Rizzotto et al., 2022). A diversidade desses recursos minerais contribuiu significativamente para o desenvolvimento socioeconômico das áreas inseridas nessa Província Tectônica (Barbosa et al., 2003).

Entre os depósitos de agrominerais mais relevantes do Cráton do São Francisco, destacam-se os depósitos de fosfato de Irecê (BA), Conceição do Mato Dentro (MG) e Cabeceiras (GO), que possuem grande potencial para a produção de fertilizantes naturais (Monteiro, 2009).

Em Irecê (BA), o depósito de fosfato é reconhecido como um dos mais importantes do Brasil, tanto em volume quanto em qualidade mineralógica (Blaskowski et al., 2016). Já em Conceição do Mato Dentro (MG), a mineralização fosfática ocorre em quartzitos e xistos carbonáticos enriquecidos em apatita, situados na porção superior da Formação Sopa-Brumadinho (Uhlein et al., 2018).

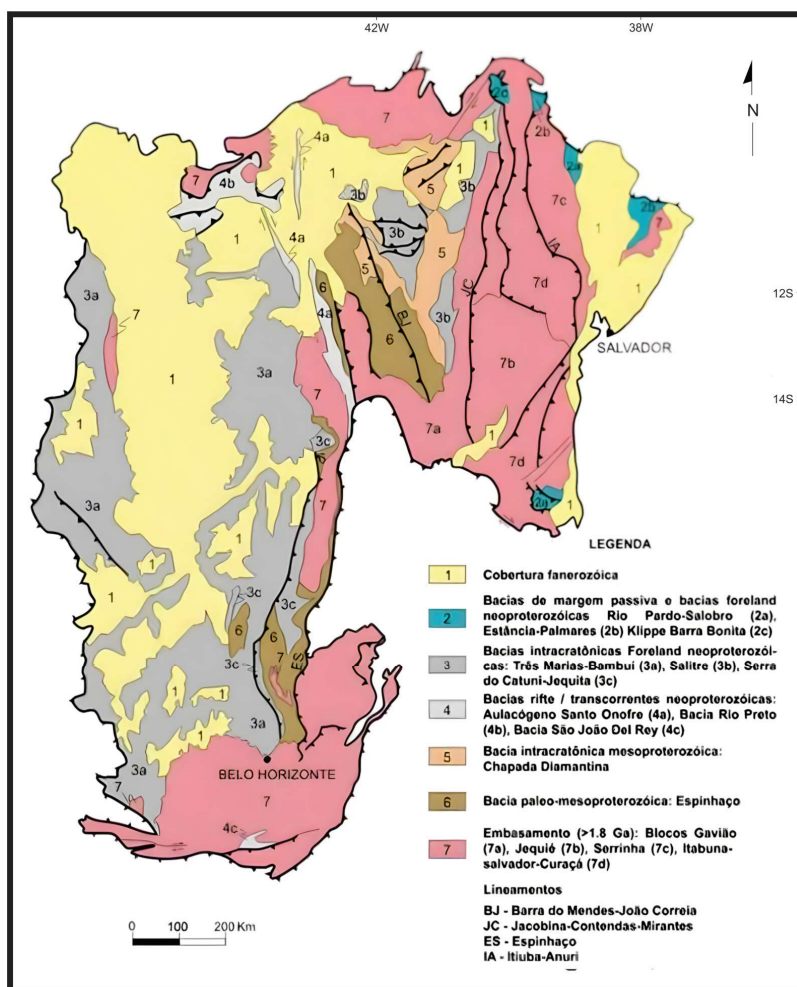


Figura 8 – Mapa geológico simplificado do Cráton do São Francisco (Delgado et al., 2003).

A sedimentação fosfática nessa área está associada a um evento transgressivo expressivo na Bacia do Espinhaço. Os fosforitos da Formação Sopa-Brumadinho, identificados em Conceição do Mato Dentro, apresentam assinatura geoquímica semelhante a depósitos fosfáticos marinhos, reforçando sua origem sedimentar ligada a eventos de subsidência da bacia (Mourão, 1995).

Segundo Monteiro (2009), diversas fases de fosfatogênese foram responsáveis pela formação dos depósitos de fosfato proterozoicos brasileiros. A borda cratônica se destaca como um ambiente propício para a deposição de fosfatos entre o Mesoproterozoico e o Neoproterozoico, como evidenciado pelos depósitos de Rocinha/Lagamar e Campos Belos/Arraias, além de inúmeras ocorrências associadas a esse contexto, incluindo Monte Alegre de Goiás, Nova Roma, Formosa e Cabeceiras, em Goiás, e Coromandel, Cedro de

Abaeté e Pium-Hi, em Minas Gerais (Boujo et al., 1994). Além disso, há ocorrências dentro do Cráton, como as registradas em Irecê/BA e Felixlândia/MG.

Além dos fosfatos, os depósitos de calcário são abundantes na província e apresentam alta qualidade, o que favorece sua utilização na agricultura (correção de solos) e na construção civil (Alcarde, 2005). A exploração desses recursos ocorre, principalmente, em unidades do Grupo Bambuí, como as Formações Lagoa do Jacaré e Serra de Santa Helena (Ribeiro, 2014). Outras unidades geológicas relevantes para a produção e beneficiamento de rochas carbonáticas incluem o Grupo São João Del Rei, Grupo Araxá, Grupo Vazante e Grupo Itabira, que contêm extensos depósitos de calcário e dolomito (Campelo, 2018).

Segundo Lima (2005), também podemos destacar a região de Cedro do Abaeté e São Gotardo, no Estado de Minas Gerais, como fonte dos ritmitos pelito-arenoso verdes (verdetes). Essas rochas, que possuem glauconita como o mineral que dá a coloração verde a rocha, possuem teores satisfatórios de K_2O entre 8 e 12% (Moreira, 2015).

4 LEVANTAMENTO DE CAMPO

Com base em um estudo prévio para a seleção das áreas a serem visitadas, utilizando dados fornecidos pela plataforma GeoSGB e referências da literatura, nas campanhas de campo foram percorridos mais de 5.000 quilômetros, abrangendo cinco estados: Bahia, Piauí, Tocantins, Goiás e Minas Gerais. Durante esse processo, verificou-se que nem todos os afloramentos indicados pela plataforma GeoSGB puderam ser localizados. No total, foram coletadas 18 amostras, cujas principais classificações estão apresentadas na **Tabela 9**.

É importante mencionar que boa parte das amostras apresentou muscovita como filossilicato predominante, o que levou à exclusão dessas amostras da etapa de análise geoquímica (**Figura 9**), uma vez que esse mineral, devido à sua baixa reatividade (Côrrea & Oliveira, 2024), não é considerado adequado para aplicação como agromineral.

Tabela 9 - Relação de parte das amostras coletadas nas duas etapas de campo. A estimativa mineralógica foi baseada na análise macroscópica.

Código da Amostra	Rocha	Local	Unidade Geológica	Mineralogia (estimativa visual)	DRX
C1P1	Muscovita xisto friável	Mansidão/BA	Fm. Formosa	70% muscovita, 25% quartzo e 5% granada.	-
C1P2	Muscovita xisto crenulado	Mansidão/BA	Fm. Formosa	60% muscovita, 25% quartzo, 10% granada e 5% sericita.	-
C1P4	Quartzito micáceo friável	Buritirama/BA	Fm. Formosa	45% de muscovita, 45% de quartzo e 10% de sericita.	43,0% de quartzo, 39,2% de muscovita.
C1P5	Anfibolito	Buritirama/BA	Fm. Formosa	70% de anfibólio, 25% quartzo e 5% de hematita.	59,8% de hornblenda, 33,4% de anortita, 3,4% de titanita, 3,2% de magnetita, 0,3% de quartzo.
C1P6	Quartzo sericítico	Buritirama/BA (BA-351)	Fm. Formosa	50% de quartzo, 20% de muscovita, 20% de granada e 10% de sericita.	47,3% de quartzo, 38,0% de muscovita, 12,0% de caulinita, 2,7% de goethita.
C1P7	Saprólito de carbonatito	Campo Alegre de Lourdes/BA	Complexo Metacarbonatítico Angico dos Dias	65% de quartzo, 25% de fluorapatita e 10% de hematita	57,4% de quartzo, 20,5% de fluorapatita, 8,4% de hematita, 7,2% de goethita, 3,4% de goyazita e 3,1% de caulinita.
C2P1	Dolomito acinzentado silicificado	Aurora/TO	Fm. Sete Lagoas	85% calcita/dolomita e 15% de quartzo	-
C2P10	Biotita Xisto	Formosa do Rio Preto/BA	Grupo Rio Preto	70% de biotita, 30% de quartzo	73,04% de biotita, 9,4% de caulinita, 9,46% de calcita, 7,27% de albita e 0,68% de dolomita.

As amostras que avançaram para a etapa de preparação geoquímica: um biotita xisto, proveniente do Grupo Rio Preto, em Formosa do Rio Preto/BA; e outra de saprólito de carbonatito (**Figura 10**), do Angico dos Dias, em Campo Alegre de Lourdes/BA.

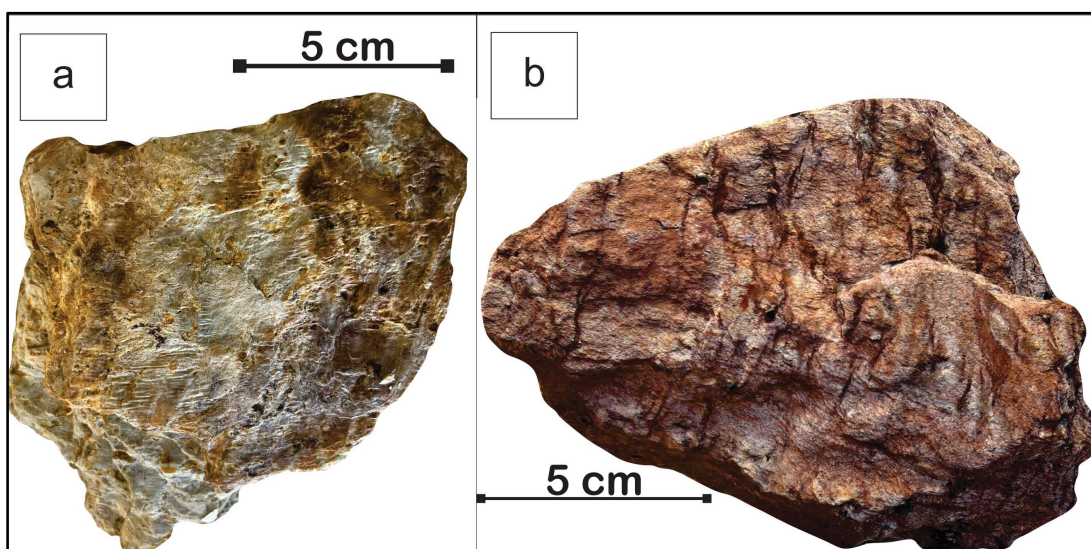


Figura 9 - (a) Muscovita-xisto; (b) Muscovita-xisto crenulado. Ambas as amostras pertencem à Formação Formosa, do Grupo Rio Preto.

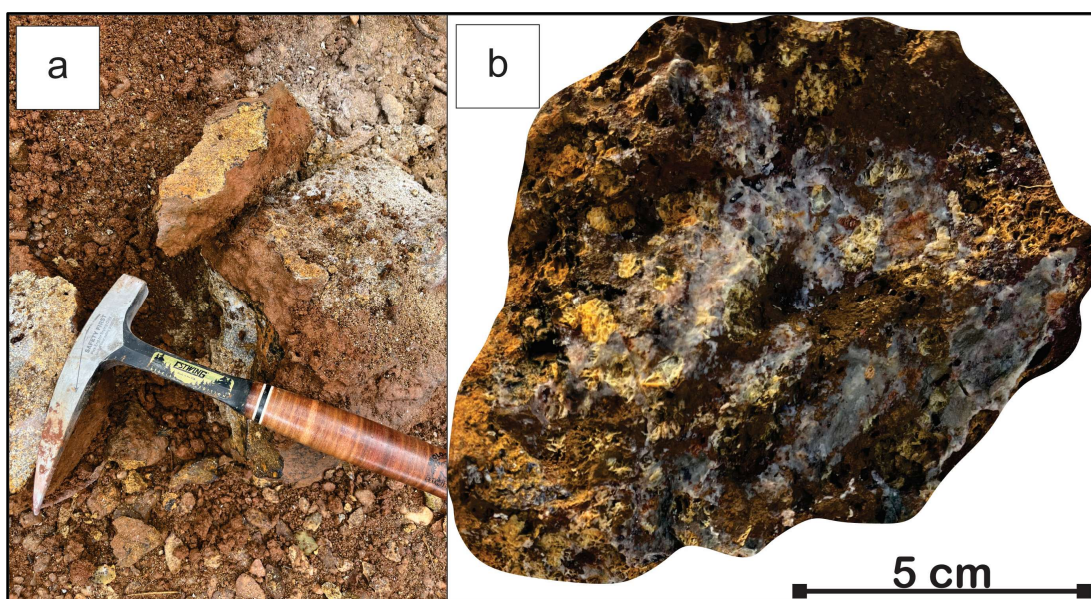


Figura 10 - (a) Afloramento do carbonatito, em Angico dos Dias/BA; (b) Fotografia da amostra coletada no afloramento.

O anfibolito (**amostra C1P5**) provavelmente corresponde aos anfibolitos encaixados entre as Formações Formosa e Canabrinha, conforme descrito por Caxito et al. (2015). Sua mineralogia, dominada por hornblenda e anortita (**Tabela 9**), sugere um potencial remineralizador, especialmente como fonte de magnésio e cálcio, elementos essenciais para a

reestruturação química dos solos. No entanto, para otimizar sua eficácia agronômica, a rocha poderia ser combinada ou formulada em conjunto com um material rico em potássio, garantindo um equilíbrio nutricional adequado para a remineralização do solo e suprimindo demandas agrícolas de maneira mais eficiente.

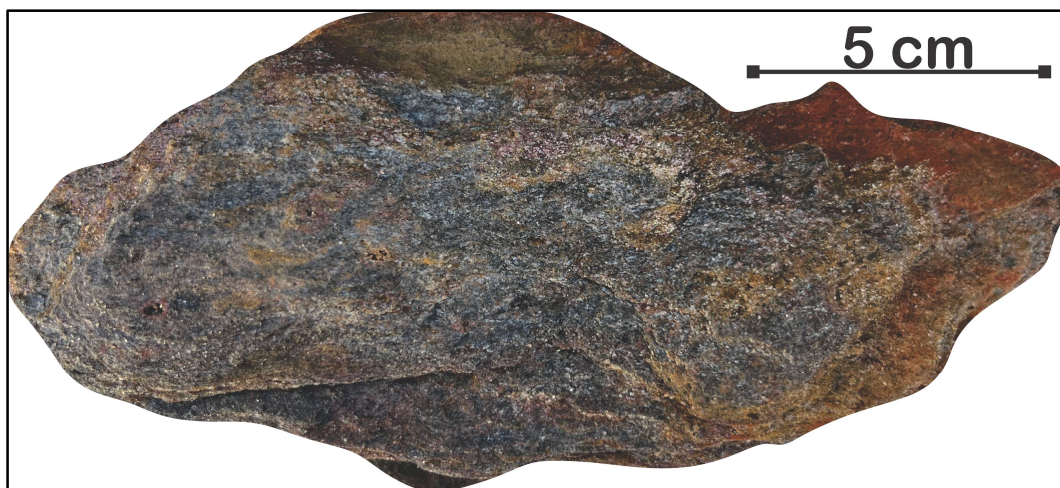


Figura 11 – Anfibolito (amostra C1P5) encaixados entre a Fm. Formosa e a Fm. Canabrinha. De acordo com o DRX da amostra, a rocha pode ser uma potencial fonte de Mg e Ca.

5 ARTIGO – ZONEAMENTO AGROGEOLÓGICO DO CHAPADÃO URUCUIA E SEU ENTORNO

Leonardo de Matos Araujo¹, Flávia Cristina Silveira Braga¹, Éder de Souza Martins²

¹Programa de pós-graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Centro de Pesquisa Professor Manuel Teixeira da Costa, Avenida Presidente Antônio Carlos, 6.623, Pampulha, CEP: 31230-901, Belo Horizonte, MG, BR (leonardoaraujogeologo@gmail.com; flaviacsbraga@gmail.com)

²Universidade de Brasília, Brasília, DF, BR (eder.martins@embrapa.br)

RESUMO

A crescente demanda por fontes alternativas de nutrientes para o solo destaca a urgência de mitigar os impactos do manejo agrícola convencional e promover a sustentabilidade na agricultura. No Brasil, essa necessidade é acentuada pela dependência de insumos importados e pela volatilidade do mercado internacional. Este estudo investigou o Chapadão Urucuia, no oeste da Bahia, uma região estratégica para a produção de grãos, e áreas adjacentes em um raio de 300 km, com o objetivo de identificar fontes minerais de fósforo, potássio, cálcio e magnésio. Foram elaborados quatro mapas temáticos que evidenciam a distribuição dos agrominerais potenciais e suas reatividades, destacando a capacidade das rochas em liberar nutrientes de forma eficiente para o solo. Duas áreas promissoras foram identificadas: o Complexo Metacarbonatítico de Angico dos Dias, em Campo Alegre de Lourdes/BA, como fonte de fósforo (10,8% de P_2O_5), e o Grupo Rio Preto, em Formosa do Rio Preto/BA, como fonte de potássio (6,0% de K_2O). As análises geoquímicas, mineralógicas e petrográficas confirmaram que os teores de nutrientes dessas rochas atendem aos requisitos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para certificação como remineralizadores. Os resultados ressaltam o elevado potencial da região para suprir, de maneira sustentável, a demanda agrícola local, reforçando a importância da integração entre dados geológicos e agrônômicos no desenvolvimento de práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis no oeste baiano.

Palavras-chave: Agrogeologia; Agromineral; Remineralizadores; Reatividade; Sustentabilidade.

