



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E  
GEODINÂMICA**

**PROSPECÇÃO GEOFÍSICA E PETROFÍSICA DE ELEMENTOS TERRAS  
RARAS NO COMPLEXO ALCALINO FAZENDA BURITI, PROVÍNCIA  
ALCALINA DE GOIÁS**

Área de concentração: Geofísica

Dissertação de Mestrado n° 208

**Fabício Pereira dos Santos**

Brasília – DF

2023

---



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E**  
**GEODINÂMICA**

**PROSPECÇÃO GEOFÍSICA E PETROFÍSICA DE ELEMENTOS TERRAS**  
**RARAS NO COMPLEXO ALCALINO FAZENDA BURITI, PROVÍNCIA**  
**ALCALINA DE GOIÁS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geociências Aplicadas.

Área de Concentração: Geofísica.

**Orientador:** Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges (UnB)

**Coorientador:** Prof. Dr. Marcelo Henrique Leão Santos (UnB)

Brasília – DF

2023

---



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E**  
**GEODINÂMICA**

**PROSPECÇÃO GEOFÍSICA E PETROFÍSICA DE ELEMENTOS TERRAS**  
**RARAS NO COMPLEXO ALCALINO FAZENDA BURITI, PROVÍNCIA**  
**ALCALINA DE GOIÁS**

**Banca examinadora:**

---

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges  
(Instituto de Geociências/UnB)

---

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira  
(Universidade Federal do Paraná - UFPR)

---

Prof. Dr. Dionisio Uendro Carlos  
(Vale S.A.)

Brasília – DF

2023

---

---

## AGRADECIMENTOS

A minha esposa, Sabrina, que desde o início me apoiou e fez de tudo para que a caminhada fosse a mais tranquila possível. Os dois anos desse árduo caminho coincidiram com os dois aninhos da nossa filha, Laura.

Laura foi o motivo pelo qual sempre me reergui, ante as quedas. Foi por você, filha.

A minha mãe, Maria (*in memoriam*) e ao meu pai, José (*in memoriam*). Não só porque sou filho de vocês, mas sei que de alguma forma vocês contribuíram nessa caminhada.

Todos da minha família. É uma grande família, mas meu carinho e amor também o são.

Um agradecimento especial a meu amigo Antônio Vitor.

A empresa de prospecção mineral 3 S Ltda. e a todos os geólogos e técnicos que fizeram parte deste projeto. Em especial a Patrícia e a Gustavo.

Aos professores Marcelo Leão e Welitom Rodrigues, pelo conhecimento repassado e pela confiança.

Ao Marcos, que realizou contribuições fundamentais para o andamento e conclusão da pesquisa.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Em especial, ao colega de curso Luiz Tobosa, pelo auxílio nos momentos finais.

Por fim, a todos que de alguma maneira contribuíram nesta caminhada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), processo 23106.098384/2022-23.

---

**SANTOS, F.P. 2023. Prospecção geofísica e petrofísica de elementos terras raras no Complexo Alcalino Fazenda Buriti, Província Alcalina de Goiás. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, DF, 97p.**

## **RESUMO**

Províncias de intrusões máficas-ultramáficas alcalinas são importantes áreas para exploração de Elementos Terras Raras (ETR). Entretanto, a Província Alcalina de Goiás (PAGO) não tem ocorrências de ETR conhecidas. Neste estudo foram desenvolvidas técnicas exploratórias aplicadas a dados petrofísicos, geofísicos aéreos e terrestres para a seleção de alvos prospectivos e descoberta de mineralização de ETR, no Complexo máfico-ultramáfico Fazenda Buriti, na PAGO. O uso de estatística e lógica booleana em conjunto com métodos de magnetometria e radiometria aérea, medidas petrofísicas correlacionadas a informações geológicas permitiram a seleção de alvos potenciais. Um furo exploratório de sonda com 100 m de profundidade consolidou a descoberta com as análises geoquímicas positivas para ETR por enriquecimento supergênico. O detalhamento terrestre dos alvos com seções geoeletricas, polarização induzida no domínio da frequência, levantamento magnetométrico e medidas de suscetibilidade magnética e radiometria em amostras de rocha de campo e testemunhos do furo de sonda, estabeleceram em detalhe assinaturas geofísicas e petrofísicas da zona de brecha hidrotermal mineralizada. A assinatura geofísica ocorre em uma zona condutiva associada as estruturas férteis que são os condutos de remobilização de fluidos hidrotermais com sulfetação. Ocorre em conjunto a uma magnetização intermediária associada aos fragmentos dos piroxenitos brechados em relação ao background alto da intrusão e baixo das encaixantes do Granito Iporá. A assinatura petrofísica delimitou a zona não magnética da brecha com maior concentração de ETR. Além disso, o uso dos dados multifonte contribuiu para a confecção do mapa geológico na escala 1:25.000 e interpretação de estruturas magnéticas rasas e profundas.

**Palavras-chave:** Província Alcalina de Goiás; Complexo Alcalino Fazenda Buriti; Elementos Terras Raras; Assinatura Geofísica; Assinatura Petrofísica.

---

**SANTOS, F. P. 2023. *Geophysical and petrophysical prospecting of Rare-Earth Elements in the Fazenda Buriti Alkaline Complex, Goiás Alkaline Province. Master's Dissertation, Graduate Program in Applied Geosciences and Geodynamics, Institute of Geosciences, University of Brasília, DF, 97p.***

### **ABSTRACT**

*Alkaline mafic-ultramafic intrusive provinces are important areas for exploration of Rare-Earth Elements (REE). However, the Goiás Alkaline Province (GAP) has no known REE occurrences. In this study, exploratory techniques applied to petrophysical, aerial and terrestrial geophysical data were developed for the selection of prospective targets and the discovery of REE mineralization, in the Fazenda Buriti Mafic-Ultramafic Complex, in GAP. The use of statistics and Boolean logic together with methods of magnetometry and aerial radiometry, and petrophysical measurements correlated with geological information, allowed the selection of potential targets. An exploratory probe hole 100 m deep consolidated the discovery with positive geochemical analyzes for REE due to supergene enrichment. The terrestrial follow-up of the targets with geoelectric sections, induced polarization in the frequency domain, magnetometric survey and measurements of magnetic susceptibility and radiometry in rock samples from the field and cores from the drill hole, established in detail the geophysical and petrophysical footprint of the zone of Mineralized hydrothermal breccia. The geophysical footprint occurs in a conductive zone associated with fertile structures that are conduits for the remobilization of hydrothermal fluids with sulfidation. It occurs associated with an intermediate magnetization associated with brecciated pyroxenite fragments in relation to the high background of the intrusion and the low background of the Iporá Granite host. The petrophysical footprint delimited the non-magnetic breach zone with the highest REE concentration. In addition, the use of multisource data contributed to the creation of the geological map at a scale of 1:25000 and the interpretation of shallow and deep magnetic structures.*

**Keywords:** *Goiás Alkaline Province; Fazenda Buriti Alkaline Complex; Rare-earth elements; Geophysical Footprint; Petrophysical Footprint.*

---

## LISTA DE FIGURA

<b>Figura 1:</b> Localização do estado de Goiás no Brasil e destaque dos acessos de Brasília até a área de estudo no estado de Goiás. Em detalhe a área de estudo com os acessos a partir da sede do município de Iporá. Dados cartográficos: IBGE (2019).....	5
<b>Figura 2:</b> Variação das concentrações médias para potássio (K), urânio (U) e tório (Th) em rochas ígneas conforme o aumento do teor de sílica. Retirado de Dickson e Scott (1997).....	10
<b>Figura 3:</b> Espectro de raios gama típico com os fotópicos registrados nas janelas de detecção dos radioelementos K, U e Th. Retirado de Minty (1997). ....	11
<b>Figura 4:</b> Arranjos mais usuais de aquisição de eletrorresistividade e seus respectivos fatores geométricos ( $k$ ). Retirado de Loke (2004). ....	12
<b>Figura 5:</b> Mapa da parte sul do Brasil com as principais ocorrências de rochas alcalinas. Detalhe para os cinturões de metamórficos representados por BB (Brasília) e RB (Ribeira) (TAKEHARA <i>et al.</i> , 2015).....	18
<b>Figura 6:</b> Geologia do setor centro-leste da Província Tocantins, com destaque para a Faixa Brasília e a área de estudo marcada com um ponto de cor amarela. Adaptado de Pimentel <i>et al.</i> (2004) e Moura (2007). ....	20
<b>Figura 7:</b> Província Alcalina de Goiás (PAGO) com a área de estudo marcada com um polígono de cor verde. Localização da PAGO na Província Tocantins. Modificado de Junqueira-Brod <i>et al.</i> (2002).....	22
<b>Figura 8:</b> Distribuição normal (Gaussiana) e limiares anômalos definidos em função da média aritmética ( $\mu$ ) e do desvio padrão ( $\sigma$ ). A área da curva mostra o percentual que cada limiar representa. Modificado de Salles (2010).....	25
<b>Figura 9:</b> Mapa das unidades geofísicas geológicas do Complexo Alcalino Fazenda Buriti. Localização das amostras de rocha coletadas e lineamentos magnéticos interpretados. Articulação das informações utilizadas para produção do mapa.....	26
<b>Figura 10-A:</b> Afloramento in situ em lajedo às margens de drenagem intermitente com gnaiss granítico; <b>B:</b> Porfiroblastos sigmoidais rotacionados de plagioclásio em gnaiss granítico; <b>C:</b> Afloramento de metagranito intrudido por dique alcalino máfico centimétrico com direção NW-SE; <b>D:</b> Amostra de milonito.....	27
<b>Figura 11-A:</b> Gnaiss milonítico em luz plano paralela com aumento de 25X; <b>B:</b> Gnaiss milonítico composto por quartzo (Qz), plagioclásio (Pl), ortoclásio (Or), biotita (Bt), epidoto (Ep) e opacos. Aumento de 25x em polarizadores cruzados; <b>C:</b> Gnaiss tonalítico	

---

visto em microscópio de luz transmitida em polarizadores paralelos e aumento de 25X;	
<b>D:</b> Mesma seção delgada de C, com gnaíse tonalítico composto por cristais estirados de plagioclásio e quartzo, contornados por associações de biotita e hornblenda orientados. Aumento de 25x com polarizadores cruzados.....	28
<b>Figura 12-A e B:</b> Matações decamétrico e métrico, respectivamente de rocha granítica.	
<b>C:</b> Afloramento de granito com intrusão de dique alcalino máfico porfirítico; <b>D:</b> Amostra de mão de granito com textura porfirítica composta por fenocristais muito grossos de feldspato potássico inseridos em matriz equigranular com quartzo, plagioclásio, biotita e magnetita. ....	29
<b>Figura 13:</b> Formação Furnas. <b>A:</b> Afloramento decamétrico de arenito. <b>B:</b> Matações de arenito. <b>C:</b> Acamamento plano-paralelo. <b>D:</b> Amostra de arenito bem selecionado com granulometria fina.....	30
<b>Figura 14-A:</b> Afloramento e blocos métricos de gabro alcalino no pasto; <b>B:</b> amostra de piroxenito com granulação média composto essencialmente por clinopiroxênio, magnetita, olivina e plagioclásio; <b>C:</b> afloramento com brecha alcalina formada por fragmentos de piroxenito/gabro e matriz sienítica; <b>D:</b> amostra de sienito encontrada em "bolsão" decamétrico em meio ao gabro alcalino. ....	31
<b>Figura 15-A:</b> Piroxenito formado por fenocristais fraturados e zonados de augita, biotita e minerais opacos nos interstícios e como inclusões. Aumento de 25X com polarizadores paralelos; <b>B:</b> Mesma seção delgada de <b>A</b> , porém com polarizadores cruzados. ....	32
<b>Figura 16-A:</b> Blocos de microsienito; <b>B:</b> Amostra de microsienito porfirítico com coloração acinzentada.....	33
<b>Figura 17:</b> Diagrama de caixa para os dados petrofísicos de suscetibilidade magnética e radioelementos Potássio, Tório e Urânio registrados nas amostras de rocha.....	34
<b>Figura 18:</b> Filtro de separação que enfatiza o conteúdo de frequência de sinal correspondente a profundidade de ajuste ao espectro (dimensões da área modelada: 7,3 por 8,5 km). ....	35
<b>Figura 19:</b> Mapas magnéticos, lineamentos magnéticos interpretados e drenagens; <b>A:</b> Inclinação do Sinal Analítico (ISA); <b>B:</b> Bloco diagrama com 3,5 de exagero vertical, com o Gradiente Total (GT) associado às elevações; <b>C:</b> Primeira derivada horizontal na direção x (Dx); <b>D:</b> Primeira derivada horizontal na direção y (Dy) e; <b>E:</b> Primeira derivada vertical (Dz). Altimetria: <i>ALOS-PALSAR</i> (ASF DAAC, 2014). ....	36
<b>Figura 20:</b> Mapas radiométricos, contatos litológicos e drenagens; <b>A:</b> Imagem ternária RGB (K-Th-U); <b>B:</b> Bloco diagrama com 3,5 de exagero vertical, com as taxas de	

---

---

exposição da Contagem Total (CT) associadas às elevações; <b>C</b> : Concentrações de potássio (K); <b>D</b> : Concentrações de tório (Th) e; <b>E</b> : Concentrações de urânio (U). Altimetria: <i>ALOS-PALSAR</i> (ASF DAAC, 2014).....	39
<b>Figura 21:</b> Razões calculadas entre os canais dos dados radiométricos potássio (K), tório (Th) e urânio (U). <b>A</b> : Razão Th/K; <b>B</b> : Razão U/K; <b>C</b> : Razão U/Th e; <b>D</b> : Fator F estimado (EFIMOV, 1978 apud GNOJEK; PŘICHYSTAL, 1985). Relevo sombreado com altimetria do sensor <i>ALOS-PALSAR</i> (ASF DAAC, 2014).....	40
<b>Figura 22:</b> Gráficos de distribuição das frequências de urânio (U), tório (Th) e razão U/Th. <b>A</b> : Distribuição de U; <b>B</b> : Distribuição de Th; <b>C</b> : Distribuição da razão U/Th e; <b>D</b> : Fluxograma de integração das anomalias de U, Th e Razão U/Th com uso da média aritmética ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) para o primeiro limiar ( $\mu+\sigma$ ), segundo limiar ( $\mu+2*\sigma$ ) e terceiro limiar ( $\mu+3*\sigma$ ). As setas indicam o sentido de sobreposição. ....	42
<b>Figura 23-A:</b> Anomalias radiométricas selecionadas em função da média ( $\mu$ ) mais o desvio padrão ( $\sigma$ ), indicação de alvos e do furo de sonda realizado; <b>B</b> : Bloco diagrama com as anomalias selecionadas sobre o relevo. <b>C</b> : Alvo 1; <b>D</b> : Alvo 2. Altimetria: <i>ALOS-PALSAR</i> (ASF DAAC, 2014).....	43
<b>Figura 24:</b> Log do furo realizado, valores de somatório total de Elementos Terras Raras (ETR) em ppm ( $\Sigma$ REE), valores do somatório de ETR leves em ppm (LREE) e valores do somatório de ETR pesados em ppm (HREE). ....	44
<b>Figura 25:</b> Mapa simplificado da geologia do setor centro-leste da Província Tocantins. Em detalhe a Faixa Brasília com a área de estudo marcada com um ponto de cor amarela. Adaptado de Pimentel <i>et al.</i> (2004) e Moura (2007).....	55
<b>Figura 26:</b> Mapa geológico do Arco de Arenópolis com sequências metavulcano-sedimentares e granitoides do arco, bem como seus limites oeste e leste. Adaptado de Marques (2017).....	57
<b>Figura 27:</b> Mapa da Província Alcalina de Goiás e sua localização na Província Tocantins. Área de estudo marcada com um polígono de cor verde. Modificado de Junqueira-Brod <i>et al.</i> (2002).....	58
<b>Figura 28:</b> Mapa das unidades geofísico geológicas do Complexo Alcalino Fazenda Buriti, com furos de sonda e detalhe da área de estudo.....	59
<b>Figura 29:</b> Testemunhos dos furos de sonda. <b>A</b> e <b>B</b> : Testemunho do furo F1 com evidência de piroxenito brechado; <b>C</b> : Testemunhos do Furo F2 que interceptou o Granito Iporá; <b>D</b> : Amostra de testemunho do furo F3 que interceptou o Granito Iporá. ....	60

---

---

<b>Figura 30:</b> Registro dos levantamentos realizados; <b>A:</b> Sincronização de magnetômetros; <b>B:</b> Montagem do magnetômetro base; <b>C:</b> Aquisição de Eletroresistividade e IP e; <b>D:</b> Leitura com susceptibilímetro nos testemunhos do furo de sonda.....	61
<b>Figura 31-A:</b> Ensaio geofísicos realizados e localização dos furos na área de estudo; <b>B:</b> Área de estudo em relação ao município de Iporá. Imagem do sensor CBERS-4, data 24/06/2020. Dados cartográficos IBGE (2019).....	62
<b>Figura 32:</b> Fluxograma com as etapas de redução, filtragem e modelagem dos dados de resistividade elétrica, PFE e MF.....	64
<b>Figura 33-A:</b> Campo Magnético Anômalo (CMA); <b>B:</b> Gradiente Total (GT); <b>C:</b> Perfil com o CMA e o GT sobre a zona de alteração hidrotermal; <b>D:</b> Localização da área de estudo.....	67
<b>Figura 34-A:</b> Primeira Derivada Vertical (Dz); <b>B:</b> Gradiente Horizontal Total (GHT); <b>C:</b> Perfil com a Dz e o GHT sobre a zona de alteração hidrotermal; <b>D:</b> Localização da área de estudo.....	68
<b>Figura 35:</b> Gradiente Total (GT) e Gradiente Horizontal Total (GHT) com localização das seções geoeletricas 1 e 2 em planta e o sentido do levantamento. Seções geoeletricas 1 e 2 com contrastes de resistividade interpretados.....	69
<b>Figura 36:</b> Seção geoeletrica 1 com a posição do furo de sonda F1. Resistividade (ER); Percentual do Efeito Frequência (PFE); Fator Metal (MF) e modelo inverso de Amplitude Total do Vetor de Magnetização (AMPL) recuperado, com detalhe para a estrutura magnética associada a brecha em linha tracejada de cor azul em todas as seções.....	70
<b>Figura 37:</b> Seção geoeletrica 2. Resistividade (ER); Percentual do Efeito Frequência (PFE); Fator metal (MF) e modelo inverso de Amplitude Total do Vetor de Magnetização (AMPL) recuperado, com detalhe para a estrutura magnética associada a brecha em linha tracejada de cor azul em todas as seções.....	72
<b>Figura 38-A:</b> Seção longitudinal do modelo inverso de Amplitude Total do Vetor de Magnetização – AMPL. Log do furo de sonda F1 com as litologias em cores representadas na legenda e perfil da susceptibilidade magnética medida nos testemunhos no perfil em preto; <b>B:</b> Bloco diagrama com a localização do furo e da seção longitudinal (linha amarela).....	73
<b>Figura 39-A:</b> Log do furo F1, $\Sigma$ ETR e dados petrofísicos de Suscetibilidade magnética, K, Th e U; <b>B:</b> Detalhe da profundidade 98,6 a 98,9 com fotografia dos testemunhos e medidas de Suscetibilidade magnética. Feldspato potássico – kfs; Pirita – py; Calcopirita – cpy.....	75

