



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IGESC

CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

CAMPUS MONTE CARMELO

ISABELA PIMENTA RIBEIRO

**MAPEAMENTO GEOLÓGICO DE UMA PORÇÃO OESTE NO DOMO
SERRA NEGRA, PATROCÍNIO – MG: UM TRABALHO VOLTADO PARA
POTENCIALIDADE NA EXPLORAÇÃO MINERAL**

Monte Carmelo (MG)

Setembro / 2025

ISABELA PIMENTA RIBEIRO

**MAPEAMENTO GEOLÓGICO DE UMA PORÇÃO OESTE NO DOMO SERRA
NEGRA, PATROCÍNIO – MG: UM TRABALHO VOLTADO PARA
POTENCIALIDADE NA EXPLORAÇÃO MINERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia do Instituto de Geografia da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte
dos requisitos necessários à obtenção do título de
Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Mota da Silva

Monte Carmelo (MG)

Setembro / 2025

ISABELA PIMENTA RIBEIRO

**MAPEAMENTO GEOLÓGICO DE UMA PORÇÃO OESTE NO DOMO SERRA
NEGRA, PATROCÍNIO – MG: UM TRABALHO VOLTADO PARA
POTENCIALIDADE NA EXPLORAÇÃO MINERAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia do Instituto de Geografia da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte
dos requisitos necessários à obtenção do título de
Bacharel em Geologia.

Monte Carmelo – MG, 2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fabiano Mota da Silva (UFU)

Prof. Dr. Christiano Magini (UFC)

Henrique Augusto Romão Moreira

Coordenador de Geologia e Geotecnia (CMOC)

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R484 2025	<p>Ribeiro, Isabela Pimenta, 1995- MAPEAMENTO GEOLÓGICO DE UMA PORÇÃO OESTE NO DOMO SERRA NEGRA, PATROCÍNIO – MG: UM TRABALHO VOLTADO PARA POTENCIALIDADE NA EXPLORAÇÃO MINERAL [recurso eletrônico] : / Isabela Pimenta Ribeiro. - 2025.</p> <p>Orientador: Fabiano Mota da Silva. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Geologia. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Geologia. I. Silva, Fabiano Mota da, 1985-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Geologia. III. Título.</p> <p>CDU: 551</p>
--------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

AGRADECIMENTO

Agradeço principalmente à minha família, que sempre foi minha base e minha maior motivação. Aos meus pais, José Albenir Ribeiro Pereira e Terezinha de Fátima Pimenta Ribeiro, pelo amor, pelo exemplo de caráter, pela dedicação e por acreditarem em mim em todos os momentos.

Ao meu irmão Hector Antunes Pimenta Ribeiro e à minha irmã Ludmyla Pimenta Ribeiro, pelo apoio e companheirismo durante essa caminhada. À minha sobrinha afilhada Olivia Pimenta Dozono, que trouxe ainda mais alegria à minha vida, sendo uma fonte de inspiração e esperança no futuro.

Aos meus avós, que tiveram papéis tão importantes em minha vida: à minha querida avó paterna Lídia Ribeiro, que sempre me incentivou com palavras de carinho; e aos meus avós maternos, Irani Maria Pimenta e Olavo Antunes Pimenta, que, mesmo não estando mais entre nós, permanecem vivos em minhas lembranças e no meu coração. O amor e os ensinamentos de vocês foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

A todos os meus amigos pela amizade sincera, pela compreensão nos momentos de ausência e pelo apoio em todas as fases desta jornada. Em especial, ao João Paulo Nunes e Wilson Araújo que compartilharam dificuldades e alegrias e esteve comigo durante todo este processo.

Aos geólogos Henrique Augusto, Juliana Missiaggia e Maira Cristina, que foram fundamentais no estágio para o aprimoramento do meu aprendizado e crescimento profissional, compartilhando seus conhecimentos, me orientaram com paciência e me incentivaram a buscar sempre mais.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fabiano Silva Mota, pela amizade, apoio, dedicação, contribuições valiosas na construção deste e de muitos outros trabalhos, bem como pela confiança depositada em mim ao longo deste processo.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha formação pessoal e acadêmica, deixo meu mais sincero agradecimento. Dedico a vocês, com muito carinho, esta conquista.

RESUMO

O Domo Serra Negra, localizado em Patrocínio (MG), apresenta relevância geológica e potencial para exploração mineral, despertando interesse em estudos voltados à caracterização de suas unidades litológicas e mineralizações associadas. O objetivo deste trabalho foi realizar o mapeamento geológico da porção oeste do domo, com ênfase na avaliação da viabilidade para exploração mineral. Para isso, foram empregadas metodologias de campo, análises laboratoriais e processamento de dados aerogeofísicos. Os resultados indicaram predominância de quartzitos do Grupo Canastra, intercalados com filitos carbonosos e quartzitos ferruginosos, além da presença de sulfetos disseminados associados a processos hidrotermais. As análises químicas revelaram altos teores de SiO_2 (>90%), favoráveis à exploração de areia industrial, além de concentrações significativas de Fe_2O_3 (>40%) e TiO_2 (>10%), considerados economicamente viáveis. Embora elementos como zircônio, nióbio e terras raras tenham apresentado baixos valores, demonstraram potencial geoquímico. A integração dos dados permitiu delimitar áreas prioritárias para futuras campanhas de pesquisa mineral, contribuindo para o entendimento do potencial econômico do Domo Serra Negra.

Palavras-chave: Domo Serra Negra. Exploração mineral. Geofísica. Geoquímica. Grupo Canastra. Mapeamento geológico.

ABSTRACT

The Serra Negra Dome, located in Patrocínio, Minas Gerais, holds significant geological relevance and mineral resource potential, drawing interest in studies aimed at characterizing its lithological units and associated mineralization. The objective of this research was to conduct geological mapping of the western sector of the dome, with emphasis on assessing its viability for mineral exploration. For this purpose, field methodologies, laboratory analyses, and aerogeophysical data processing were employed. The results indicate a predominance of quartzites from the Canastra Group, interlayered with carbonaceous phyllites and ferruginous quartzites, as well as the occurrence of disseminated sulfides related to hydrothermal alteration. Geochemical analyses revealed high SiO_2 contents ($>90\%$), favorable for industrial sand exploration, in addition to significant concentrations of Fe_2O_3 ($>40\%$) and TiO_2 ($>10\%$), considered economically viable. Although elements such as zirconium, niobium, and rare earth elements displayed low concentrations, they nonetheless suggest geochemical potential. The integration of datasets allowed the delineation of priority areas for future mineral exploration campaigns, contributing to a better understanding of the economic potential of the Serra Negra Dome.

Keywords: Serra Negra Dome. Canastra Group. Geological mapping. Geochemistry. Geophysics. Mineral exploration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo simplificado da evolução do complexo Salitre I. Na porção superior é ilustrada a disposição das rochas dos Grupos Canastra (creme) e Bambuí (verde) antes da intrusão. Na figura central é representada a intrusão alcalina, a intrusão dos diques e a formação da estrutura dômica. Na inferior pode-se visualizar a situação atual. Fonte: Adaptado de Borges, 2018.

Figura 2: Mapa de pontos das amostras coletadas. Fonte: A autora.

Figura 3: Mapa da Amplitude do Sinal Analítico no Domo Serra Negra. Fonte: A autora.

Figura 4: Mapa de Inclinação do Sinal Analítico no Domo Serra Negra. Fonte: A autora.

Figura 5: Amostras coletadas no mapeamento geológico para serem enviadas ao Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Fonte: A autora.

Figura 6: Mapa geológico simplificado do Cráton do São Francisco. Fonte: Pinho et al., modificado de Alkmim et al. 1993, extraído de Alkmim, 2004.

Figura 7: Complexos alcalinos da PIAP. Fonte: Novaes, 2018.

Figura 8: Distribuição da Província Ígnea Alto paranaíba. Fonte: Oliveira, 2004.

Figura 9: Intrusão Alcalina carbonatítica Serra Negra. Fonte: Grasso, 2010.

Figura 10: Mapa Geológico local resultante do mapeamento realizado. Fonte: A autora.

Figura 11: Afloramento de quartzito bem desenvolvido pertencente a Formação Chapada dos Pilões (amostragem P8). Fonte: A autora.

Figura 12: Aspectos geomorfológicos do empreendimento por satélite. Fonte: Google Earth.

Figura 13: Afloramento de metassedimento siliciclástico apresentando estrutura deformacional bem desenvolvida. Fonte: A autora.

Figura 14: Afloramento de quartzito rósea apresentando vênulo de hematita cortando a matriz quartzo-feldspática (amostragem P14 MIN). Fonte: A autora.

Figura 15: Afloramento em planta de quartzito friável e de coloração esbranquiçada com intercalações de filito preferencial a estrutura (amostragem P3 FE). Fonte: A autora.

Figura 16: Afloramento de quartzito silicificado, maciço, fraturado e com foliação desenvolvida, evidenciando episódio de deformação. Fonte: A autora.

Figura 17: Afloramento de quartzito composto por grãos de quartzo de granulometria variando de subarredondada a arredondada, embutidos em matriz muito fina de coloração esbranquiçada, com textura bem desenvolvida (amostragem P14 MIN). Fonte: A autora.

Figura 18: Afloramento de quartzitos ferruginosos, com coloração variando entre avermelhada, amarela e acinzentada, localmente magnéticos, indicando presença de minerais ferruginosos finamente disseminados na matriz (amostragem P3 I). Fonte: A autora.

Figura 19: Filito cinzento com foliação milimétrica bem desenvolvida, característica de baixo grau metamórfico (amostragem P31). Fonte: A autora.

Figura 20: Mapa de Amplitude do Sinal Analítico contendo os principais lineamentos estruturais. Fonte: A autora.

Figura 21: Mapa de Inclinação do Sinal Analítico contendo os principais lineamentos estruturais. Fonte: A autora.

Figura 22: Pontos realizados no mapeamento, destacado em vermelho os pontos com amostragens enviadas para análise química. Fonte: A autora.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo Geral	4
2.2 Objetivo específico	4
3. LOCALIZAÇÃO E ACESSO	4
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
4.1 Levantamento Bibliográfico.....	5
4.2 Mapeamento Geológico	6
4.3 Dados Aerogeofísicos	7
4.4 Coleta de Amostras para Laboratório	10
5. CONFIGURAÇÃO GEOLÓGICA	11
5.1 Geologia Regional	11
5.1.1 Cráton do São Francisco	11
5.1.2 Faixa Brasília	12
5.1.3 Grupo Canastra.....	13
5.1.4 Formação Chapada dos Pilões - Membro Hidrelétrica da Batalha	15
5.1.5 Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP).....	15
5.1.6 Coberturas detrito – laterítica	17
5.1.7 Coberturas detríticas indiferenciadas	17
5.1.8 Suíte Intrusiva Serra Negra.....	18
5.2 Geologia Local	19
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
6.1 Levantamento Aeromagnético.....	26
6.2 Análises químicas	28
6.3 Favorabilidade para Exploração Mineral.....	33
7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1. INTRODUÇÃO

A produção mineral brasileira é fortemente concentrada em substâncias metálicas de grande relevância econômica, como alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco. Juntas, essas 11 substâncias representam 89% da produção mineral do país, somando aproximadamente R\$ 312,9 bilhões anuais, sendo que 88,12% desse montante se concentra nos estados de Minas Gerais e Pará (ANM, 2023).

Em Minas Gerais concentra-se um expressivo número de empresas do setor mineral, o que gera elevada demanda por serviços geológicos, incluindo pesquisas, mapeamentos e análises de testemunhos de sondagem. Em 2013, foram extraídas aproximadamente 39 milhões de toneladas de minério bruto (Run of Mine – ROM) em dez minas brasileiras, com teor médio de 9,6% de P_2O_5 , resultando, após o beneficiamento, em cerca de 6,7 milhões de toneladas de concentrado com teor médio de 37% de P_2O_5 (Fonseca, 2014).

Nesse contexto, Minas Gerais destacou-se como o principal produtor nacional, responsável por 49% do fosfato do país, seguido por Goiás (36%), São Paulo (10%), Bahia (4%) e Tocantins, que completou o restante. As operações mineiras no estado concentram-se nos municípios de Tapira, Araxá, Patos de Minas e Lagamar, sendo Tapira o maior produtor de rocha fosfática do Brasil. Apesar das extensas reservas disponíveis, as regiões de Patrocínio e Serra do Salitre ainda não apresentam exploração comercial ativa, configurando-se como áreas estratégicas para futuras pesquisas e investimentos no setor.

A relevância dessas regiões está diretamente relacionada à presença do elevado estrutural conhecido como Domo de Patrocínio. De acordo com Ab'Sáber (1975), um domo é uma estrutura geológica em que as camadas apresentam uma elevação local, geralmente formada por atividades intrusivas, como o plutonismo ou outros fenômenos magmáticos, que provocam o bombeamento das rochas e a formação de uma abóbada topográfica, podendo influenciar significativamente a ocorrência e distribuição de minerais na área.