Keywords: Agrogeological zoning of the Urucuia plateau and its surroundings

ABSTRACT

The increasing demand for alternative soil nutrient sources highlights the urgency of mitigating the impacts of conventional agricultural management and promoting sustainability in agriculture. In Brazil, this need is accentuated by the reliance on imported inputs and the volatility of the international market. This study investigated the Urucuia Plateau, located in western Bahia, a strategic region for grain production, and adjacent areas within a 300 km radius, aiming to identify mineral sources of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium. Four thematic maps were developed to illustrate the distribution of potential agrominerals and their reactivity, emphasizing the ability of these rocks to efficiently release nutrients into the soil. Two promising areas were identified: the Metacarbonatitic Complex of Angico dos Dias, in Campo Alegre de Lourdes/BA, as a phosphorus source (10.8% P_2O_5), and the Rio Preto Group, in Formosa do Rio Preto/BA, as a potassium source (6.0% K_2O). Geochemical, mineralogical, and petrographic analyses confirmed that the nutrient levels of these rocks meet the requirements of the Brazilian Ministry of Agriculture, Livestock, and Food Supply (MAPA)

for certification as soil remineralizers. The results highlight the region's significant potential to sustainably meet local agricultural demand, reinforcing the importance of integrating geological and agronomic data to develop more efficient and sustainable agricultural practices in western Bahia.

Keywords: Agrogeology; Agromineral; Remineralizers; Reactivity; Sustainability.

5.1 Introdução

Reconhecido como um dos maiores produtores agrícolas globais, o Brasil enfrenta o desafio de aumentar sua produtividade enquanto minimiza os impactos ambientais e reduz sua dependência de fertilizantes importados, com uma taxa de crescimento exponencial de 192% nas importações dos últimos 15 anos (Brasil, 2022). Essa vulnerabilidade, agravada pela instabilidade do mercado internacional, destaca a necessidade de soluções inovadoras e sustentáveis para garantir a segurança alimentar e a soberania agrícola. Para realização de um planejamento de um futuro sustentável para a agricultura no Brasil é necessária a compreensão detalhada da dinâmica do solo e da identificação de fontes alternativas de nutrientes que possam complementar ou substituir os fertilizantes convencionais.

Entre as alternativas mais promissoras, destaca-se o uso de remineralizadores de solo, materiais de origem mineral processados mecanicamente, que têm mostrado potencial significativo para a melhoria das propriedades físico-químicas e biológicas do solo (Martins et al., 2008; Martins et al., 2010; Brasil, 2013; Manning et al., 2017). Esses remineralizadores oferecem um aporte gradual de nutrientes essenciais, como fósforo e potássio, fundamentais para culturas de alto impacto econômico, incluindo soja e milho (Machado et al., 2008; Nasser et al., 2022). Nos últimos anos, diversos estudos sugeriram que a reintrodução de resíduos minerais, na forma de pós de rochas, pode transformar o manejo agrícola em um modelo mais sustentável (Resende et al., 2012; Souza, 2014; Chiwona et al., 2020; Manning & Theodoro, 2020).

Apesar do avanço no entendimento do uso de remineralizadores, ainda são escassas as investigações detalhadas em escala regional, especialmente no Brasil. A identificação de litologias específicas e o estudo de suas características mineralógicas e geoquímicas são fundamentais para o desenvolvimento do Zoneamento Agrogeológico (ZAGEO), que integra informações de solos e agrominerais em sistemas cartográficos (Martins et al., 2016). Embora iniciativas nacionais já tenham sido conduzidas, lacunas permanecem no mapeamento detalhado e na avaliação sistemática do potencial agrícola de diversas regiões (Prado e Martins, 2019).

Nesse contexto, a compreensão mineralógica das rochas utilizadas como remineralizadores assume papel central. Estudos como o de Krahel et al. (2022) reforçam a relevância de considerar as diferenças estruturais e composicionais dos minerais na avaliação da liberação de nutrientes. Comparando duas fontes de potássio — biotita-Mg, proveniente de biotita-xisto, e biotita-Fe, oriunda de biotita-sienito —, os autores observaram que a biotita-Mg

apresentou maior suscetibilidade ao intemperismo, resultando na formação de hidrobiotita e aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) do solo. Por outro lado, a biotita-Fe, devido à sua menor relação Mg/Fe nos sítios octaédricos, demonstrou menor reatividade e liberação de potássio. Esses resultados destacam a necessidade de ir além da composição química total, incorporando a análise da mineralogia e do arranjo cristalino na escolha de remineralizadores.

Este presente estudo aborda o potencial de agrominerais no entorno do Chapadão Urucuia, uma região economicamente estratégica no oeste da Bahia, inserida no polo agrícola MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia). O trabalho destaca a relevância de integrar dados geológicos e geoquímicos com modelagem espacial para identificar fontes naturais de nutrientes essenciais, como fósforo, potássio, cálcio e magnésio, visando atender às demandas da agricultura local. A elaboração de mapas temáticos baseados em dados geológicos e geoquímicos permite compreender a distribuição espacial e a reatividade mineral, fundamentais para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis. Essa abordagem enfatiza o papel dos sítios agrominerais como fontes potenciais de nutrientes, contribuindo para estratégias que promovem a fertilidade dos solos tropicais e ampliam as perspectivas de manejo agrícola em regiões de importância econômica como o oeste da Bahia.

5.2 Localização da área de estudo

A área de estudo foi delimitada com base na distribuição do Grupo Urucuia no estado da Bahia, que engloba uma ampla extensão das áreas agricultáveis do oeste baiano situadas no Chapadão homônimo. A partir dos limites dessa unidade geológica, foi definida uma área com raio de 300 quilômetros (**Figura 11**), com o objetivo de garantir a viabilidade logística das regiões identificadas como potenciais. Essa delimitação considerou o transporte como um fator crucial para a viabilidade econômica e operacional, dado o elevado volume de remineralizadores necessário em comparação aos fertilizantes convencionais (Martins et al., 2023).

5.3 Contexto geológico

O Grupo Urucuia, unidade litoestratigráfica predominante na área de estudo, é composto por arenitos finos a médios, conglomerados e siltitos de idade neocretácea (Sgarbi et al., 2001). Esta unidade se destaca pela sua importância hidrogeológica, formando o principal aquífero da região, com potencial estratégico para o abastecimento hídrico e o suporte à agricultura irrigada.

Os depósitos sedimentares do Grupo Urucuia, associados a processos fluviais e eólicos, conferem características únicas aos solos da região, com variações texturais que influenciam a retenção de água e nutrientes (Barbosa, 2016).

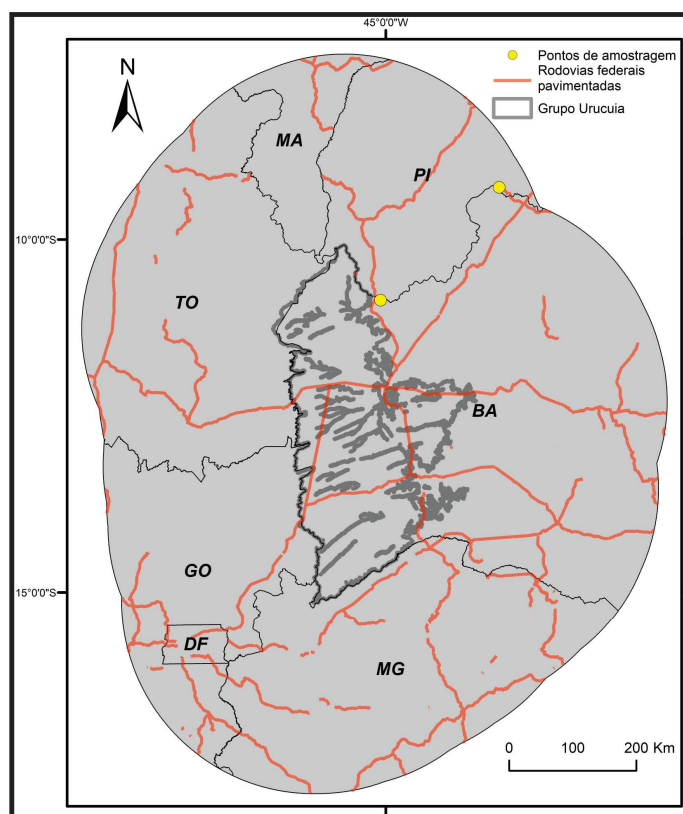


Figura 12 - Mapa de localização da área de estudo. O raio de 300 km foi criado a partir da borda do Grupo Urucuia presente no Estado da Bahia.

Estudos como o de Donagemma et al. (2016) destacam a presença de Neossolos Quartzarênicos no Cerrado brasileiro. No oeste da Bahia, esses solos, oriundos do intemperismo do Grupo Urucuia, são classificados como leves e possuem textura arenosa a franco-arenosa, o que dificulta a prática agrícola devido à baixa retenção de água e nutrientes e à alta susceptibilidade à erosão. No entanto, práticas modernas, como o plantio direto e os sistemas integrados de produção, têm viabilizado a exploração sustentável dessas áreas, promovendo melhorias na estrutura do solo e aumentando a sustentabilidade agrícola (Embrapa, 2020).

A área de estudo apresenta uma complexidade geológica significativa, pois abrange porções do Cráton do São Francisco, bem como faixas móveis associadas à Província Tocantins, incluindo as faixas Brasília e Araguaia, além da Província Sedimentar do Parnaíba (Figura 12).

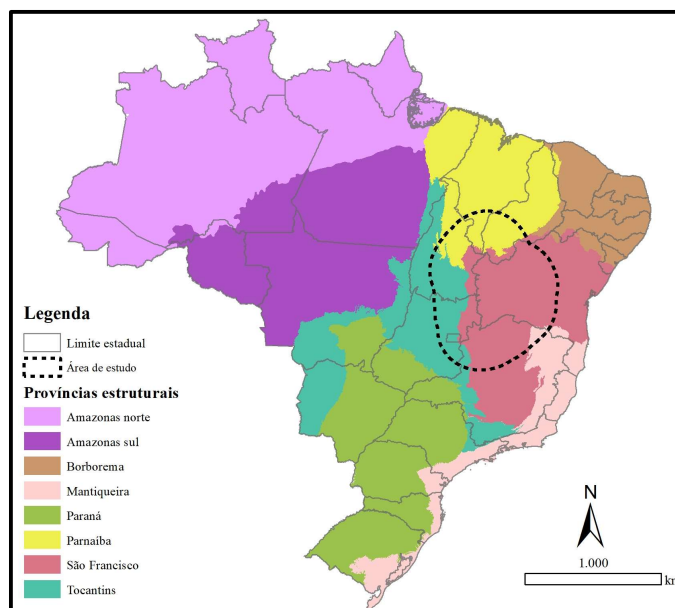


Figura 13 - Províncias Tectônicas do Brasil e localização da área de estudo.

Inserida no Cráton do São Francisco, a porção central da Bahia, próximo ao município de Irecê, destaca-se como potencial para agrominerais pela Formação Salitre, do Grupo Una, que inclui unidades como Irecê, Jussara, Gabriel, Lapão, Nova América e Sarandi. Essa unidade é a principal portadora de rochas fosfatadas na região. Sanches (1997) identificou teores médios de 33,4% de P_2O_5 em amostras da unidade fosfatada, particularmente na Unidade B1, que compreende as unidades Lapão, Nova América e Sarandi. Essas litologias são formadas por dolomitos silicosos e intraclásticos, enriquecidos por processos intempéricos e depositados em ambientes de planície de maré (Misi & Kyle, 1994). A caracterização mineralógica e geoquímica das amostras foi realizada por meio de análises petrográficas, difratometria de raios X (DRX), fluorescência de raios X e microsonda eletrônica, permitindo a identificação do carbonato-fluorapatita como principal mineral fosfático presente.

De acordo com Rezende (2021), o Grupo Rio Preto contém uma ampla diversidade de rochas metassedimentares, incluindo metadiamictitos, mármore dolomíticos, xistos grafitosos, muscovita-xistos, xistos manganésíferos, gonditos e quartzitos, destacando-se pelo seu potencial como fonte de potássio. O Grupo Bambuí, por sua vez, é constituído por uma alternância de siliciclásticos finos e carbonatos, englobando pelitos, arenitos, siltitos e calcários, com relevante potencial para fosfato e calcário (Alkmim & Martins-Neto, 2012).

Na região do município de Guanambi (BA), o Batólito de Guanambi, e em especial o Maciço Ceraíma, tem sido alvo de estudos sobre rochas fontes potenciais para potássio. Essa região apresenta afloramentos de sienitos máficos porfiríticos na base, seguidos por sienitos

faneríticos leucocráticos (Paim, 2014). A fácies sienítica com maior teor de K_2O é composta por microclina (77%), biotita (11%) e clinopiroxênio (11%), com um potencial mineral estimado em 67,9 Mt a partir de um *cut-off* de 12,5% de K_2O (Silveira Braga et al., 2014). Segundo Krahel et al. (2022), essas rochas possuem um elevado potencial para liberação de potássio, especialmente quando reduzidas à fração fina ($<53 \mu m$), devido à presença predominante de biotita ferro-magnesiânica. A alteração química da biotita no ambiente rizosférico leva à formação de hidrobiotita, promovendo a liberação gradual do potássio interlaminar. Contudo, a relação Fe/Mg nos sítios octaédricos da biotita influencia a estabilidade da estrutura mineral, reduzindo a taxa de liberação de K_2O (Krahel et al., 2022).

Na porção norte da área de estudo, inserida na Bacia do Parnaíba, ocorrem extensas unidades carbonáticas, sendo a Formação Pedra do Fogo a mais representativa. Essa unidade apresenta uma sedimentação cíclica composta por *chert* e calcário oolítico/pisolítico, de coloração creme a branca, frequentemente estromatolítico, intercalado com arenitos finos a médios amarelados, folhelhos cinza e anidritas esbranquiçadas (Faria Jr., 1979).

No sul do Piauí, as rochas pertencentes ao Grupo Canindé (Formações Pimenteira, Cabeças e Longá) também apresentam ocorrências de fosfato. Sachs et al. (2009) identificaram teores de P_2O_5 entre 5% e 25% na Formação Pimenteira, sendo os valores mais elevados encontrados em carbonatos e nódulos fosfáticos. A Formação Cabeças, em sua porção basal, apresenta teores de P_2O_5 de até 10%, em arenitos piritosos intercalados com argilitos e calcários impuros fosfatados. Já a Formação Longá possui teores de até 10% de P_2O_5 , associados a arenitos, siltitos e folhelhos. Young (2006) interpretou essas rochas como depósitos marinhos rasos, formados sob influência de marés, tempestites e superfícies transgressivas de inundação máxima.

A Faixa Brasília é constituída por rochas metassedimentares, metavulcânicas e granitóides intrusivos, com idades entre 2,0 Ga e 630 Ma (Pimentel et al., 2011). Já a Faixa Araguaia é composta por rochas metassedimentares e metavulcânicas de baixo a médio grau metamórfico (Moura et al., 2008). Ambas as faixas são conhecidas por seus depósitos de níquel laterítico, fosfato e rochas ultramáficas, recursos estratégicos para a agricultura e a indústria mineral (Fuck et al., 1994; Uhlein et al., 2012).

Na Faixa Brasília, depósitos fosfatados são registrados nas unidades Coromandel, Rocinha e Lagamar, estando associados às formações do Grupo Canastra e Grupo Paranoá (Pimentel et al., 2001; Prado, 2019). Já na porção noroeste de Minas Gerais, unidades da Formação Serra da Saudade apresentam ocorrências de potássio, devido à presença da glauconita presente nos verdetes, como observado na região de São Gotardo (MG) (Moreira,

2015). Estudos de Costa & Oliveira (1970) indicam que a illita é o mineral predominante nesses verdetes, com teores de K_2O entre 6,2% e 10%. Valarelli et al. (1993) estimaram 1,5 bilhões de toneladas de rochas potássicas em Cedro do Abaeté (MG), com teor médio de 11% de K_2O , além da presença de lentes fosfatadas com teores de até 27% de P_2O_5 . Ackroyd et al. (2014) identificaram uma sequência de argilitos glauconíticos, com teor variando entre 6% e 12% de K_2O .

5.4 Demanda regional de fertilizantes

A produção agrícola no oeste baiano ocupa uma extensa área de agricultura de sequeiro das principais culturas (**Figura 13**). O mais recente levantamento do conselho técnico da Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia (AIBA), safra 2024/25 (**Tabela 10**), demonstrou que houve um crescimento da área cultivada de 7% da safra 2023/2024 para a estimada de 2024/2025, o que consequentemente vem acompanhado por um aumento proporcional na demanda por fertilizantes.

De acordo com Lacerda et al. (2015), a adubação recomendada para o milho em solos de fertilidade construída no Cerrado é de 312 kg/ha de NPK 10-32-10 (10% de nitrogênio, 32% de fósforo e 10% de potássio) na semeadura e 263 kg/ha de ureia em cobertura. Para a soja, as doses indicadas são de 303 kg/ha de NPK 10-32-10 na semeadura e 75 kg/ha de KCl em cobertura. Com base nesses parâmetros, a demanda total de NPK no Cerrado baiano para as culturas de milho (sequeiro e irrigado) e soja é estimada em aproximadamente 683.463 toneladas/ano, evidenciando a alta relevância desses fertilizantes para a produtividade agrícola da região.

Tabela 10 - Produção agrícola, em hectares, das principais culturas no oeste baiano. Apenas o algodão tem sua produtividade em arroba/hectare. Fonte: AIBA (2024).