---

---

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Valores mínimos (Min), máximos (Max) e médios ( $\mu$ ) dos radioelementos Potássio (K), Tório (Th), Urânio (U) e da taxa de exposição da Contagem Total (CT) para cada tipo de rocha na área de estudo, extraídos dos dados aéreos. Os valores de médias estão marcados com cores quentes para valores mais altos até cores frias para valores mais baixos relativamente. ....	38
<b>Tabela 2:</b> Valores de média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) utilizados na seleção de alvos prospectivos. ....	41
<b>Tabela 3:</b> Principais depósitos brasileiros de terras raras classificados quanto ao tipo de ocorrência. Takehara (2015). ....	52

---

## SUMÁRIO

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO.....	1
1.1. APRESENTAÇÃO .....	2
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. Objetivos específicos.....	3
1.3. JUSTIFICATIVA.....	4
1.4. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	4
CAPÍTULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1. MAGNETOMETRIA.....	6
2.2. RADIOMETRIA .....	9
2.3. ELETORRESISTIVIDADE .....	11
2.4. POLARIZAÇÃO INDUZIDA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	13
CAPÍTULO III (ARTIGO).....	15
Descoberta de mineralização de Elementos Terras Raras no Complexo Alcalino Fazenda Buriti, Província Alcalina de Goiás, Brasil .....	15
RESUMO.....	15
<i>ABSTRACT</i> .....	16
3.1. INTRODUÇÃO.....	17
3.2. CONTEXTO GEOLÓGICO .....	18
3.2.1. Província Tocantins.....	18
3.2.2. Faixa Brasília.....	19
3.2.3. Arco Magmático de Goiás.....	20
3.2.4. Bacia do Paraná.....	21
3.2.5. Província Alcalina de Goiás .....	21
3.3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	23
3.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	25
3.4.1. Geologia local.....	25
3.4.2. Petrofísica.....	33
3.4.3. Magnetometria aérea .....	34
3.4.4. Gamaespectrometria aérea .....	37
3.4.5. Delimitação de alvos prospectivos .....	41
3.5. CONCLUSÕES.....	44
3.6. AGRADECIMENTOS.....	45

---

3.7. REFERÊNCIAS .....	45
CAPÍTULO IV (ARTIGO) .....	50
Assinaturas geofísicas e petrofísicas de brecha hidrotermal enriquecida em Elementos Terras Raras no Complexo Máfico-Ultramáfico Fazenda Buriti, Província Alcalina de Goiás, Brasil .....	50
RESUMO.....	50
<i>ABSTRACT</i> .....	51
4.1. INTRODUÇÃO.....	52
4.2. CONTEXTO GEOLÓGICO .....	54
4.2.1. Geologia Local .....	58
4.3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	61
4.4. PROCESSAMENTO DE DADOS .....	64
4.4.1. Dados geoeletricos .....	64
4.4.2. Cálculo do PFE e MF .....	65
4.4.3. Dados magnéticos.....	65
4.4.4. Modelagem inversa do Vetor de Magnetização.....	66
4.5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
4.6. CONCLUSÕES.....	75
4.7. AGRADECIMENTOS.....	76
4.8. REFERÊNCIAS .....	76
CAPÍTULO V: CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	80
REFERÊNCIAS .....	82

---

## CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

As informações circulam ao redor do mundo, são processadas e exibidas em telas de telefones celulares ou de computadores em questão de minutos. Essa velocidade com que a informação trafega transforma a sociedade atual, que a cada dia está mais conectada e dependente de dispositivos tecnológicos. Em adição, o aquecimento global faz com que os países apontem políticas públicas para alternativas de energia de fontes limpas e renováveis (VAN GOSEN *et al.*, 2017). Entretanto, para continuar a suprir essas demandas e direcionamentos, nos últimos anos um conjunto de metais de transição ganharam destaque devido a sua importância neste contexto, são os elementos terras raras (CHAKHMOURADIAN; WALL, 2012; VONCKEN, 2016; VAN GOSEN *et al.*, 2017).

Os elementos terras raras ou ETR possuem propriedades especializadas em aplicações de alta tecnologia e em componentes ligados a matrizes energéticas limpas. As aplicações vão desde metalurgia, carros elétricos, telefones celulares, lâmpadas fluorescentes, cabos de telecomunicação de fibra ótica, *lasers*, ímãs, vidros polidos, dentre outras (HAXEL *et al.*, 2005; CHAKHMOURADIAN; WALL, 2012; LAPIDO-LOUREIRO, 2013). Contudo, a forte dependência de fontes de produção e fornecimento da China, maior produtor de ETR no mundo, trouxe um alerta aos países consumidores destes metais (VONCKEN, 2016; VAN GOSEN *et al.*, 2017).

Em 2009, quando a China criou cotas de produção e exportação, impostos de exportação e tornou sua legislação ambiental mais restritiva, sem conceder novas licenças de mineração de ETR houve uma crise no mundo, conhecida como a “Crise das Terras Raras” (VONCKEN, 2016). A partir daí houve uma busca por novos depósitos e o Brasil, que já teve destaque na produção de ETR em meados do século XX, reforçou o interesse na produção e prospecção de novas áreas (LAPIDO-LOUREIRO, 2013; TAKEHARA *et al.*, 2015).

---

A exploração de ETR em larga escala no Brasil se iniciou em 1885 com as areias monazíticas do litoral (LAPIDO-LOUREIRO, 2013). Atualmente os principais depósitos de ETR no país ocorrem associados a rochas ígneas, sobretudo em complexos alcalinos carbonatíticos como em Araxá (MG), Catalão (GO) e Seis Lagos (AM), além de granitos diferenciados como Pitinga (AM), Serra Dourada (GO) e Granitos Rondonianos (RO) (TAKEHARA *et al.*, 2015). Nesse sentido, as intrusões máficas-ultramáficas em províncias alcalinas brasileiras são importantes áreas para prospecção de elementos terras raras.

A Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP) e a Província Alcalina de Goiás (PAGO), estão assentadas ao longo das zonas de cisalhamento do Lineamento Az 125° (MORAES ROCHA *et al.*, 2014; MORAES ROCHA *et al.*, 2015). Na PIAP os depósitos e minas em operação (Araxá, Salitre, Tapira, Catalão I e II), na qual ocorrem mineralizações de nióbio, fosfato, terras raras e diamantes em kimberlitos foram alvos de diversos estudos (RIBEIRO, 2008; ARAÚJO, 2015; GOMIDE, 2015). Entretanto, a PAGO carece de estudos prospectivos, principalmente para ETR, uma vez que importantes depósitos de níquel já são conhecidos, a exemplo de Morro do Engenho e Santa Fé, o que retrata o seu potencial mineral (RADAELLI, 2000a, 2000b).

Neste contexto, o presente estudo utilizou dados geofísicos multifonte para prospectar e avaliar áreas de ocorrência de terras raras no Complexo Alcalino Fazenda Buriti, Iporá (GO), como forma de contribuir para o desenvolvimento de métodos e técnicas geofísicas aplicadas na prospecção mineral da Província Alcalina de Goiás. De maneira geral, os resultados apontaram que a PAGO possui elevado potencial para prospecção de ETR. O método geoeletrico apontou padrões verticais associados a estruturas magnéticas em que ocorre a zona de brecha. A petrofísica realizada no furo onde ocorre a mineralização ajudou a compreender as assinaturas magnéticas e radiométricas das zonas de maior concentração e ETR.

## **1.1. APRESENTAÇÃO**

Este trabalho foi realizado como pré-requisito para a obtenção do título de mestre em geociências aplicadas pelo Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. O conteúdo envolve os dados de pesquisas realizadas no Complexo Alcalino Fazenda Buriti, na região de Iporá, oeste do estado de Goiás. O trabalho dispôs de dados geofísicos do Serviço Geológico do Brasil (SGB) e dados fornecidos pela empresa de prospecção mineral 3S

---

Ltda., que apoiou este estudo (banco de dados geológicos, dados geoquímicos e descrição de furos de sonda).

O texto foi estruturado em cinco capítulos: O **Capítulo I** contém os objetivos, a justificativa e a localização da área de estudo, já no **Capítulo II** a fundamentação teórica.

O contexto geológico foi inserido nos artigos nos capítulos III e IV, assim como os materiais e métodos utilizados.

O **Capítulo III** inclui os resultados da primeira etapa da pesquisa em formato de artigo. O artigo é intitulado “*Descoberta de mineralização de Elementos Terras Raras no Complexo Alcalino Fazenda Buriti, Província Alcalina de Goiás, Brasil*”. Neste artigo foi aplicada estatística e lógica booleana a dados aerogeofísicos de magnetometria e gamaespectrometria para a definição e a delimitação de alvos potenciais para ETR.

O **Capítulo IV** consiste no artigo “*Assinaturas geofísicas e petrofísicas de brecha hidrotermal enriquecida em Elementos Terras Raras no Complexo Máfico-Ultramáfico Fazenda Buriti, Província Alcalina de Goiás, Brasil*”. Neste capítulo constam os resultados de aquisições de dados magnéticos terrestres, de medidas diretas de suscetibilidade magnética e radiometria realizadas em testemunhos do furo de sonda que interceptou a brecha hidrotermal mineralizada em ETR, com ocorrência de sulfetos disseminados e maciços. Além disso, para definir as anomalias em profundidade utilizou-se de modelos geoeletrônicos de eletrorresistividade e de polarização induzida, no domínio da frequência, associados a modelagem inversa do vetor de magnetização.

Por fim, o **Capítulo V** apresenta as considerações finais.

## 1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é fazer uso de metodologias geofísicas para prospectar áreas potenciais de ocorrência de elementos terras raras na intrusão alcalina Fazenda Buriti e elaborar um modelo prospectivo para investigação de novas áreas relacionadas ao Complexo Máfico-Ultramáfico.

### 1.2.1. Objetivos específicos

- Definir alvos de pesquisa no Complexo Fazenda Buriti com uso de estatística e dados aéreos de gamaespectrometria e magnetometria;
- Realizar medidas petrofísicas em amostras de rochas e testemunhos de furo de sonda, com intersecção positiva para elementos terras raras, sulfetação maciça

---

e disseminada. Correlacionar com a amostragem geoquímica e descrição geológica;

- Realizar levantamento terrestre e inversão de dados magnéticos para mapear pequenos corpos e estruturas magnéticas;
- Realizar seções de eletrorresistividade e polarização induzida no domínio da frequência e;
- Interpretar e correlacionar os dados geofísicos, petrofísicos e geoquímicos com a geologia da área de estudo, a fim de produzir um modelo prospectivo.

### 1.3. JUSTIFICATIVA

De acordo Gibson *et al.* (1995), o magmatismo alcalino ocorrido durante o Cretáceo, resultou em províncias alcalinas de importância econômica mineral, como no caso da Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP) e da Província Alcalina de Goiás (PAGO). Estas duas importantes províncias estão assentadas ao longo do Lineamento Az 125° (MORAES ROCHA *et al.*, 2014; MORAES ROCHA *et al.*, 2015), com idades de magmatismo ultramáfico mais recente na direção leste ao longo da borda norte da Bacia do Paraná (SGARBI *et al.*, 2004).

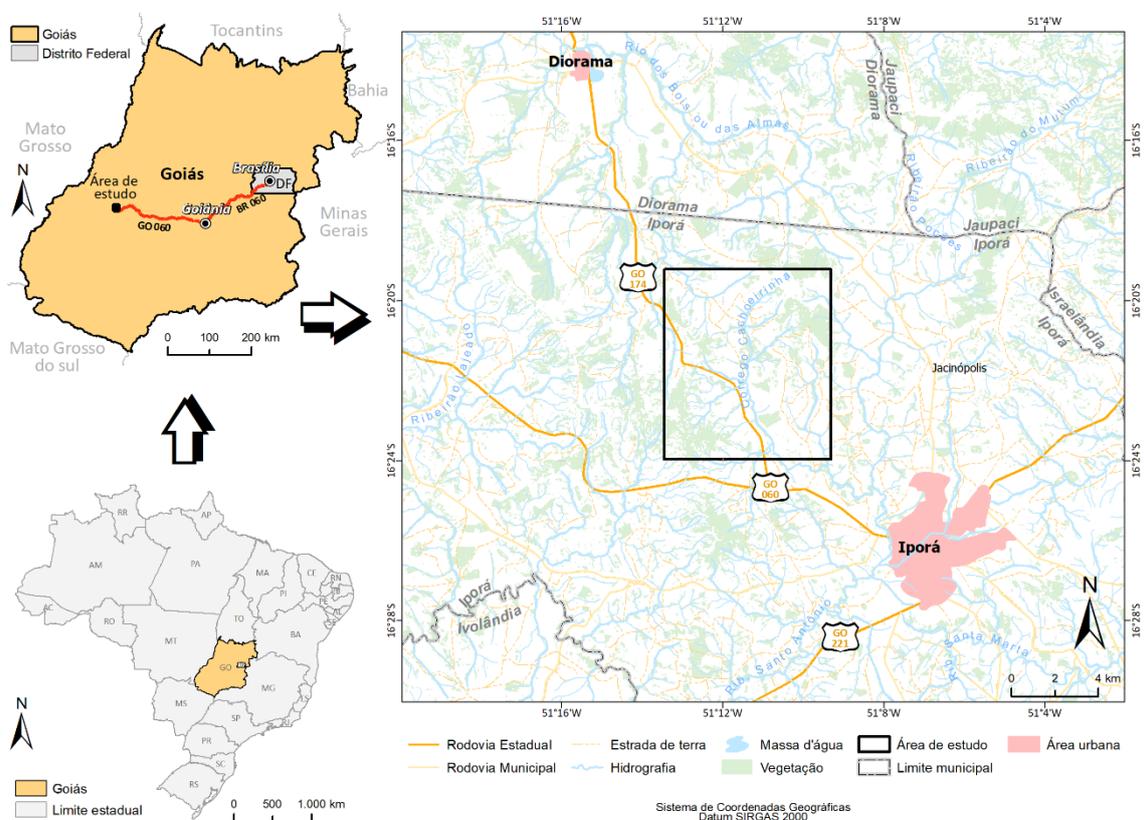
A PIAP encerra depósitos e minas em operação relacionados a corpos máficos-ultramáficos alcalinos onde ocorrem mineralizações de nióbio, fosfato, terras raras, diamantes em kimberlitos, dentre outros. Araxá, Salitre, Tapira, Catalão I e II são alguns exemplos (ARAÚJO, 2015). Embora importantes depósitos de níquel laterítico tenham sido encontrados na PAGO (RADAELLI, 2000a, 2000b), a região ainda carece de estudos de caráter prospectivo, seja no âmbito acadêmico ou profissional. É de interesse estudar as assinaturas geofísicas e o potencial econômico e mineral dos complexos intrusivos desta província, dentre eles o Complexo Fazenda Buriti, como forma de contribuir para o desenvolvimento do conhecimento da região.

### 1.4. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no município de Iporá, região oeste do estado de Goiás, no Centro-Oeste do Brasil. Situa-se a cerca de 425 km de Brasília, com acesso pelas rodovias BR-060 e GO-060. Geograficamente colocada entre os paralelos 16°19'13"S e 16°23'57"S e meridianos 51°9'19"W e 51°13'27"W, que formam um polígono de 6.448 hectares (**Figura 1**).

No centro da área de estudo o relevo exhibe declividades caracterizadas como suave ondulado (3 a 8%) a ondulado (8 a 20%). Já nas bordas da intrusão alcalina Fazenda Buriti o relevo mostra declividades elevadas, definidas como forte ondulado (20 a 45%) e montanhoso (45 a 75%), essas áreas são caracterizadas pelo Granito Iporá a nordeste e por gnaisses do Arco Magmático de Arenópolis a sudoeste. Os argissolos vermelho-amarelos distróficos predominam na área, com granulometria argilosa a siltosa e perfis que variam entre 10 e 20 metros de profundidade. A intrusão alcalina máfica e ultramáfica favorece o desenvolvimento de solos com magnetismo moderado a forte, além de óxidos de ferro que caracterizam a área de estudo. As águas são drenadas, principalmente, pelo Córrego Cachoerinha, que faz parte da microbacia do Ribeirão Santo Antônio, tributário do Rio Caiapó, afluente do Rio Araguaia.

As pastagens com manejo e áreas agrícolas cobrem cerca de 90,3% da área de estudo. A vegetação florestal cobre 9,7% da área com matas ciliares e de topo de morro bem preservadas (IBGE, 2020).



**Figura 1:** Localização do estado de Goiás no Brasil e destaque dos acessos de Brasília até a área de estudo no estado de Goiás. Em detalhe a área de estudo com os acessos a partir da sede do município de Iporá. Dados cartográficos: IBGE (2019).

---

## CAPÍTULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os itens a seguir descrevem a fundamentação teórica dos métodos geofísicos utilizados neste estudo, como magnetometria, radiometria, eletrorresistividade e polarização induzida no domínio da frequência.