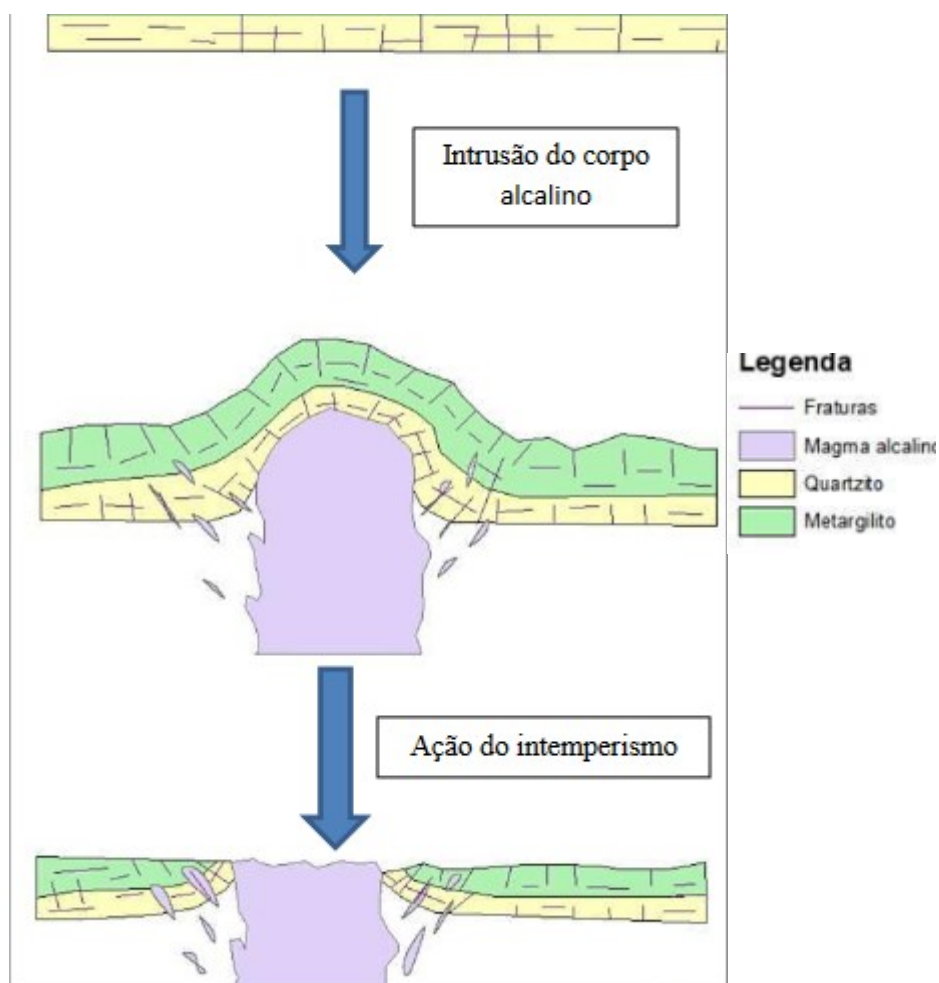
BORGES (2018) descreve que no Domo Serra Negra ocorrem importantes mineralizações de fosfato resultantes dos processos magmáticos e enriquecida de forma

supergênica, gerando depósitos economicamente viáveis. Atualmente estes depósitos estão sendo explorados pelas empresas Mosaic Fertilizantes e Iara Fertilizantes.

O autor mencionado anteriormente destaca que pelo sensoriamento remoto, o corpo intrusivo (ascensão magmática) produziu fraturamentos radiais, fato este que contribuiu para a instalação de mineralizações nas adjacências da estrutura.

Por último, BORGES (2018) descreve que a cúpula do domo é afetada por intemperismo e erosão, o que enriquece supergênicamente a mineralização e destrói a elevação criada pela intrusão, o que explica o relevo e a distribuição geológica do complexo hoje, como mostra a Figura 1.

Figura 2: Modelo simplificado da evolução do complexo Salitre I. Na porção superior é ilustrada a disposição das rochas dos Grupos Canastra (creme) e Bambuí (verde) antes da intrusão. Na figura central é representada a intrusão alcalina, a intrusão dos diques e a formação da estrutura dômica. Na inferior pode-se visualizar a situação atual.



Fonte: Adaptado de Borges, 2018.

Através do uso de metodologias geofísicas é possível identificar profundidades das fontes magnéticas (a exemplo do que ocorre na Figura 01), o qual podem representar corpos mineralizados, fato este que será empregado nesta pesquisa para corroborar com novas informações.

Citado anteriormente, ocorrem nas adjacências do Domo Serra Negra, mineradoras para extração de substâncias fosfáticas a exemplo da Mosaic e Iara Fertilizantes, além de pequenas empresas de atividade de areia.

Sabe-se que em qualquer atividade de prospecção mineral no Brasil, pesquisas como mapeamento geológico e geofísicos são fundamentais para que a mineradora perceba se o bem mineral apresenta volume e teor significativamente para uma possível instalação em uma área pesquisada.

No Brasil, o código de mineração foi decretado inicialmente em 1967 através do projeto de lei 227, de 28 de fevereiro. No mencionado decreto, o artigo 20 inciso II descreve que *“o titular deverá entregar o relatório final/parcial dos trabalhos ao DNPM (hoje ANM) além do pagamento da taxa anual, por hectare, admitida a fixação em valores progressivos em função da substância mineral objetivada, extensão e localização da área e de outras condições, respeitado o valor máximo de duas vezes a expressão monetária UFIR.”*

O mapeamento geológico da porção oeste do Domo Serra Negra, em Patrocínio-MG, concentra-se na avaliação do potencial de exploração mineral da região. A pesquisa envolveu a aplicação de metodologias geológicas, incluindo mapeamento de campo e coleta de amostras, combinadas com técnicas geofísicas, como o processamento de dados aeromagnéticos e aerogeoquímicos, além de análises químicas laboratoriais, permitindo caracterizar de forma detalhada as unidades minerais presentes.

A atuação de profissionais capacitados é fundamental para a execução de pesquisas minerais, fornecendo informações que apoiem órgãos de fiscalização e embasem processos de autorização para lavra e beneficiamento de substâncias minerais. Nesse contexto, a análise do potencial mineral da porção oeste do Domo Serra Negra possibilitou a realização das campanhas de campo e a obtenção de dados laboratoriais relevantes, contribuindo para o entendimento detalhado das características geológicas e do potencial econômico da área de estudo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Objetivo Geral é realizar um mapeamento geológico, aplicando técnicas de métodos indiretos para extração de Estruturas Geológicas e identificações de possíveis ocorrências minerais para a realização das análises químicas de amostras para todos os elementos da Tabela Periódica, e assim integrar todas as informações obtidas para a avaliação de ocorrências ou de depósitos minerais.

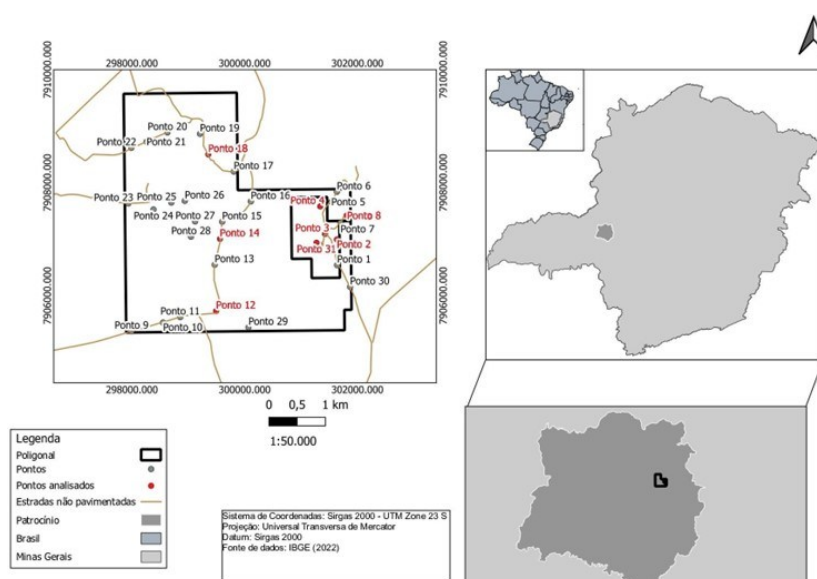
2.2 Objetivo específico

- i: Realizar mapeamento na escala 1:50.000
- ii: Produzir mapas geofísicos aeromagnéticos para elaboração de mapas magnéticos.
- iii: Coletar amostras de campo para estudos geoquímicos
- iv: Realizar análise geoquímica para identificação dos elementos maiores e menores
- v: Integrar todos os dados para determinar se há ou não favorabilidade de exploração

3. LOCALIZAÇÃO E ACESSO

Á área de estudo está localizada na região de Patrocínio, no estado de Minas Gerais.

Figura 2: Mapa de pontos das amostras coletadas.



Fonte: A autora.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de identificar áreas com potencial para exploração mineral, a metodologia empregada incluiu levantamento bibliográfico, processamento de dados aeromagnéticos e análises químicas das rochas.

4.1 Levantamento Bibliográfico

A região do Domo Serra Negra, também conhecido como Complexo Alcalino-Carbonatítico de Serra Negra, situa-se no município de Patrocínio, no Triângulo Mineiro, e representa uma das mais importantes intrusões alcalinas do Alto Paranaíba.

A área se destaca tanto do ponto de vista científico, pela complexidade petrogenética, quanto do ponto de vista econômico, pelo potencial de exploração de recursos minerais estratégicos.

Segundo Grasso (2010), o domo é composto por uma variedade de litotipos, incluindo carbonatitos, dunitos, flogopititos, clinopiroxenitos e glimmeritos, muitos dos quais associados a mineralizações de fosfato, nióbio, barita, terras raras (ETRs) e magnetita. Essas características são similares às encontradas em outras intrusões do Alto Paranaíba, como o Complexo de Araxá (CBMM) e o Complexo de Tapira.

Além disso, relatórios da CPRM (1984) descrevem a morfologia dômica da intrusão, associada a uma estrutura radial e anelar que influencia diretamente a disposição dos corpos mineralizados.

Os documentos indicam presença de anomalias geofísicas (gravimétricas e magnéticas), que sugerem a existência de corpos profundos com mineralizações concentradas.

Embora ainda pouco explorado comercialmente em comparação com complexos vizinhos, como Araxá (CBMM) e Tapira (Mosaic Fertilizantes), o Domo Serra Negra já atrai o interesse de diversas empresas do setor mineral. Dentre as mais relevantes está a Mosaic Fertilizantes que possui áreas em exploração e pesquisa no entorno da intrusão, voltadas à extração de fosfato.

A Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), ainda que não atue diretamente em Patrocínio, utiliza o modelo geológico da região como referência comparativa em sua pesquisa sobre depósitos de nióbio e terras raras.

Empresas de menor porte, registraram em momentos distintos requerimentos de pesquisa mineral na ANM para carbonatitos e outros minerais industriais na região (dados da ANM, 2022–2024).

Contudo, o Domo Serra Negra, por suas características petrológicas e geoquímicas, representa uma área estratégica para o setor mineral. Apesar do menor grau de exploração atual, comparado a outros complexos do Alto Paranaíba, sua geologia oferece alto potencial para depósitos de fosfato, barita, magnetita e ETR's.

O mapeamento geológico detalhado da porção oeste do domo, com integração de métodos tradicionais e digitais, torna-se uma etapa essencial para subsidiar ações futuras de exploração e atração de investimentos minerários para a região.

4.2 Mapeamento Geológico

O mapeamento geológico foi desenvolvido com base em atividades de campo voltadas à caracterização geológica da porção oeste do Domo Serra Negra, com foco na identificação litológica, estrutural e na análise do potencial mineral da área. A etapa de campo foi conduzida ao longo de três dias consecutivos, previamente planejados para cobrir os principais afloramentos e feições de interesse geológico.

Os dados bibliográficos sobre a região, incluindo publicações, trabalhos anteriores e mapeamentos geológicos, foram analisados com o objetivo de compreender as formações geológicas e a distribuição dos depósitos minerais na área de estudo. Com base nessas informações, foi realizado um reconhecimento geológico preliminar utilizando mapas topográficos, imagens de satélite e dados bibliográficos existentes, permitindo identificar traços litoestruturais, como contatos litológicos, falhas, lineamentos e outras feições relevantes.

Essa etapa forneceu subsídios para o planejamento das campanhas de campo, que incluíram mapeamento geológico detalhado, coleta sistemática de amostras e registro de dados estruturais. As análises químicas laboratoriais das amostras permitiram avaliar a composição mineral e o potencial econômico da região. A integração das informações bibliográficas, das observações de campo e dos resultados laboratoriais possibilitou a construção de um panorama abrangente da geologia local, auxiliando na identificação de áreas com maior potencial para exploração mineral.