Culturas	Safr 2023/24			Previsão Safr 2024/25			Variações (%) Fechamento Safr 2022/23 e Previsão Safr 2023/24		
	Área (ha)	Produt. (sacas/ha)	Produção (t)	Área (ha)	Produtiv. (sacas/ha)	Produção (t)	Produt.	Área	Produção (t)
Soja	1.980.000	63	7.484.400	2.129.000	67	8.558.580	6,3%	7,5%	14,4%
Algodão*	345.000	326	1.687.050	380.000	326	1.858.200	0,0%	10%	10%
Milho	110.000	150	990.000	105.000	170	1.071.000	13,3%	-5%	8,2%
Milho Irrigado	25.000	160	240.000	18.000	180	194.400	12,5%	-28%	-
Trigo	7.000	90	37.800	7.000	100	42.000	11,1%	0%	11,1%
Sorgo	150.000	60	540.000	160.000	60	576.000	0,0%	7%	6,7%
Sub-Total	2.167.000		10.161.450	2.799.000		11.487.780		7%	

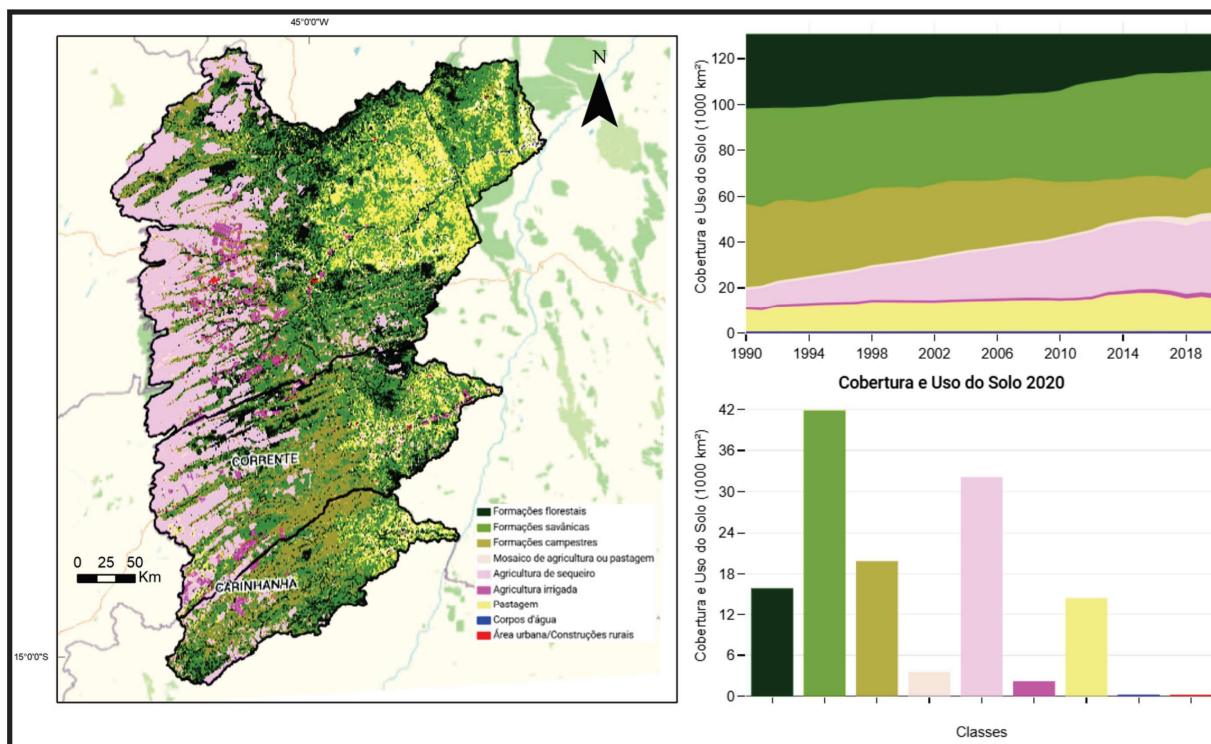


Figura 14 - Distribuição do uso e ocupação do solo no oeste baiano. Fonte: Plataforma OBahia - Inteligência Territorial e Hídrica para o Oeste da Bahia.

5.5 Materiais e métodos

5.5.1 Geoprocessamento

Para a elaboração dos mapas de capacidade de reatividade das rochas e dos nutrientes disponíveis da área de estudo, foi inicialmente estabelecida uma malha de pontos com uma escala de 1 ponto para cada 25 km, garantindo a uniformidade e a representatividade espacial dos dados. O software de geoprocessamento utilizado foi o Esri ArcGis® 10.7. Em cada ponto, foi extraída a informação da unidade geológica com base no mapa geológico ao milionésimo, disponibilizado pela plataforma GeoSGB® (**Figura 15**). Adicionalmente, foram incorporados dados disponíveis, na mesma plataforma, acerca de afloramentos geológicos, além dos pontos de afloramentos visitados na etapa de campo. No total o banco de dados gerados possui 1.529 pontos da malha inicial e 29.581 pontos oriundos de afloramentos geológicos.

Para quantificar a reatividade potencial, utilizou-se como referência os critérios estabelecidos por Côrrea & Oliveira (2024) acerca dos diferentes graus de reatividade dos minerais constituintes de rochas (**Tabela 11**). Em cada unidade geológica, foi aplicada uma escala qualitativa de reatividade e riqueza do nutriente avaliado, variando de 0 a 3 (baixa, média e alta). Para representar cada unidade geológica, selecionou-se a rocha de maior reatividade dentro da unidade, uma vez que uma mesma unidade pode abranger diversas litologias.

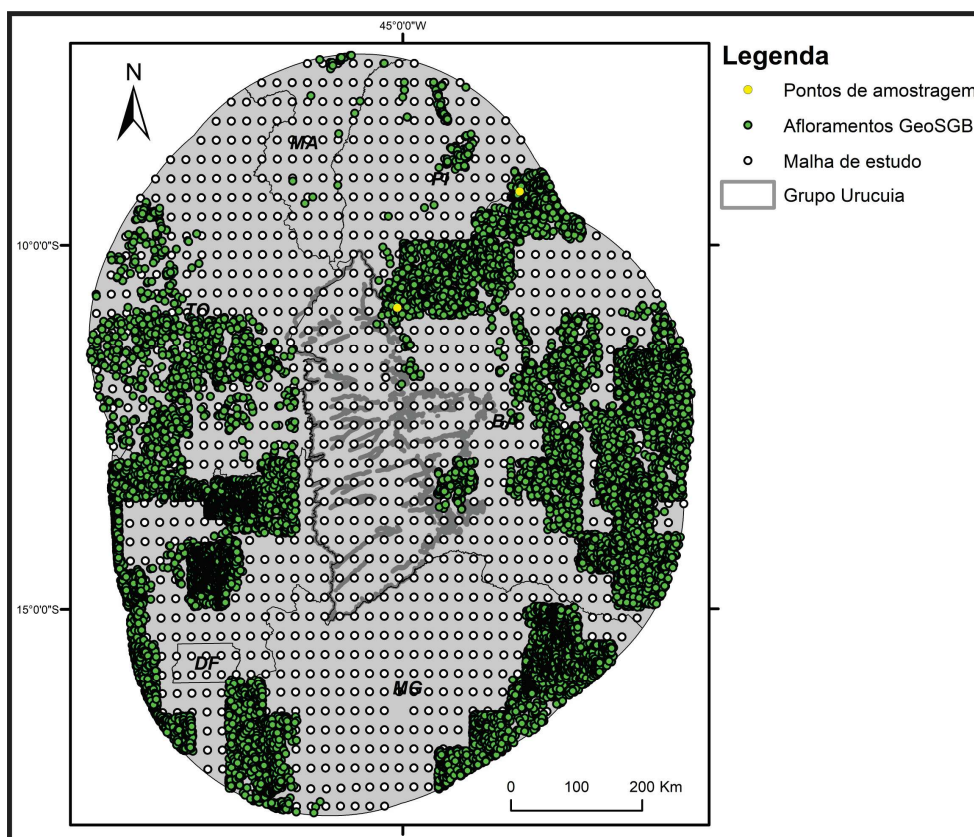


Figura 15 - Mapa com a distribuição dos pontos amostrados e selecionados para análises geoquímicas (esferas amarelas), afloramentos da plataforma GeoSGB (esferas verdes), malha equidistante criada para o estudo (esferas brancas), área de estudo e o Grupo Urucuia em destaque.

Com o banco de dados estruturado, realizou-se a interpolação dos dados utilizando o método de Krigagem Ordinária. De acordo com Li & Heap (2008), esse método é particularmente adequado para situações em que há uma forte variabilidade espacial, onde os dados apresentam estrutura espacial que pode ser modelada através de um variograma.

A partir da interpolação, foram gerados quatro mapas temáticos: um para rochas fosfatadas, um para rochas magnesianas, outro para rochas cálcicas e um último para rochas potássicas. A rampa de cores dos mapas representa a capacidade das rochas em intemperizar e reagir com o solo, oferecendo uma visualização da variabilidade espacial das reatividades mineralógicas.

5.5.2 Amostragem e preparação

Foram coletadas em campo duas amostras para caracterização: um biotita-xisto, proveniente do Grupo Rio Preto, em Formosa do Rio Preto/BA; e outra de carbonatito, do Complexo Metacarbonatítico de Angico dos Dias, em Campo Alegre de Lourdes/BA.

Tabela 11 - Diferentes Taxas de Dissolução de minerais relevantes para utilização como agrominerais. Modificado de Côrrea e Oliveira (2024), baseado em Lasaga et al. (1994) e Palandri & Kharaka (2004).

TAXA DE DISSOLUÇÃO (log mol.m ⁻² .s ⁻¹)	GRUPOS MINERAIS	USO E OCORRÊNCIAS
ALTA (≥ -5,00)	Cloretos (silvita, carnalita); Sulfatos (gipsita, anidrita, polihalta, kainita); Carbonatos (calcita, dolomita, magnesita); Fosfatos (carbonatoapatita, hidroxiapatita); Nefelina; Vidro vulcânico; Micas (glauconita).	A maior parte da produção mundial de potássio provém de evaporitos (i.e., cloretos e sulfatos), enquanto os fertilizantes fosfatados são produzidos predominantemente a partir de fosforitos sedimentares e carbonatitos. Carbonatos e sulfatos são associados principalmente a rochas sedimentares e metamórficas e amplamente utilizados para a correção da acidez do solo, além de fontes de Ca e Mg.
MÉDIA (<-5,00 e ≥-10,00)	Feldspatoides (leucita, kalsilita); Zeólita; Olivinas (forsterita); Plagioclásios cálcicos (anortita-labradorita); Piroxênios (diopsídio-hedenbergita, egirina-augita); Anfibólios (tremolita-actinolita, hornblenda); Epidoto (zoisita); Micas (biotita-flogopita); Plagioclásios sódicos (andesina-albita); Sulfetos (pirita, pirrotita, calcopirita); Óxidos (hematita, magnetita).	A maioria dos remineralizadores é composta por minerais silicáticos, que apresentam taxa de dissolução intermediária e que têm como função alterar os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promover a melhoria das propriedades físicas, físico-químicas ou da atividade biológica do solo. Esses remineralizadores são representados por um amplo espectro composicional (químico e mineralógico) de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares.
BAIXA (<-10,00)	Feldspatos potássicos (microclínio, ortoclásio, sanidina); Micas (muscovita); Filossilicatos (pirofilita, talco, clorita, serpentina); Argilominerais (esmectita, ilita, caulinita); Quartzo; Hidróxidos (gibbsita, goethita, limonita).	Os grupos minerais que apresentam taxa de dissolução baixa (feldspato potássico, muscovita e quartzo) estão associados a um volumoso conjunto de rochas félsicas (ígneas), representadas em grande proporção por granitos, gnaisses e quartzitos.

As amostras foram enviadas ao laboratório SGS, em Vespasiano/MG, para preparação física. Inicialmente, foram secas e britadas até que 75% do material atingisse uma granulometria

de 3 mm. Em seguida, foram homogeneizadas e reduzidas utilizando um quarteador tipo Jones, garantindo representatividade na amostragem. Posteriormente, cerca de 250 a 300 gramas de cada amostra foram pulverizadas em moinho de aço, obtendo uma granulometria de 95% passante na malha 150#.

5.5.3 Procedimentos analíticos

5.5.3.1 Análise mineralógica

As análises de DRX (difração de raios X) de ambas as amostras foram realizadas no Centro de Pesquisas Professor Manuel Teixeira da Costa (CPMTC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). As amostras foram acondicionadas em porta-amostras de alumínio, utilizando a técnica de montagem do tipo *back-loading*. A caracterização mineralógica foi conduzida pelo Método do Pó, utilizando um difratômetro de raios X *Panalytical Expert PRO*, equipado com goniômetro Θ - Θ (theta-theta) de 240 mm de diâmetro e configuração Bragg-Brentano. No tubo de raios X, o filamento de tungstênio foi excitado com uma corrente de 45 mA e uma voltagem de 40 kV. Os elétrons ejetados foram direcionados para bombardear um alvo de cobre, produzindo um feixe com comprimento de onda característico ($\text{CuK}\alpha 1 = 1,54060 \text{ \AA}$). Um conjunto de fendas e aberturas fixas foi utilizado para controlar o feixe e limitar a área de incidência no porta-amostra.

A varredura foi realizada em modo contínuo, cobrindo a faixa de $5\text{-}70^\circ 2\Theta$, com um passo de $0,02^\circ$ e tempo de exposição de 1 segundo por passo. Esse procedimento totalizou 3250 passos, resultando em um tempo total de aquisição de 54 minutos e 13 segundos por amostra. O detector utilizado foi do tipo proporcional, consistindo em uma câmara cilíndrica preenchida com uma mistura de xenônio/metano e uma janela de berílio com dimensões de 20 mm x 24 mm.

Os difratogramas obtidos foram interpretados por meio do software *HighScore Plus*. A identificação das fases minerais foi realizada por comparação com os bancos de dados COD (*Crystallography Open Database*) e ICDD (*International Centre for Diffraction Data*). As fases identificadas, juntamente com suas respectivas fichas e referências bibliográficas, estão detalhadas no item de resultados.

A lâmina delgada do biotita-xisto foi analisada pelo microscópio óptico de luz plano polarizada. A partir daí foi possível obter uma estimativa visual do percentual dos minerais identificados na lâmina, assim como características texturais.

5.5.3.2 Análises químicas

As análises químicas de fertilidade da amostra de biotita-xisto e do carbonatito foram realizadas no Laboratório Terra, localizado em Goiânia/GO, seguindo os protocolos estabelecidos pelo BRASIL (2017). Para a abertura química das amostras, utilizou-se ácido tartárico em combinação com NaF (fluoreto de sódio), um sistema eficiente na dissolução de minerais silicatados e carbonáticos, permitindo a extração de nutrientes e elementos-traço para análises posteriores. As análises incluíram a determinação de macronutrientes essenciais como fósforo (P_2O_5), potássio (K_2O), cálcio (CaO), magnésio (MgO), além de micronutrientes como cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn), ferro (Fe), boro (B), molibdênio (Mo) e cobalto (Co).

Também foram realizadas análises de elementos potencialmente tóxicos, como cádmio (Cd) e chumbo (Pb), conforme as exigências estabelecidas para a classificação de remineralizadores de solo.

A análise de FRX (fluorescência de raios-X) do biotita-xisto foi processado pelo Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI), em Goiânia/GO. Foi utilizado um espectrômetro WDS Bruker S8 Tiger, equipado com tubo de Rh, para analisar os óxidos maiores e menores. Nos óxidos maiores (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , SO_3), a calibração foi realizada com o pacote GeoQuant M® da Bruker composto por padrões de rochas e minerais naturais.

O método de preparação utilizado para a análise dos óxidos maiores envolveu uma alíquota de aproximadamente 5 gramas de amostra, obtida por quarteamento manual, que foi pulverizada em moinho planetário de bolas com jarra de ágata durante 40 minutos. Após a pulverização, a amostra foi seca em estufa a 105 °C por 12 horas, sendo posteriormente utilizada para determinação da perda na ignição (LOI) ou ganho na ignição (GOI). Para essa determinação, a amostra foi calcinada a 1.000 °C por 5 horas. Em seguida, uma alíquota de 1 grama da amostra calcinada foi fundida com 9 gramas de tetraborato de lítio.

Para os óxidos menores (Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Sb, Ba, La, Ce, Pb, Th, U, Cd), foi utilizada uma alíquota de aproximadamente 15 gramas de amostra, também obtida por quarteamento manual, que passou por pulverização em moinho planetário de bolas com jarra de ágata por 40 minutos. Após a moagem, a amostra foi seca em estufa a 105 °C por 12 horas e destinada à confecção de pastilhas prensadas. A confecção das pastilhas foi realizada por meio da mistura e homogeneização de 3 gramas de aglutinante com 9 gramas da amostra previamente seca, seguida de prensagem com uma força de 15 toneladas.

5.6 Resultados

5.6.1 Mapeamento agrogeológico

No mapa gerado para rochas fosfatadas (**Figura 16**), foram identificadas três áreas de maior potencial. Na porção leste da área de estudo, próximo ao município de Irecê, destacam-se as unidades da Formação Salitre (Irecê, Jussara, Gabriel, Lapão, Nova América e Sarandi), do Grupo Una, como a litologia mais influente na interpolação que indicou potencial para fosfato.

Na porção norte da área de estudo, as rochas pertencentes ao Grupo Canindé, mais especificamente as Formações Pimenteira, Cabeças e Longá, apresentaram alta reatividade fosfática.