### 2.1. MAGNETOMETRIA

O método magnetométrico faz uso de medidas magnéticas, na qual as concentrações de minerais magnéticos nas rochas da crosta causam anomalias locais nos elementos intensidade, declinação e inclinação do campo magnético da Terra (LUIZ; SILVA, 1995). Um dos objetivos deste método é investigar essas perturbações nas rochas em subsuperfície, pois fornecem informações valiosas sobre a geologia. Mesmo que a maioria dos minerais constituintes das rochas não sejam magnéticos, os minerais que manifestam esta propriedade como a magnetita, a pirrotita e a ilmenita são suficientes para produzir anomalias magnéticas significativas em subsuperfície (KEAREY *et al.*, 2002).

O magnetismo intrínseco ao material é o natural, ou espontâneo (e.g. magnetita). A magnetização é chamada de permanente, remanente ou remanescente quando é adquirida ao longo de toda a história da rocha. Em outras palavras, magnetização remanente acontece quando o material é submetido a ação de um campo externo, diferente do atual e retém a magnetização mesmo após encerrada a mencionada ação (DENTITH; MUDGE, 2014).

A suscetibilidade magnética está atrelada a abundância de minerais ferromagnéticos presentes em um meio (ISLES; RANKIN, 2013). De acordo com a capacidade de adquirir magnetização os materiais podem ser: diamagnéticos, que recebem fraca intensidade de magnetização no sentido contrário da aplicação do campo magnético; paramagnéticos, possuem baixa suscetibilidade e a intensidade do campo

---

magnético é fraca e; ferromagnéticos, estes materiais possuem elevada suscetibilidade magnética, com uma intensidade alta no sentido do campo magnético aplicado (KEAREY *et al.*, 2002). Os magnetômetros são os equipamentos usados para registrar a intensidade do campo magnético total.

A magnetometria convencional consiste na medição da amplitude total do campo magnético (TMI). Este possui componentes como o campo geomagnético, o campo magnético proveniente das radiações solares e o campo magnético induzido nos minerais ferromagnéticos presentes na crosta (DENTITH; MUDGE, 2014; ISLES; RANKIN, 2013). Quando o interesse no dado magnético é voltado para mapeamento geológico ou mesmo prospecção, o TMI passa por várias etapas de redução, como a redução da variação diurna e do campo geomagnético principal, originado no núcleo externo da Terra, com a finalidade de exibir apenas o campo magnético de interesse, ou seja, o Campo Magnético Anômalo (CMA) (BLUM, 1999).

As anomalias magnéticas resultam das variações magnéticas controladas pela direção e intensidade local do campo terrestre, além do conteúdo dos minerais magnéticos nas rochas da crosta média e superior (ISLES; RANKIN, 2013). Podem variar em geometria, conforme a localização geográfica, ainda que um corpo com a mesma forma, por conta das diferentes inclinações do campo magnético terrestre. Essa variação resulta em feições dipolares nas latitudes intermediárias e em feições monopolares nos polos (DENTITH; MUDGE, 2014). No equador magnético, a anomalia de um dipolo se transforma numa anomalia tripolar, com um mínimo no centro e duas anomalias positivas, a norte e a sul (LI, 2008).

Com o intuito de ressaltar as anomalias magnéticas de interesse, sejam superficiais (altas frequências) ou profundas (baixas frequências) os filtros derivativos podem ser aplicados nos dados magnéticos (BLUM, 1999).

Os filtros das derivadas de primeira ordem são realizados a partir da derivada parcial (derivadas direcionais) dos valores do Campo Magnético Anômalo (CMA), com relação a cada uma das componentes espaciais em X para Dx (Equação 1), em Y para Dy (Equação 2) e em Z para Dz (Equação 3) (BLUM, 1999). Tais gradientes possuem ênfase nos parâmetros medidos, são eficientes para demarcar mudanças geológicas orientadas perpendicularmente à direção da derivada produzindo uma alta resposta (DENTITH; MUDGE, 2014). Note que o CMA é a anomalia de campo potencial (BLUM, 1999).

$$Dx(x, y) = \frac{\partial CMA(x, y)}{\partial x} \quad (1)$$

$$Dy(x, y) = \frac{\partial CMA(x, y)}{\partial y} \quad (2)$$

$$Dz(x, y) = \frac{\partial CMA(x, y)}{\partial z} \quad (3)$$

Os filtros Gradiente Horizontal Total (GHT) (BLUM, 1999; MILLIGAN; GUN 1997), o Gradiente Total (GT) (LI, 2006; NABIGHIAN, 1972; ROEST *et al.*, 1992) e a Inclinação da Amplitude do Gradiente Total (ISA) (MILLER; SINGH, 1994; ELLIS, 2012) são calculados a partir da soma vetorial dos gradientes das componentes espaciais.

O GHT é dado a partir da raiz quadrada da soma dos quadrados dos gradientes horizontais (Equação 4). Segundo Milligan e Gun (1997) a transformação de fase ressalta os picos das anomalias, localizadas próximas às bordas, com a diminuição do gradiente de fora para dentro dos corpos magnéticos.

$$GHT(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial CMA(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial CMA(x, y)}{\partial y}\right)^2} \quad (4)$$

O cálculo do GT, ou Amplitude do Sinal Analítico (ASA) (Equação 5) ocorre a partir da raiz quadrada da soma dos quadrados dos gradientes de todas as componentes (NABIGHIAN, 1972). O filtro é indicado para realçar anomalias que são pouco expressivas ou muito regionais, ainda como uma boa alternativa para corpos que apresentam magnetização remanente significativa (LI, 2006).

$$GT(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial CMA(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial CMA(x, y)}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial CMA(x, y)}{\partial z}\right)^2} \quad (5)$$

Segundo Cooper e Cowan (2008) o filtro ISA é uma normalização da Dz pelo GHT (Equação 6). Como o ângulo de inclinação é proporcional as derivadas, ele realça as anomalias de pequena amplitude. O ISA é eficaz para equalizar as amplitudes das anomalias, mas não é um filtro primário para a detecção de bordas (MILLER; SINGH, 1994; ELLIS, 2012).

$$ISA(x, y) = \tan^{-1} \left( \frac{\frac{\partial CMA(x, y)}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial CMA(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial CMA(x, y)}{\partial y}\right)^2}} \right) \quad (6)$$

---

## 2.2. RADIOMETRIA

O decaimento radiativo natural dos elementos potássio ( $^{40}\text{K}$ ), tório ( $^{232}\text{Th}$ ) e urânio ( $^{238}\text{U}$ ) é utilizado como fonte de informação no método radiométrico, também conhecido como gamaespectrométrico. Os isótopos destes elementos, como o  $^{40}\text{K}$ , o  $^{232}\text{Th}$  e o  $^{238}\text{U}$ , são instáveis e na busca de núcleos estáveis emitem energia na forma de radiação ionizada (MINTY, 1997). Seja nas rochas expostas ou nos solos, essas medidas servem para apoiar os mapeamentos geológicos, onde os processos de intemperismo e pedogênese atuam (DICKSON; SCOTT, 1997).

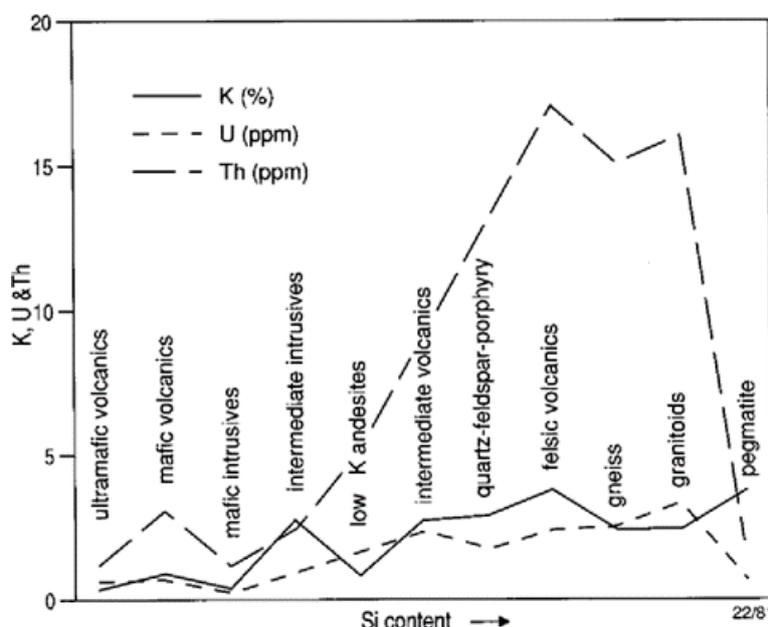
A distribuição do K faz desse radioelemento um dos principais componentes da crosta terrestre, com cerca de 2,35%. O K é encontrado nas rochas em feldspatos potássicos e micas, com baixas concentrações nos minerais máficos. Rochas félsicas tem alta concentração de potássio, basaltos máficos tem baixas, já os dunitos e peridotitos exibem muito baixas concentrações. O intemperismo atua fortemente nos hospedeiros do potássio, todavia, adsorvido em argilas (DICKSON; SCOTT, 1997).

A presença de urânio, componente secundário da crosta terrestre, ocorre nas rochas em minerais óxidos, silicatos, uraninita e uranotorita, além de minerais que contém este radioelemento como monazita, xenotima e zircão (DENTITH; MUDGE, 2014). Durante o processo de intemperismo apenas o zircão e a monazita permanecem estáveis, contudo, o urânio liberado pela quebra de outros minerais pode ser retido em óxidos de ferro autigênicos e minerais de argila, dessa maneira, pode formar depósitos em condições favoráveis (DICKSON; SCOTT, 1997).

Com solubilidade geralmente baixa, o tório é um elemento, assim como o urânio, secundário na crosta terrestre. Está presente na alanita, monazita, xenotima e zircão, com níveis acima de 1000 ppm e pode ocorrer como traços em outros minerais (DENTITH; MUDGE, 2014). Ao longo do processo de intemperismo o tório permanece presente nos minerais como a monazita e o zircão. Quando ocorre a quebra de outros minerais que contém este elemento pode acontecer a retenção em óxidos e argilas, tal qual o U e formar depósitos (DICKSON; SCOTT, 1997).

As concentrações médias dos radioelementos K, Th e U acompanham o teor de sílica em rochas ígneas, conforme a **Figura 2**. De maneira que as rochas ultramáficas e máficas encerram baixas concentrações, já as rochas intermediárias revelam valores elevados e, por conseguinte, as rochas félsicas possuem as maiores concentrações (DENTITH; MUDGE, 2014). Entretanto, rochas como os pegmatitos, formadas nas

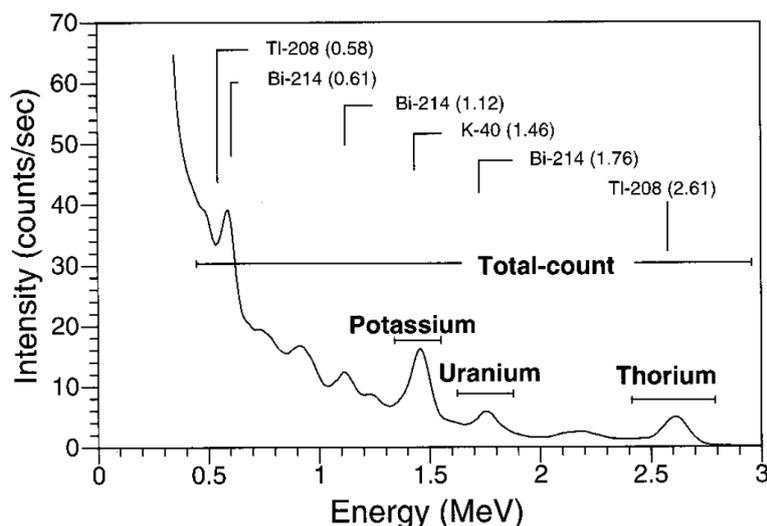
últimas fases de colocação ígnea, com temperaturas mais baixas, tendem a manter o teor de K elevado, porém Th e U em menores concentrações (DICKSON; SCOTT, 1997).



**Figura 2:** Variação das concentrações médias para potássio (K), urânio (U) e tório (Th) em rochas ígneas conforme o aumento do teor de sílica. Retirado de Dickson e Scott (1997).

As leituras de K são expressas em percentual (%) por sua abundância na crosta. Tório e Urânio ocorrem em quantidades menores, em média 12 e 3 ppm (partes por milhão), respectivamente. As medidas das quantidades de potássio são realizadas diretamente no meio, pois no processo de decaimento radioativo do isótopo  $^{40}\text{K}$  para o isótopo filho argônio, ocorre a emissão de um fóton de energia característica de 1,46 MeV (MINTY, 1997; DENTITH; MUDGE, 2014). A **Figura 3** mostra um espectro de raios gama típico na qual é possível observar o fóton característico do  $^{40}\text{K}$ .

Contudo, as leituras de Th e U não podem ser realizadas diretamente, pois estes radioelementos possuem séries de decaimento radioativo mais complexas que a do K e envolvem um número maior de isótopos filhos. Ao longo da série de decaimento os isótopos filhos  $^{208}\text{Tl}$ , com fóton de 2,61 MeV e  $^{214}\text{Bi}$ , com fóton de 1,76 MeV são registrados para inferir as concentrações de Th e U (**Figura 3**), respectivamente, por essa razão são expressos como equivalentes (MINTY, 1997; DENTITH; MUDGE, 2014).



**Figura 3:** Espectro de raios gama típico com os fotópicos registrados nas janelas de detecção dos radioelementos K, U e Th. Retirado de Minty (1997).

Para auxílio na interpretação dos dados radiométricos são utilizadas análises que incluem a realização de razões dos canais K, U e Th. As concentrações relativas desses radioelementos podem ser ressaltadas pelas razões de Th/K, U/Th, U/K (DENTITH; MUDGE, 2014). Outra razão que pode ser utilizada para ressaltar anomalias de K, relacionadas a rochas alteradas por hidrotermalismo é o Fator F (EFIMOV, 1978 apud GNOJEK; PŘICHYSTAL, 1985), que considera a relação entre o K, o Th e o U, conforme a Equação 7.

$$\text{Fator F} = \frac{KU}{\text{Th}} \quad (7)$$

### 2.3. ELETORRESISTIVIDADE

O levantamento de eletrorresistividade (ER) tem como foco conhecer a distribuição das resistividades do subsolo para relacioná-la com a litologia, a porosidade do meio, o grau de saturação da água, a presença ou ausência de vazios na rocha, ou mesmo, a propriedade de interesse (JOHNSON, 2003). Em um levantamento de ER a resistência (R) é registrada em Ohms e fornece uma medida elétrica, conforme estabelece a Lei de Ohm (Equação 8). Na qual V é a tensão em volts e I a corrente em Amperes. Ao considerar R a resistência de um bloco de material condutor, com um comprimento L e área da seção transversal A, a resistividade ( $\rho$ ) é encontrada conforme a Equação 9. A resistividade aparente ( $\rho_a$ ) é dada pela Equação 10, em que  $k$  é o fator geométrico, relacionado ao arranjo dos eletrodos em campo (KEAREY *et al.*, 2002; JOHNSON, 2003).

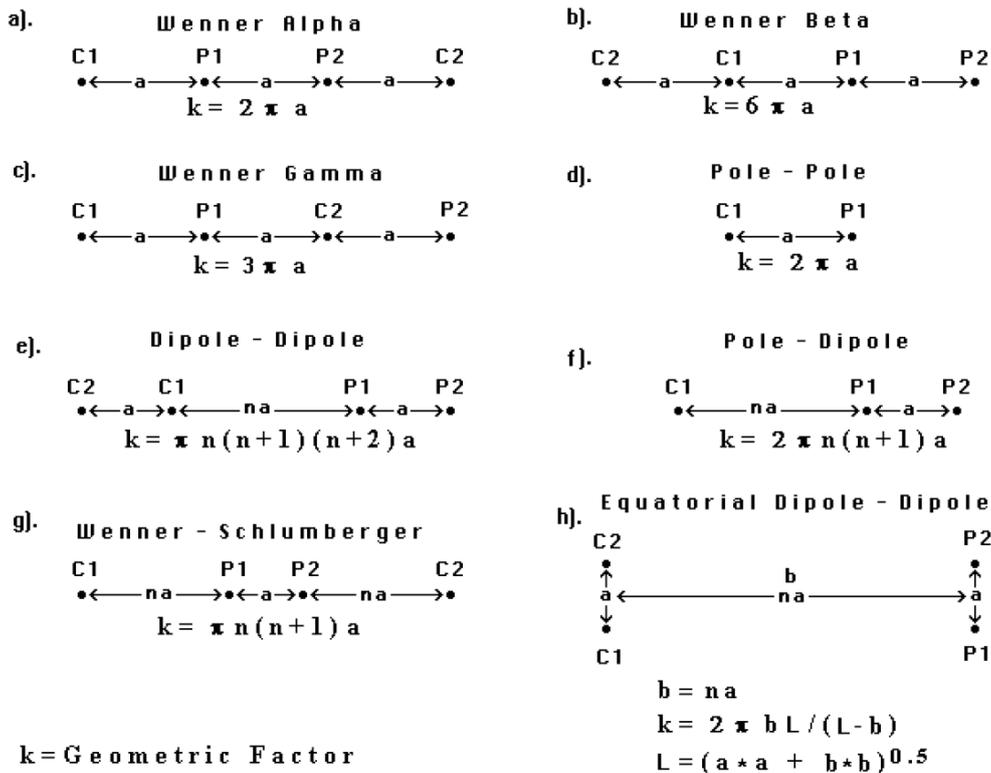
$$R = \frac{V}{I} \quad (8)$$

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (9)$$

$$\rho a = \frac{kV}{I} \quad (10)$$

Existem três tipos mais usuais de técnicas de aquisição de dados: Sondagem Elétrica Vertical, Caminhamento Elétrico e Perfilagem Elétrica de Poços. Para este estudo optou-se por aplicar o caminhamento elétrico, uma vez que as descontinuidades laterais de materiais geológicos, além de estruturas como falhas e fraturas são ressaltadas por esta técnica (KEAREY *et al.*, 2002). Para realizar as aquisições é normalmente usado um arranjo geométrico de quatro eletrodos. A partir destes, dois eletrodos são utilizados para injeção de corrente e dois para medição de potencial (LOKE, 2004).