Realizou-se caminhamentos perpendiculares e paralelos em campo para determinar os tipos litológicos ocorrentes na região e as relações estruturais dos mesmos, através de reconhecimento ao longo de estradas, caminhos, drenagens e afloramentos. Os dados coletados foram lançados em uma base topográfica juntamente com os dados publicados levantados para compilação do mapa geológico. Foram definidos os alvos minerais para posterior detalhamento.

A área apresenta contextos geológicos pertencentes aos quartzitos e filitos da formação Chapada dos Pilões do grupo Canastra e em menor presença os siltitos do grupo Bambuí, além das coberturas detríticas indiferenciadas (Q1di) e coberturas eluvionares detrítico lateríticas (Ndl), como citado anteriormente no contexto geológico.

Durante os trabalhos, observou-se que grande parte da área de estudo é dominada por propriedades privadas, predominantemente rurais, com intensa atividade agrícola, principalmente cultivo de café, milho e soja.

Essa realidade impôs restrições logísticas importantes ao mapeamento, dificultando o acesso a determinados setores. Em locais acessíveis, foram realizadas descrições litológicas, registro fotográfico, coleta de amostras e anotações estruturais.

O mapeamento constitui uma importante base para a compreensão geológica local e serve como subsídio preliminar para estudos de favorabilidade à exploração mineral no Domo Serra Negra.

4.3 Dados Aerogeofísicos

Foram elaborados mapas aeromagnetométricos, como a Amplitude do Sinal Analítico (ASA), utilizada para identificar a geometria dos corpos, e a Inclinação do Sinal Analítico (ISA), que auxilia na delimitação de lineamentos estruturais.

Esses mapas foram gerados a partir do Campo Magnético Anômalo (CMA) e posteriormente reduzidos ao polo, com o objetivo de eliminar os efeitos dipolares causados pela elevada intensidade do campo magnético das rochas.

Para criar o CMA foi-se utilizado os dados brutos disponíveis no banco de dados da CODEMIG. A partir deste mapa são extraídas as derivadas horizontais e vertical permitindo identificar feições importantes das anomalias magnéticas.

O mapa ASA é gerados pela seguinte equação:

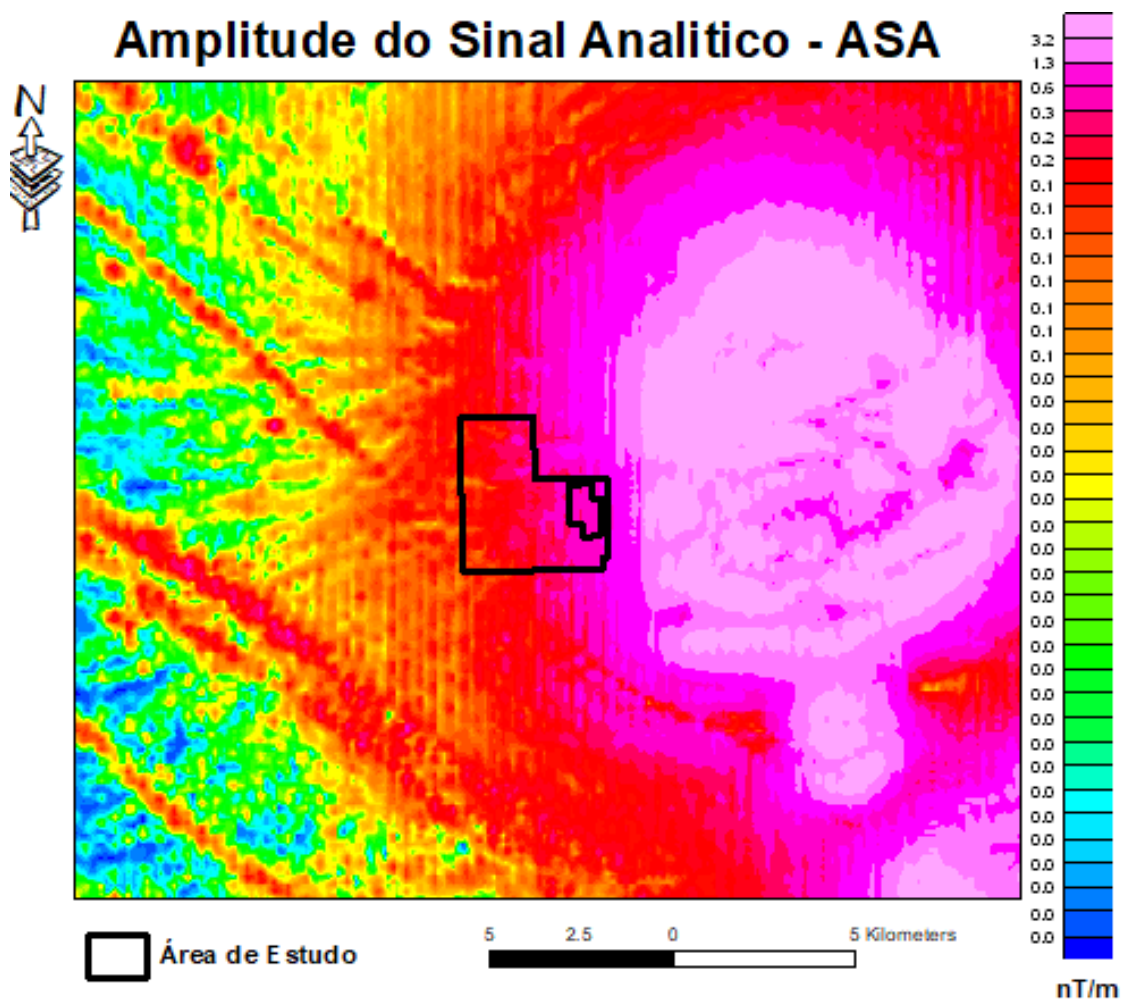
$$ASA = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial z}\right)^2\right]}$$

Onde: $\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2$ = derivada horizontal em x (Leste-Oeste)

$\left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2$ = derivada horizontal em y (Norte-Sul)

$\left(\frac{\partial G}{\partial z}\right)^2$ = deriva em vertical z (profundidade)

Figura 3: Mapa da Amplitude do Sinal Analítico no Domo Serra Negra.



Fonte: A autora.

A ASA permite a realçar corpos com intensidade do campo magnético total, facilitando a identificação de anomalias e destacando regiões de alta e baixa magnetização. O ASA é comumente utilizado para delimitar os contornos dos corpos magnéticos e inferir suas dimensões e/ou geometrias aproximadas.

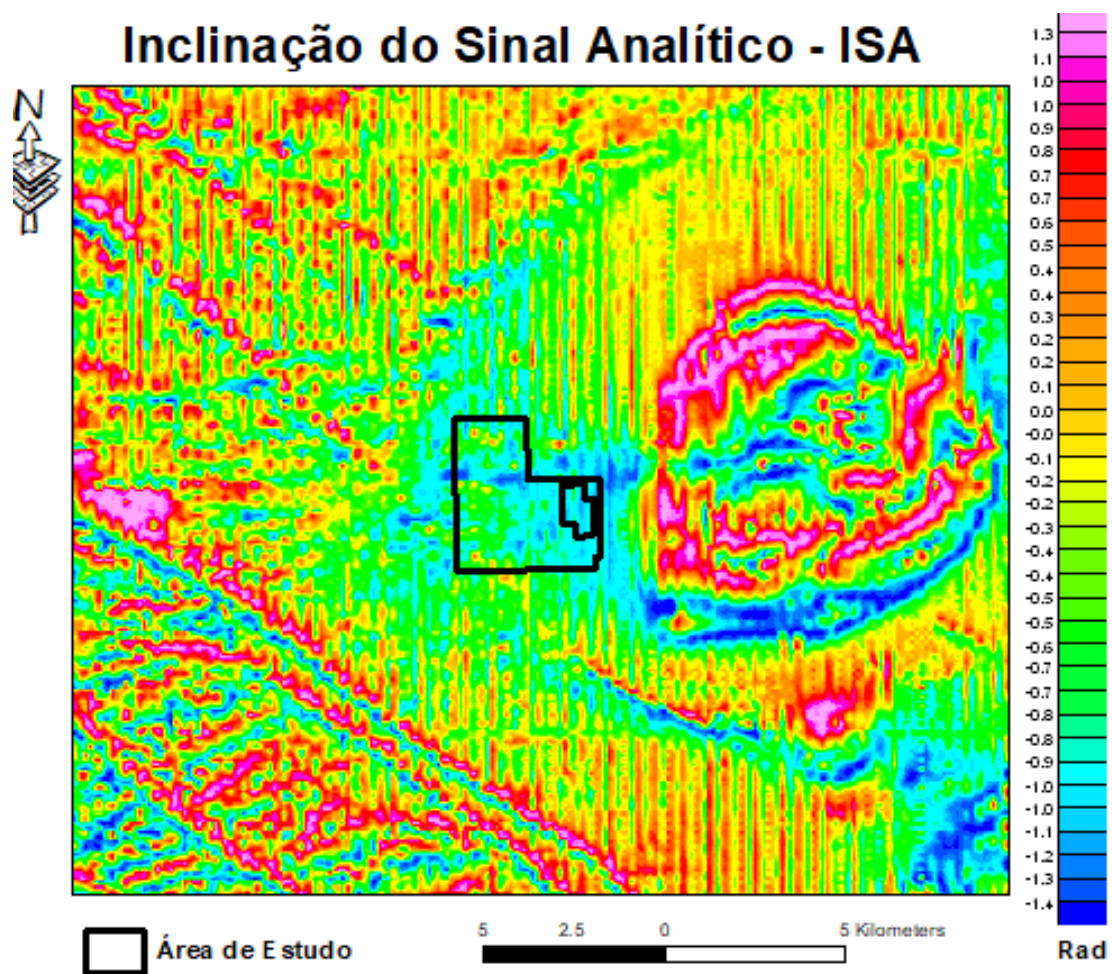
Para a obtenção do ISA foi-se utilizado a seguinte equação:

$$ISA = \tan^{-1} \frac{\frac{\partial G}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2}} = \frac{Dz}{AGHT}$$

Onde Dz é a derivada na componente vertical

AGHT = Amplitude do Gradiente Horizontal Total, e/ou raiz quadrada da derivada Norte-Sul + Leste-Oeste ao quadrado.

Figura 4: Mapa de Inclinação do Sinal Analítico no Domo Serra Negra.



Fonte: A autora.

O Mapa de Inclinação do Sinal Analítico (ISA) realça as inclinações das anomalias magnéticas, permitindo compreender os ângulos de mergulhos estruturais a partir das geometrias dos corpos magnéticos.

Este mapa auxilia identificar os lineamentos de fontes profundas e superficiais, contribuindo para uma interpretação mais precisa das estruturas e orientação dos corpos geológicos da área em pesquisa.

4.4 Coleta de Amostras para Laboratório

As amostras coletadas foram encaminhadas ao Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

Figura 5: Amostras coletadas no mapeamento geológico para serem enviadas ao Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).



Fonte: A autora

Dos 29 pontos realizados, apenas amostras de 8 pontos foram selecionadas para análise química, considerando critérios como representatividade geológica, estado de conservação e interesse geoquímico.

O preparo laboratorial incluiu secagem, britagem, pulverização e prensagem das amostras, conforme protocolos técnicos padronizados. A análise química foi realizada por espectrometria de fluorescência de raio X em amostra prensada, utilizando o equipamento Malvern Panalytical, modelo Zetium.

O método utilizado foi baseado na calibração STD-1 (Standardless), permitindo a determinação dos teores dos elementos químicos compreendidos entre o flúor (F) e o urânio (U), sem o uso de padrões externos. Os resultados foram normalizados a 100%.

Adicionalmente, foi realizada a Perda ao Fogo, com calcinamento das amostras a 1.020 °C durante 2 horas, visando determinar o teor de voláteis, como água e compostos orgânicos, que não são detectados diretamente por fluorescência de raio X, mas que influenciam no balanço químico total.