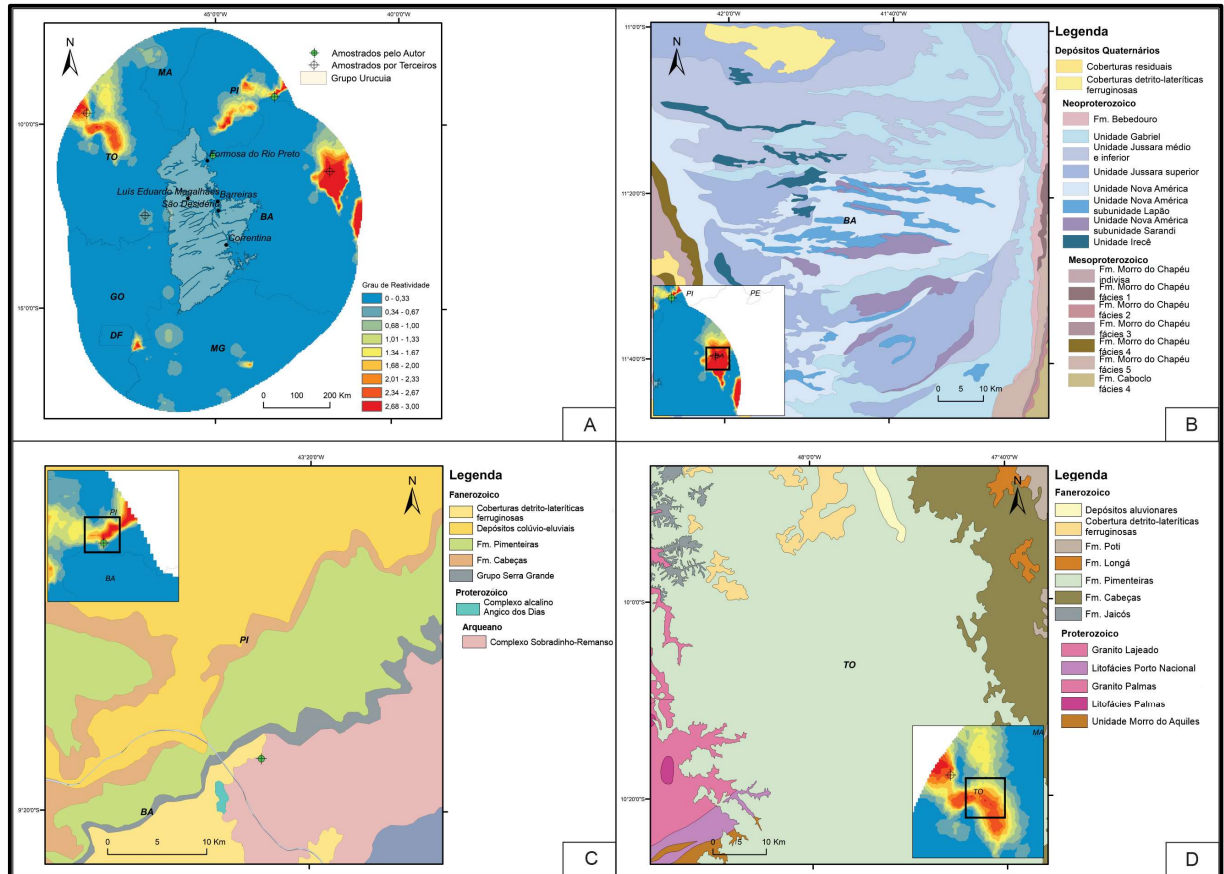
A porção noroeste da área de estudo também apresentou alta representatividade na reatividade de rochas fosfatadas, em decorrência das rochas dos Grupos Canindé (Formações Longá e Pimenteira) e Balsas (Formação Pedra de Fogo).

O mapa de reatividade de rochas potássicas (**Figura 17 A, B, C e D**) apresentou dados relevantes, destacando três áreas de maior interesse devido aos elevados teores de potássio. Na região do município de Guanambi (BA), destacam-se áreas do Batólito de Guanambi, mais especificamente o Maciço Ceraíma. No município de Formosa do Rio Preto (BA), as rochas do Grupo Rio Preto também se destacaram no mapa de reatividade de rochas potássicas, especialmente na porção centro-norte da área de estudo.

Porções esparsas com indicativo de alta reatividade de potássio na região sul da área de estudo são associadas à Formação Serra da Saudade, situadas na porção noroeste do estado de Minas Gerais, são associadas às ocorrências de verdetes em siltitos verdes, como observado na região de São Gotardo (MG) (Moreira, 2015). Essa unidade pode ser considerada potencial para reatividade, mesmo que a ocorrência de verdetes seja, até o momento, reconhecida apenas em áreas específicas do estado.

No mapa de distribuição de rochas magnesianas e cálcicas (**Figura 18a e 18b**), observa-se que as zonas de alta reatividade são coincidentes em várias porções, e associadas às unidades compostas por carbonatos, especialmente na porção norte da área de estudo, a qual está inserida no contexto geológico da Bacia do Parnaíba. A Formação Pedra do Fogo é a principal contribuidora no mapa de rochas cálcicas (**Figura 18c**), em decorrência de suas ocorrências de rochas carbonáticas.

A porção norte do Estado de Minas Gerais (**Figura 18d**) teve como destaque os calcários dolomíticos da Formação Serra de Santa Helena que contribuiu para uma alta reatividade no mapa magnésiano.



5.6.2 Caracterização química e mineralógica das amostras coletadas

5.6.2.1 Biotita-xisto – Formosa do Rio Preto (BA)

A análise petrográfica em lâmina delgada (**Figura 19**) mostrou que a biotita é o mineral predominante. Quartzo ocorre em lentes bem definidas, com extinção ondulante. Plagioclásio aparece em grãos subédricos. Minerais opacos estão dispersos na matriz da rocha. A granulometria varia de fina a média. A composição mineralógica foi estimada em 76% de biotita, 20% de quartzo, 3% de plagioclásio e 1% de minerais opacos.

A análise granulométrica indicou que 88% das partículas passaram pela peneira de 0,3 mm (**Figura 20**) e o pH medido foi de 6,6.

A análise química de fertilidade e corretivo do biotita-xisto (**Tabela 12**) revelou teores de 6,0% de K₂O, 5,5% de MgO e 1,9% de CaO, totalizando uma soma de bases de 13,4%. Quanto aos elementos potencialmente contaminantes, foram detectados 2 mg/kg de cádmio e 33 mg/kg de chumbo. A análise granulométrica demonstrou um declínio progressivo da fração retida a partir da peneira de 0,84 mm (99% do material passante), com 88% do material passando pela peneira de 0,30 mm. A análise mineralógica por DRX (**Figura 21**) identificou a composição da amostra como sendo formada por 46,5% de biotita, 23,6% de quartzo, 21,1% de flogopita e 8,9% de anortita.

A análise química de FRX dos óxidos maiores (**Tabela 13**) indica que a amostra é composta por 40,02% de SiO₂, 15,03% de Al₂O₃, 16,09% de Fe₂O₃, 7,71% de MgO, 4,21% de CaO e 6,32% de K₂O. A soma das bases (CaO, MgO, K₂O) foi de 18,24%. A perda ao fogo (LOI) foi de 8,58%. A análise química de FRX dos óxidos menores (**Tabela 13**) indicou a presença de 1134 ppm de Ba e 327 ppm de Rb como elementos menores com concentrações mais expressivas.

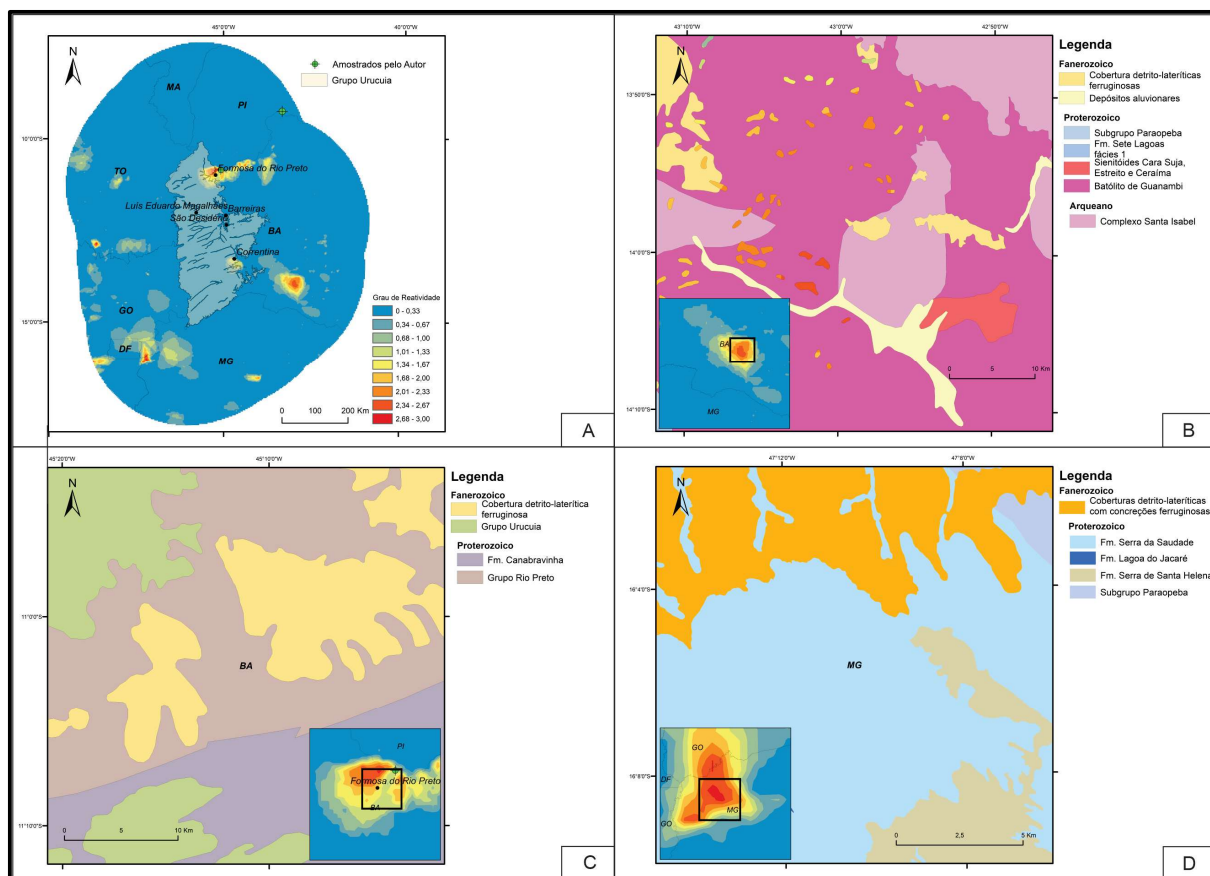


Figura 17 - (a) Mapa do grau de reatividade de rochas potássicas; (b) Mapa geológico da região de Guanambi/BA, com foco no Batólito Guanambi; (c) Mapa geológico com foco no Grupo Rio Preto; (d) Formação Serra da Saudade, no setor noroeste do estado de Minas Gerais.

Tabela 12 - Resultado da análise de fertilização e corretivo do biotita-xisto.

Parâmetro	Unidade	Resultado
Cd	mg/kg	2
Pb	mg/kg	33
K ₂ O (total)	%	6,00
pH	.	6,6
P ₂ O ₅ (total)	%	0,16
CaO (total)	%	1,90
MgO (total)	%	5,50
SiO ₂	%	31,6
B	mg/kg	1,0
Co	mg/kg	1,5
Mo	mg/kg	1,1
Cu	mg/kg	56
Fe	mg/kg	112000
Mn	mg/kg	1800
Zn	mg/kg	160
Pass. 2,00 mm	%	100,0
Ret 2,00 mm	%	0,0
Pass. 0,84 mm	%	99,0
Ret. 0,84 mm	%	1,0
Pass. 0,30 mm	%	88,0
Ret. 0,30 mm	%	12,0

Cl	%	0,10
K ₂ O (Ac. Tart 5% + 0,5 NaF)	%	4,70
S.B.	%	13,40

5.6.2.2 Carbonatito – Angico dos Dias/BA

A análise química de fertilidade e corretivo do carbonatito (**Tabela 14**) apresentou 10,8% de P₂O₅, 12,9% de CaO e pH de 6,5. Os teores de cádmio foram de 3 mg/kg e de chumbo, 29 mg/kg. Na curva granulométrica (**Figura 20**), observa-se que o carbonatito mantém um percentual de 100% passante em todas as peneiras, sendo, portanto, um material de granulometria muito fina.

A análise de DRX (**Figura 22**) indicou a presença de 57,4% de quartzo, 20,5% de fluorapatita, 8,4% de hematita, 7,2% de goethita, 3,4% de goyazita e 3,1% de caulinita.

5.7 Discussões

5.7.1 Mapeamento agrogeológico

Bem & Theodoro (2023) também utilizaram a plataforma GeoSGB para identificar áreas com potencial para remineralizadores de solo nas mesorregiões Nordeste e Sudeste do Pará. Os autores adotaram uma filtragem de dados por meio do cruzamento das informações do GeoSGB com o Mapa de Geodiversidade do Pará (João et al., 2013) e referências da literatura sobre rochas com potencial remineralizador. De acordo com o presente estudo, foi possível constatar que a plataforma GeoSGB nem sempre oferece um nível de detalhamento adequado, tornando necessário seu uso com cautela, sobretudo em estudos voltados para a prospecção em escala local.

A análise dos mapas de reatividade (**Figuras 16, 17 e 18**) evidencia que o Grupo Bambuí se destaca como a unidade geológica mais relevante em termos de agrominerais. Esse grupo abrange litologias classificadas como Primárias e Secundárias (**Figura 23**), conforme a classificação de Côrrea e Oliveira (2024). Entre elas, destacam-se os verdetes da Formação Serra da Saudade, apontados como uma fonte significativa de potássio (Moreira, 2015), e a Formação Sete Lagoas, amplamente reconhecida por seu potencial como fonte de fosfato (Ribeiro, 2016). Essas características reforçam a importância do Grupo Bambuí para o desenvolvimento de estratégias agrícolas sustentáveis, baseadas no uso de remineralizadores locais.

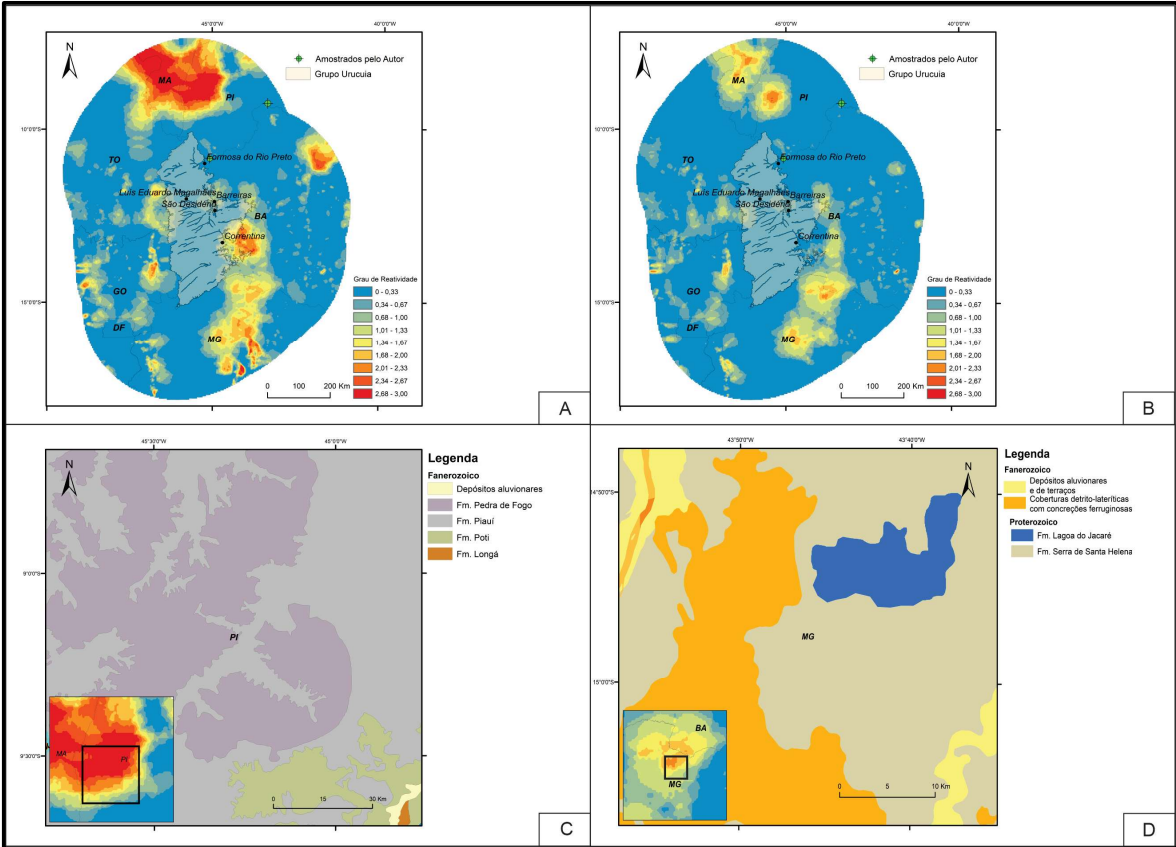


Figura 18 - (a) Mapa do grau de reatividade de rochas cálcicas; (b) Mapa do grau de reatividade de rochas magnesianas; (c) Mapa geológico da região oeste do Piauí; (d) Mapa geológico da região norte de Minas Gerais.

Tabela 13 - Análise química de FRX dos óxidos maiores e dos elementos menores analisados da amostra do biotita-xisto (LQ = abaixo do limite quantificável).

Óxidos maiores analisados (%)	Limite mínimo de detecção (ppm)	Elementos menores analisados (ppm)	Resultados do biotita-xisto
SiO ₂	-	-	40,02
TiO ₂	-	-	1,44
Al ₂ O ₃	-	-	15,03
Fe ₂ O ₃	-	-	16,09
MnO	-	-	0,33
MgO	-	-	7,71
CaO	-	-	4,21
Na ₂ O	-	-	0,43
K ₂ O	-	-	6,32
P ₂ O ₅	-	-	<LQ
SO ₃	-	-	<LQ
LOI(%)	-	-	8,58
Soma(%)	-	-	100,15
-	5	Sc	21
-	15	V	126
-	20	Cr	325
-	10	Co	44
-	10	Ni	123
-	15	Cu	37
-	20	Zn	249
-	5	Ga	28
-	10	As	<LQ
-	10	Rb	327
-	20	Sr	58

-	15	Y	312
-	20	Zr	287
-	5	Nb	30
-	20	Mo	<LQ
-	10	Sn	<LQ
-	10	Sb	<LQ
-	50	Ba	1134
-	15	La	568
-	20	Ce	136
-	15	Pb	<LQ
-	10	Th	<LQ
-	10	U	<LQ
-	10	Cd	<LQ

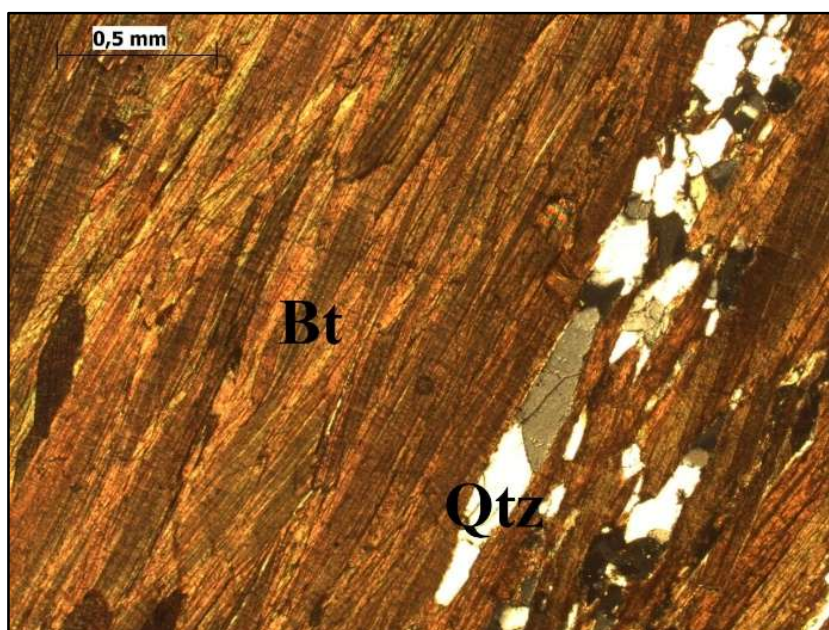


Figura 19 - Fotomicrografia do biotita-xisto, luz transmitida, nicóis descruzados, com objetiva de 10x, onde é possível visualizar biotita (Bt) e quartzo (Qtz).