O arranjo dos quatro eletrodos obedece a um padrão preestabelecido, em que os eletrodos C1 e C2 são convencionados como de injeção de corrente e P1 e P2 convencionados como eletrodos de potencial (LOKE, 2004). A **Figura 4** exibe os arranjos mais frequentemente utilizados, com o fator geométrico ( $k$ ) específico para cada um deles.



**Figura 4:** Arranjos mais usuais de aquisição de eletrorresistividade e seus respectivos fatores geométricos ( $k$ ). Retirado de Loke (2004).

---

A escolha do arranjo a ser utilizado em uma aquisição elétrica está sujeita ao tipo da estrutura a que se quer mapear, a sensibilidade do equipamento e ao nível de ruído de fundo. Entretanto, algumas características na escolha do arranjo devem ser avaliadas como a profundidade a ser investigada, a sensibilidade do arranjo quanto a mudanças laterais e em profundidade da resistividade, a área horizontal de cobertura dos dados e a força do sinal (LOKE, 2004).

#### 2.4. POLARIZAÇÃO INDUZIDA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

O efeito IP é ocasionado, principalmente, pela capacidade de minerais de brilho metálico se comportarem como capacitores, quando uma corrente elétrica flui pelo solo ou rocha (SUMNER, 1985). Ao injetar uma corrente elétrica no terreno em ciclos periódicos, algumas cargas se concentram em pontos aleatórios. Quando a injeção de corrente é cessada as cargas voltam a posição natural, entretanto em alguns pontos uma fração de segundos é necessária para dissipar as cargas e retornar ao seu potencial de equilíbrio. De acordo com Dentith e Mudge (2014) este efeito pode ser medido no domínio do tempo, ao se registrar o decaimento do potencial quando a corrente é desligada e no domínio da frequência, no qual se compara duas medidas de resistividade aparente, registradas com correntes de frequências distintas.

Na Polarização Induzida (IP) no domínio da frequência as medidas são realizadas no domínio de duas frequências distintas, geralmente menor que 10 Hz. Essa aplicação parte do princípio de que a resistividade elétrica, impedância elétrica,  $Z(\omega)$ , varia conforme a mudança de frequência da corrente injetada no meio. Essa variação acontece devido a pequenos intervalos de medição causarem a diminuição do efeito IP e, conseqüentemente, da resistividade aparente.

No contexto de exploração mineral o tipo de polarização de maior relevância é a polarização de eletrodo, por conta de sua forte relação com a presença de minerais metálicos (PINTO, 2019). Os intervalos de corrente devem ser definidos, de modo que, haja um contraste identificável no efeito de polarização do meio, que resulta na variação de resistividade (SUMNER, 1985).

A resistividade aparente para uma frequência baixa ( $\rho_{a0}$ ) é maior que para uma frequência alta ( $\rho_{a1}$ ). Em um pequeno intervalo de tempo a sobrevoltagem observada ( $V_{a0}$ ) é menor que para um longo intervalo de tempo ( $V_{a1}$ ). O decaimento da tensão é muito curto para ser determinado, de modo que a amplitude da voltagem é medida com base na corrente injetada, que resulta no valor de resistência, com a aplicação do fator

---

geométrico, obtém-se o valor de resistividade aparente (REYNOLDS, 2011). O efeito observado na mudança de resistividade de uma alta e uma baixa frequência é denominado Efeito Frequência (FE) descrita pela Equação 11. Como os valores dos efeitos de frequência possuem baixa magnitude, as medidas são observadas segundo o seu valor percentual e definem o Percentual de Efeito Frequência (PFE, Equação 12).

$$FE = \frac{Z(\omega_{a0}) - Z(\omega_{a1})}{Z(\omega_{a1})} = \frac{(\rho_{a0} - \rho_{a1})}{\rho_{a1}} \quad (11)$$

$$PFE = 100 \frac{(\rho_{a0} - \rho_{a1})}{\rho_{a1}} \quad (12)$$

O Fator Metal (MF) é outro produto de análise para o efeito de polarização, pode ser calculado no domínio do tempo e no domínio da frequência, utilizado principalmente no domínio frequência (HALLOF, 1964). Ainda que, os valores não consistam na resposta de propriedades físicas, a relação do efeito de polarização e resistividade pode ser utilizado para indicar possíveis zonas de mineralizações metálicas (MARSHALL; MADDEN, 1959; TELFORD *et al.*,1990).

O MF é calculado a partir dos valores de PFE, multiplicados por uma constante arbitrária e normalizados pelos valores de resistividade de baixa frequência ( $\rho_{a0}$ ), conforme a Equação 13. Contrasta regiões com alto efeito de polarização, mas que possuem variação nos valores de resistividade, de modo que tenham altos valores para regiões com alto FE e baixa resistividade (HALLOF, 1964; TELFORD *et al.*,1990).

$$MF = \frac{PFE}{\rho_{a0}} 2\pi 10^3 \quad (13)$$

---

## CAPÍTULO III (ARTIGO)

### **Descoberta de mineralização de Elementos Terras Raras no Complexo Alcalino Fazenda Buriti, Província Alcalina de Goiás, Brasil**

#### **RESUMO**

Intrusões máficas-ultramáficas em províncias alcalinas são importantes áreas para prospecção de elementos terras raras (ETR). O uso de estatística e aplicação da lógica booleana em conjunto com métodos geofísicos e medidas petrofísicas correlacionadas a informações geológicas são técnicas pouco utilizadas para a definição de alvos na prospecção mineral. Neste estudo de caso foram aplicadas técnicas exploratórias para seleção de alvos potenciais para ETR, no Complexo máfico-ultramáfico Fazenda Buriti, na Província Alcalina de Goiás. A mineralização consiste em produtos de alteração hidrotermal que formam brechas com ETR. Os resultados do processamento e interpretação de dados magnéticos e radiométricos aéreos, associados a medidas diretas de suscetibilidade magnética e radiometria em 15 amostras de rochas coletadas na área de estudo, permitiram aplicar a lógica booleana para gerar um mapa prospectivo com a delimitação de dois importantes alvos. Um furo de sondagem exploratória com 100 m de profundidade foi realizado no alvo principal e interceptou mineralização de ETR que validou a técnica prospectiva desenvolvida. Além disso, os resultados possibilitaram a contribuição para o detalhamento dos mapas geológicos conhecidos para a escala 1:25.000 e interpretação de estruturas magnéticas rasas e profundas. Os dados petrofísicos permitiram estimar o teor de magnetita nas principais unidades da área de estudo. A delimitação de alvos com o método aplicado se mostrou eficiente, uma vez que o resultado do furo de sonda comprovou sua eficácia com as análises geoquímicas positivas para ETR.

---

**Palavras-chave:** Província Alcalina de Goiás; Complexo Fazenda Buriti; Elementos Terras Raras; Prospecção Geofísica; Magnetometria, Gamaespectrometria; Petrofísica.

**ABSTRACT**

*Mafic-ultramafic intrusions in alkaline provinces are important areas for prospecting for Rare-Earth Elements (REE). The use of statistics and the application of Boolean logic together with geophysical methods and petrophysical measurements correlated to geological information are little used techniques for defining targets in mineral prospecting. In this case study, exploratory techniques were applied for the selection of potential targets for REE, in the Fazenda Buriti Mafic-Ultramafic Complex, in the Goiás Alkaline Province. Mineralization consists of products of hydrothermal alteration that form breccias with REE. The results of processing and interpretation of magnetic and radiometric air data associated with direct measurements of magnetic susceptibility and radiometry in 15 rock samples collected in the study area, allowed the application of Boolean logic to generate a prospective map with the delimitation of two important targets. A 100 m deep exploratory drill hole was drilled at the main target and intercepted REE mineralization which validated the prospective technique developed. In addition, the results made it possible to contribute to the detailing of known geological maps for the 1:25,000 scale, and interpretation of shallow and deep magnetic structures. The petrophysical data allowed estimating the magnetite content in the main units of the study area. The delimitation of targets with the applied method proved to be efficient since the result of the drill hole proved its effectiveness with positive geochemical analyzes for REE.*

**Keywords:** Goiás Alkaline Province; Fazenda Buriti Complex; Rare-Earth Elements; Geophysical prospecting; Magnetometry; Gamma spectrometry; Petrophysics.

---

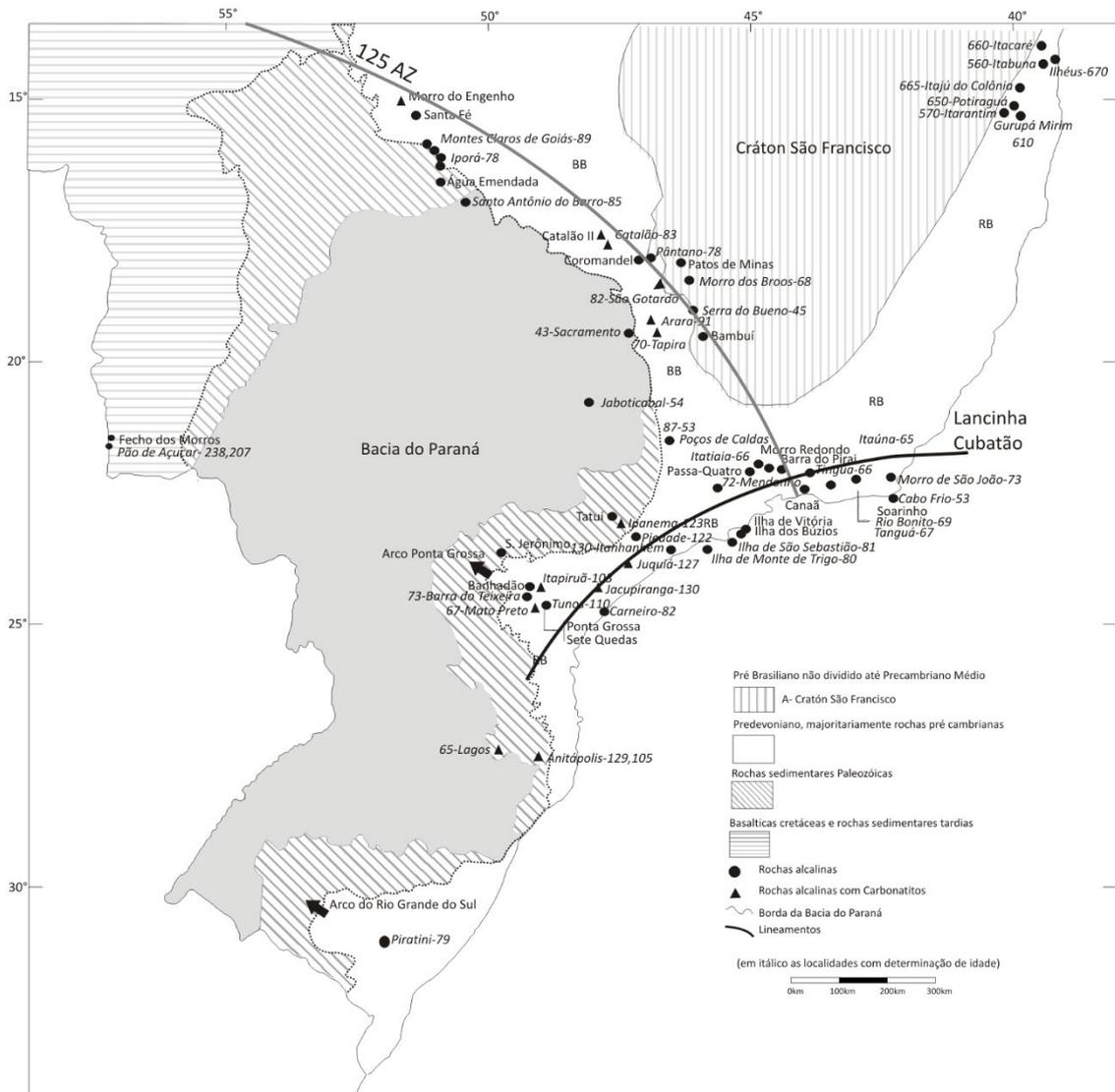
### 3.1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos dos últimos anos reforçam a dependência da sociedade moderna na exploração de novas jazidas de elementos terras raras (ETR), por essa razão, estudos voltados para a descoberta de fontes *greenfield* são fundamentais para suprir as demandas futuras desses metais (CHAKHMOURADIAN; WALL, 2012; VONCKEN, 2016). Os complexos alcalinos do Brasil se destacam como importantes áreas para prospecção de metais, sobretudo para ETR, dadas suas reservas existentes (TAKEHARA *et al.*, 2015).

O magmatismo alcalino que ocorreu ao longo do Cretáceo no evento de abertura do Oceano Atlântico resultou em províncias alcalinas de elevado interesse econômico mineral no Brasil (GIBSON *et al.*, 1995). A Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP) e a Província Alcalina de Goiás (PAGO), localizadas ao longo do Lineamento Az 125 ° (**Figura 5**) são associadas a esse evento (MORAES ROCHA *et al.*, 2014; MORAES ROCHA *et al.*, 2015). De acordo com Sgarbi *et al.* (2004) as idades obtidas de U-Pb em perovskita indicam uma faixa de 75 a 81 Ma para as intrusões destas províncias, com idades de magmatismo ultramáfico mais recente na direção leste ao longo da borda norte da Bacia do Paraná.

Na PIAP ocorrem depósitos e minas em operação (Araxá, Salitre, Tapira, Catalão I e II) relacionados aos complexos alcalino-carbonatíticos na qual ocorrem mineralizações de nióbio, fosfato, terras raras e diamantes em kimberlitos (RIBEIRO, 2008; ARAÚJO, 2015; GOMIDE, 2015). Não obstante, a PAGO possui importantes depósitos de níquel, a exemplo de Morro do Engenho e Santa Fé (RADAELLI, 2000a, 2000b). Pelo seu potencial mineral, a PAGO ainda necessita de estudos de caráter prospectivos.

A PAGO é composta por complexos intrusivos máficos-ultramáficos alcalinos, rochas alcalinas vulcânicas e subvulcânicas amplamente estudadas e descritas em abordagens geofísicas e geológicas (FEITOZA *et al.*, 2011; DUTRA *et al.*, 2014; MORAES ROCHA *et al.*, 2015; MARANGONI *et al.*, 2016). O emprego de metodologias geofísicas em modelagens computacionais tem fornecido informações que ajudam a compreender, por exemplo, a colocação de corpos intrusivos na PAGO (MARTINS; VIDOTTI, 2021). Todavia, os complexos intrusivos desta província carecem de publicações com enfoques na avaliação de potencial mineral como alvo de descobertas de novos bens minerais e jazidas, em especial de ETR.



**Figura 5:** Mapa da parte sul do Brasil com as principais ocorrências de rochas alcalinas. Detalhe para os cinturões de metamórficos representados por BB (Brasília) e RB (Ribeira) (TAKEHARA *et al.*, 2015).

Por conseguinte, este estudo utiliza a interpretação de dados geofísicos aéreos, geológicos e medidas petrofísicas em amostras de rochas para delimitar alvos com uso de estatística e aplicação da lógica booleana para prospecção de ETR. A área de estudo está localizada no Complexo máfico-ultramáfico Fazenda Buriti, na região de Iporá-Goiás. O principal objetivo é contribuir para o desenvolvimento de métodos e técnicas geofísicas aplicadas à prospecção mineral na PAGO.

## 3.2. CONTEXTO GEOLÓGICO

### 3.2.1. Província Tocantins

A região de estudo se situa no arcabouço geotectônico da América do Sul e está inserida na Província Tocantins. Composta por faixas móveis neoproterozoicas, esta província é estruturada pela inversão tectônica das bacias marginais meso-

---

neoproterozoicas quando do Ciclo Brasileiro, contém ainda, núcleos pretéritos mais ou menos retrabalhados ao longo deste ciclo, cerca de 900 – 450 Ma (ALMEIDA; HASUI, 1977; ALMEIDA, 1983; ALMEIDA, 1986; PIMENTEL *et al.*, 1999).

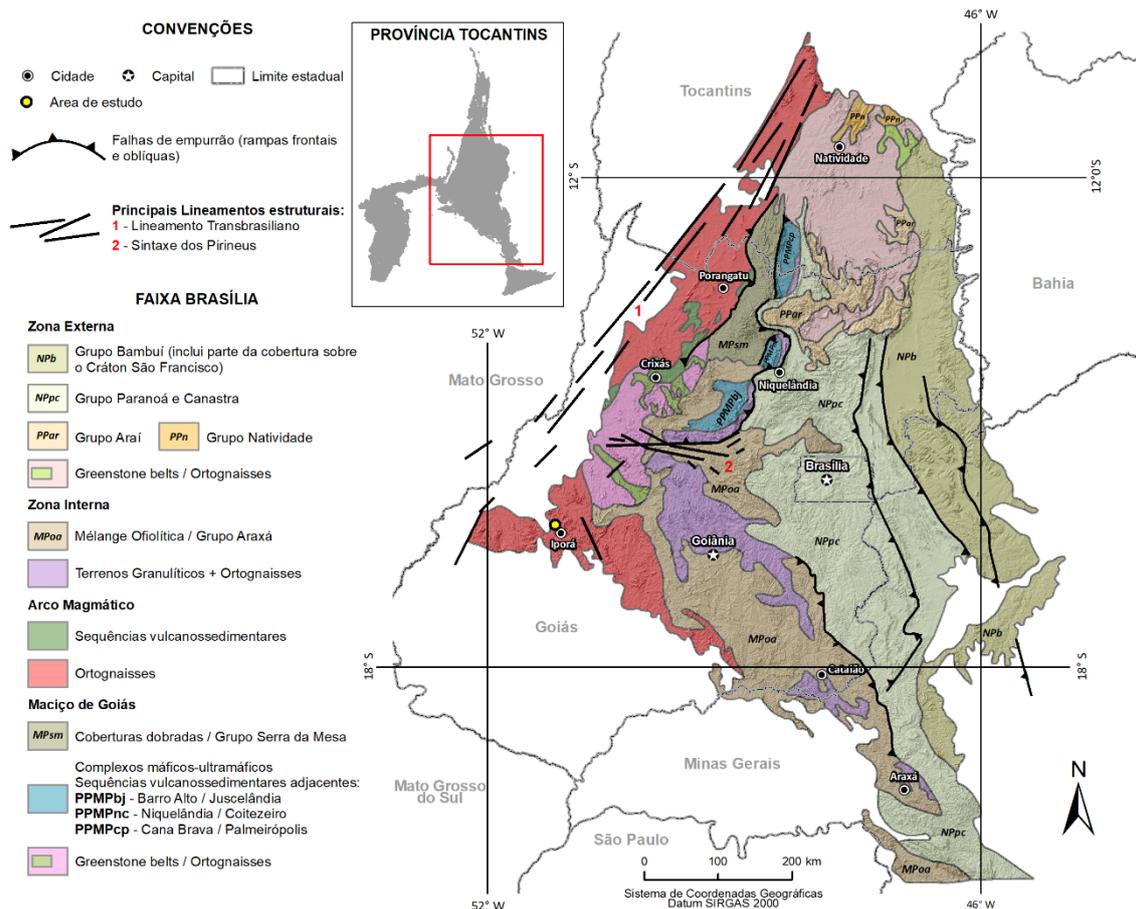
Na Província Tocantins são agrupadas estruturalmente três regiões: a parte central, na qual ocorre o Maciço de Goiás; a parte leste destacadas pelas faixas de dobramentos Uruaçu e Brasília e; na parte oeste a faixa de dobramentos Paraguai-Araguaia (ALMEIDA; HASUI, 1977).