5. CONFIGURAÇÃO GEOLÓGICA

5.1 Geologia Regional

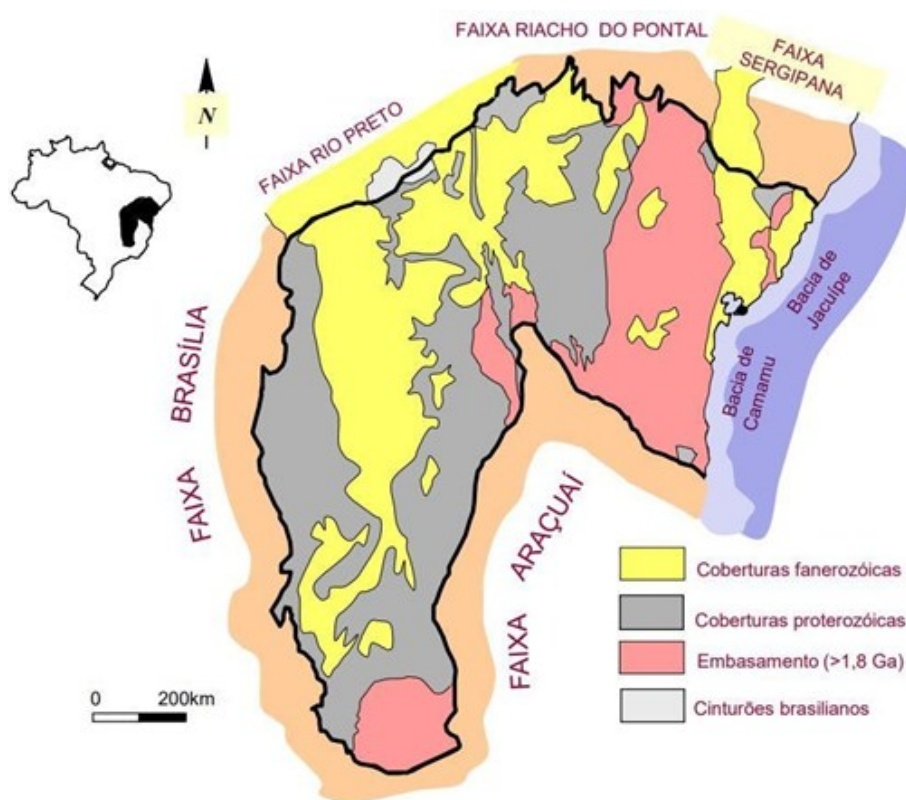
O município de Patrocínio, localizado na porção central do Alto Paranaíba, oeste de Minas Gerais, insere-se em uma das regiões geologicamente mais complexas e economicamente relevantes do estado. O contexto geológico regional é marcado pela presença de rochas do embasamento proterozoico, coberturas sedimentares fanerozoicas e importantes intrusões ígneas alcalinas, associadas a atividades magmáticas do Cretáceo Inferior.

O arcabouço geológico da região onde está inserida a área de estudo é formado por unidades que fazem parte de três compartimentos geotectônicos - a Província Tocantins, a Bacia do Paraná e a Bacia San-Franciscana -, sendo predominante as unidades que fazem parte da Faixa Brasília, na Província Tocantins.

5.1.1 Cráton do São Francisco

Na área o Craton do São Francisco abrange os limites do craton definidos por (Almeida 1977, 1981, Brito Neves & Alkmim, 1993, Alkmim et al., 1993, Alkmim & Martins Neto, 2001) compreendendo, conceitualmente, o cinturão epidérmico de antepaís da Faixa Brasília, envolvendo as unidades proterozoicas de cobertura (Alkmim et al., 1996), e a região indeformada das coberturas (Alkmim et al. 1993, Reis & Alkmim, 2015). Neste trabalho, o domínio geotectônico engloba apenas as regiões de ocorrência das litologias do Grupo Bambuí.

Figura 6: Mapa geológico simplificado do Cráton do São Francisco.



Fonte: Pinho et al., modificado de Alkmim et al. 1993, extraído de Alkmim, 2004.

5.1.2 Faixa Brasília

A Faixa Brasília, foi formada durante o Neoproterozóico pela Orogênese Brasiliana, que comprimiu entre três crátons - Amazônico, São Francisco e um hipotético, que estaria sob os sedimentos da Bacia do Paraná – as unidades ali depositadas (Fuck, 1994; Dardene, 2000). Limitada pelo Cráton São Francisco, a leste, a Bacia do Paraná a sudoeste, a Faixa Paraguai-Araguai a oeste e o Cráton Amazônico a noroeste, a Faixa de Dobramentos Brasília tem direção geral NW-SE e seus litotipos apresentam aumento no grau metamórfico de leste para oeste, desde incipiente até fácies granulito.

Esta variação na intensidade do metamorfismo permitiu que fosse formulada a compartimentação da Faixa em zonas metamórficas. Costa & Angeiras (1971), Dadenne (1978) e Fuck (1994) sugerem a divisão da faixa em três seguimentos principais, de acordo com o grau de metamorfismo, e criam as zonas Cratônica, Externa e Interna, de leste para oeste.

No entanto, a existência de uma megainflexão na altura do paralelo 16°S, identificada por Costa et al. (1970) permite também a subdivisão da Faixa nos segmentos Norte e Sul (Araújo Filho, 1980; Schobbenhaus et al., 1984; Araújo Filho 2000; Strieder, 1993; Fonseca, 1996 e Fonseca & Dardenne, 1996).

Esta proposta se justifica pela diferença na evolução tectônica a norte e a sul desta estrutura denominada Sintaxe ou Megainflexão dos Pirineus, na região de Pirenópolis e Corumbá, no estado de Goiás. Excluem-se desta segmentação o Arco magmático de Goiás e o Grupo Bambuí, que mantêm as mesmas características em toda a extensão da Faixa.

5.1.3 Grupo Canastra

Ocupando a porção externa da Faixa Brasília, o Grupo Canastra estende-se para o sul, desde as imediações de Brasília até a Serra da Canastra, a oeste de Bambuí. Ao longo dos vários trabalhos sobre o Grupo Canastra, evidenciou-se a estreita relação com o Grupo Araxá.

Os primeiros estudos sobre o Grupo Canastra foram elaborados por Barbosa (1955, 1963), Almeida (1967) e Barbosa et al. (1969, 1970). De acordo com os trabalhos pioneiros, a unidade litoestratigráfica Canastra foi definida sucessivamente como formação, série e grupo, onde os termos pelíticos e quartzíticos predominantes mostram indícios de relação com o Grupo Araxá.

Os diversos trabalhos sobre as relações entre o Grupo Canastra e o Grupo Araxá foram sintetizados por Fuck et al. (1993, 1994) e Fuck (1994), que definiram, na porção sul da Faixa de Dobramentos Brasília, três compartimentos tectônicos, imbricados de oeste para leste: Nappe Araxá-Canastra, caracterizada por uma sequência metasedimentar com metamorfismo inverso, passando de fácies xisto verde na base para fácies anfibolito no topo; Sequência metasedimentar do Carmo do Rio Claro associada com escamas granito-gnaissicas do embasamento.

A sequência metasedimentar é constituída predominantemente por metassedimentos psamíticos afetados por metamorfismo baixo, zona da clorita; e o Grupo Bambuí constituído por metapelitos repousando sobre o embasamento arqueano constituído por rochas granito-gnaissicas e rochas associadas à greenstone belts.

Freitas-Silva & Dardenne (1994) apresentaram uma coluna estratigráfica, levantada no oeste mineiro e leste de Goiás, para o Grupo Canastra com sugestões de nomes. Neste Grupo foram identificadas quatro unidades: 1. Duas unidades inferiores, onde predominavam filitos: Formação Morro do Ouro e Formação Serra da Anta, agrupadas no Subgrupo Paracatu.

A Formação Morro do Ouro reunia quartzo-sericita filitos carbonosos com intercalações subordinadas de quartzo-sericita-clorita filitos e quartzitos. A Formação Serra da Anta continha quartzo-sericita-clorita filitos com intercalações de filitos carbonosos, quartzitos e metassiltitos; E duas unidades superiores: Formação Serra da Urucânia e Formação Serra da Batalha, agrupadas no Subgrupo Chapada dos Pilões.

A Formação Serra da Urucânia era composta por quartzo-sericita-clorita filitos intercalados com quartzitos e metassiltitos. A Formação Serra da Batalha era constituída predominantemente por ortoquartzitos com intercalações de filitos.

Freitas-Silva & Dardenne (1996) dividem o Grupo Canastra nas formações Serra do Landim, Paracatu (membros Morro do Ouro e Serra da Anta) e Chapada dos Pilões (membros Serra da Urucânia e Hidrelétrica da Batalha), mas sem definição do empilhamento estratigráfico.

Dados Rb-Sr, K-Ar e Pb-Pb indicaram que os xistos carbonosos da Formação Paracatu possuem idade em torno de 1.000Ma a 1.300Ma. Rodrigues (2008) sugere uma coluna estratigráfica para o Grupo Canastra aplicável à porção noroeste de Minas Gerais, baseada em Freitas-Silva & Dardenne (1994, 1996).

Da base para o topo em: Formação Serra do Landim, composta por margas e lentes de calcário, gradando para níveis de calciofilitos/calciostos; Formação Paracatu, dividida da base para o topo em: a. Membro Morro do Ouro, incluindo filitos carbonosos com intercalações de quartzitos; b. Membro Serra da Anta composto por sericita filitos, com intercalações de filito carbonoso e quartzitos;

Formação Chapada dos Pilões, dividida em: a. Membro Serra da Urucânia, inferior, representado por metarritmitos arenosos com níveis de quartzito; b. Membro Hidrelétrica da Batalha, predominantemente quartzítico com finos níveis de filitos. Dias (2011) faz uma correlação dos diversos trabalhos existentes.

5.1.4 Formação Chapada dos Pilões - Membro Hidrelétrica da Batalha

Em Dardenne (2000) e Rodrigues (2008), a Formação Serra da Batalha passou a ser denominada Formação Hidrelétrica da Batalha e considerada com membro da Formação Chapada dos Pilões. A distribuição da unidade aflora desde Patrocínio, passando por Coromandel e pelos chapadões do Pau Terra e dos Pilões, indo até a localidade de Cruzeiro do Desbarrancado, onde sofre uma inflexão para sudoeste até Martírio.

De acordo com o autor citado anteriormente, ocorre também nos chapadões dos Araújos e da Laje, na serra Negra, na serra do Triunfo, na serra da Fazendinha e no morro da Mesa (um testemunho estrutural sobre as rochas da Formação Serra da Saudade, Grupo Bambuí), na localidade de Jambreiro e nos arredores do rio da Batalha. Ótima exposição, sob a forma de lajedos, é observada em sua área tipo, no Rio Batalha, no local da antiga hidrelétrica.

A unidade exibe relevo acidentado representado por serras com topos aplainados sob a forma de chapadões ou planaltos, onde é comum o aparecimento de um nível de peneplanização com a formação de superfícies lateríticas. Essas serras são limitadas em todo o seu contorno por escarpas abruptas e íngremes, contrastando com o relevo suave e uniforme das rochas pelíticas dos grupos Bambuí, Vazante e Ibiá.

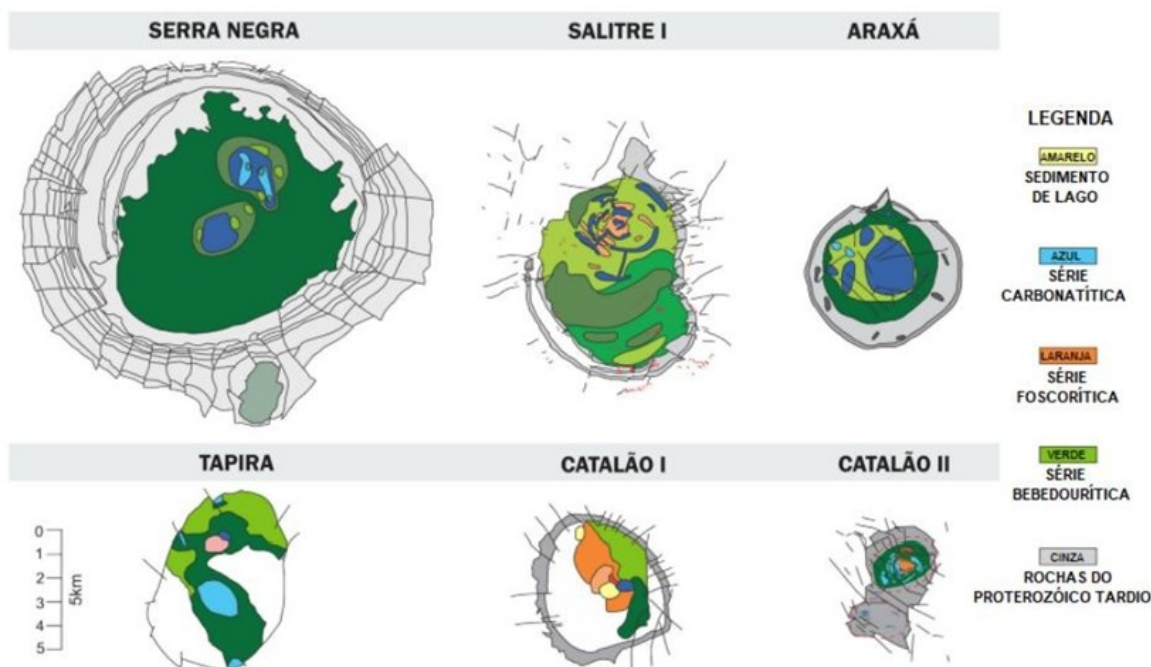
5.1.5 Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP)

Segundo Gibson et al. (2000), a Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP) constitui-se como resultado de intenso magmatismo alcalino ocorrido nas bordas nordeste e sudeste da Bacia Sedimentar do Paraná. Tal província engloba diferentes tipos de magmas alcalinos, incluindo kimberlitos, olivina lamproítos madupíticos e kamafugitos, além de intrusões de complexos alcalino-carbonatíticos distribuídos ao longo do arco homônimo.