Tabela 14 - Resultado da análise de fertilização e corretivo do carbonatito.

Parâmetro	Unidade	Resultado
Cd	mg/kg	2
Pb	mg/kg	29
K ₂ O (total)	%	0,24
Ph	.	6,5
P ₂ O ₅ (total)	%	10,80
CaO (total)	%	12,90
MgO (total)	%	0,40
SiO ₂	%	49,5
B	mg/kg	0,8
Co	mg/kg	1,1
Mo	mg/kg	1,0
Cu	mg/kg	26
Fe	mg/kg	105000
Mn	mg/kg	660
Zn	mg/kg	80

Pass. 2,00 mm	%	100,0
Ret 2,00 mm	%	0,0
Pass. 0,84 mm	%	100,0
Ret. 0,84 mm	%	0,0
Pass. 0,30 mm	%	100,0
Ret. 0,30 mm	%	0,0
Cl	%	0,11
S.B.	%	13,54

A ocorrência de biotita-xisto no Grupo Rio Preto, destaca-se como um recurso estratégico devido à influência direta do custo do frete na viabilidade econômica dos remineralizadores. A proximidade dessas rochas às áreas de demanda agrícola pode reduzir significativamente os custos logísticos, aumentando sua competitividade em relação a outras fontes de nutrientes.

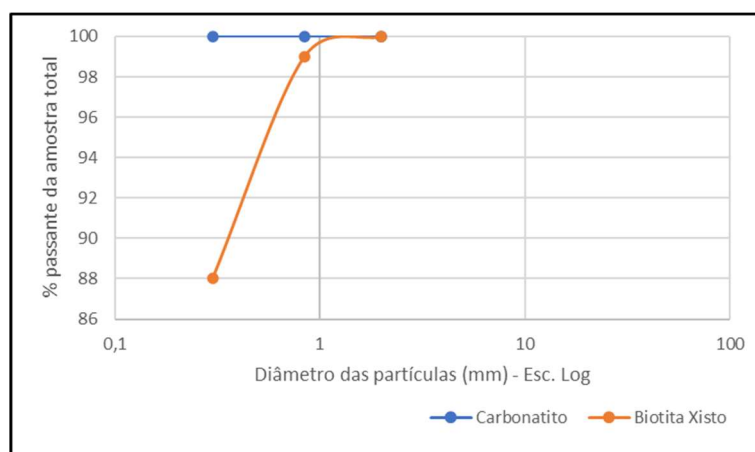


Figura 20 - Curva granulométrica referente à análise de fertilidade e corretivo das amostras do biotita-xisto (cor laranja) e carbonatito (cor azul).

Nesse contexto, a realização de um mapeamento geológico detalhado dessa unidade torna-se essencial para compreender sua distribuição espacial e avaliar seu potencial como fonte de remineralizadores potássicos-cálcicos-magnesianos, contribuindo para o fortalecimento da agricultura sustentável na região.

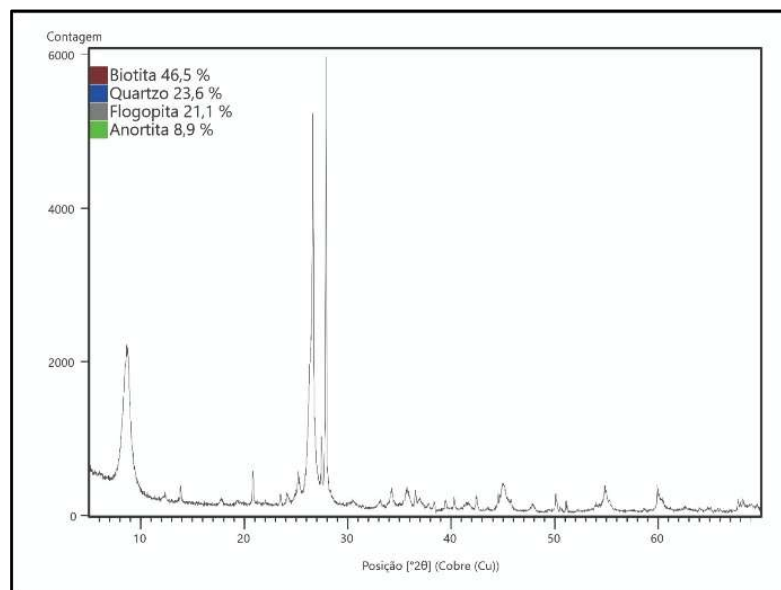


Figura 21 - Difratoograma da amostra do biotita-xisto, com quantificação mineralógica obtida pelo método de Rietveld.

5.7.2 Possibilidades de aplicação

As análises de DRX e FRX da amostra de biotita-xisto confirmaram seu potencial como remineralizador de solo, atendendo aos critérios estabelecidos pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). A rocha apresenta um teor significativo de K_2O (6,32%), superando o limite mínimo de 1% exigido, além de concentrações relevantes de MgO (7,71%) e CaO (4,21%), fornecendo nutrientes essenciais para a fertilização do solo. Quanto aos contaminantes, os teores são considerados seguros, com cádmio (2 ppm) e chumbo (33 ppm) dentro dos limites aceitáveis.

A análise de DRX realizada no carbonatito (**Figura 22**) revelou a presença da fluorapatita, que se destaca como uma fonte crucial de fósforo, essencial para o desenvolvimento das culturas agrícolas, enquanto os óxidos de ferro, como goethita e hematita, podem corrigir deficiências de micronutrientes, desempenhando um papel estratégico em solos tropicais.

A análise de fertilidade e corretivo para a mesma amostra reforçou esse potencial agrônomo, destacando os altos teores de CaO (12,90%) e P_2O_5 (10,80%) como atributos-chave. A baixa concentração de metais pesados, como Cd (3 mg/kg) e Pb (29 mg/kg), atende plenamente aos limites regulatórios, garantindo a segurança ambiental do uso desse material.

As análises granulométricas de ambas as amostras indicam boa fineza do produto, fator importante para sua reatividade do solo. Os resultados são favoráveis para seu uso como pó de

rocha ou remineralizador, pois partículas menores aumentam a superfície de contato com o solo, facilitando o intemperismo e a liberação de nutrientes (Kleiv & Thornhill, 2007; Krahel et al., 2022). Além disso, os valores atendem aos critérios da Instrução Normativa (BRASIL, 2016), que exige fineza mínima para o enquadramento desses materiais como remineralizadores.

Os valores de pH de abrasão obtidos nas amostras de biotita xisto (6,6) e carbonatito (6,5) indicam um caráter levemente ácido, situando-se próximos da neutralidade. Conforme descrito em BRASIL (2020), a análise do pH de abrasão é relevante porque fornece uma estimativa do comportamento químico do remineralizador em contato com o solo, especialmente sua influência sobre o pH da rizosfera. Produtos com pH muito baixo ou muito alto podem interferir negativamente na disponibilidade de nutrientes e na atividade microbológica do solo. Assim, valores próximos à neutralidade, como os obtidos, são desejáveis, pois minimizam riscos de desequilíbrio químico no solo e aumentam a versatilidade do uso do remineralizador em diferentes tipos de cultivos e ambientes agrícolas.

Mesmo diante do teor reduzido de K_2O (0,24%), que limita sua aplicação como fonte de potássio, a alta concentração de cálcio e fósforo compensa essa restrição. Além disso, a possibilidade de uma composição desse material com rochas potássicas poderia viabilizar sua aplicação direta no solo.

Apesar da classificação de Côrrea & Oliveira (2024) incluir os carbonatitos como exemplos de rochas que atendem aos critérios de remineralizadores integrais, a amostra analisada neste trabalho só apresentou teores interessantes de CaO e P_2O_5 , podendo assim ser classificada como do grupo Primários, e do subgrupo fósforo-cálcicos (**Figura 23**). Enquanto o biotita-xisto pertence ao mesmo grupo, porém do subgrupo potássico-cálcico-magnesianos, com teores satisfatórios de K_2O , CaO e MgO .

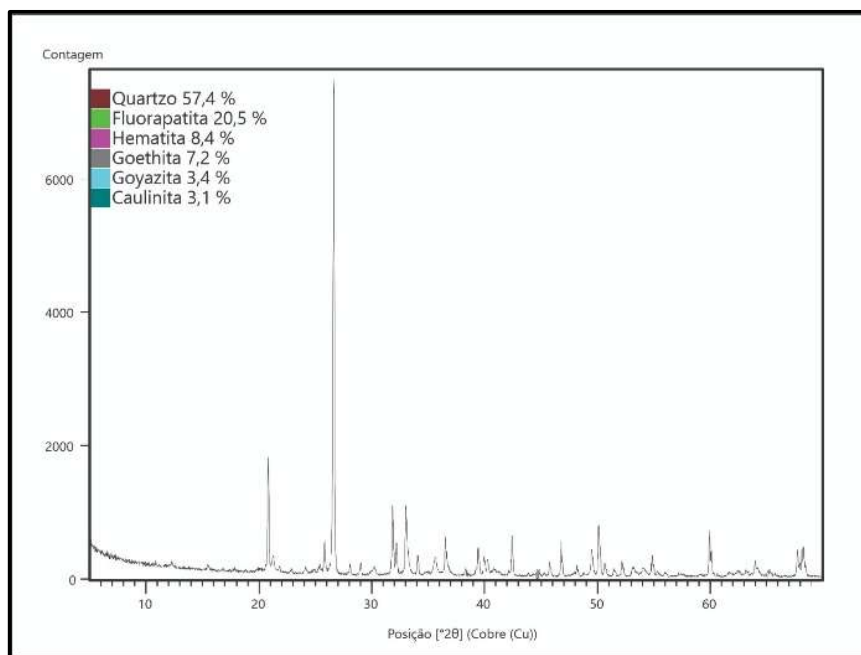


Figura 22 - Difratograma da amostra do carbonatito, com quantificação mineralógica obtida pelo método de Rietveld.

5.7.3 Comparações com outros estudos

A literatura apresenta diversos estudos que compararam a diferença entre o teor total de nutrientes nos minerais e sua disponibilidade efetiva no solo, utilizando distintos métodos analíticos. Krahel et al. (2022), por exemplo, empregaram microsonda eletrônica (EPMA) em amostras de biotita-xisto e biotita-sienito de Guanambi/BA e confirmaram a influência da composição mineralógica na reatividade das rochas. Em experimentos em vasos, o intemperismo do biotita-xisto resultou na formação de hidrobiotita, aumentando a capacidade de troca catiônica (CTC). Em contraste, o biotita-sienito apresentou menor reatividade, atribuída à elevada relação Fe/Mg nos sítios octaédricos.

De forma semelhante, Araújo & Sampaio (2010) analisaram a extração de potássio de uma rocha alcalina potássica, utilizando diferentes ácidos e o extrator Mehlich-1. Os autores compararam o teor total de K_2O com o potássio disponível no solo e concluíram que o método de extração influencia significativamente a avaliação da disponibilidade desse nutriente. Por sua vez, Angélica et al. (2014) investigaram perfis de alteração em rochas sieníticas, observando que o intemperismo da microclina reduziu o teor total de potássio e aumentou o potássio disponível, evidenciando a importância das condições de intemperismo na liberação gradual de nutrientes dos minerais para o solo. Além disso, Braga et al. (2014) avaliaram a aplicação agrícola de sienito, considerando o teor total de potássio e sua eficácia em experimentos

agronômicos com milho. Os resultados desses estudos reforçam a necessidade de se considerar tanto o teor total de nutrientes nos minerais quanto sua disponibilidade no solo ao avaliar o potencial agronômico dos remineralizadores de solos.

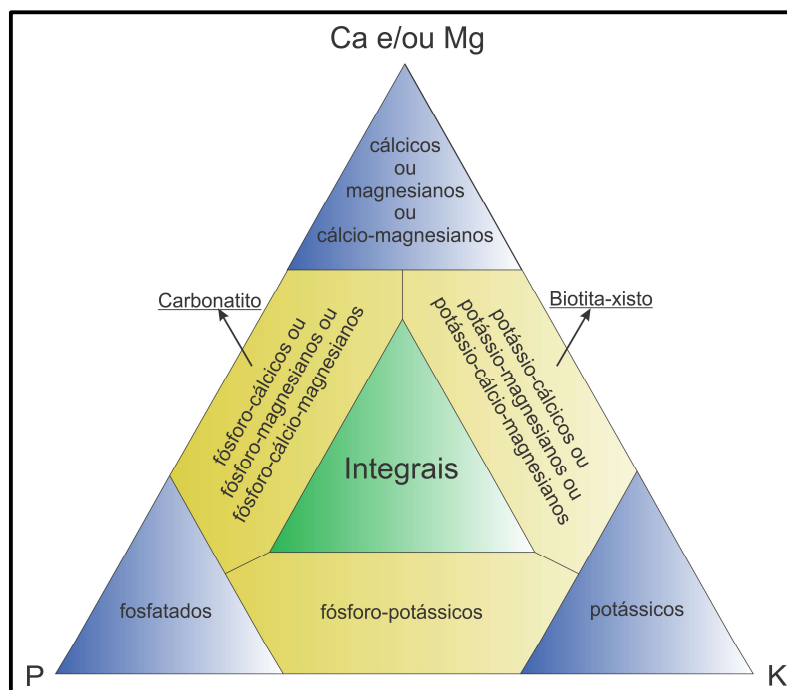


Figura 22 - Diagrama ternário PKCa-Mg representando os grupos e subgrupos dos remineralizadores, com base nos macronutrientes primários (P e K) e secundários (Ca e Mg). Os integrais, localizados no centro do diagrama, apresentam concentrações elevadas desses nutrientes. Fonte: Modificado de Côrrea & Oliveira (2024).

Estudos prévios têm investigado a eficiência agronômica de rochas similares (**Tabela 15**), considerando diferentes condições de solo e frações mineralógicas de mica-xistos utilizados como remineralizador. Castro et al. (2022), por exemplo, analisaram os micaxistos de Bela Vista de Goiás (GO) em lavouras de milho e soja, demonstrando que os resultados variam significativamente conforme a textura do solo. Em solos arenosos, o micaxisto apresentou desempenho superior ao KCl no cultivo de milho. Contudo, em solos argilosos, foi necessário aumentar as doses de micaxisto no primeiro ano de cultivo, indicando que o pó de rocha pode substituir parcialmente o KCl. A análise de FRX revelou que o micaxisto contém 3,47% de K_2O e 2,09% de CaO .

Khral et al. (2022) estudaram o biotita-xisto de Guanambi (BA), avaliando sua composição química em diferentes frações granulométricas. Os resultados mostraram uma ampla variação na concentração de nutrientes, com teores de K_2O variando de 2,38% (fração

de 300–1000 μm) a 4,14% (fração de 53–300 μm), enquanto o MgO variou de 2,38% (fração de 300–1000 μm) a 3,84% (<53 μm).

Diante desses fatores, torna-se essencial que estudos futuros sejam conduzidos sobre o biotita-xisto do Grupo Rio Preto, com ênfase na avaliação de sua eficiência em diferentes tipos de solo utilizados na agricultura no oeste da Bahia. Paralelamente, é crucial investigar o comportamento agrônomo do biotita-xisto em variadas frações granulométricas, levando em consideração as principais culturas agrícolas cultivadas na região. Essas análises poderão gerar informações estratégicas para otimizar sua aplicação como remineralizador, contribuindo para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis e alinhadas às condições edafoclimáticas locais.

Tabela 15 - Comparação dos teores de K₂O, K disponível, MgO e CaO do biotita-xisto estudado com dados de pesquisas publicadas que analisaram o mesmo resíduo e diferentes rochas em pó.

Fonte	Amostra	K ₂ O (%)	K disponível (mg/L; mg/kg)	MgO (%)	CaO (%)
Este estudo	Biotita-xisto	6,32	47,0	7,71	4,21
Braga et al. (2023)	Resíduo	6,96	192,76	0,92	7,72
Nasser et al. (2022)	Resíduo	3,5	-	2,34	3,36
Lichs et al. (2019)	Resíduo	4,29	-	-	17,09
Castro et al. (2022)	Mica-xisto	3,47	-	3,87	2,09
Souza (2021)	Piroxenito-bebedourito	1,09	-	7,42	30,24
Duarte et al. (2013)	Olivina Melilitito	3,42	30,7	18,44	13,35
Duarte et al. (2013)	Granito	3,99	29,7	0,49	1,81
Duarte et al. (2013)	Sienito	4,7	25	-	-
Araújo & Sampaio (2010)	Rocha potássica alcalina	8,9	58,9	0,29	0,14
Angélica et al. (2014)	Sienito (saprólito)	13	43,01	-	-
Silveira Braga et al. (2014)	Sienito	12,5	172,04	-	-

5.8 Conclusões

- O Chapadão Urucuia e seu entorno apresentam um grande potencial para a exploração de remineralizadores de solo, com destaque para duas áreas principais deste estudo. O Complexo Metacarbonatítico de Angico dos Dias/BA surge como uma promissora fonte de fósforo (10,8% de P₂O₅), enquanto o Grupo Rio Preto se destaca pela presença significativa de potássio (6,0% de K₂O).