Com destaque para a Faixa Brasília, as faixas móveis neoproterozoicas inseridas na Província Tocantins são formadas, em síntese, por rochas supracrustais vulcano-sedimentares, intrusões graníticas, além de corpos básicos-ultrabásicos subordinados (MOURA, 2007).

### **3.2.2. Faixa Brasília**

A Faixa Brasília consiste em um orógeno Neoproterozoico situado na região central do Brasil (**Figura 6**). Sua formação remonta ao processo de amalgamento durante a convergência dos Crátons Amazonas, São Francisco – Congo e Paranapanema, assim como blocos alóctones de menor dimensão (PIMENTEL, 2016). A Faixa Brasília é parte do sistema orogênico, pertencente a Província Tocantins, que se desenvolve na margem oeste do Cráton São Francisco.

A Faixa Brasília é compartimentada em diversos terrenos geológicos, que reúnem um quadro evolutivo quase homogêneo. De acordo com Fuck *et al.* (1994) a Faixa Brasília pode ser individualizada nos seguintes compartimentos: Zona Externa, constituída de unidades metassedimentares e partes do seu embasamento (Grupo Canastra, Grupo Paranoá, Formação Vazante e Formação Ibiá); Zona Interna, com unidades alóctones de micaxistos e rochas associadas (Grupo Araxá), além de áreas do embasamento; Maciço de Goiás, composto por terrenos granito-greenstone arqueanos, além de terrenos ortognáissicos paleoproterozoicos e pelos Grupos Serra da Mesa e Araxá; Por fim, Arco Magmático de Goiás com terrenos ortognáissicos e sequências vulcano-sedimentares neoproterozoicas. Esta crosta juvenil engloba a área de estudo desta pesquisa, portanto, será descrita a seguir.



**Figura 6:** Geologia do setor centro-leste da Província Tocantins, com destaque para a Faixa Brasília e a área de estudo marcada com um ponto de cor amarela. Adaptado de Pimentel *et al.* (2004) e Moura (2007).

### 3.2.3. Arco Magmático de Goiás

O Arco Magmático de Goiás é apontado como um dos eventos mais significativos de acreção crustal juvenil ao longo da junção do Gondwana, se destaca como uma das unidades tectônicas mais importantes da Faixa Brasília (PIMENTEL, 2016). Com direção principal NNE e centenas de quilômetros de extensão, o Arco Magmático de Goiás é dividido em duas unidades. Sua exposição ao norte é conhecida como Arco Mara Rosa e, ao sul, separado pelo Maciço de Goiás, é chamado de Arco de Arenópolis. Seu desenvolvimento iniciou-se há cerca de 900 Ma na forma de arcos insulares instraocênicos, com fechamento do Oceano Goiás-Farusiano entre 630 e 600 Ma como evento magmático final (PIMENTEL; FUCK, 1992; CORDANI *et al.*, 2013; PIMENTEL, 2016).

De acordo com Pimentel (2016) compõem o Arco Magmático de Goiás sequências supracrustais, que compreendem rochas metavulcânicas cálcio-alcálicas, micaxistos feldspato, quartzitos e mármore. São encontradas unidades de rochas plutônicas cálcio-alcálicas com grau de metamorfismo e deformação variável, sua

---

composição vai de gabros a granitos, com volume extenso de tonalitos. Estas unidades alojaram uma extensa intrusão bimodal granítica pós-tectônica. Dessa forma, a ocorrência de ortognaisses expostos são caracterizadas como metadioritos, metatonalitos e metagranodioritos, na maioria.

Na região de estudo, S-SW do estado de Goiás, ocorrem ainda duas unidades de contextos geológicos diferentes da Província Tocantins: a Bacia do Paraná, com coberturas sedimentares expostas ao longo das bordas da Faixa e a Província Alcalina de Goiás, com rochas vulcânicas, sub-vulcânicas e plutônicas.

#### **3.2.4. Bacia do Paraná**

Na área de estudo são encontrados arenitos das formações Furnas e Ponta Grossa da Bacia do Paraná. Esta unidade sedimentar consiste em uma extensa bacia intracratônica sul-americana, de idades entre o Neo-Ordoviciano e o Neocretáceo e se desenvolveu sobre crosta continental preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas (MOURA, 2007).

Os arenitos são de coloração branca a creme, com granulação média a grossa, friáveis, feldspáticos, caulíníticos e micáceos. São intercalados com níveis secundários de conglomerados, arenitos conglomeráticos, além de siltitos.

Durante o Cretáceo Superior ocorreu nas bordas da bacia um magmatismo alcalino, responsável pela ocorrência de chaminés de rochas ultrabásicas e intermediárias, algumas, na própria bacia (ALMEIDA; HASUI, 1977). No magmatismo ocorrido às bordas da Bacia do Paraná se destaca o que originou a PAGO.

#### **3.2.5. Província Alcalina de Goiás**

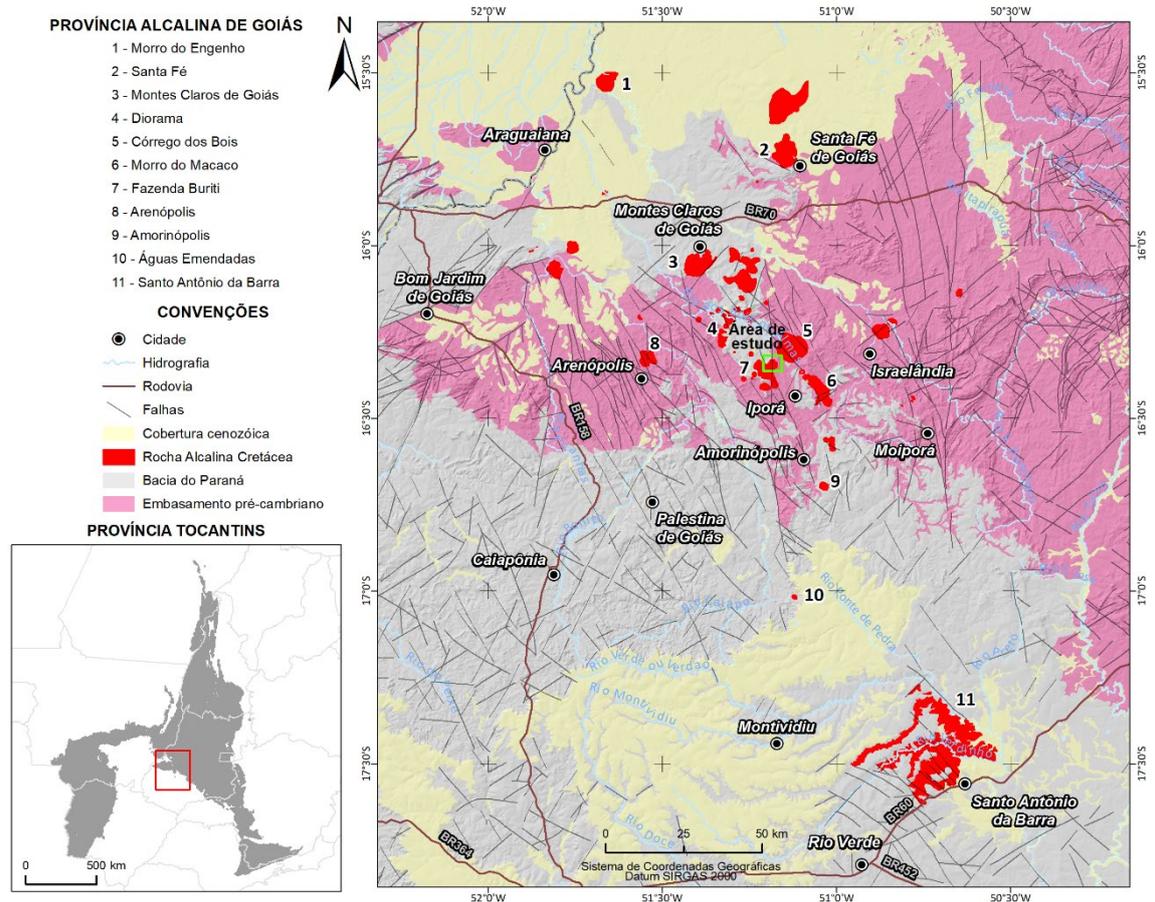
A PAGO está inserida na porção central da Província Tocantins e possui variados tipos litológicos, dentre rochas vulcânicas, sub-vulcânicas e plutônicas (ALMEIDA, 1986; PIMENTEL *et al.*, 1999). Se destaca como uma das unidades tectônicas mais importantes da Faixa Brasília, em virtude da sua importância econômica mineral e pelo seu contexto geológico (PIMENTEL, 2016).

De acordo com Junqueira-Brod *et al.* (2002), a PAGO é composta por onze complexos. Ocorrem complexos plutônicos na porção norte, rochas alcalinas sub-vulcânicas na porção central e rochas vulcânicas na porção sul. Na **Figura 7** os seguintes complexos são representados: Morro do Engenho, Santa Fé, Montes Claros de Goiás,

Diorama, Córrego dos Bois, Morro do Macaco, Fazenda Buriti, Arenópolis, Amarinópolis, Águas Emendadas e Santo Antônio da Barra.

Moura (2007) define sua ocorrência ao longo de um *trend* de direção N30°E de, aproximadamente 250 km, que se estende desde a região de Araguaiana - Santa Fé ao norte de Goiás, passa por Iporá até Santo Antônio da Barra - Rio Verde ao sul.

Dentre as rochas alcalinas da PAGO, que fazem parte da região norte de Iporá-GO, destaca-se como alvo deste estudo o Complexo Alcalino Fazenda Buriti, com cerca de 35 km<sup>2</sup>, composto por clinopiroxenitos, melagabros, sienogabros, olivina sienitos, dunitos, peridotitos, piroxenitos, essexitos, teralitos, gabros alcalinos, nefelina sienitos, fonólitos, traquitos, lamprófiros (JUNQUEIRA-BROD *et al.*, 2002, 2004, 2005; CARLSON *et al.*, 2007; FEITOZA *et al.*, 2011).



**Figura 7:** Província Alcalina de Goiás (PAGO) com a área de estudo marcada com um polígono de cor verde. Localização da PAGO na Província Tocantins. Modificado de Junqueira-Brod *et al.* (2002).

A geologia local está no item 3.4.1, como resultado da compilação das informações de mapeamentos anteriores, informações da interpretação de dados aerogeofísicos e informações disponibilizadas pela empresa 3 S Ltda.

---

### 3.3. MATERIAIS E MÉTODOS

Na elaboração dos produtos geofísicos magnéticos e radiométricos foram utilizados os dados da primeira etapa do Levantamento Aerogeofísico do estado de Goiás (LASA, 2006). Os dados de altimetria são oriundos do modelo digital de elevação, derivado de imagens do sensor *PALSAR*, embarcado no satélite *ALOS* com resolução espacial de 12,5 metros (ASF DAAC, 2014).

A informação geológica foi compilada com base em dados oriundos do levantamento realizado pela empresa 3 S Ltda., na escala 1:20.000 e com o mapa de unidades geofísicas do Complexo Alcalino Fazenda Buriti (FEITOZA, 2011), na escala 1:25.000. O mapeamento realizado pela empresa se deu com linhas na direção Leste-Oeste, com coleta de 60 amostras de rochas para análises geoquímicas, das quais em 15 foram realizadas medidas diretas de suscetibilidade magnética e radiometria.

O programa *Geosoft Oasis Montaj* foi utilizado para tratamento dos dados aéreos de magnetometria e radiometria. As etapas de pré-processamento nos dados aéreos foram realizadas conforme descrito por Lasa (2006). Após a análise dos perfis magnéticos e radiométricos os dados foram interpolados com o algoritmo bidirecional, em malhas regulares com tamanho de célula de 125 metros (IAEA, 2003).

Os dados magnéticos foram utilizados para interpretação de contatos litológicos e estruturas magnéticas. Nos dados de amplitude total do campo magnético (TMI) foi aplicada a correção geomagnética com uso do Campo Geomagnético de Referência Internacional (IGRF) (KEAREY *et al.*, 2002). Nas anomalias magnéticas residuais foram aplicados os filtros das derivadas de primeira ordem  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  (BLUM, 1999). Também foram utilizados os filtros Gradiente Total (GT) para realçar as bordas das anomalias magnéticas (NABIGHIAN, 1972; LI, 2006) e a Inclinação da Amplitude do Gradiente Total (ISA) para realçar as anomalias de menor amplitude (MILLER; SINGH, 1994; ELLIS, 2012).

Para auxílio na interpretação dos lineamentos magnéticos foi utilizada a filtragem de separação de sinais, onde se assume que o campo magnético registrado é o somatório do campo regional, do campo residual e de um componente de ruído (COWAN; COWAN, 1993; COWAN; DENTITH, 2003). A filtragem de separação do campo magnético regional e residual foi realizada com o uso da extensão *matched filter* do programa *Geosoft Oasis Montaj*. O uso da ferramenta favoreceu a classificação dos

---

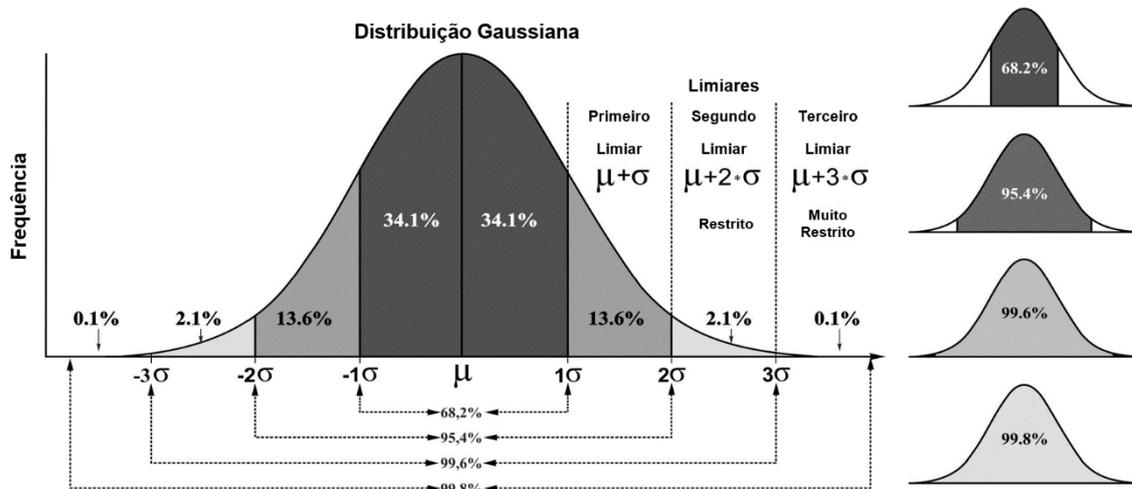
lineamentos mais profundos como de primeira ordem e os mais rasos como de segunda ordem.

Os dados radiométricos foram associados a geologia para fornecer um panorama do comportamento geofísico de cada litologia da área de estudo. Para auxiliar na interpretação foram produzidos mapas de potássio (K), tório (Th), urânio (U), taxa de exposição da contagem total (CT) e composições ternárias em RGB (K, Th e U). As razões Th/K, U/K e U/Th foram calculadas para ressaltar as concentrações relativas destes radioelementos (DENTITH; MUDGE, 2014). Foi estimado o Fator F (Equação 14) para verificar possíveis zonas de alteração hidrotermal (EFIMOV, 1978 *apud* GNOJEK; PŘICHYSTAL, 1985).

$$\text{Fator F} = \frac{KU}{Th} \quad (14)$$

Para delimitação de alvos prospectivos, os canais U, Th e a razão U/Th foram inicialmente considerados temas de entrada no programa *ArcMap*. Em cada tema foram calculados os elementos estatísticos de posição e variabilidade, média aritmética ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ), respectivamente. Ao se considerar os dados de cada tema em uma curva de distribuição gaussiana é possível selecionar as anomalias com uso de limiares. A partir do uso das expressões  $\mu + \sigma$  (primeiro limiar),  $\mu + 2 * \sigma$  (segundo limiar) e  $\mu + 3 * \sigma$  (terceiro limiar) foram calculados limiares anômalos (HAWKES; WEBB, 1962). Dessa maneira, em cada tema o primeiro limiar concentrou 13,6% dos valores anômalos, o segundo limiar 2,1% e o terceiro limiar 0,1%, como pode ser visto na **Figura 8**.

O cálculo do primeiro, segundo e terceiro limiar originou imagens binárias para cada tema. Posteriormente o operador booleano OR foi utilizado sobre os temas para agrupar os limiares primeiro, segundo e terceiro em três camadas de saídas distintas (BONHAM-CARTER, 1994). As camadas de saídas foram sobrepostas em um mapa prospectivo para definição de alvos.



**Figura 8:** Distribuição normal (Gaussiana) e limiares anômalos definidos em função da média aritmética ( $\mu$ ) e do desvio padrão ( $\sigma$ ). A área da curva mostra o percentual que cada limiar representa. Modificado de Salles (2010).