Sob o ponto de vista tectônico, a PIAP apresenta-se associada aos lineamentos estruturais do cinturão de dobramentos correlato às bordas do Cráton do São Francisco e da Bacia Sedimentar do Paraná (MORBIDELLI et al., 1997). Sua área de ocorrência estende-se do sudeste de Goiás, onde se destacam as intrusões de Catalão I e II, até o oeste de Minas Gerais, representado pelos complexos de Serra Negra, Salitre I, II e III, Araxá e Tapira. Esta província é considerada uma das maiores concentrações

ultrapotássicas em escala global, caracterizada pelo expressivo volume de rochas alcalinas máficas e ultramáficas. As figuras subsequentes apresentam a localização e a geometria das intrusões alcalinas que constituem os complexos associados à PIAP.

Figura 7: Complexos alcalinos da PIAP.

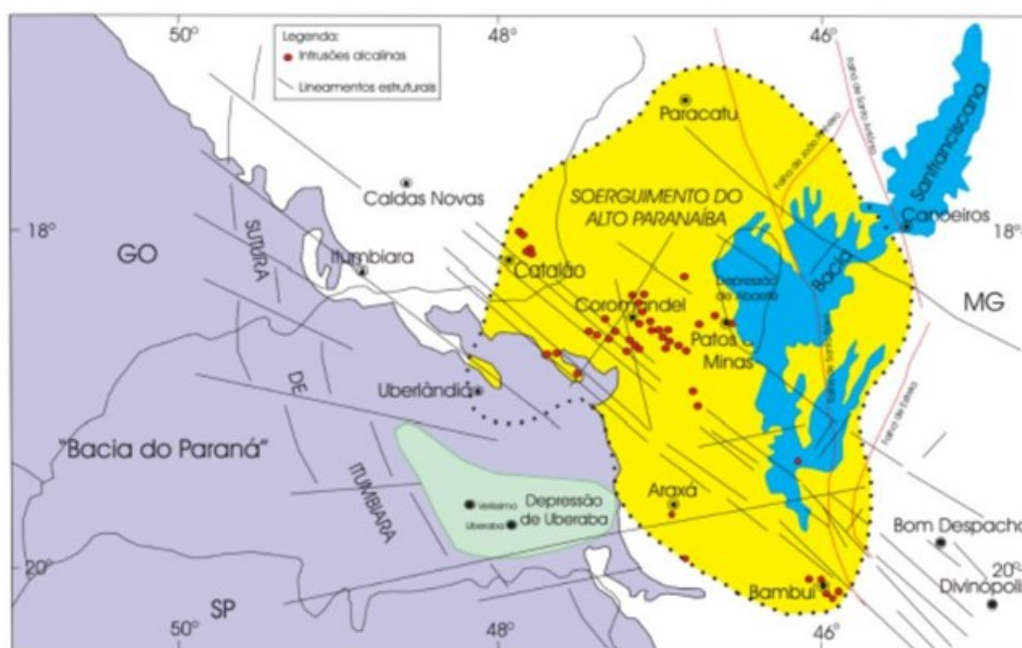


Fonte: Novaes, 2018.

Regionalmente, de acordo com Barbosa et al. (2010), as rochas mais antigas da região do Alto Paranaíba são constituídas por granodioritos, granitos e gnaisses, as quais datam o período Pré-cambriano. Sobre essas rochas, foram depositados sedimentos que posteriormente transformaram-se em rochas, os quais atualmente pertencem ao Grupo Araxá, Grupo Canastra, Formação Ibiá e Grupo Bambuí. No final do Cretáceo, ocorreu um intenso magmatismo básico-alcalino, representado pelos complexos de Tapira, Salitre, Araxá e Serra Negra em Minas Gerais, bem como Catalão I e II em Goiás (Figura 5).

Sobre as rochas do Cretáceo, ocorreram as formações de solos lateríticos, os quais apresentam uma canga composta por quartzo e magnetita, cimentados por limonita. Sobre essa canga foi formado um solo marrom, cobertura característica de Serra Negra.

Figura 8: Distribuição da Província Ígnea Alto paranaíba.



Fonte: Oliveira, 2004.

5.1.6 Coberturas detrítico – laterítica

Apresentam-se na forma de grandes coberturas de canga ferruginosa com até três metros de espessura, cor marrom avermelhada, aspecto brechoide, constituída, em geral, de fragmentos da rocha subjacente cimentados por hidróxidos de ferro. Assim, quando ocorrem sobre rochas do Grupo Areado, apresentam fragmentos de arenito do tamanho de bloco a seixo, geralmente arredondados; sobre rochas do Grupo Canastra, fragmentos angulosos a arredondados de quartzito e/ou filito; sobre rochas do Grupo Araxá, blocos de micaxisto e fragmentos angulosos a arredondados de quartzito fino de cor esbranquiçada e, sobre as rochas vulcânicas do Grupo Mata da Corda, fragmentos arredondados de material ferruginoso. Nos mapas geofísicos mostram-se fortemente magnéticas e apresentam teor muito baixo de potássio. São muito utilizadas no encascalhamento de estradas (CODEMIG; CPRM, 2015).

5.1.7 Coberturas detríticas indiferenciadas

Nesta unidade compreende as coberturas detríticas indiferenciadas e inconsolidadas, expostas em altimetria entre 700 metros a 950 metros. Esta cobertura é composta de material areno-argiloso geralmente esbranquiçado, constituído de grãos angulosos de quartzocimentados por silte e argila. Localmente apresenta, em alguns locais, níveis de cascalho de pequena espessura. Foram incluídos nesta unidade

os sedimentos transportados que recobrem as diversas unidades litológicas. São sedimentos argilosos, espessos, que, com a devida correção de acidez e adubação, tornam-se férteis e próprios para agricultura (CPRM, 2017).

5.1.8 Suíte Intrusiva Serra Negra

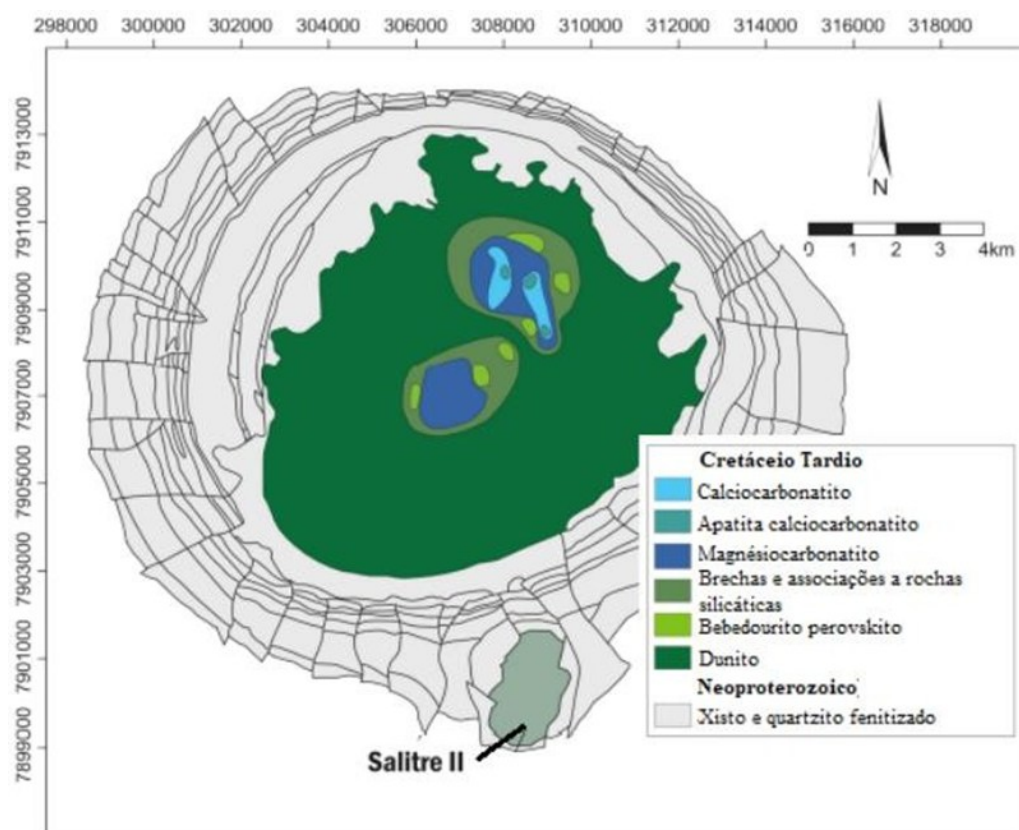
Conforme Grasso (2010) o Complexo Alcalino-Carbonatítico de Serra Negra, popularmente chamado de *Chapadão de Ferro*, é um domo circular de aproximadamente 10 km², localizado ao norte das intrusões Salitre I, II e III, na região de Patrocínio – MG. A estrutura está inserida nos quartzitos do Grupo Canastra e apresenta, em seu topo, uma espessa crosta de canga ferruginosa, que cobre grande parte da área nivelada e é utilizada para cultivo de café.

De acordo com a mesma autora citada anteriormente, o núcleo central do complexo consiste em calciocarbonatitos de cerca de 4,5 km de diâmetro, com elevado teor de apatita (superior a 20%) e pequenas quantidades de dolomita, além de minerais acessórios como flogopita, magnetita, humita, rutilo, pirocloro, pirrotita e pirita. Estudos geocronológicos indicam que a idade dessas rochas varia em torno de 83 milhões de anos, confirmando sua formação no Cretáceo Superior.

Rochas foscoríticas e bebedouríticas circundam o núcleo carbonatítico. Os foscoritos, ricos em apatita (mais de 25%), apresentam tonalidades verde a castanho claro e, ocasionalmente, texturas raras orbiculares ou esferulíticas. A série bebedourítica é acamadada e apresenta variações modais, com zonas enriquecidas em apatita ou magnetita + perovskita, que podem ocorrer tanto como estratos concordantes quanto como diques discordantes (GRASSO, 2010).

O complexo se formou por cristalização fracionada de magmas sovito-foscoríticos, com diferenciação controlada pela imiscibilidade de líquidos, resultando na associação de rochas ricas em apatita, magnetita e olivina, com minerais subordinados como mica, piroxênio e carbonatos. Não foram identificados efeitos de fenitização ou metassomatismo alcalino na rocha encaixante regional. A combinação de características mineralógicas, texturais e estruturais torna o Complexo de Serra Negra de grande interesse não apenas do ponto de vista acadêmico, mas também econômico, especialmente devido ao potencial de exploração de apatita e outros minerais associados (GRASSO, 2010).

Figura 9: Intrusão Alcalina carbonatítica Serra Negra.

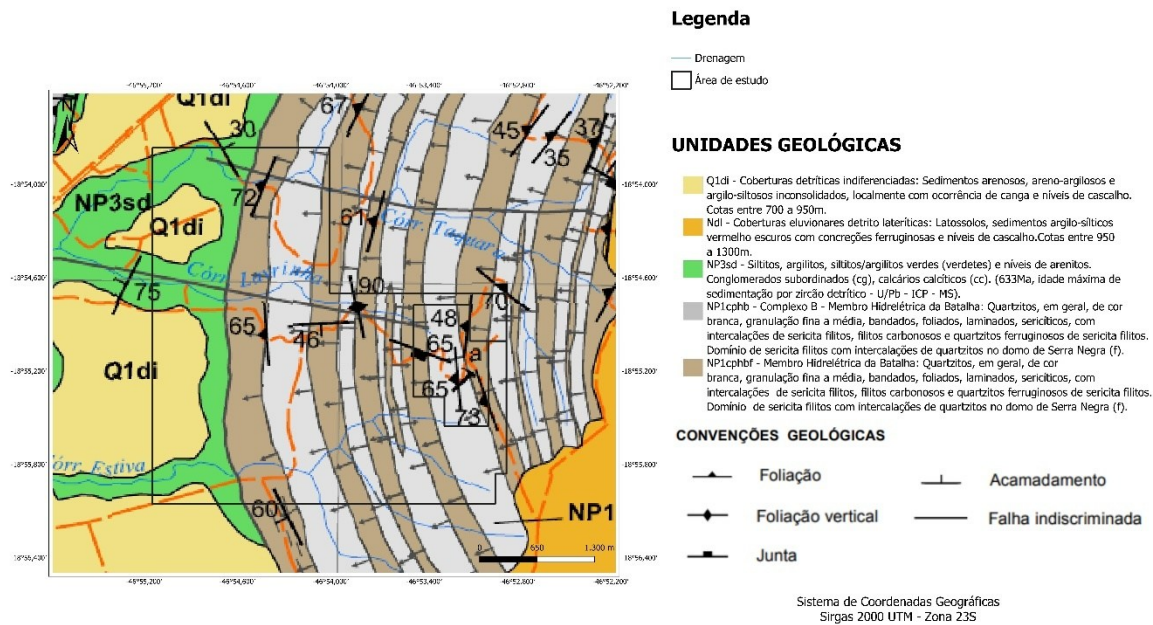


Fonte: Grasso, 2010.