- A elaboração de mapas temáticos voltados para a reatividade de rochas primárias e secundárias demonstrou-se uma ferramenta essencial na identificação de novas áreas com potencial agrícola. A distribuição e o grau de reatividade dos agrominerais fornecem informações estratégicas para o direcionamento da exploração desses recursos.
- Os resultados laboratoriais sugerem a eficiência dos materiais estudados. O biotita-xisto apresentou teores expressivos de K_2O (6,32%), MgO (7,71%) e CaO (4,21%), atendendo aos critérios estabelecidos pelo MAPA para certificação como remineralizador. Já o carbonatito se destacou como fonte de fósforo e cálcio, ainda que apresente baixa concentração de potássio. Ambas as rochas demonstram potencial para contribuir com a sustentabilidade agrícola na região oeste da Bahia.
- Além do potencial mineral, questões logísticas e econômicas também devem ser consideradas. A proximidade entre os depósitos minerais e as áreas agrícolas da região representa uma vantagem estratégica, reduzindo os custos logísticos associados ao transporte dos remineralizadores. No entanto, a viabilidade econômica dessas explorações exige um mapeamento detalhado e contínuo, aliado ao monitoramento da demanda agrícola local.
- A integração entre dados geológicos e agronômicos, apresentada neste estudo, reforça a importância dos remineralizadores de solo para a agricultura sustentável. O uso de fontes minerais locais pode reduzir a dependência de fertilizantes importados, promovendo a autonomia regional e favorecendo práticas agrícolas mais equilibradas do ponto de vista econômico e ambiental.
- Diante desse cenário, recomenda-se que pesquisas futuras avaliem a eficiência agrônoma do biotita-xisto e do carbonatito em diferentes tipos de solo e culturas agrícolas. A diversidade das microrregiões do oeste baiano, marcada por variações pluviométricas, distribuição das chuvas, diversidade de solos e cultivos, ressalta a importância de ensaios de fertilidade que forneçam dados detalhados sobre a aplicação desses materiais em distintos contextos agrícolas.

6 CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou a relevância do Zoneamento Agrogeológico como uma ferramenta estratégica para identificação e avaliação de fontes potenciais de remineralizadores de solo no Chapadão Urucuia e seu entorno. A abordagem integrada, baseada em análises geológicas, mineralógicas, geoquímicas e geoprocessamento, permitiu identificar unidades geológicas promissoras para aplicação agrícola, destacando o carbonatito de Angico dos Dias/BA como uma importante fonte de fósforo e cálcio, e o biotita-xisto de Formosa do Rio Preto/BA como um potencial fornecedor de potássio e magnésio.

Os resultados obtidos reforçam a importância dos remineralizadores como alternativa sustentável para a agricultura da região, contribuindo para a redução da dependência de fertilizantes convencionais importados. A proximidade das áreas mapeadas em relação aos polos agrícolas pode representar uma vantagem logística significativa, reduzindo custos de transporte e viabilizando a utilização local de insumos minerais. Além disso, os materiais identificados atendem, em sua composição química e mineralógica, aos requisitos estabelecidos pelo MAPA para certificação como remineralizadores, tornando-se candidatos promissores para aplicação prática.

A viabilidade agronômica e econômica dos remineralizadores pode ser substancialmente otimizada com a aplicação de técnicas de beneficiamento mineral, que permitem modificar a granulometria, aumentar a superfície de contato e melhorar a taxa de liberação de nutrientes essenciais para os solos. Processos como moagem, separação granulométrica e concentração mineralógica podem tornar os remineralizadores mais eficientes, elevando a disponibilidade de elementos como Ca, Mg, K e P para as plantas e aumentando sua competitividade no mercado de insumos agrícolas.

Entretanto, apesar do potencial identificado, a aplicação desses materiais como remineralizadores ainda exige estudos complementares, especialmente voltados para a avaliação de sua eficiência agronômica em diferentes tipos de solo e culturas. Ensaios laboratoriais e de campo prolongados são fundamentais para determinar a taxa de liberação dos nutrientes ao longo do tempo, o impacto sobre a fertilidade do solo e produtividade das culturas e a interação desses materiais com diferentes condições edafoclimáticas. Além disso, estudos de custo-benefício serão essenciais para validar a viabilidade econômica da exploração e comercialização desses insumos.

No contexto global, a busca por alternativas sustentáveis para a adubação dos solos tem se intensificado, e os resultados obtidos neste estudo indicam que a região do Chapadão Urucuia

pode se tornar um polo estratégico para a produção de remineralizadores. A adoção dessas fontes minerais pode minimizar os impactos ambientais associados ao uso excessivo de fertilizantes solúveis, contribuindo para a redução da lixiviação de nutrientes e promovendo um manejo mais equilibrado e resiliente dos solos agrícolas. No entanto, a efetiva implementação dessas soluções depende de uma maior aceitação desse tipo de produto no mercado (quebra de paradigma), avanços regulatórios, incentivos financeiros e mais políticas públicas voltadas para a inserção dos remineralizadores no setor agrícola.

Dessa forma, este trabalho amplia significativamente o conhecimento sobre os recursos minerais da região, demonstrando como a integração entre geociências e agronomia pode fornecer soluções inovadoras e sustentáveis para a agricultura brasileira. O zoneamento agrogeológico do Chapadão Urucuia representa um avanço na aplicação da geologia na produção agrícola, evidenciando o papel dos remineralizadores como alternativa viável para o fortalecimento da agricultura nacional, especialmente em um cenário de crescente demanda por insumos mais acessíveis e ambientalmente responsáveis.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-MOUTY, M. M.; EL-GREADLY, N. H. M. The productivity of two okra cultivars as affected by Gibberellic acid, organic N, rock phosphate and feldspar application. *Journal of Applied Sciences Research*, v. 4, n. 6, p. 627–636, 2008.
- ACKROYD, B.; GUZMAN, C.; CHOW, W. *Pre-feasibility study: Cerrado Verde ThermoPotash Project*, Minas Gerais State, Brazil. [S.l.]: [s.n.], 2014. 131 p. Disponível em: <http://www.verdepotash.com>. Acesso em: 25 jan. 2025.
- AGUIAR, G. A. *Bacia do Maranhão: geologia e possibilidades de petróleo*. Recife: DNPM/CPRM, 1969. 75 p. *Relatório* n. 371.
- AKTER, M.; AKAGI, T. Effect of fine root contact on plant-induced weathering of basalt. *Soil Science and Plant Nutrition*, v. 51, n. 6, p. 861–871, 2005.
- AIBA. Anuário safra 2022/2023. 2023. Disponível em: <https://www.aiba.org.br>. Acesso em: 30 out. 2024.
- AIBA. *Circular n. 04 de 04/11/2024: safra 2024/25 e condições climáticas no Oeste da Bahia*. AIBA, 2024. Disponível em: <https://aiba.org.br/arquivos/boletins/Circular%2004%20de%2004-11-2024.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2024.
- ALCARDE, J. C. *Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas*. São Paulo: ANDA, 2005. 24 p. (*Boletim Técnico*, 6).
- ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. *A Bacia Intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos*. In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. (org.). *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. Belo Horizonte: SBG/MG, 2001. p. 9-30.
- 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. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2011.08.011.
- ALI, A. H.; TAALAB, A. S. Effect of natural and/or chemical potassium fertilizers on growth, bulbs yield and some physical and chemical constituents of onion (*Allium cepa*, L.). *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, v. 4, n. 3, p. 228–237, 2008.
- ALMEIDA, F.; BRITO NEVES, B. B.; CARNEIRO, C. The origin and evolution of the South American Platform. *Earth-Science Reviews*, v. 50, p. 70–111, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(99\)00072-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(99)00072-0).
- ALOVISI, A. M. T.; TAQUES, M. M.; ALOVISI, A. A.; TOKURA, L. K.; SILVA, J. A. M.; CASSOL, C. J. Rochagem como alternativa sustentável para a fertilização de solos. *Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental*, v. 9, p. 918-932, maio 2020. DOI: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e02020918-932>.

ANDA, M.; SHAMSHUDDIN, J.; FAUZIAH, C. I. Increasing negative charge and nutrient contents of a highly weathered soil using basalt and rice husk to promote cocoa growth under field conditions. *Soil and Tillage Research*, v. 132, p. 1-11, 2013.

ANGÉLICA, R. S. et al. *Feldspar crystallinity and potassium behaviour in soils overlying syenites: agromineral application*. In: WORLD FERTILIZER CONGRESS OF CIEC, 16., 2014, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, 2014. p. 161-163. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 12 dez. 2024.

ARAÚJO, S. C.; SAMPAIO, J. A. Estudo do uso de rocha potássica como fertilizante de liberação lenta. In: LUZ, A. B.; BALTAR, C. A. M.; BERTOLINO, L. C. (org.). II Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste. *Anais...* Campina Grande: CETEM, 2010. p. 145-152. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br>. Acesso em: 12 dez. 2024.

AQUINO, J. M.; TANIGUCHI, C. A. K.; MAGINI, C.; BERNI, G. V. The potential of alkaline rocks from the Fortaleza volcanic province (Brazil) as natural fertilizers. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 103, 102800, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102800>.

BADR, M. A. Efficiency of K-feldspar combined with organic materials and silicate dissolving bacteria on tomato yield. *Journal of Applied Sciences Research*, v. 12, p. 1191–1198, 2006.

BALDWIN, J. A.; BROWN, M. *Petrogenesis of high-pressure metagranitoids from the Brasília Belt, central Brazil: implications for Neoproterozoic crustal evolution*. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 26, p. 531-547, 2008.

BALIGAR, V. C.; BENNETT, O. L. Outlook on fertilizer use efficiency in the tropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 10, n. 1, p. 83–96, 1986.

BARAK, P.; CHEN, Y.; SINGER, A. Ground basalt and tuff as iron fertilizers for calcareous soils. *Plant and Soil*, v. 73, p. 155–158, 1983.

BARBOSA, J. S. F.; SABATÉ, P.; MARINHO, M. M.; FERRARI, A. L.; MASCARÓ, J. *O Cráton do São Francisco na Bahia: uma síntese*. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, p. 3-6, 2003.

BARBOSA, N. S. Hidrogeologia do Sistema Aquífero Urucuia, Bahia. 2016. 168 f. *Tese* (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

BEM, Lucas Pozzobon de; THEODORO, Suzi Huff. 2023. Ocorrências de rochas com potencial para o uso como remineralizadores de solo nas mesorregiões Nordeste e Sudeste do Pará. Disponível em: <https://gmga.com.br/01-ocorrencias-de-rochas-com-potencial-para-o-uso-como-remineralizadores-de-solo-nas-mesorregioes-nordeste-e-sudeste-do-para/>. Acesso em: 2 dez. 2024.

BLASKOWSKI, A. E.; BERGMANN, M.; ABRAM, M. B.; SARDOU FILHO, R.; CAVALCANTE, O. A. *Prospecção de agrominerais na região de Irecê e Jaguarari-Bahia: uma proposta de metodologia para mapeamento agrogeológico*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 48., 2016, Porto Alegre. *Anais...* São Paulo: SBG, 2016.

BLUM, W. E.; HERBINGER, B.; MENTLER, A.; OTTNER, F.; POLLAK, M.; UNGER, E.; WENZEL, W. W. Zur Verwendung von Gesteinsmehlen in der Landwirtschaft. I. Chemisch-mineralogische Zusammensetzung und Eignung von Gesteinsmehlen als Dungenmittel. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, v. 152, n. 5, p. 421-425, 1989.

BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Brasília: CPRM, 2003.

BOLLAND, M. D.; BAKER, M. J. Powdered granite is not an effective fertilizer for clover and wheat in sandy soils from Western Australia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 56, n. 1, p. 59-68, 2000.

BOMFIM, L. F. C.; GOMES, R. A. D. *Aquífero Urucuia – geometria e espessura: ideias para discussão*. Salvador: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2002.

BOUJO, A.; TROMPETTE, R.; FLICOTEAUX, R.; MELFI, A. J.; AFFATON, P.; BLOT, A.; MONTEIRO, M. D.; DE OLIVEIRA, J. J.; MAGAT, P. 1994. *Fosfatos sedimentares marinhos do Proterozóico Médio e Superior e do Cambriano da África e do Brasil: Geologia, Mineralogia, Geoquímica e Importância Econômica*. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 66(3):293-318.

BRAGA, F. C. S.; LEITE, A. A. S.; OLIVEIRA, M. A. M.; MARTINS, E. S.; GABOS, M. B.; ANGÉLICA, R. S. K-alternative fertilizer project: biotite-bearing ultrapotassic deposit in Bahia State. In: WORLD FERTILIZER CONGRESS OF CIEC, 16., 2014, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, 2014. p. 164-166. Disponível em: <http://alice.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 12 dez. 2024.

BRASIL. Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 17 dez. 1980.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 5 out. 1988.

BRASIL. Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. Brasília, DF: Presidência da República, 2013.

BRASIL. Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais simples, mistos, organominerais e corretivos: volume VII. Brasília: MAPA, 2020. Disponível em: <https://wikisda.agricultura.gov.br/pt-br/Laborat%C3%B3rios/Metodologia/Fertilizantes/ManualFICVolVII>. Acesso em: 20 mar. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos. Brasília: MAPA/ACS, 2017. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/manual-de-metodos_2017_isbn-978-85-7991-109-5.pdf. Acesso em: 10 fev de 2025.

BRASIL. Trade Balance and Foreign Affairs Statistics of Brazil. Disponível em: <<https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/ptbr/assuntos/comercio-exterior/estatisticas>>. Acesso em: 27 jul. 2022c.

BROD, E.R.; BLASKOWSKI, A.E. *Avaliação do potencial agromineral do Brasil – Área: Estado do Tocantins*. Brasília: Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM, 2024. (*Informe de Recursos Minerais*. Série Insumos Minerais para Agricultura, n. 30).

BRUULSEMA, T.W., FIXEN, P.E., SULEWSKI, G.D. - *4R plant nutrition manual: A manual for improving the management of plant nutrition*. International Plant Nutrition Institute (IPNI), Norcross, GA, USA, 2012.

CAMPBELL, N. S. The use of rockdust and composted materials as soil fertility amendments. University of Glasgow, 2009.

CAMPELO, M. Rochas Carbonáticas. Recursos Minerais de Minas Gerais, 2018. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substanciasminerais/rochas-carbonaticas/>. Acesso em: 15 jan. 2021.

CARA, D.V.C.; ROCHA, D.L.; CUNHA, C.D.; RIZZO, A.C.L.; SÉRVULO, E.F.C. Solubilização biológica de potássio. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, *Série Tecnologia Ambiental*, 66, 42p. 2012.

CASTRO, J. P. V., LEANDRO, W. M., BRAIL, E. P. F., FERREIRA, K. R. S., OLIVEIRA, C. B. A., PASSOS, P. B. (2022). Eficiência agrônômica de remineralizados de solo de micaxisto na sucessão milheto-soja. *Research, Society and Development*, 11(14), e76111435864.

CAXITO, F.A., UHLEIN, A., DANTAS, E.L., STEVENSON, R., PEDROSA-SOARES, A.C. *Orosirian (ca. 1.96 Ga) mafic crust of the northwestern São Francisco Craton margin: Petrography, geochemistry and geochronology of amphibolites from the Rio Preto fold belt basement, NE Brazil*. *Journal of South American Earth Sciences*, 59:95-111, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2015.02.003>.

CHIWONA, A. G.; CORTÉS, J. A.; GAULTON, R. G.; MANNING, D. A. C. Petrology and geochemistry of selected nepheline syenites from Malawi and their potential as alternative potash sources. *Journal of African Earth Sciences*, v. 164, 2020.

CICERI, D., DE OLIVEIRA, M., ALLANORE, A., 2017. Potassium fertilizer via hydrothermal alteration of K-feldspar ore. *Green Chem.* 19 (21), 5187–5202.

COELHO, H. J. Instrução normativa MAPA – remineralizadores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 3., 2016, Pelotas. *Anais...* Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2016. Apresentação em slides.

COELHO, A. M. Eficiência agrônômica de subprodutos da mineração e de siderurgia como fontes de potássio para as culturas de milho e soja em sistema de rotação. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2017. 15 p. Embrapa Milho e Sorgo. *Comunicado Técnico*, 224.

CORREIA, Roberto de Siqueira; OLIVEIRA, Claudinei Gouveia de. Classificação dos remineralizadores. *Geologia USP - Série Científica*, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 23-37, 2024. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v24-222452>.

COSTA, F.G.; OLIVEIRA, F.A.D. 1970. O 'Verdete' rocha potássica na região de Cedro do Abaeté. In: XXIV Congresso de Geologia. Brasília: Sociedade Brasileira de Geologia. *Publicações*, 115-116.

COSTA, L.M.; SILVA, M.F.O. A indústria química e o setor de fertilizantes. In: *BNDES 60 anos: perspectivas setoriais*. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2012. p. 12-60.

CRUSCIOL, C. A. C.; MORETTI, L. G.; BOSSOLANI, J. W.; MOREIRA, A.; MICHERI, P. H.; ROSSI, R. Can dunite promote physiological changes, magnesium nutrition and increased corn grain yield? *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 50, n. 18, p. 2343-2353, 2019.

DA SILVA, E.M.N.C.P. et al. Qualidade de alface crespa cultivada em sistema orgânico, convencional e hidropônico. *Horticultura brasileira*, v. 29, p. 242-245, 2011.

DAHLIN, A. S.; RAMEZANIAN, A.; CAMPBELL, C. D.; HILLIER, S.; ÖBORN, I. Waste recovered by-products can increase growth of grass-clover mixtures in low fertility soils and alter botanical and mineral nutrient composition. *Annals of Applied Biology*, v. 166, n. 1, p. 105-117, 2015.

DALMORA, A. C.; RAMOS, C. G.; SILVA OLIVEIRA, M. L.; SILVA OLIVEIRA, L. F.; SCHNEIDER, I. A. H.; KAUTZMANN, R. M. Application of andesite rock as a clean source of fertilizer for eucalyptus crop: evidence of sustainability. *Journal of Cleaner Production*, v. 256, p. 120432, 2020.

DARDENNE M.A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho & D.A. Campos. 2000. Tectonic evolution of South America. 31 st *International Geological Congress*, Rio de Janeiro, SBG. p. 231-263.

DAROLT, M.R. A qualidade nutricional do alimento orgânico é superior ao convencional? Portal Planeta Orgânico, 2001.

DE ANDRADE, L.R.M. FALEIRO, A.S.G.; SANTOS SOBRINHO, D.A.; NASCIMENTO, M.T. DO; SOUZA, A.L. Disponibilização de K de rochas silicáticas para plantas de soja inoculadas com 31 fungos micorrízicos arbusculares (FMA). *Boletim de Desenvolvimento e Pesquisa, Embrapa Cerrados*, n. 303, 21 p. 2011.