Posteriormente foi realizada a verificação em campo das anomalias apontadas como alvos prospectivos com o mapeamento geológico de superfície, malha geoquímica, realização de furo de sonda em área anômala.

Os testemunhos do furo de sonda foram amostrados com análises geoquímicas para ETR a cada metro, até profundidade de 100 metros. A amostragem geoquímica seguiu o padrão IMS95R – Determinação por fusão com metaborato de lítio – Terras Raras – ICP MS.

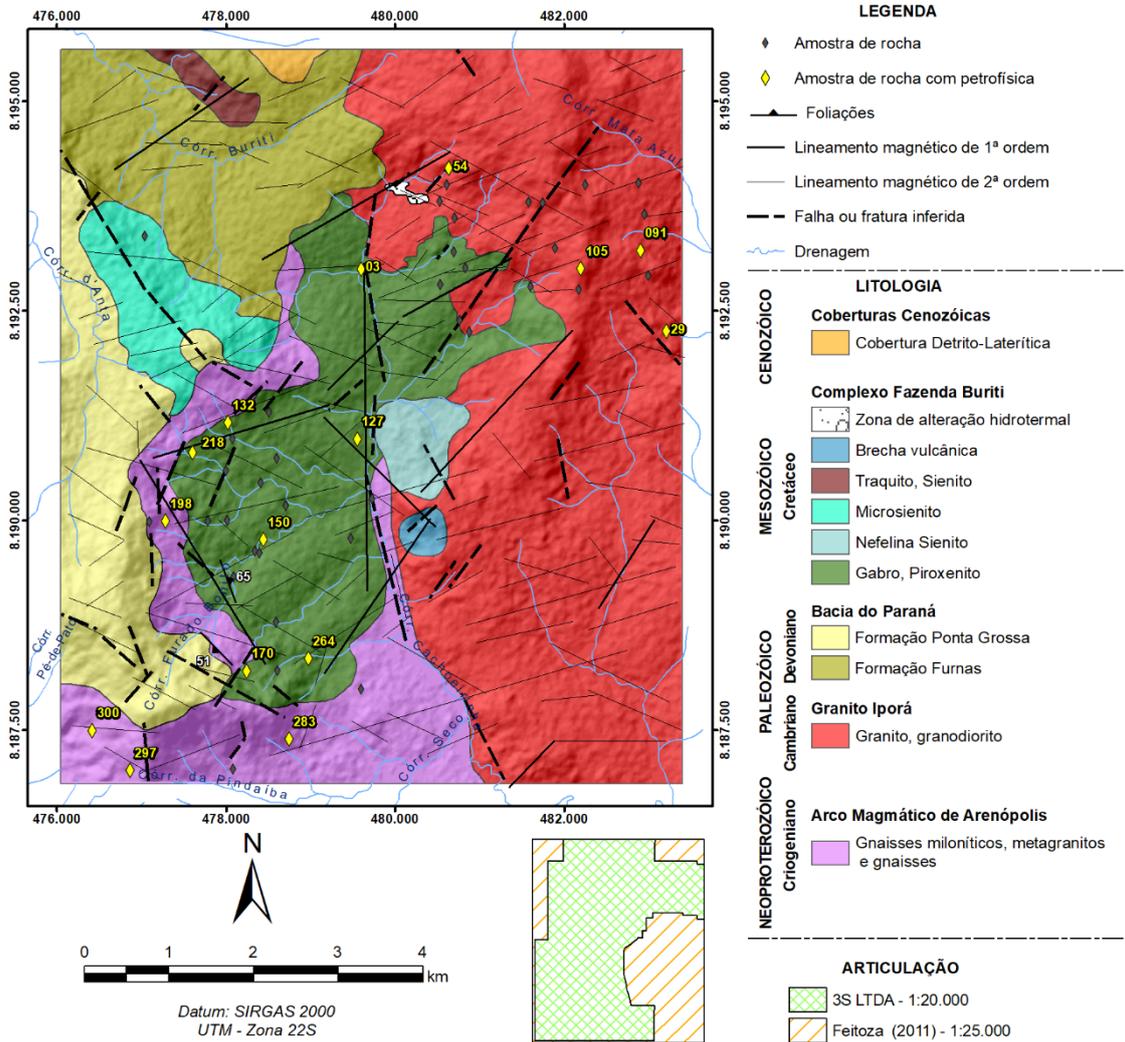
Nas medidas de suscetibilidade magnética realizadas nas amostras de rocha foi utilizado o susceptímetro *KT-20* da empresa *Terraplus*. As medidas foram realizadas com a configuração *Measure Mode*, em que são seguidos três passos: uma leitura ao ar livre; uma leitura na amostra e novamente, uma leitura ao ar livre. Em cada amostragem foram efetuadas três leituras consecutivas no mesmo ponto e a média destas consistiu no valor final de suscetibilidade magnética. As medidas diretas de radiometria nas amostras foram realizadas com o gamaespectrômetro *RS-125 (Radiation Solutions INC)*. O tempo de exposição de cada amostra foi configurado em 120 segundos com o intuito de reduzir as contribuições das radiações de *background* do local.

### 3.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.4.1. Geologia local

A interpretação dos dados radiométricos, magnéticos e das informações geológicas disponíveis, tanto de trabalhos anteriores (CERQUEIRA, 1995; FEITOZA, 2011), quanto dos dados deste estudo possibilitou a confecção de um mapa geológico na escala 1:25.000. As unidades identificadas e suas litologias associadas estão na **Figura 9**,

que correspondem as rochas neoproterozóicas metamórficas sin-tectônicas e rochas ígneas tardi- a pós-tectônicas do Arco Magmático de Arenópolis, sedimentares da Bacia do Paraná e intrusivas plutônicas e subvulcânicas cretáceas da Província Alcalina de Goiás. Em relação ao mapa geológico de Feitoza (2011) a principal contribuição deste trabalho refere-se ao ajuste do contato sul da intrusão plutônica com os gnaisses miloníticos, além da demarcação de uma zona de alteração hidrotermal, com ocorrência de brecha e fragmentos de piroxenitos próximo ao contato norte deste corpo.



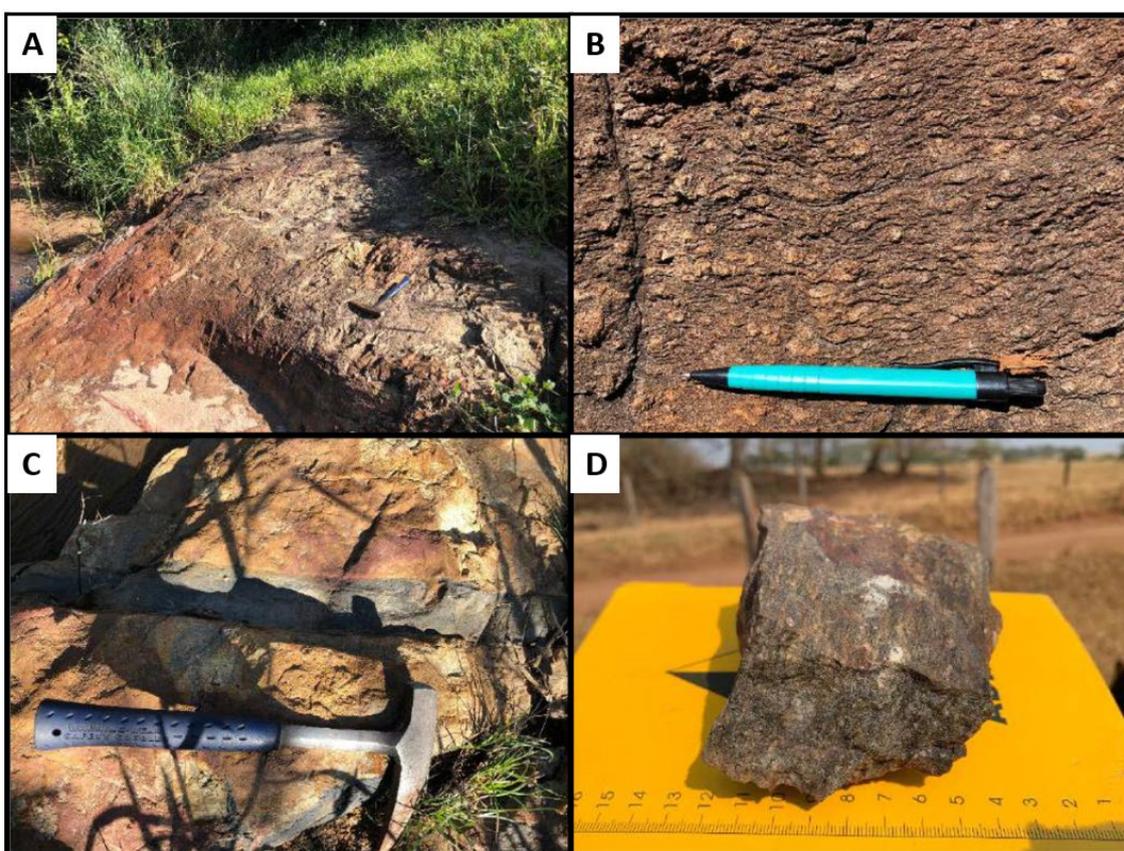
**Figura 9:** Mapa das unidades geofísicas geológicas do Complexo Alcalino Fazenda Buriti. Localização das amostras de rocha coletadas e lineamentos magnéticos interpretados. Articulação das informações utilizadas para produção do mapa.

A unidade mais antiga encontrada na área de estudo corresponde ao Arco Magmático de Arenópolis. Composto por monzogranitos e meta-sienogranitos porfíricos milonitizados. Esta unidade foi datada pelo método Rb-Sr com 688 +/- 35 Ma (SOUZA; GOLLMANN, 2020). A unidade foi intrudida por rochas plutônicas, vulcânicas e subvulcânicas pertencentes a PAGO e recoberta por rochas sedimentares da

---

Formação Furnas. Aflora na porção sudoeste da área de estudo, onde são encontrados gnaisses miloníticos (**Figura 10-D**), metagranitos (**Figura 10-C**) e gnaisses de composição granítica a tonalítica (**Figura 10-A e B**). Os afloramentos ocorrem em lajedos ao longo de drenagens, onde podem ser visualizados matacões e blocos rolados.

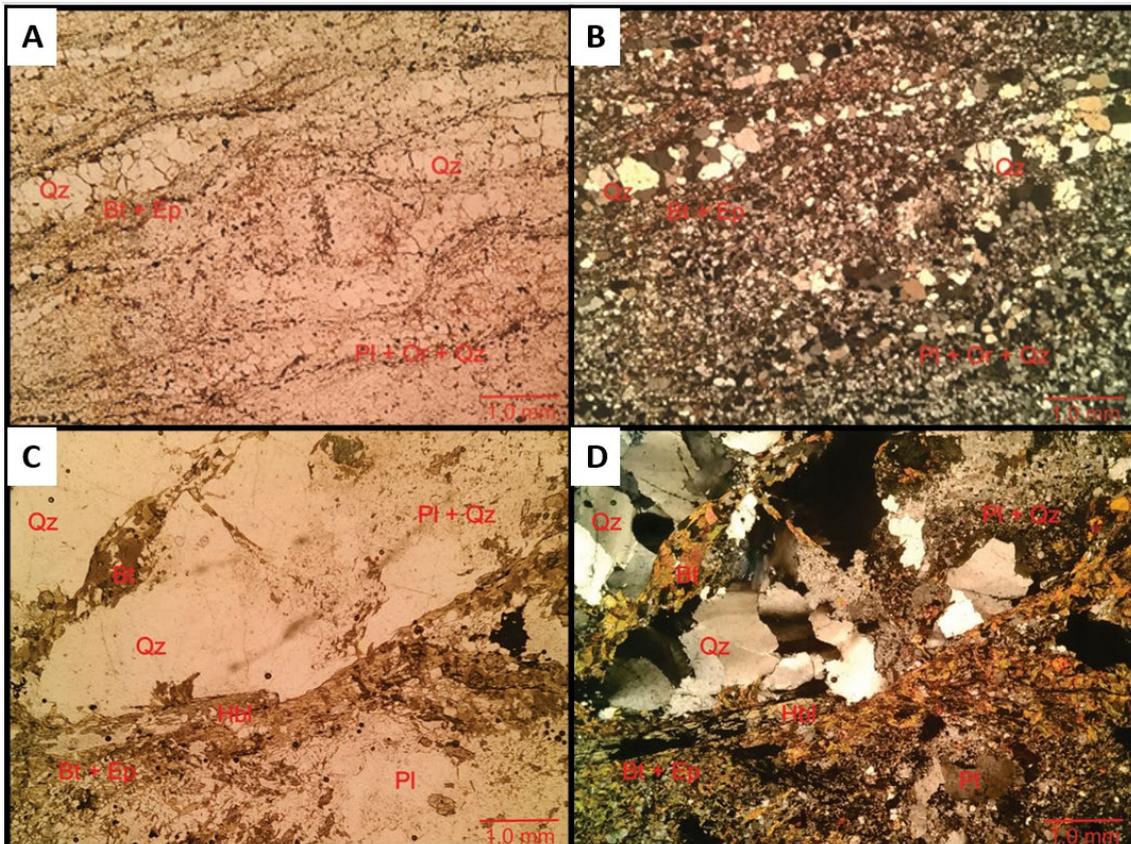
Duas estruturas são comumente encontradas nestas rochas, que indicam fases distintas de deformação. A primeira segue o padrão regional do Arco Magmático de Arenópolis, que indica baixo a médio grau de metamorfismo, com foliação incipiente e pode ocorrer bandamento. Este primeiro padrão tem direção NW-SE com mergulhos entre 50° e 70°. O segundo padrão de estruturas possui deformação cisalhante NNW-SSE, mergulho subvertical, associado a milonitização.



**Figura 10-A:** Afloramento in situ em lajedado às margens de drenagem intermitente com gnaiss granítico; **B:** Porfiroblastos sigmoidais rotacionados de plagioclásio em gnaiss granítico; **C:** Afloramento de metagranito intrudido por dique alcalino máfico centimétrico com direção NW-SE; **D:** Amostra de milonito.

As **Figura 11-A e B** contém a lâmina petrográfica de uma amostra de gnaiss milonítico a ultramilonítico com possível protólito granítico. Constituído por cristais de ortoclásio pertítico (20%), plagioclásio (37%) e quartzo (29%). Completam sua composição modal, cristais diminutos de epidoto (5%) e biotita castanha (7%) em agregados finos orientados segundo a foliação, além de opacos (1%) e apatita (1%), que ocorre junto à biotita.

As **Figura 11-C e D** mostram a lâmina de um gnaiss tonalítico. Composto por cristais tabulares a fortemente estirados de plagioclásio (45%) geminado, tipicamente ígneos, com interstícios preenchidos por quartzo (27%), biotita castanho esverdeada (10%) orientada, hornblenda verde (4%), epidoto (7%) como produto de alteração de plagioclásio, opacos (3%) e como minerais acessórios, allanita (2%), titanita, clorita, apatita e zircão (2%).



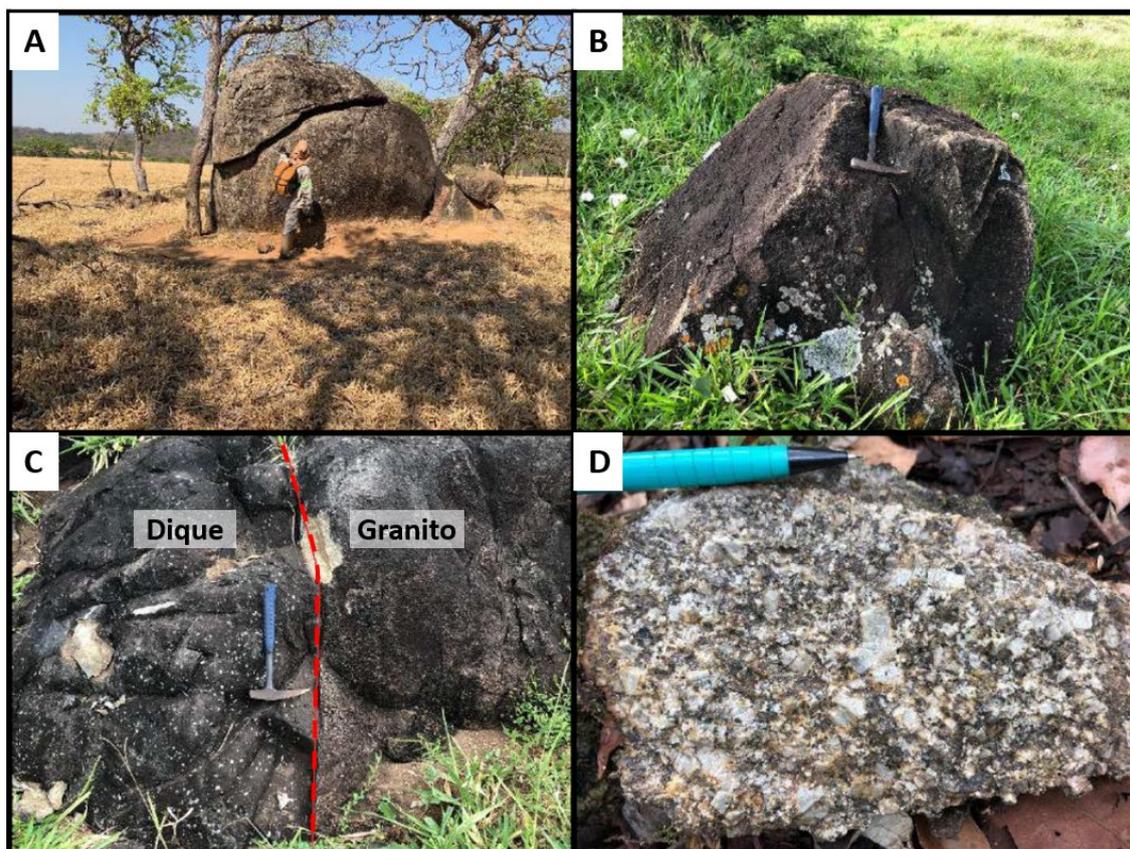
**Figura 11-A:** Gnaiss milonítico em luz plano paralela com aumento de 25X; **B:** Gnaiss milonítico composto por quartzo (Qz), plagioclásio (Pl), ortoclásio (Or), biotita (Bt), epidoto (Ep) e opacos. Aumento de 25x em polarizadores cruzados; **C:** Gnaiss tonalítico visto em microscópio de luz transmitida em polarizadores paralelos e aumento de 25X; **D:** Mesma seção delgada de C, com gnaiss tonalítico composto por cristais estirados de plagioclásio e quartzo, contornados por associações de biotita e hornblenda orientados. Aumento de 25x com polarizadores cruzados.