5.2 Geologia Local

A área mapeada insere-se no domínio do Grupo Canastra, unidade estratigráfica pertencente ao Supergrupo Espinhaço-São Francisco, que aflora amplamente na porção sul do Cráton São Francisco.

Figura 10: Mapa Geológico local resultante do mapeamento realizado.



Fonte: CPRM.

No contexto local, a geologia é representada predominantemente pela Formação Chapada dos Pilões, mais especificamente pelo Membro Hidrelétrica da Batalha, o qual ocorre em afloramentos bem desenvolvidos na região oeste do Domo Serra Negra, como a amostragem P8 realizada no afloramento representado na Figura 11.

Figura 11: Afloramento de quartzito bem desenvolvido pertencente a Formação Chapada dos Pilões (amostragem P8).



Fonte: A autora.

Geomorfologicamente, a drenagem é de padrão dendrítico retangular, essencialmente controlada pela estruturação das serras, dando formas bastante entrecortadas com escarpas abruptas, devido aos fraturamentos. O solo é arenoso, de granulometria fina e de cor clara. A vegetação é principalmente do tipo campo limpo, ocorrendo localmente os cerrados e as matas galerias nas nascentes e cursos dos rios.

Figura 12: Aspectos geomorfológicos por satélite.



Fonte: Google Earth.

O Grupo Canastra é composto principalmente por metassedimentos siliciclásticos e pelíticos submetidos a metamorfismo de baixo a médio grau, com estruturas deformacionais bem desenvolvidas (Figura 13).

Figura 13: Afloramento de metassedimento siliciclástico apresentando estrutura deformacional bem desenvolvida.



Fonte: A autora

A Formação Chapada dos Pilões representa a unidade basal do grupo, composta principalmente por quartzitos, metaconglomerados, filitos e xistos. Na área de estudo, o mapeamento revelou uma predominância marcante de quartzitos apresentando-se frescos a semi-intemperizados, friáveis, com cores esbranquiçada, cinza claro a esbranquiçada, rósea e amarelada, granulação fina a média, sericíticos, bandados, foliados, laminados, fraturados, com finas intercalações de filitos.

Os quartzitos apresentam textura granoblástica, constituídos quase que inteiramente de quartzo e opacos, e feldspatos. Como acessórios ocorrem hematita, rutilo, turmalina e zircão, sendo realizada a amostragem P14 MIN no afloramento representado na figura 14. Os opacos, hematita, exibem formas fibrosas. Estes quartzitos, quando cisalhados, contêm cristais deformados de quartzo orientados em uma direção preferencial, com deformação intracristalina como extinção ondulante e subgranulação, como mostra nas figuras abaixo.

Figura 14: Afloramento de quartzito rósea apresentando vênulo de hematita cortando a matriz quartzo-feldspática (amostragem P14 MIN).



Fonte: A autora.

Figura 15: Afloramento em planta de quartzito friável e de coloração esbranquiçada com intercalações de ardósia preferencial a estrutura (amostragem P3 FE).



Fonte: A autora.

Localmente, os quartzitos são de granulação mais grossa com aspecto microconglomerático, bastante silicificados, maciços ou foliados (Figura 13). Quando preservados da deformação, mostram grãos de quartzo subarredondados a arredondados numa matriz impura, branca e muito fina, amostragem P14 MIN no afloramento da figura 17. Os quartzitos ferruginosos ocorrem como intercalações lenticulares centimétricas nos filitos sericíticos, associados com filito carbonoso. São de granulação fina, com cores avermelhada, marrom avermelhado, amarelado e cinza a cinza-escuro, sendo a amostragem P3 I coletada no afloramento da Figura 18.

Figura 16: Afloramento de quartzito silicificado, maciço, fraturado e com foliação desenvolvida, evidenciando episódio de deformação.



Fonte: A autora.

Figura 17: Afloramento de quartzito composto por grãos de quartzo de granulometria variando de subarredondada a arredondada, embutidos em matriz muito fina de coloração esbranquiçada, com textura bem desenvolvida (amostragem P14 MIN).



Fonte: A autora.

Figura 18: Afloramento de quartzitos ferruginosos, com coloração variando entre avermelhada, amarela e acinzentada, localmente magnéticos, indicando presença de minerais ferruginosos finamente disseminados na matriz (amostragem P3 I).



Fonte: A autora.

O Membro Hidrelétrica da Batalha, unidade inferior da Formação Chapada dos Pilões é composto por quartzitos com intercalações subordinadas de filitos, filitos carbonosos e quartzitos ferruginosos (Figura 19). Em alguns pontos do mapeamento, observou-se a presença de sulfetos disseminados, principalmente pirita, indicativos de processos de alteração hidrotermal ou diagenética prévia ao metamorfismo, o resultado da amostragem P31 coletada apresentou teores consideráveis de sílica, alumínio, ferro, titânio e elemento terras raras.

Figura 19: Filito cinzento com foliação milimétrica bem desenvolvida, característica de baixo grau metamórfico (amostragem P31).



Fonte: A autora.

A geologia local revela um arcabouço favorável tanto à exploração de areia silicosa, devido à abundância de quartzitos puros, quanto ao reconhecimento de possíveis zonas de alteração hidrotermal em filitos portadores de sulfetos. A presença do Membro Hidrelétrica da Batalha enriquece a interpretação estratigráfica da região, contribuindo para o entendimento da evolução geológica do Grupo Canastra e seu potencial econômico.

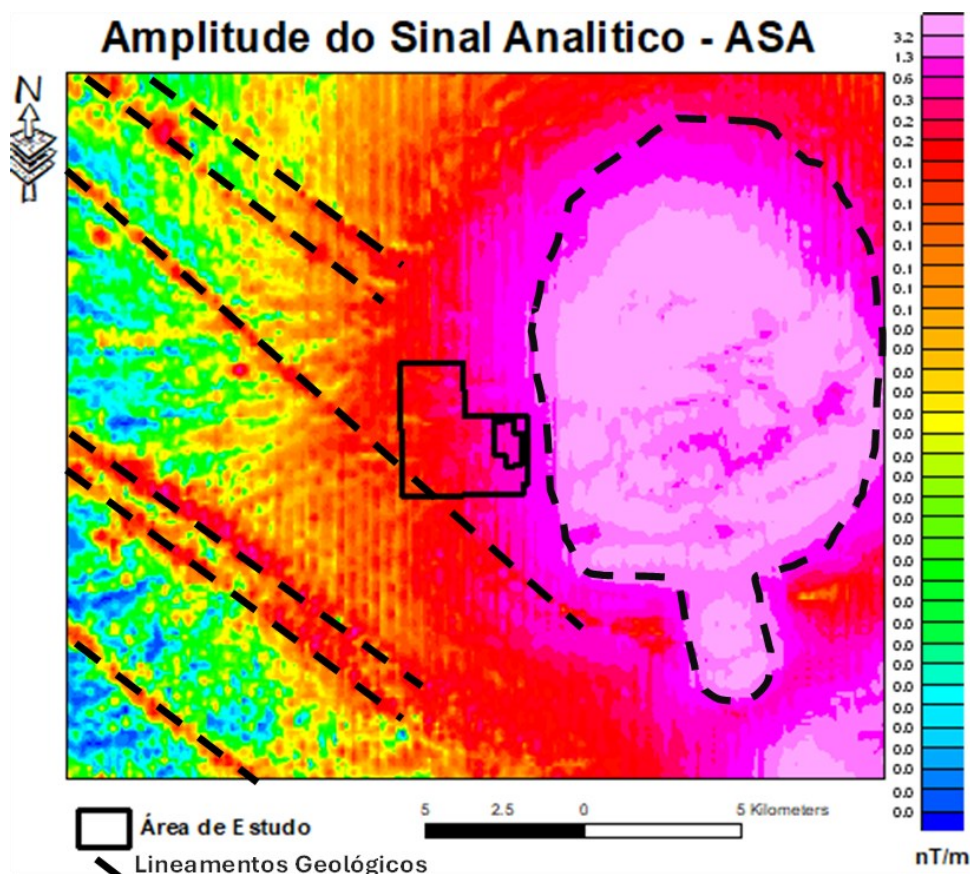
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Levantamento Aeromagnético

A análise dos dados aeromagnéticos processados indica que a porção oeste da área de estudo apresenta valores magnéticos elevados, evidenciando uma intensa anomalia nessa região. Essa característica está associada à proximidade da cratera do Domo Serra Negra, sugerindo influência de suas estruturas geológicas sobre a distribuição do campo magnético local.

A intensidade observada pode refletir a presença de corpos rochosos de maior susceptibilidade magnética, fornecendo informações importantes para a interpretação da geometria estrutural e para a identificação de áreas com potencial mineral na região.

Figura 20: Mapa de Amplitude do Sinal Analítico contendo os principais lineamentos estruturais.



Fonte: A autora

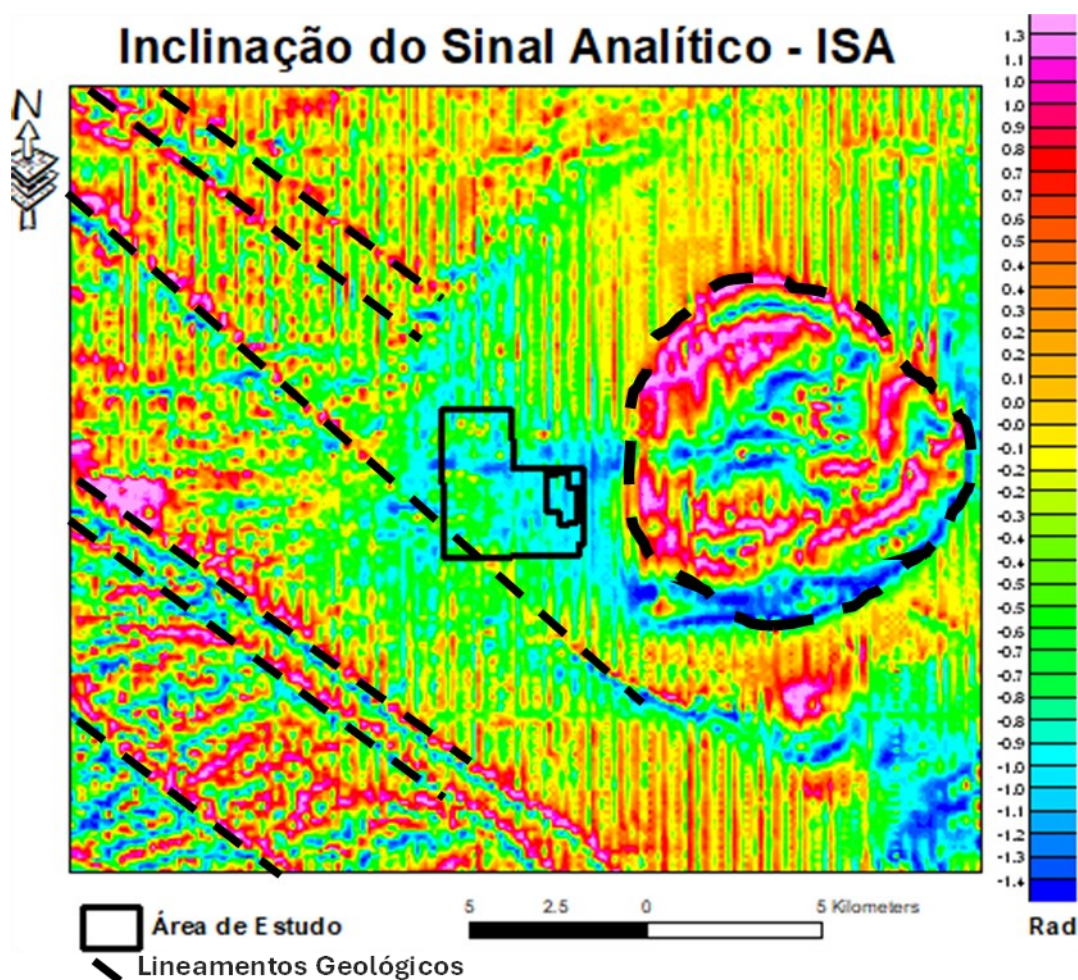
A Figura 20 evidencia o mapa ASA contendo os principais lineamentos estruturais presentes na área de pesquisa. De um modo geral, as estruturas possuem uma direção preferencial para NW.

Percebe-se na ASA que a maior amplitude magnética se encontra na porção Leste da área de estudo, o Domo possui geometria circular com valores da ordem dos 3nT/m, sugerindo altas concentrações magnéticas nesta zona.