DEER, W.A., HOWIE, R.A., ZUSSMAN, J., 2013. An Introduction to the Rock-forming Minerals. 3rd ed. *The Mineralogical Society*, London.

DELGADO, I. de M. et al. Geotectônica do escudo Atlântico. In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (org.). *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília, DF: CPRM, 2003. cap. 5, p. 227–334. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/5006>. Acesso em: 11 maio 2023.

DEMITO, J. Mineração de calcário em Tocantins deve crescer 7%. *Brasil Mineral*, 2011.

DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. S. G.; AMARAL, A. J.; VIEIRA, S. R.; MORAIS, L. A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L.; AGLIO, M. L. D.; GUILHERME, L. R.; MAFRA, A. L.; BENEDETTI, A. S.; COELHO, M. R.; MATTOS, E. R.; ALMEIDA, J. A.; VIANA, J. H. M. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1003-1020, 2016.

ESCOSTEGUY, P. A. V.; KLAMT, E. Basalto moído como fonte de nutrientes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, n. 1, p. 11-20, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000100002>

EMBRAPA. *Solos Arenosos: a nova fronteira agrícola brasileira*. Embrapa, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/49801116/artigo---solos-arenosos-a-nova-fronteira-agricola-brasileira>. Acesso em: 12 dez. 2024.

FARIA, Jr., L.E.C. Estudo sedimentológico da Formação Pedra de Fogo – Permiano – Bacia do Maranhão. *Dissertação de Mestrado*, Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológica, Universidade Federal do Pará, 57 p., 1979.

FRASCA, A.A.S.; RIBEIRO, P.S.E. *Mapa geológico e de recursos minerais: Áreas de relevante interesse mineral centro-norte da faixa Brasília*. CPRM. 2019.

FUCK, R.A.; PIMENTEL, M.M.; DARDENNE, M.A.; BOTELHO, N.F. Compartimentação tectônica da porção oriental da Província Tocantins. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., 1994, Balneário Camboriú. *Anais...* Balneário Camboriú: SBG, 1994. p. 215-216.

FUCK, R.A.; PIMENTEL, M.M.; DARDENNE, M.A.; BOTELHO, N.F. Província Tocantins. In: ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y. (Eds.). *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo: Edgard Blücher, 1984. p. 185-204.

GILLMAN, G. P.; BURKETT, D. C.; COVENTRY, R. J. *A laboratory study of application of basalt dust to highly weathered soils: effect on soil cation chemistry*. *Soil Research*, v. 39, n. 4, p. 799-811, 2001.

GLOBALFERT. Principais empresas produtoras de fertilizantes no mundo em 2022. GlobalFert, 2022. Disponível em: <https://globalfert.com.br/boletins/principais-empresas-produtoras-de-fertilizantes-no-mundo-em-2022-globalfert/>. Acesso em: 05 out. 2024.

GÓES, A.M. A Formação Poti (Carbonífero Superior) da Bacia do Parnaíba. Universidade de São Paulo, São Paulo. *Tese de Doutorado*, 171 p., 1995.

GUNNARSEN, K. C.; JENSEN, L. S.; GÓMEZ-MUÑOZ, B.; ROSING, M. T.; DE NEERGAARD, A. Glacially abraded rock flour from Greenland: potential for macronutrient supply to plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 182, n. 5, p. 846–856, 2019.

HELLAL, F. A.; EL-SAYED, S.; ZEWAINY, R. M. Effects of natural potassium source enriched with compost on nutrient uptake and yield of sugar beet grown in newly reclaimed soils. *Middle East Journal of Agricultural Research*, v. 2, n. 3, p. 101–107, 2013.

HENSEL, J. Bread from stones. Philadelphia: A.J. Tafel, 1894.

HENSEL, J. Pães de Pedra. Traduzido do original: Brot aus Steinen, durch mineralische Dungung der felder -1898- por: Landgraf, H.; Riveira, J. R. & Pinheiro, J. Salles Editora, Canoas/RS – Brasil. 2003.

HINSINGER, P.; BOLLAND, M.; GILKES, R. J. *Silicate rock powder*: effect on selected chemical properties of a range of soils from Western Australia and on plant growth as assessed in a glasshouse experiment. *Fertilizer Research*, v. 45, p. 69–79, 1996.

HINSINGER, P., BARROS, O.N.F., BENEDETTI, M.F., NOACK, Y., CALLOT, G., 2001. Plant-induced weathering of a basaltic rock: experimental evidence. *Geochim. Cosmochim. Acta* 65, 137–152.

HÖFIG, P.; MARTINS, E. S.; GIASSON, E.; ARANTES, B. S. Diferentes rochas moídas no processo de compostagem em Unaí/MG: fertilizante orgânico e autonomia agrícola. *Geographia Opportuno Tempore*, v. 9, n. 1, e47425, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5433/got.2023.v9.47425>.

INAGAKI, M.N.; JUNQUEIRA, C.P.; BELLON, P.P. Desafios da produção de soja orgânica como determinante à implantação de seu cultivo para fins comerciais na região oeste do Paraná. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 7, n. 1, p. 682-699, 2018.

JOÃO X.S.J. TEIXEIRA S.G. FONSECA D.D.F. 2013. Geodiversidade do Estado do Pará. Belém, CPRM, 218p.

KAHNT, R.; DITTMAR, H.; SCHULZ, H. *Effectiveness of crushed rocks as fertilizers on plant growth and soil properties*. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, v. 149, n. 4, p. 397-402, 1986.

KEREK, B.; KUTI, L.; VATAI, J. *Agrogeology today*. EGU General Assembly 2010, Vienna, Austria, p.14124, 2010.

KLEIV, R.A., THORNHILL, M., 2007. *Production of mechanically activated rock flour fertilizer by high intensive ultrafine grinding*. *Miner. Eng.* 20 (4), 334–341.

KLUTHCOUSKI, J. et al. Manejo do solo e o rendimento de soja, milho, feijão e arroz em plantio direto. *Scientia Agricola*, v. 57, p. 97-104, 2000.

KRAHL, L. L.; MARCHI, G.; PAZ, S. P. A.; ANGÉLICA, R. S.; SOUSA-SILVA, J. C.; VALADARES, L. F.; MARTINS, É. S. Increase in cation exchange capacity by the action of maize rhizosphere on Mg or Fe biotite-rich rocks. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 52, e72376, 2022.

LACERDA, J. J. de J.; RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; HICKMANN, C.; CONCEIÇÃO, O. P. da. Adubação, produtividade e rentabilidade da rotação entre soja e milho

em solo com fertilidade construída. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 50, n. 9, p. 769-778, 2015.

LASAGA, A. C.; SOLER, J. M.; GANOR, J.; BURCH, T. E.; NAGY, K. L. Chemical weathering rate laws and global geochemical cycles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 58, n. 10, p. 2361-2386, 1994.

LEME, E. S. V. C.; PORTO, C. G.; NASCIMENTO, J. A. C.; ABRAM, M. B.; SOUSA, S. Q.; OLIVEIRA, J. P. P.. Geoquímica e mineralogia dos fosforitos da mina de Pratápolis, MG. In: *TRABALHOS APRESENTADOS EM EVENTOS*. Brasília: ADIMB, mai. 2024.

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.

LI, J.; HEAP, A. D. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. Canberra: Geoscience Australia, 2008. 137 p. (Geoscience Australia Record, 2008/23).

LI, X.; DONG, L. Effects of straw incorporation combined with basalt powder on soil fertility and microbial activity. *Journal of Applied Microbiology*, v. 115, n. 2, p. 306–313, 2013.

LI, X.; LIU, J.; ZHANG, Y.; LI, J. Effects of rock powder and organic compost on soil microbial functional diversity and crop yield. *Soil Use and Management*, v. 36, n. 3, p. 486–494, 2020.

LIMA, O. N. B. Grupo Bambuí: Estratigrafia regional no Alto São Francisco e geologia dos depósitos fosfáticos da Serra da Saudade. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 142 p, 2005.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: *Fertilidade do solo*. 2007. p. 2-64.

LOPES, O. M. M.; CARRILHO, E. N. V. M.; LOPESASSAD, M. L. R. C. Efeito do pó de rocha e vinhaça em dois tipos de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 5, p. 1547-1557, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000500020>

MACHADO, R. V.; RIBEIRO, R. C. C.; ANDRADE, F. V. Nutrição Mineral e a Utilização de resíduos de Rochas Ornamentais. In: *XVII Jornada de Iniciação Científica*. Vitória: UFES-CETEM, 2008. p. 130-136. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/490>. Acesso em: 30 out. 2024.

MANCUSO, M. A. C.; SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CASTRO, G. S. A. Effect of potassium sources and rates on arabica coffee yield, nutrition, and macronutrient export. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 5, 2014.

MANNING, D. A. C. Mineral Sources of Potassium for Plant Nutrition: A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 30, n. 2, p. 281-294, 2010.

MANNING, D. A. C.; BAPTISTA, J.; LIMON, M. S.; BRANDT, K. Testing the ability of plants to access potassium from framework silicate minerals. *Science of the Total Environment*, v. 574, p. 476-481, 2017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.086.

MANNING, D.A.C., 2018. Innovation in resourcing geological materials as crop nutrients. *Nat. Resour. Res.* 27 (2), 217–227.

MANNING, D. A. C.; THEODORO, S. H. Enabling food security through use of local rocks and minerals. *The Extractive Industries and Society*, v. 7, p. 480-487, 2020.

MARTINAZZO, Rosane; SILVEIRA, Carlos Augusto Posser; BAMBERG, Adilson Luís; PILLON, Clenio Nailto. Pó de rocha, agrominerais e remineralizadores. In: *ALTERNATIVAS PARA DIVERSIFICAÇÃO DA AGRICULTURA FAMILIAR DE BASE ECOLÓGICA*. Brasília: Embrapa, 2022. (Documentos, 527).

MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, C. G.; RESENDE, A. V.; MATOS, M. S. F. Agrominerais – Rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. In: Luz, A. B.; Lins, F. M. (Eds.). *Rochas e Minerais Industriais*. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2008. p. 206-211.

MARTINS, E. S.; RESENDE, A. V.; OLIVEIRA, C. G.; FURTINI NETO, A. E. Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos. In: FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B.; CASTILHOS, Z. C. (Eds.). *Agrominerais para o Brasil*. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. p. 89-104.

MARTINS, E. S.; COUTO JUNIOR, A. F.; VASCONCELOS, V. Zoneamento agrogeológico como ferramenta para o manejo regional da fertilidade de solos agrícolas tropicais. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM*, 3., 2016, Pelotas, RS. Anais do III Congresso Brasileiro de Rochagem, 8 a 11 de novembro de 2016. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado; Brasília: Embrapa Cerrados; Assis: Triunfal Gráfica e Editora, 2016. p. 91-100.

MARTINS, E.S.; MARTINS, E.S.; HARDOIM, P.R. Princípios geoquímicos, mineralógicos e biológicos do manejo de remineralizadores de solos. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 44, n. 321, p. 26-39, 2023.

MEENA, V.D., DOTANIYA, M.L., COUMAR, V., RAJENDIRAN, S., AJAY, KUNDU S., 2014. Acase for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. *Proc. Natl. Acad. Sci., India, Sect. B Biol. Sci.* 84 (3), 505–518.

MEENA, V.S., MAURYA, B.R., VERMA, J.P., MEENA, R.S., 2016. Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture. Springer India, New Delhi, s.l.

MERSI, W.V., KUHNERT-FINKERNAGEL, R., SCHINNER, F., 1992. The influence of rock powders on microbial activity of three forest soils. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* 155 (1), 29–33.

MISI, A.; KYLE, R. Upper Proterozoic carbonate stratigraphy, diagenesis and stromatolitic Phosphorite Formation, Irecê Basin, Bahia, Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, A64(2): 299-310, 1994a.

MONTEIRO, C. F. Fosforitos do Grupo Bambuí na região de Campos Belos (GO) / Arraias (TO), na borda oeste do Cráton São Francisco. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

MOREIRA, Débora Silvano. Estratigrafia, petrografia e gênese da mineralização de potássio em siltitos verdes (verdetes) do Grupo Bambuí na região de São Gotardo, Minas Gerais. 2015. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica e Aplicada) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MORETTI, L. G.; BOSSOLANI, J. W.; CRUSCIOL, C. A. C.; MOREIRA, A.; MICHERI, P. H.; ROSSI, R. Dunite in agriculture: physiological changes, nutritional status and soybean yield. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 50, n. 14, p. 1775–1784, 2019.

MOURA, C.A.V.; PINTO, C.P.; SILVA, M.G.; ROCHA NETO, M.B. Geocronologia e geoquímica isotópica Sm-Nd da Faixa Araguaia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 44., 2008, Curitiba. Anais... Curitiba: SBG, 2008. p. 28.

MOURÃO, M. A. A. A unidade fosfática da Formação Sopa-Brumadinho, Supergrupo Espinhaço (região de Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais): petrografia, geoquímica e considerações genéticas. 1995. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 124 p.

NASSER, M. D.; GUARÇONI, A.; CARNEIRO, V. A.; BURKET, D.; TAVARES, M. B. Caracterização química do resíduo gerado por beneficiamento de rochas ornamentais do município de Adamantina (SP). *Cientific@ Multidisciplinary Journal*, v. 9, n. 1, p. 1-7, 2022.

NUNES, K. C. Interpretação integrada da Bacia do Parnaíba com ênfase nos dados aeromagnéticos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 30., 1993, Rio de Janeiro. *Resumo expandido*. Rio de Janeiro: SBGf, 1993. v. 1, p. 152–157.

OLIVEIRA, D.C., MOHRIAK, W. U. 2003. Jaibaras trough: an important element in the early tectonic evolution of the Parnaíba interior sag basin, Northern Brazil. *Marine And Petroleum Geology*, 20(3-4):351-383

PALANDRI, J.L., KHARAKA, Y.K., 2004. A Compilation of Rate Parameters of Water-Mineral Interaction Kinetics for Application to Geochemical Modeling: U.S. Geological Survey, Open File Report 2004-1068.

PAIM, M. M. Maciço de Cara Suja: expressão do magmatismo alcalino potássico pós-colisional no sudoeste da Bahia. 2014. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

PIMENTEL, M.M.; FUCK, R.A.; GIOIA, S.M.C.L. The Neoproterozoic Goiás Magmatic Arc, Central Brazil: a review and new Sm–Nd isotopic data. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 1, p. 35-39, 2000.

PIMENTEL, M. M.; DARDENNE, M. A.; FUCK, R. A.; VIANA, M. G.; JUNGES, S. L.; FISCHER, D. P.; SEER, H. J.; DANTAS, E. L. Nd isotopes and the provenance of detrital

sediments of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil. *Journal of South American Earth Science*, v. 14, p. 571-585, 2001.

PIMENTEL, M.M.; FUCK, R.A.; JARDIM DE SÁ, E.F.; FERNANDES, D. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS U–Pb sedimentary provenance data: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 31, n. 4, p. 345-357, 2011.

PINHEIRO, S., BARRETO, S. B. - Agricultura sustentável, trofobiose e biofertilizantes, Porto Alegre: Junqueira Candiru, 1996.

PRADO, Elias Martins Guerra; MARTINS, Eder de Souza. Zoneamento agrogeológico do Brasil. Brasília: Embrapa; Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2019. 32 slides.

PRIYONO, J., GILKES, R.J., 2008. High-energy milling improves the effectiveness of silicate rock fertilizers: a glasshouse assessment. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 39 (3–4), 358–369.

RAMEZANIAN, A.; DAHLIN, A. S.; CAMPBELL, C. D.; HILLIER, S.; ÖBORN, I. Addition of a volcanic rockdust to soils has no observable effects on plant yield and nutrient status or on soil microbial activity. *Plant and Soil*, v. 367, n. 1–2, p. 419-436, 2013.

RAMEZANIAN, A., DAHLIN, A.S., CAMPBELL, C.D., HILLIER, S., ÖBORN, I., 2015. Assessing biogas digestate, pot ale, wood ash and rockdust as soil amendments: effects on soil chemistry and microbial community composition. *Acta Agric. Scand. Sect. B Soil Plant Sci.* 65 (5), 383–399.

RAMOS, C. G.; SANTOS DE MEDEIROS, D.; GOMEZ, L.; OLIVEIRA, L. F. S.; SCHNEIDER, I. A. H.; KAUTZMANN, R. M. Evaluation of soil re-mineralizer from by-product of volcanic rock mining: experimental proof using black oats and maize crops. *Natural Resources Research*, v. 56, n. 1, p. 53-62, 2019.

REMÉDIO, M. O potencial de recursos minerais em fósforo e potássio: a produção nacional de fertilizantes e seus impactos econômicos, ambientais e sociais. Apresentação realizada em 4 de maio de 2022, Ministério Público Federal. CPRM/Serviço Geológico do Brasil, 2022.

RESENDE, A. V.; MACHADO, C. T. T.; MARTINS, E. S.; NASCIMENTO, M. T.; SENA, M. C.; SILVA, L. C. R.; LINHARES, N. W. Rochas moídas como fontes de potássio para o milho em solo de cerrado. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2006. 20 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 162).

RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; MARTINS, E. S.; HURTADO, S. M. C.; OLIVEIRA, C. G.; SENA, M. C. Protocolo de avaliação agronômica de rochas e produtos derivados como fontes de nutrientes às plantas ou condicionadores de solo: milho e sorgo. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. 30 p.

REZENDE, E.S. Faixa Rio Preto: atividade microbiológica, grafita e manganês no Neoproterozoico do Nordeste Brasileiro. 2021. 168 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

RIBEIRO, P. S. E. Projeto Minerações Associadas à Plataforma Bambuí no Sudeste do Estado do Tocantins (TO). Goiânia: CPRM, 2016.

RIZZOTTO, G.J.; OLIVEIRA, A.C. da S.; KLEIN, C.; OLIVEIRA, C.E.S.; CHAVES, C.L.; SILVA, C.R.M da; PALHETA, E.S. de M.; KLEIN, E.; SOUSA, F.R. de; MARINHO, M. de S.; SILVA, M.F. da; SILVA, M.P.; RODRIGUES SOBRINHO, V.. Províncias e distritos auríferos do Brasil: escala 1:5.000.000 [Goiânia] : CPRM, 2002. 1 mapa color.