O Granito Iporá corresponde a blocos, matacões, afloramentos em lajedos métricos a decamétricos ao longo de pastos e drenagens (**Figura 12-A e B**), em áreas elevadas com feições do tipo morrotes arredondados. Caracterizado como biotita granitos, granodioritos e quartzo sienitos sem ou com pouca deformação. Diques alcalinos centimétricos intrudem ocasionalmente essas rochas (**Figura 12-C**).

As rochas do Granito Iporá são compostas por variáveis conteúdos de quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, biotita, hornblenda, magnetita e minerais acessórios. De textura granular, na qual podem ocorrer tramas equigranulares que variam de granulação

---

fina a grossa e, ainda, textura porfirítica com cristais de feldspato potássico de alguns centímetros de comprimento (**Figura 12-D**).



**Figura 12-A e B:** Matacões decamétrico e métrico, respectivamente de rocha granítica. **C:** Afloramento de granito com intrusão de dique alcalino máfico porfirítico; **D:** Amostra de mão de granito com textura porfirítica composta por fenocristais muito grossos de feldspato potássico inseridos em matriz equigranular com quartzo, plagioclásio, biotita e magnetita.

Como pode ser visto na **Figura 9** a parte oeste da área é caracterizada pela ocorrência de arenitos da Bacia do Paraná (formações Furnas e Ponta Grossa), que recobrem na maioria as rochas do Arco Magmático de Arenópolis e do Granito Iporá na área de estudo. Todavia são intrudidas pelas rochas plutônicas e subvulcânicas da PAGO.

Os arenitos ocorrem como blocos e matacões de dimensões centimétricas a decamétricas e, em poucas ocorrências, como afloramentos em encostas e drenagens (**Figura 13-A e B**). As litologias são caracterizadas por arenitos de coloração creme, bege a arroxeadado, granulometria com variação de fina a média (**Figura 13-D**), e algumas porções mal selecionadas. Sua composição consiste em quartzo, micas, feldspatos, argilominerais e óxidos de ferro. É possível observar, em alguns pontos, níveis conglomeráticos com ocorrência de grãos imaturos de quartzo e estruturas sedimentares primárias tipo acamamento plano paralelo e estratificações cruzadas (**Figura 13-C**). Podem ocorrer, ainda, arenitos ferruginosos com cores arroxeadas.



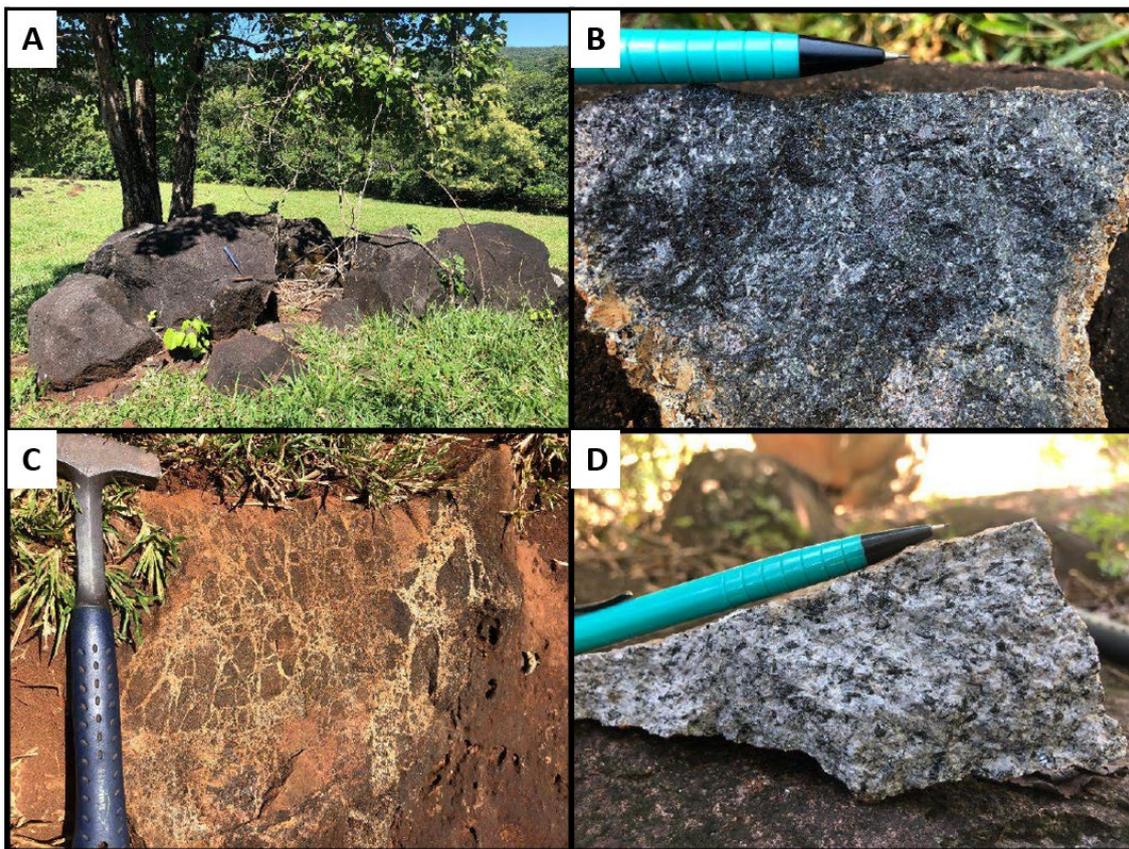
**Figura 13:** Formação Furnas. **A:** Afloramento decamétrico de arenito. **B:** Matações de arenito. **C:** Acamamento plano-paralelo. **D:** Amostra de arenito bem selecionado com granulometria fina.

Os litotipos pertencentes a PAGO ocorrem como intrusões plutônicas e subvulcânicas com litologias e dimensões diferenciadas. Esta província se distingue, na área de estudo, como a intrusão plutônica Fazenda Buriti, que corresponde predominantemente aos gabros, piroxenitos e sienitos na região central, rochas subvulcânicas na forma de *sills* com cerca de 2 a 5 km de extensão a noroeste, que consiste em microsienitos e traquitos. Ao longo da área ocorrem, ainda, diques alcalinos de dimensões centimétricas a dezenas de metros, com grande variedade composicional e textural.

O Complexo Alcalino Fazenda Buriti se estende em uma área de aproximadamente 35 km<sup>2</sup> com rochas alcalinas intrusivas. São encontrados clinopiroxenitos, melagabros, sieno-gabros, olivina sienitos, dunitos, peridotitos, piroxenitos, essexitos, teralitos, gabros alcalinos, nefelina sienitos (FEITOZA, 2011), além da brecha alcalina hidrotermal com fragmentos de piroxenitos.

As rochas do complexo ocorrem como blocos e matações centimétricos a decamétricos, de coloração escura, de granulação grossa a muito grossa, com algumas ocorrências de porções finas (**Figura 14-A**). Macroscopicamente predomina nas rochas a coloração escura, com textura mesocumulática a ortocumulática. Possuem granulação

grossa, que pode chegar a muito grossa, com porções finas (**Figura 14-B**). São compostas por clinopiroxênio, plagioclásio como fração intercumulus, não contém fácies bem definidas. Ocorre magnetita com granulação grossa, subédrica, oxidada, olivina fina, anfibólio, feldspato alcalino, e por vezes, feldspatóides (nefelina).

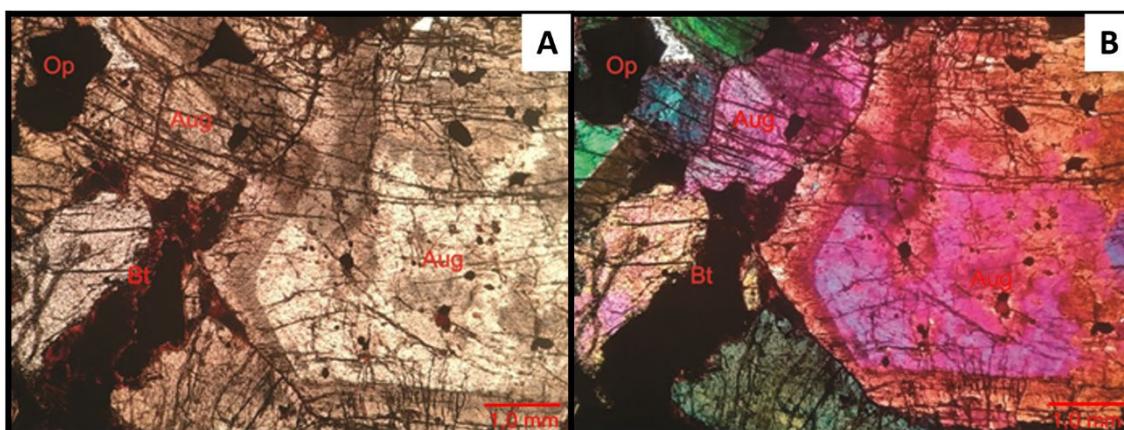


**Figura 14-A:** Afloramento e blocos métricos de gabro alcalino no pasto; **B:** amostra de piroxenito com granulação média composto essencialmente por clinopiroxênio, magnetita, olivina e plagioclásio; **C:** afloramento com brecha alcalina formada por fragmentos de piroxenito/gabro e matriz sienítica; **D:** amostra de sienito encontrada em "bolsão" decamétrico em meio ao gabro alcalino.

Ocorrem piroxenitos, com ou sem olivina, gabros alcalinos e nefelina sienitos. Os afloramentos são métricos com acamamento ígneo, no qual cristais cumuláticos grossos de piroxênio estão dispostos em camadas plano-paralelas de espessura decimétrica. Em menor volume os sienitos ocorrem como “bolsões félsicos” dispersos entre as rochas máficas (**Figura 14-D**).

A brecha alcalina hidrotermal ocorre com fragmentos de piroxenitos dispersos em uma matriz sienítica, que variam de centímetros a metros. No furo de sonda que interceptou a brecha foi possível constatar a presença das alterações hidrotermais, sobretudo potassificação, carbonatação e sulfetação. Ocorre cloritização, que altera os minerais máficos como piroxênio, anfibólio e biotita (**Figura 14-C**).

A descrição macroscópica caracteriza uma rocha escura constituída por cristais zonados de piroxênio (titanoaugita), em torno de 1 cm, com cristais menores de magnetita, pirrotita e sulfetos disseminados. A composição modal tem 81% de Augita (titanoaugita); 11% de minerais opacos (11 % de magnetita e traços de pirita), 4% de óxidos Fe/Ti; 2 % de biotita; 1% de apatita, 1% de carbonato e traços de zeólita (**Figura 15**).

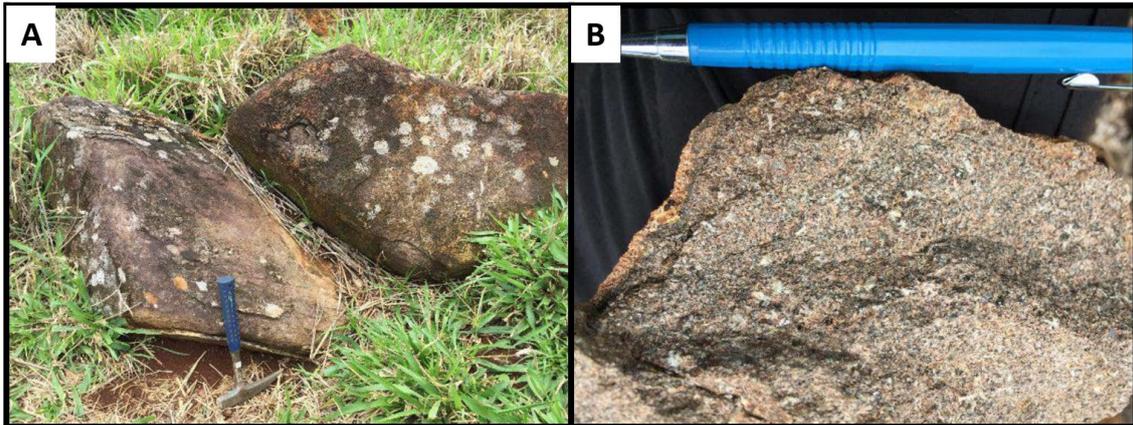


**Figura 15-A:** Piroxenito formado por fenocristais fraturados e zonados de augita, biotita e minerais opacos nos interstícios e como inclusões. Aumento de 25X com polarizadores paralelos; **B:** Mesma seção delgada de A, porém com polarizadores cruzados.

O corpo subvulcânico que ocorre a oeste da área de estudo é definido como um microsienito de coloração acinzentada, com textura equigranular a porfirítica, que intrude os arenitos da Formação Furnas (**Figura 16-A e B**). O microsienito é composto por fenocristais de feldspato potássico, plagioclásio e piroxênio. Possui granulação que varia de fina a média em uma matriz com biotita, óxidos e quartzo.

A noroeste são encontrados traquitos de coloração cinza-claro a escuro, que cortam os arenitos. As dimensões dos corpos variam de centímetros a dezenas de metros. De textura porfirítica, tem em sua composição fenocristais euédricos de feldspato e piroxênio, com biotita intersticial de granulação fina a média em matriz fina a muito fina.

Os diques de dimensões centimétricas a decamétricas são encontrados em meio as litologias da área de estudo. De coloração acinzentada, possuem textura porfirítica com fenocristais que variam de finos a grossos em uma matriz muito fina a afanítica. Em sua composição são encontrados feldspatos (plagioclásio e/ou feldspato potássico), anfíbios, piroxênios, magnetitas, biotitas e carbonatos.



**Figura 16-A:** Blocos de microsienito; **B:** Amostra de microsienito porfírico com coloração acinzentada.

Desta maneira, em ordem cronológica, ocorrem na área de estudo: **(I)** seqüências vulcano-sedimentares neoproterozóicas desenvolvidas em ambiente de arco magmático, que posteriormente foram metamorfizadas e deformadas, Arco Mágmatco de Arenópolis. **(II)** Evento magmático tardio pós-colisional, que resultou na colocação do Granito Iporá. **(III)** Período de pouca atividade tectônica, que se caracteriza por coberturas sedimentares, com idade Siluriano-Devoniano, Formação Furnas e Formação Ponta Grossa da Bacia do Paraná. Por fim, **(IV)** o magmatismo alcalino que intruiu as unidades já citadas acima e deu origem a Província Alcalina de Goiás no Cretáceo.

### 3.4.2. Petrofísica

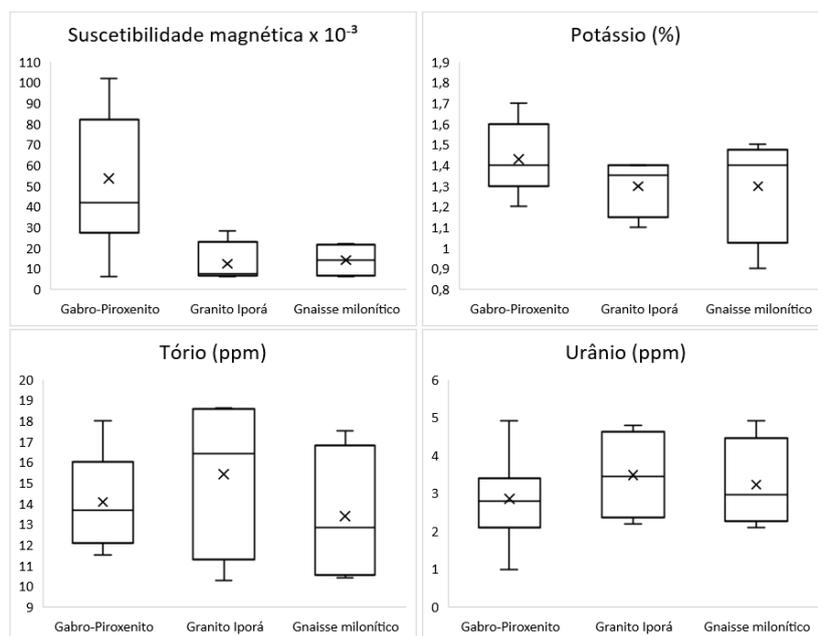
As leituras petrofísicas nas amostras de rochas foram avaliadas para as unidades Gnaisse milonítico (GM), Granito Iporá (GI) e Gabro-Piroxenito (GP), uma vez que nessas litologias a quantidade de amostras lidas permitiu realizar comparações. Foram realizadas leituras em quatro amostras do GM, quatro amostras do GI e sete amostras do GP.

Como pode ser visto na **Figura 17**, os valores mínimos de suscetibilidade magnética registrada ficaram bem próximos para as três unidades (6,3-GM; 6,4-GI; 6,2-GP). Já os valores máximos ressaltam o contraste entre os GP e as demais unidades (22,03-GM; 28,17-GI; 102-GP). Contudo, a variabilidade dos GP se mostrou alta, reforçada pelo número maior de leituras em relação as outras unidades, o que sugere variação no teor de magnetita. Os valores médios encontrados (14,2-GM; 12,4-GI; 53,5-GP) podem ser utilizados para realizar uma aproximação da porcentagem do volume de magnetita ( $V_m$ ) nessas rochas, conforme Reeves (2005) estabelece na Equação 15. O conteúdo médio do  $V_m$  encontrado é de 0,43%-GM; 0,38%-GI e 1,62%-GP.

$$\kappa = 33V_m 10^{-3} \text{ SI} \quad (15)$$

A análise estatística das medidas de susceptibilidade magnética caracteriza com exatidão as assinaturas petrofísicas do contraste entre as unidades encaixantes com predomínio de gnaisses e granitos, da intrusão máfica-ultramáfica alcalina com predomínio de gabros e piroxenitos magnéticos. Tanto as médias e medianas, quanto o envelope de 25 a 75% dos dados corroboram o contraste entre as unidades.