Em campo, é possível encontrar rochas com concentrações magnéticas a partir da porção central da área indo em direção a borda da cratera (porção Leste), geologicamente esta porção é caracterizada por Quartzitos, Filitos e Ardósias.

A partir da ISA observa-se que os lineamentos geológicos se confirmam para NW e o Domo de Patrocínio se apresenta em forma de estrutura circular, cujos valores variam de -1.3 até 1.3 Rad.

Figura 21: Mapa de Inclinação do Sinal Analítico contendo os principais lineamentos estruturais.



Fonte: A autora.

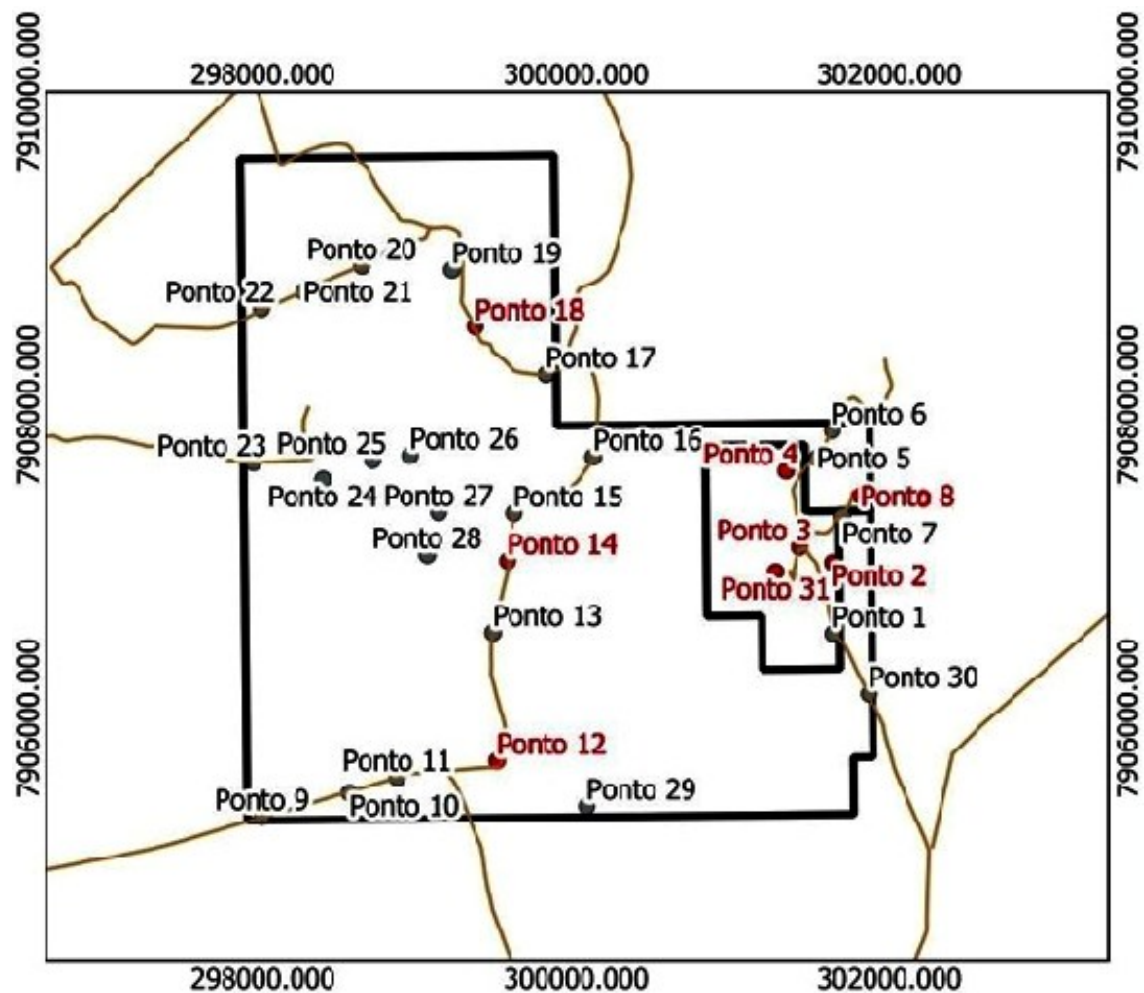
Ressalta-se que os lineamentos ISA refletem o “mergulho” da estrutura e/ou camada geológica, com isso é possível observar através destes mapas, que na área de pesquisa, há um baixo ângulo de mergulho predominante com alguns lineamentos E-W, sendo estes vistos em campo com ocorrências de metálicos associados.

6.2 Análises químicas

Para as análises químicas foram consideradas 12 amostras de rochas com coleta e envio para o laboratório. As amostras foram analisadas pelo Laboratório de Caracterização Tecnológica da Universidade de São Paulo (USP), conforme Figura 22, em preto os pontos amostrados em campo e em vermelho os pontos enviados para análise

química. De modo geral os pontos ficaram mais concentrados no alvo principal na porção leste e na porção intermediária da área de pesquisa.

Figura 22: Pontos realizados no mapeamento, destacado em vermelho os pontos com amostragens enviadas para análise química.



Fonte: A autora.



Laboratório de Caracterização Tecnológica

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo



1. MÉTODO: Os teores apresentados foram dosados em amostra prensada, na calibração STD-1 (Standardless), relativa a análise sem padrões dos elementos químicos compreendidos entre o flúor e o urânio, em espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Malvern Panalytical, modelo Zetium. Os valores foram normalizados a 100%. A Perda ao Fogo (PF) foi realizada a 1.020°C por 2h.

2. RESULTADOS:

N° LCT	1221	1222	1223	1224
Amostra	P12 MIN	P3 TM	P8	P3 FE
Na ₂ O (%)	nd	nd	nd	0,51
MgO (%)	0,04	nd	0,57	0,03
Al ₂ O ₃ (%)	7,87	6,14	15,7	7,41
SiO ₂ (%)	84,8	7,77	74,5	80,9
P ₂ O ₅ (%)	0,28	0,47	0,04	0,13
SO ₃ (%)	0,01	0,07	0,02	0,02
Cl (%)	0,01	nd	0,02	0,01
K ₂ O (%)	3,02	0,06	1,84	1,19
CaO (%)	0,06	0,03	0,07	0,02
Sc ₂ O ₃ (%)	nd	nd	nd	nd
TiO ₂ (%)	0,28	5,55	0,56	0,16
V ₂ O ₅ (%)	nd	0,08	0,02	nd
Cr ₂ O ₃ (%)	0,03	0,20	nd	0,02
MnO (%)	0,06	0,02	0,02	nd
Fe ₂ O ₃ (%)	1,80	72,0	2,96	8,52
NiO (%)	0,01	nd	<0,01	nd
CuO (%)	<0,01	0,03	nd	<0,01
ZnO (%)	<0,01	0,01	nd	nd
As ₂ O ₃ (%)	nd	nd	nd	nd
Rb ₂ O (%)	<0,01	nd	<0,01	nd
SrO (%)	0,02	0,04	<0,01	0,04
Y ₂ O ₃ (%)	<0,01	nd	<0,01	nd
ZrO ₂ (%)	0,05	0,08	0,07	0,06
Nb ₂ O ₅ (%)	<0,01	0,03	nd	nd
BaO (%)	0,05	0,06	nd	nd
La ₂ O ₃ (%)	nd	nd	nd	nd
CeO ₂ (%)	nd	0,04	nd	nd
Nd ₂ O ₃ (%)	nd	nd	nd	nd
PbO (%)	nd	nd	nd	nd
ThO ₂ (%)	nd	nd	nd	nd
PF (%)	1,63	7,37	3,62	1,02



Laboratório de Caracterização Tecnológica

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo



N° LCT	1225	1226	1227	1228
Amostra	P3 SULF	P31	P3 I	P2
Na ₂ O (%)	nd	nd	0,32	nd
MgO (%)	nd	nd	nd	nd
Al ₂ O ₃ (%)	15,0	23,0	11,4	1,51
SiO ₂ (%)	37,3	23,8	75,3	97,0
P ₂ O ₅ (%)	0,91	0,98	0,42	0,05
SO ₃ (%)	0,09	0,05	0,05	0,03
Cl (%)	nd	nd	0,02	0,02
K ₂ O (%)	0,13	0,02	2,44	0,30
CaO (%)	0,04	0,09	0,04	0,04
Sc ₂ O ₃ (%)	nd	nd	nd	nd
TiO ₂ (%)	4,84	13,6	0,22	0,06
V ₂ O ₅ (%)	0,10	nd	<0,01	nd
Cr ₂ O ₃ (%)	0,09	0,07	0,02	nd
MnO (%)	0,02	0,16	nd	nd
Fe ₂ O ₃ (%)	33,0	26,3	7,92	0,41
NiO (%)	nd	0,03	nd	nd
CuO (%)	nd	0,02	nd	nd
ZnO (%)	nd	<0,01	nd	<0,01
As ₂ O ₃ (%)	<0,01	0,01	nd	nd
Rb ₂ O (%)	nd	nd	<0,01	nd
SrO (%)	0,14	0,14	0,10	0,01
Y ₂ O ₃ (%)	<0,01	<0,01	<0,01	nd
ZrO ₂ (%)	0,13	0,22	0,08	<0,01
Nb ₂ O ₅ (%)	0,03	0,07	nd	nd
BaO (%)	0,23	0,27	0,05	nd
La ₂ O ₃ (%)	nd	0,04	nd	nd
CeO ₂ (%)	0,03	0,10	0,07	nd
Nd ₂ O ₃ (%)	nd	nd	nd	nd
PbO (%)	nd	<0,01	nd	nd
ThO ₂ (%)	0,01	0,01	nd	nd
PF (%)	7,92	10,9	1,46	0,54
N° LCT	1229	1230	1231	1232
Amostra	P14 MIN	P4 B	P18	P3 FILITO
Na ₂ O (%)	nd	0,07	0,09	nd
MgO (%)	0,35	nd	1,05	nd
Al ₂ O ₃ (%)	9,83	1,85	12,2	12,3
SiO ₂ (%)	32,8	94,3	73,3	10,9
P ₂ O ₅ (%)	0,21	0,10	0,04	1,41
SO ₃ (%)	0,04	0,04	0,02	0,05
Cl (%)	0,01	0,02	nd	nd
K ₂ O (%)	1,69	0,36	3,58	0,02
CaO (%)	0,03	0,02	0,02	0,11



Laboratório de Caracterização Tecnológica

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

32



N° LCT	1229	1230	1231	1232
Amostra	P14 MIN	P4 B	P18	P3 FILITO
Sc ₂ O ₃ (%)	nd	nd	nd	0,02
TiO ₂ (%)	1,11	0,67	0,54	18,3
V ₂ O ₅ (%)	0,06	nd	nd	nd
Cr ₂ O ₃ (%)	0,12	nd	0,03	0,11
MnO (%)	0,02	nd	0,01	0,04
Fe ₂ O ₃ (%)	47,1	1,67	6,49	44,1
NiO (%)	nd	nd	nd	0,05
CuO (%)	0,03	nd	nd	0,05
ZnO (%)	0,01	nd	nd	0,02
As ₂ O ₃ (%)	nd	nd	nd	<0,01
Rb ₂ O (%)	<0,01	nd	0,02	nd
SrO (%)	0,01	0,04	<0,01	0,21
Y ₂ O ₃ (%)	nd	<0,01	nd	<0,01
ZrO ₂ (%)	0,06	0,46	0,05	0,31
Nb ₂ O ₅ (%)	<0,01	nd	nd	0,11
BaO (%)	nd	nd	0,03	0,21
La ₂ O ₃ (%)	nd	nd	nd	0,10
CeO ₂ (%)	0,05	nd	nd	0,16
Nd ₂ O ₃ (%)	nd	nd	nd	0,11
PbO (%)	nd	nd	nd	0,01
ThO ₂ (%)	nd	nd	nd	0,02
PF (%)	6,45	0,41	2,46	11,2

0,01% - limite de quantificação FRX

nd - não detectado

Executado por: Mavinieur Sabo Yamaguishi - CRQ 04490656-4ªR (24/02/2024 14:34 BRT)

Revisado por: Dra. Gislayne Kelmer - CRQ 04165656-4ªR (26/02/2024 10:09 BRT)

Prof. Dra. Carina Ulsen
Coordenadora do LCT - Poli/USP

NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) amostra(s) enviada(s) ao LCT; a representatividade da(s) mesma(s) é de inteira responsabilidade do cliente.

Verifique a autenticidade deste documento em www.lct.poli.usp.br utilizando o código **MZUA-FLOC-SUPW-GWHB**

Relatório FRX 94-24

De acordo com ANM (2023) o Ferro (Fe_2O_3) são favoráveis a partir de teores $>60\%$ e aproximadamente 42% para Fe metálico. Depósitos de areia que possuem teor de Titânio (TiO_2) de $4\text{--}6\%$ são viáveis e teor acima de 10% é considerado alto teor. Já a Sílica (SiO_2) deve ter teor $>95\%$ para ser considerado quartzo de alta pureza.