RÖMHELD, V., MARSCHNER, H., 1990. Genotypical differences among graminaceous species in release of phytosiderophores and uptake of iron phytosiderophores. *Plant Soil* 123 (2), 147–153.

ROSIÈRE, C.A.; RANGEL, R.E.; RIOS, F.J.; OLIVEIRA, S.M.B. Structure and iron mineralization of the Cauê banded iron formation, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 34, n. 3, p. 339-354, 2008.

SACHS, Liliane Lavoura Bueno; BATISTA, Ivo Hermes; ABRAM, Maisa Bastos. Rochas fosfáticas no estado do Piauí. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2009.

SANCHES, Andreia Lima. O fosforito Proterozoico da região de Irecê (Bahia): caracterização cristalográfica e química. 1997. 125 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1997.

SANCHEZ, P.A., 2019. *Properties and Management of Soils in the Tropics*. Cambridge University Press.

SANTOS, J. A. et al. Eficácia Agronômica de Remineralizadores. *Revista de Agricultura Sustentável*, v. 12, n. 1, p. 45-53, 2017.

SHAH, G. A.; SHAH, G. M.; RASHID, M. I.; GROOT, J. C. J.; TRAORE, B.; LANTINGA, E. A. Bedding additives reduce ammonia emission and improve crop N uptake after soil application of solid cattle manure. *Journal of Environmental Management*, v. 209, p. 195-204, 2018.

SILVA, U.C.; GOMES, E.A.; OLIVEIRA-PAIVA, C.A.; DIAS, F.E.S.; FRADE, Y.S.; MARRIEL, Biossolubilização de fonolito por microrganismos do solo solubilizadores de potássio. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 33, 2011. Uberlândia. Anais... Uberlândia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011.

SILVA, L. F.; OLIVEIRA, L. F.; RAMOS, C. G.; SCHNEIDER, I. A. H.; KAUTZMANN, R. M. Basalt powder as an alternative source of soil fertility and carbon sequestration. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 36, n. 1, p. 123-134, 2014.

SILVA, A.M.M. Aumento da produtividade e mudanças na microbiota do solo em cultivo de cana-de-açúcar com aplicação de composto e inoculação de bactérias solubilizadoras de fosfato. Piracicaba: 72 p., 2018. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

SWOBODA, P.; DÖRING, T. F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. *Science of the Total Environment*, v. 807, p. 150976, 2022.

SOLUM LABORATÓRIO. Uso do pó de rocha como adubo na agricultura. 2022. Disponível em: <https://www.solumlab.com.br/uso-de-po-de-rocha-como-adubo-na-agricultura/>. Acesso em: 01 mai. 2023.

SON, N. K.; KHOI, N. H. T.; HUYNH, N. N. T.; PHUOC, N. V. A comprehensive review of rock dust for soil remineralization in sustainable agriculture and preliminary assessment of nutrient values in micronized porous basalt rock from Nghe An province, Viet Nam. *Vietnam Journal of Science and Technology*, v. 62, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.15625/2525-2518/18544>.

SOUZA, A. F.; LEITE, A. L.; PINHEIRO, P. A.; NUNES, L. M.; CAETANO, P. H. R. The use of gneiss and steatite powders with vermicompost for soil fertility enhancement. *Agricultural Research*, v. 7, n. 3, p. 223-234, 2019.

TILMAN, D., CASSMAN, K., MATSON, P. - Agricultural sustainability and intensive production practices, *Nature* 418 (2002) 671-677.

TOSCANI, Rafael Gomes da Silveira; CAMPOS, José Elói Guimarães. Uso de pó de basalto e rocha fosfatada como remineralizadores em solos intensamente intemperizados. *Geociências, UNESP*, v. 36, n. 2, p. 259-274, 2017.

SPIGOLON, A. L. D.; ALVARENGA, C. J. Fácies e elementos arquiteturais resultantes de mudanças climáticas em um ambiente desértico: Grupo Urucuia (Neocretáceo), Bacia Sanfranciscana. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 32, n. 4, p. 579-586, 2002.

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

THEODORO, S. H, MEDEIROS, F. P., IANNIRUBERTO, M., JACOBSON, T.K. Soil remineralization and recovery of degraded areas: An experience in the tropical region, *J. S. Am. Earth Sci.*, Apr 1;107:103014 (2021)

TOSCANI, R. G. S.; 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.

UHLEIN, A. et al. Tectônica da Faixa de Dobramentos Brasília – Setores Setentrional e Meridional. *Geonomos*, v. 20, n. 2, p. 1-13, 2012.

UHLEIN, A.; MARQUES, C. S. de S.; UHLEIN, G. J.. Fertilizantes provenientes de depósitos sedimentares de fosfato e potássio Pré-Cambrianos. CODEMGE – Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais, [s.d.]. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/fertilizantes-provenientes-de-depositos-sedimentares-de-fosfato-e-potassio-pre-cambrianos/#aspectos-gerais-dos-macronutrientes-f%C3%B3sforo-e-pot%C3%A1ssio>. 2018. Acesso em: 02 fev. 2025.

WEIL, R.R., BRADY, N.C., 2017. *The Nature and Properties of Soils*. Pearson Prentice Hall, Harlow, London, New York NY.

VALARELLI, J.V., NOVAIS, R.F., VAZ DE MELO, M.T., LEAL, E.D. 1993. Ardósias verdes de Cedro do Abaeté na produção de termofosfato potássico fundido e sua eficiência agrônômica *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 65. 343-375.

VAN SCHÖLL, L.; KUYPER, T.W.; SMITS, M.M.; LANDEWEERT, R.; HOFFLAND, E.; VAN BREEMEN, N. Rock-eating mycorrhizas: their role in plant nutrition and biogeochemical cycles *Plant and Soil*, v. 303, n. 1, pág. 35-47, 2008.

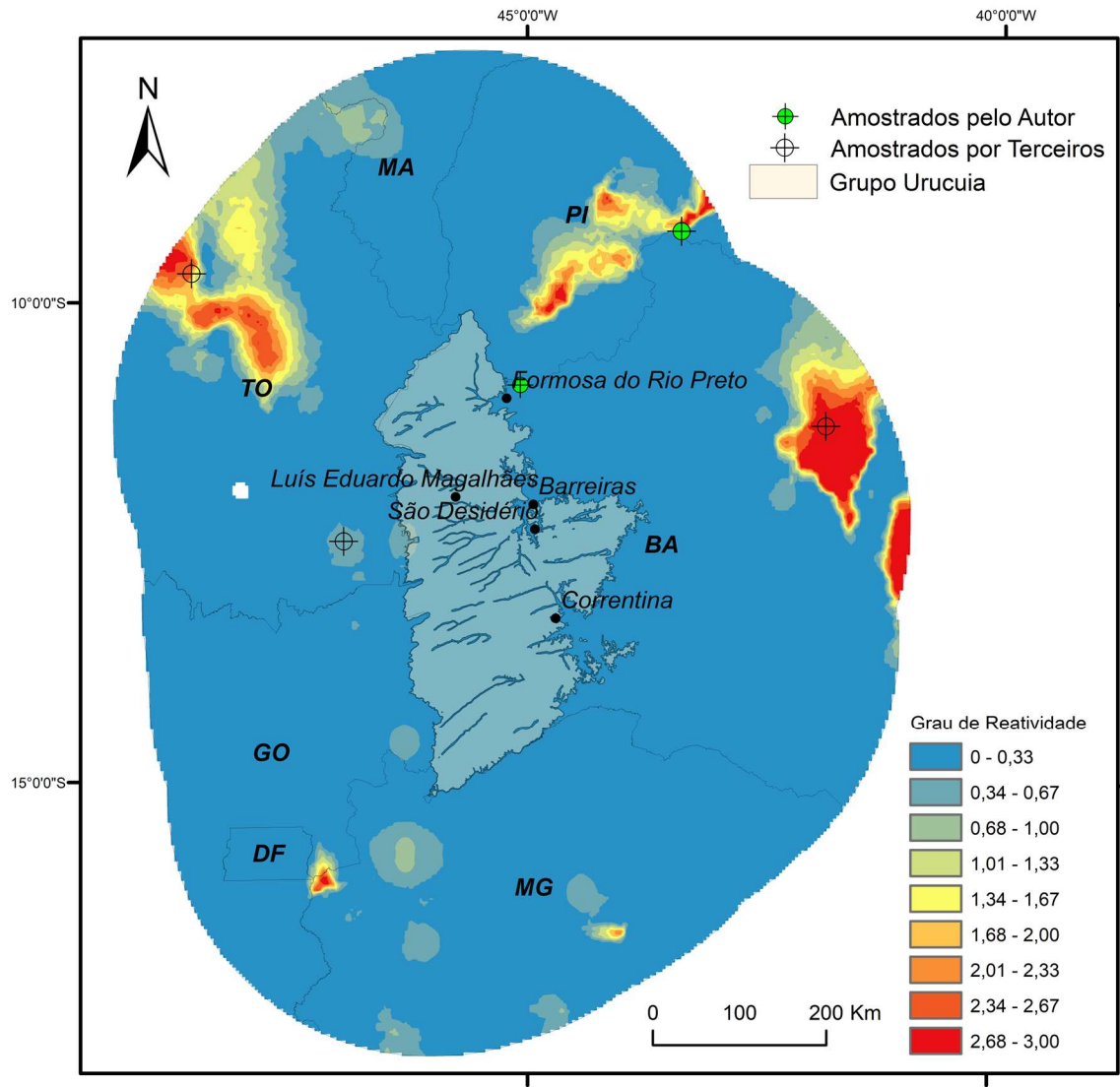
VAN STRAATEN, P. *Agrogeology: The Use of Rocks for Crops*. Cambridge: Enviroquest Ltd., 2007.

VAZ, P. T. et al. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p.253-263, 2007

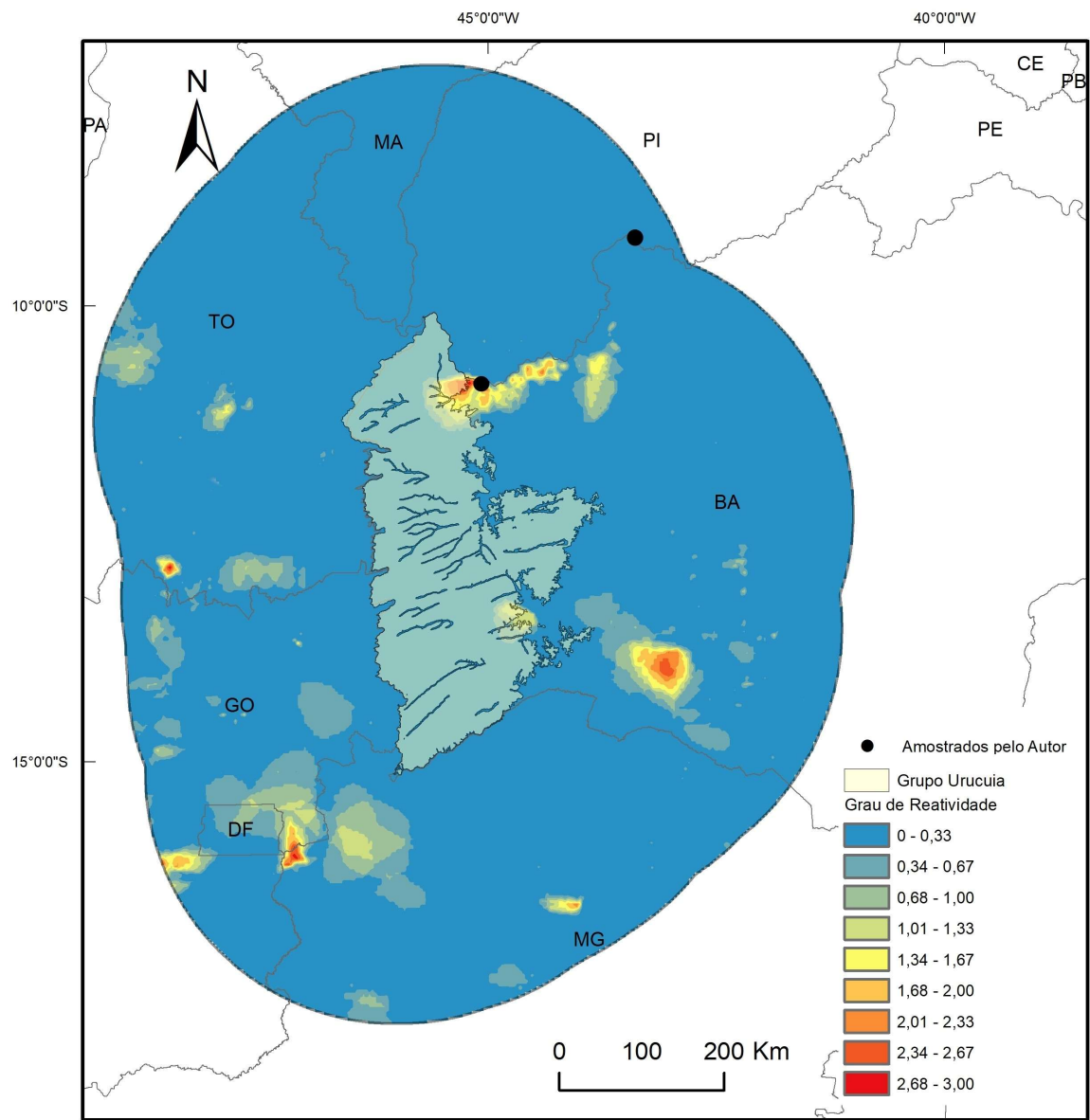
VIANA, L. S. B.; CAITANO, T. B. S.; PONTES, A. N. A remineralização de solos como iniciativa ao desenvolvimento sustentável. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 14, p. e45101421516, 2021.

YOUNG, C.G.K. Estratigrafia de alta-resolução da Formação Pimenteiras (Devoniano, Bacia do Parnaíba). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 170 p., 2006.

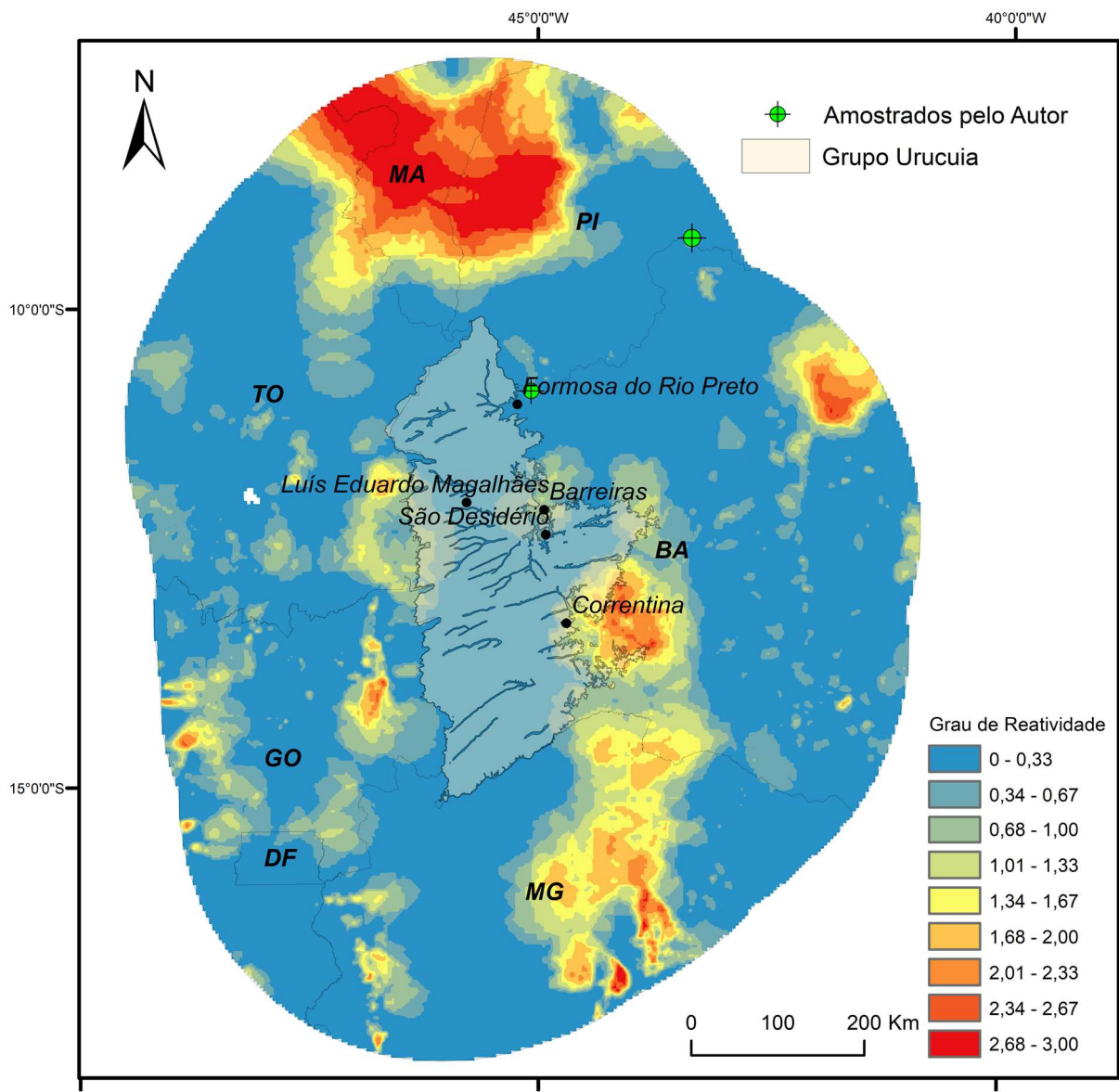
APÊNDICE A – MAPA DO GRAU DE REATIVIDADE DE ROCHAS FOSFATADAS



APÊNDICE B – MAPA DO GRAU DE REATIVIDADE DE ROCHAS POTÁSSICAS



APÊNDICE C – MAPA DO GRAU DE REATIVIDADE DE ROCHAS CÁLCICAS



APÊNDICE D – MAPA DO GRAU DE REATIVIDADE DE ROCHAS
MAGNESIANAS