O Fosfato (P_2O_5) é viável quando possui $>5\text{--}10\%$. Já o Zircônio (ZrO_2) possui faixa de referência para areias minerais exploradas para zircão de $1\text{--}2\%$ ZrO_2 no minério bruto. O Nióbio (Nb_2O_5) é viável em depósitos carbonatíticos com teor $>0,50$, por fim os Elementos Terras Raras se tornam depósitos viáveis quando se tem teores $>1\%$.

Tabela 1: Teores dos elementos químicos comparados com teores para exploração e classificação de favorabilidade.

Elemento (óxido)	Teor máximo encontrado na amostra	Teor para exploração	Favorabilidade	Referências
Fe_2O_3	72,0% (P3 TM) 47,1% (P14 MIN) e 44,1 (P3 FILITO)	$>60\%$ Fe_2O_3 ($\sim 42\%$ Fe) para minério de alto teor	Acima – muito favorável	ANM, 2023; USGS, 2024
TiO_2	18,3% (P3 FILITO) 5,55% (P3 TM) 4,84% (P3 SULF) e 13,6% (P31)	$4\text{--}6\%$ para areias minerais; $>10\%$ é alto teor	Acima – muito favorável	ANM, 2023; Parker, 2012
SiO_2	94,3% (P4 B) e 97% (P2)	$>95\%$ para quartzo de alta pureza	Aproxima – favorável	ANM, 2023; IMA, 2015
P_2O_5	1,41% (P3 FILITO)	$>5\text{--}10\%$ para lavra de fosfato	Abaixo – apenas indicativo geológico	USGS, 2023; ANM, 2023
ZrO_2	0,46% (P4 B)	$0,1\text{--}2\%$ em areias minerais com zircão	Dentro – potencial secundário	ANM, 2023; Gupta & Krishnamurthy, 2005
Nb_2O_5	0,11% (P3 FILITO)	$>0,50\%$ para lavra de carbonatitos	Abaixo – indicativo de mineralização	ANM, 2023; Woolley, 2016
CeO_2 (ETR's)	0,16% (P3 FILITO)	$>1\%$ TREO para exploração	Abaixo – indicativo geoquímico	USGS, 2023; Mariano, 1989
La_2O_3 (ETR's)	0,10% (P3 FILITO)	$>1\%$ TREO para exploração	Abaixo – indicativo geoquímico	USGS, 2023; Mariano, 1989

Fonte: A autora.

6.3 Favorabilidade para Exploração Mineral

Os resultados analíticos obtidos a partir das amostras coletadas na área de estudo indicam um cenário geológico promissor para a exploração mineral, com destaque para os teores de Ferro, Titânio, Sílica, Fosfatos, Zircônio, Nióbio e Elementos Terras Raras (CeO_2 e La_2O_3).

A amostra P3 (Filito) apresentou um valor máximo de Titânio de $18,3\%$, sendo considerado acima do teor favorável para exploração, enquanto o Nióbio atingiu $0,11\%$ e

os ETRs atingiram concentrações de até 0,16%, o que representa um potencial baixo, sendo apenas um indicativo de mineralização e indicativo geoquímico.

Adicionalmente, observou-se que, dentro da poligonal requerida, os quartzitos ocorrem em maior abundância nas porções centrais e leste da área, especialmente nas proximidades da cratera do Domo Serra Negra. Os pontos onde os quartzitos apresentaram teores de SiO₂ superiores a 90% são considerados áreas potenciais para a produção de areia industrial.

Outro fator relevante é a tendência de aumento nos teores de ferro e ETR's a partir dos 10 metros de profundidade nos quartzitos, o que pode estar diretamente relacionado à influência geológica da estrutura do domo, o qual confere à região características favoráveis à concentração mineral.

Com base nos resultados das análises química, é notório que a área de pesquisa apresenta um grande potencial na exploração mineral em diversas substâncias, sendo o quartzito a que mais se sobrepõe as demais litologias.

7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento geológico da região adjacente ao Domo Serra Negra, realizado na escala de 1:50.000, permitiu identificar afloramentos predominantemente compostos por quartzitos, com ocorrências concentradas de minerais metálicos e ferruginosos na porção leste da área de estudo. Esses padrões geológicos indicam a presença de feições estruturais e litológicas que podem influenciar a distribuição de minerais na região, fornecendo subsídios relevantes para a avaliação de seu potencial mineral.

Foram realizados dois mapas aeromagnetométricos, sendo estes o ASA e ISA, os quais permitem mapear a geometria dos corpos e o ângulo de mergulho das estruturas geológicas respectivamente, o que permite concluir que a porção Leste da área mapeada é a que mais apresenta potencialidade de ocorrências metálicas associadas.

Em campo, a relação descrita acima se confirma com a presença de minerais magnéticos vistos na porção central indo em direção a porção Leste, nesta área, há uma concentração predominante de minerais ferromagnéticos intrudidos nas fraturas das rochas cuja direção varia de NW-SE até E-W.

Através da ISA, é possível concluir que a área de pesquisa (porção Oeste) é recortada por grandes estruturas alinhadas para NW, e na porção proximal ao Domo Serra

Negra as estruturas se comportam mais E-W e com baixo ângulo de mergulho. A partir das coletas de amostras foram realizadas as análises químicas total em laboratório os quais permitiram identificar quais pontos possuem potencialidades para a exploração mineral na área investigada.

De um modo geral, destaca-se que a porção central e Oeste da área pesquisada, não apresentava potencialidades para atividades de exploração mineral, entretanto, a medida em que se sai da porção central para Leste (topo do Domo Serra Negra), há uma forte presença de minerais metálicos, associados com quartzitos friáveis e bem espessos.

Na porção Leste da área, há uma cava de areia que já se encontra em exploração, nela foram amostrados alguns pontos os quais permitiram identificar um crescimento de valores em Elementos Terras Raras (ETR's) nas rochas presentes na superfície quanto indo em direção a níveis mais profundos da ordem dos 35 a 40m de profundidade.

Tal fato, sugere que nos níveis mais basais do Quartzito friável, deva aumentar a concentração de ETR's, já que a cava se encontrar ao lado da borda da cratera do Domo Serra Negra.

Ainda sobre as análises químicas, é possível concluir que na porção Leste da pesquisa, ocorrem outras concentrações como Ferro, Titânio, Zircônio e Elementos Terras Raras, com valores acima e aproximados ao “*background*” aceitável para exploração, isto sugere que o alvo em si, apresenta substância e concentrações viáveis a exploração mineral, mas, no entanto, deve-se obter informações mais precisa sobre volume, geometria do corpo e teor médio para justificar uma prospecção.

De um modo geral, a área investigada, apresentam alta potencialidade para exploração de Sílica, os valores descritos pelas análises química, permitem concluir que tais teores são ideais para a siderurgia, construção civil e seguimento industrial como todo.

A integração das informações provenientes dos dados aeromagnéticos, do mapeamento geológico e das análises químicas permitiu identificar que a porção leste da área investigada apresenta o maior potencial para exploração mineral. Essa característica está associada à proximidade do setor analisado com o Domo Serra Negra, cuja estrutura geológica influencia diretamente a concentração de minerais na região.

Além disso, evidencia-se a necessidade de estudos complementares para aprofundar o conhecimento geológico da área. Investigações envolvendo análises petrográficas em seções delgadas poderiam esclarecer a mineralogia e a organização dos cristais, enquanto novas pesquisas geofísicas e geológicas, aliadas à perfuração de sondagens, possibilitariam compreender melhor a litologia de subsuperfície. Tais iniciativas seriam fundamentais para validar o potencial mineral identificado e orientar futuras campanhas de exploração na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. Sumário Mineral Brasileiro.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. Sumário Mineral Brasileiro – Seção Titânio (2023).

Alkmim, F.F.; Marini, O.J.; Martins-Neto, M.A. (1993). *Evolução tectônica paleoproterozóica do setor meridional do Cráton São Francisco*. Revista Brasileira de Geociências.

ANM (2024). **Sistema de Requerimentos Minerários – Patrocínio, MG**. Agência Nacional de Mineração.

ARAÚJO FILHO, J. O. Geologia e evolução tectônica da região de Patos de Minas – MG. 1980. 182 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 1980.

ARAÚJO FILHO, J. O. Análise da Bacia Canastra: implicações para a evolução da Faixa Brasília. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 2000.

BARBOSA, G. O.; REIS, H. L. S.; ALKMIM, F. F. Compartimentação tectônica e arquitetura da Faixa Brasília na região do Alto Paranaíba (MG): implicações para a evolução neoproterozoica da margem oeste do Cráton São Francisco. *Geonomos*, Belo Horizonte, 2010.

BORGES, Marlos Elias. *Estudo da deformação rúptil no Complexo Alcalino-Carbonatítico de Salitre I*. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Unidade Araxá, Araxá-MG, 2018.

CODEMIG; CPRM. Mapa Geológico da Folha Araxá – SE.23-Y-C-VI, escala 1:100.000. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais; Serviço Geológico do Brasil, 2015.

CODEMIG & IGC-UFMG (2017). Mapeamento Geológico do Alto Paranaíba – Escala 1:100.000.

COSTA, A. P.; ANGEIRAS, J. A. Geologia da Folha Patrocínio (SF.23-Y-C-VI). *DNPM/Projeto Radam – Folha Patrocínio*, Rio de Janeiro: DNPM, 1971. 92 p. (Boletim, 21).

CPRM (1984). Relatório técnico do Projeto Serra Negra – MG.

DARDENNE, M. A. The Brasília Fold Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 2000.

FREITAS-SILVA, G.; DARDENNE, M. A. Arcabouço estratigráfico e evolução tectônica da porção sul da Faixa Brasília. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 1994.

FONSECA, M. A. Evolução tectônica da porção norte da Faixa Brasília: estudo da região de Coromandel, MG. 1996. 252 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.

FONSECA, M. A.; DARDENNE, M. A. A Faixa Brasília e o Grupo Canastra: uma proposta de compartimentação tectonoestratigráfica. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 1996.

FUCK, R. A.; PIMENTEL, M. M.; CARNEIRO, M. A.; ALMEIDA, D. P. M. Tectonic evolution of the Brasília Belt, Central Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE BRASÍLIA BELT, 1993, Brasília. *Anais...* Brasília: Universidade de Brasília, 1993. p. 5–9.

FUCK, R. A.; PIMENTEL, M. M.; CARNEIRO, M. A. Evolução tectônica da Faixa Brasília. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 24, n. 4, p. 365–372, 1994.

GEOMORFOLOGIA ESTRUTURAL. *Morfologias estruturais em áreas de deformação tectônica*. Aula 8.

GRASSO, C. B. (2010). **Petrologia do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Serra Negra – MG**. Dissertação (Mestrado), UnB.

HEILBRON, Monica; CORDANI, Umberto G.; ALKMIM, Fernando F. O Cráton do São Francisco e suas margens. In: **Cráton do São Francisco, leste do Brasil: Genealogia tectônica de um continente em miniatura**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 3-13.

NASCIMENTO JÚNIOR, Francisco de Assis. Estudo gravimétrico do complexo ígneo alcalino-carbonatílico de Serra Negra. 2002, Anais. São Paulo: USP, 2002.

MELFI, Adolfo José; MISI, Aroldo; CAMPOS, Diógenes de Almeida; CORDANI, Umberto Giuseppe (org.). *Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2000

MORBIDELLI, L.; VALERIANO, C. M.; FUCK, R. A.; DANTAS, E. L. A evolução geológica do Grupo Canastra na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 1997.

SCHOBENHAUS, C. et al. Geologia do Brasil. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM, 1984. 501 p. (Projeto RADAMBRASIL, Série Levantamento de Recursos Naturais, v. 27).

SOUZA FILHO, C. R. (2005). **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados à Geologia**. Oficina de Textos.

SUBASINGHE, T.; RATNAYAKE, R. General review of titanium ores in exploitation: present status and ... 2022.

STRIEDER, A. H. O embasamento da Faixa Brasília no setor Araxá–Patrocínio: implicações na evolução geotectônica do Brasil Central. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 1993.

REIS, H. L. S.; ALKMIM, F. F. Neoproterozoic sedimentation and tectonics at the São Francisco cratonic margin: the Vazante Group revisited. *Brazilian Journal of Geology*, São Paulo, 2015.

Woodruff, LG, Bedinger, GM, e Piatak, NM, 2017, Titânio, cap. T de Schulz, KJ, DeYoung, JH, Jr., Seal, RR, II, e Bradley, DC, orgs., Recursos minerais críticos dos Estados Unidos — Geologia econômica e ambiental e perspectivas para o fornecimento futuro: US Geological Survey Professional Paper 1802, p. T1–T23, <https://doi.org/10.3133/pp1802T>.