O conteúdo médio dos radioelementos registrado diretamente nas amostras dos GP se aproximou do esperado para rochas máficas e ultramáficas (1,4-K; 14,1-Th; 2,9-U) e se manteve dentro da faixa das concentrações registradas nos dados aéreos. Conforme Dentith e Mudge (2014) o conteúdo dos radioelementos é extremamente baixo nas rochas máficas e ultramáficas, entretanto U e Th podem ocorrer como substituição nos feldspatos ou piroxênios, por exemplo. com algumas dezenas de ppm. As concentrações médias registradas para o GI (1,3-K; 15,4-Th; 3,5-U) e para o GM (1,5-K; 13,4-Th; 3,2-U) seguiram conforme o esperado para essas litologias, contudo as rochas do GI possuem concentrações mais elevadas de Th e média de U mais elevada.



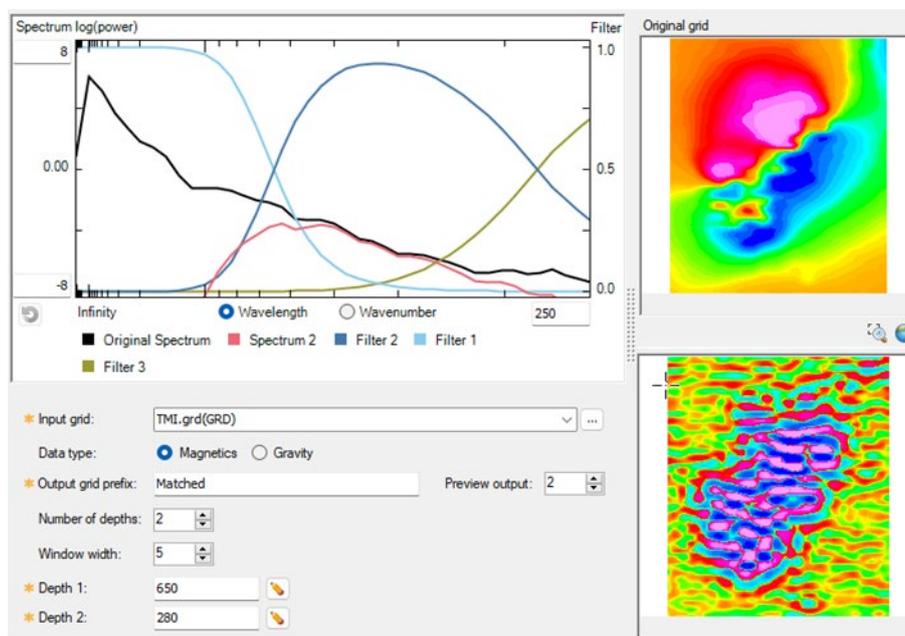
**Figura 17:** Diagrama de caixa para os dados petrofísicos de susceptibilidade magnética e radioelementos Potássio, Tório e Urânio registrados nas amostras de rocha.

### 3.4.3. Magnetometria aérea

A filtragem de separação do campo magnético regional e residual favoreceu a interpretação das estruturas magnéticas na área de estudo. O filtro enfatizou o conteúdo de frequência dos sinais correspondente a profundidade de cada campo magnético no modelo (**Figura 18**).

Os lineamentos de primeira ordem, interpretados na camada de dados correspondente ao campo regional, alcançaram profundidades estimadas de fonte de 650 metros e os lineamentos de segunda ordem, interpretados na camada de dados do campo residual, profundidades estimadas de fonte de 280 metros (**Figura 18**).

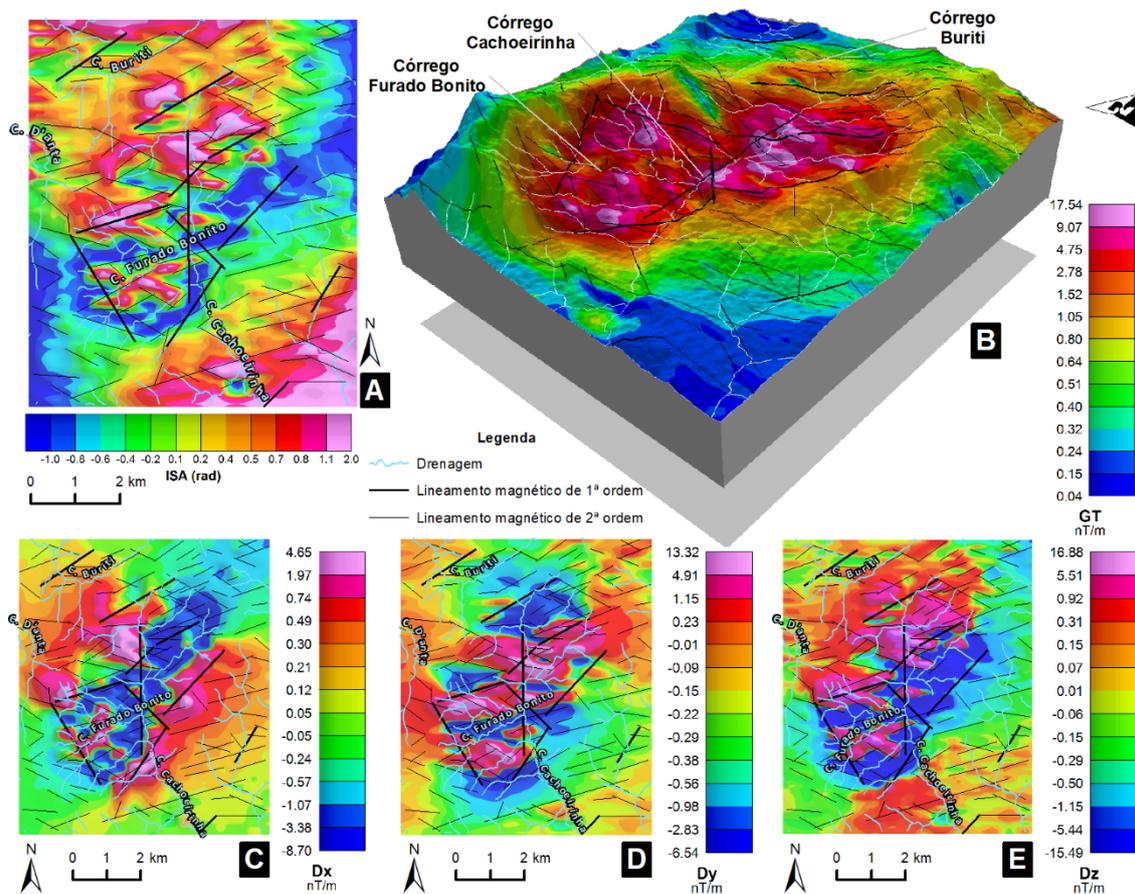
As profundidades das fontes se aproximam dos valores encontrados por Feitoza (2011) para fontes intermediárias (400 m) e fontes rasas (250 m). Entretanto, as diferenças nos valores das estruturas intermediárias e os lineamentos de primeira ordem podem estar relacionados ao fato de que na avaliação de Feitoza (2011) uma área maior foi modelada (80 km x 105 km), o que resultaria na sobreposição de maiores comprimentos de ondas no sinal e estruturas mais profundas. A **Figura 19** mostra os lineamentos magnéticos interpretados com filtro de separação de bandas. Os lineamentos mais profundos ao centro da área de estudo sugerem relação com as bordas da intrusão Fazenda Buriti.



**Figura 18:** Filtro de separação que enfatiza o conteúdo de frequência de sinal correspondente a profundidade de ajuste ao espectro (dimensões da área modelada: 7,3 por 8,5 km).

Os mapas de ISA, Dx, Dy e Dz foram utilizados para realçar a interpretação dos lineamentos magnéticos (**Figura 19**). No mapa de ISA (**Figura 19-A**) e de Dx (**Figura 19-C**) nota-se um lineamento N-S que corta toda a extensão do corpo magnético, que está associado a uma estrutura que controla o córrego Cachoerinha. Os lineamentos de direção NE estão associados as estruturas que são as zonas de fraquezas do relevo bem marcadas pelos córregos Buriti e Furado Bonito. Os lineamentos de direção NW também estão bem evidenciados pelas drenagens na área de estudo.

Os lineamentos de primeira e segunda ordem têm direções principais EW e NE, consoante as estruturas mapeadas da bibliografia da área (CERQUEIRA, 1995; FEITOZA, 2011; MARTINS, 2021). Nos produtos ISA (**Figura 19-A**) e derivadas  $D_y$  (**Figura 19-D**) e  $D_z$  (**Figura 19-E**) fica evidente o padrão direcional dessas estruturas, além de possíveis quebras associadas as bordas da intrusão alcalina. A  $D_y$  ressalta as estruturas EW e NE com maior detalhe, conforme visto na **Figura 19-D**. Na  $D_z$  (**Figura 19-E**) é possível identificar as altas frequências que indicam a existência de corpos magnéticos mais rasos aflorantes fragmentados ao longo da intrusão alcalina.



**Figura 19:** Mapas magnéticos, lineamentos magnéticos interpretados e drenagens; **A:** Inclinação do Sinal Analítico (ISA); **B:** Bloco diagrama com 3,5 de exagero vertical, com o Gradiente Total (GT) associado às elevações; **C:** Primeira derivada horizontal na direção x ( $D_x$ ); **D:** Primeira derivada horizontal na direção y ( $D_y$ ); **E:** Primeira derivada vertical ( $D_z$ ). Altimetria: *ALOS-PALSAR* (ASF DAAC, 2014).

O bloco diagrama da **Figura 19-B** mostra o GT associado as elevações, drenagens e lineamentos interpretados na área de estudo. Na figura notam-se as bordas NE e SW de relevo mais elevadas em relação à intrusão, que estão associadas as rochas encaixantes do Granito Iporá e dos gnaisses, nesta ordem (FEITOZA, 2011). Os contrastes magnéticos entre as unidades ficam evidentes, com destaque para as rochas gabróicas, ao centro da área, com média de 5,5 nT/m e picos de 17 nT/m. A resposta indica o esperado para rochas com alto teor de Fe em sua composição, embora esse elemento possa ser

---

dividido em minerais de silicato não magnéticos como as olivinas, piroxênios e anfibólios nas rochas máficas e ultramáficas (ISLES; RANKIN, 2013).

#### **3.4.4. Gamaespectrometria aérea**

A **Tabela 1** mostra os valores mínimos e máximos de cada litologia na área de estudo, além dos valores médios de cada radioelemento extraídos de suas respectivas malhas regulares. Os valores médios das concentrações diferem dos valores registrados na petrofísica, todavia é necessário um número maior de leituras diretas em amostras de rochas de maior distribuição espacial para caracterizar essas unidades. Contudo, os valores retirados nas malhas ajudam a indicar concentrações médias de K, Th, U e das taxas de exposição da CT para os tipos de rochas em evidência como um primeiro passo na caracterização dessas unidades.

As variações entre os valores mínimos e máximos em uma mesma litologia ocorrem devido aos processos de intemperismo e pedogênese que alteram as concentrações da rocha de origem, o que pode ocasionar perda ou enriquecimento dos radioelementos (DICKSON; SCOTT, 1997). Nos locais em que a rocha aflora na superfície, as concentrações estão mais próximas dos valores originais da matriz rochosa.

Os menores valores de médias dos radioelementos estão associados aos gabros e piroxenitos da intrusão alcalina em razão de sua composição máfica-ultramáfica ferro-magnésiana a cálcica. Os valores médios dos radioelementos do arenito da Formação Furnas também são baixos devido à composição abundante em quartzo. As coberturas detrito-lateríticas tem valores médios intermediários devido às concentrações supergênicas por processos intempéricos.

As rochas ígneas, traquito, sienito, microsienito; e metamórficas do gnaiss milonítico tem valores mais altos de K por efeito da presença do feldspato potássico em suas composições. As rochas intrusivas nefelina sienito e granito tem altos valores de médias das contagens devido as suas composições félsicas com maiores concentrações de CT, K, Th e U.

Os maiores valores médios das concentrações estão associados a brecha vulcânica e a zona de alteração hidrotermal. No caso da zona de alteração hidrotermal, esses valores sugerem que os processos de alteração por fluidos enriqueceram as concentrações de K, Th, U. Estes processos hidrotermais podem ser a fonte das mineralizações de ETR e marcam as assinaturas radiométricas na área de estudo.

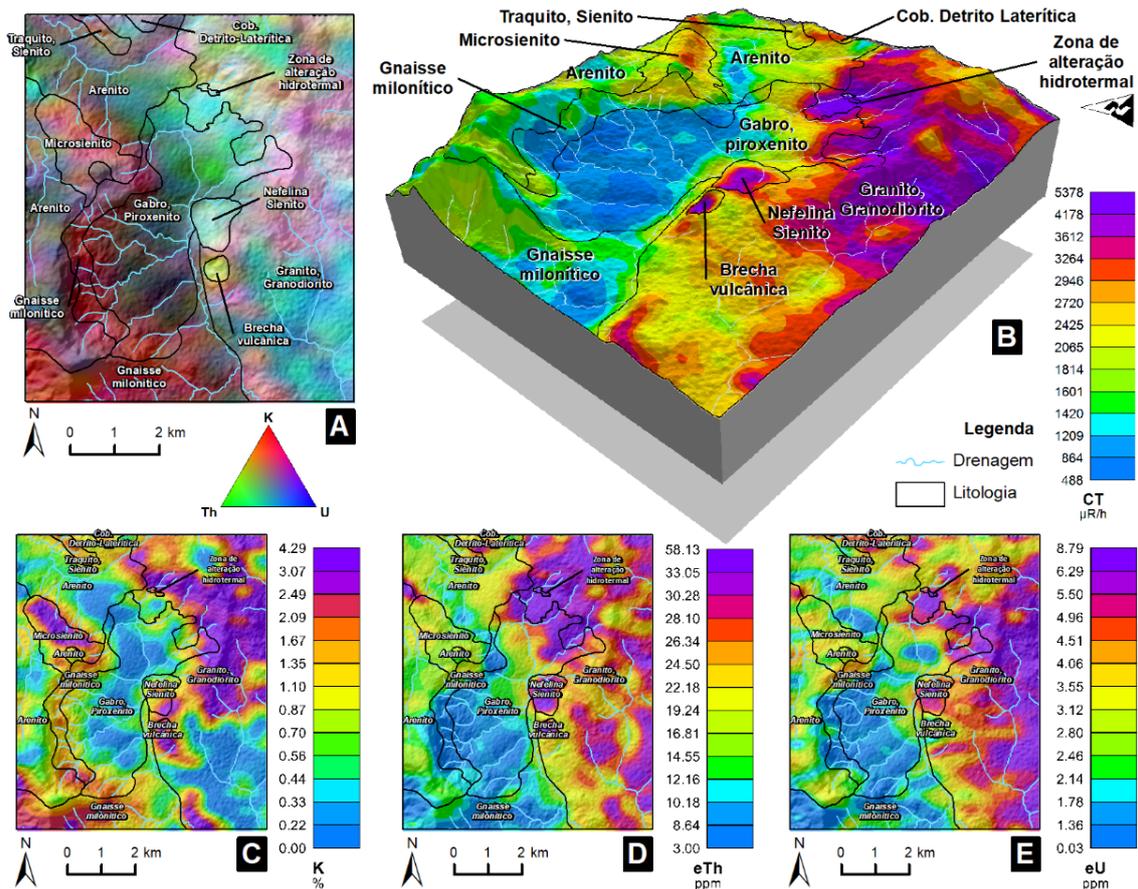
**Tabela 1:** Valores mínimos (Min), máximos (Max) e médios ( $\mu$ ) dos radioelementos Potássio (K), Tório (Th), Urânio (U) e da taxa de exposição da Contagem Total (CT) para cada tipo de rocha na área de estudo, extraídos dos dados aéreos. Os valores de médias estão marcados com cores quentes para valores mais altos até cores frias para valores mais baixos relativamente.

Litologia	K (%)			Th (ppm)			U (ppm)			CT ( $\mu$ R/h)		
	Min	Max	$\mu$	Min	Max	$\mu$	Min	Max	$\mu$	Min	Max	$\mu$
Arenito	0,04	3,2	0,8	6	40	17	0,8	5,8	2,8	1.113	3.927	1.791
Traquito, Sienito	0,9	2,0	1,5	17	26	20	2,1	4,7	3,0	2.000	2.798	2.272
Cob. Detrito-Laterítica	0,9	1,7	1,2	18	28	24	3,7	5,5	4,8	1.935	3.243	2.827
Microsienito	0,4	3,8	2,1	10	30	18	1,8	4,3	3,0	1.342	3.064	2.389
Gabro, Piroxenito	0,01	3,9	0,6	3	49	16	0,5	6,9	2,5	488	4.287	1.592
Nefelina Sienito	0,4	3,1	1,4	18	41	32	2,3	6,5	5,0	1.689	4.281	3.318
Granito Iporá	0,02	4,3	1,7	15	58	28	1,7	8,8	5,0	1.446	5.083	3.159
Gnaise milonítico	0,2	2,8	1,4	3	28	11	0,0	4,9	1,9	623	2.681	1.500
Brecha vulcânica	1,8	3,0	2,4	22	50	35	2,0	3,2	2,6	2.381	5.246	3.477
Zona de alteração hidrotermal	1,8	2,6	2,2	46	53	50	4,0	6,4	5,3	4.363	5.378	4.943

A **Figura 20-A** correlaciona os contornos litológicos e o mapa ternário na composição RGB (K, Th e U), sobreposto ao modelo sombreado do relevo. Nesta figura é possível observar os contrastes das cores entre os tipos de rochas félsicas e máficas-ultramáficas na área de estudo. Nas rochas félsicas do Granito Iporá, as cores mais claras indicam maior concentração dos radioelementos, sobretudo nas áreas mais elevadas, onde estas rochas afloram. Nas regiões de encosta e baixa topografia desta litologia na porção SE da área, o K é lixiviado, o que diminui a concentração deste radioelemento. Nas rochas máficas-ultramáficas que compõe o complexo Fazenda Buriti os radioelementos tem baixa concentração, o que favorece a identificação de rochas como os gabros e os piroxenitos em cores escuras.

O bloco diagrama da **Figura 20-B** mostra as taxas de exposição da Contagem Total (CT) com as elevações e os contornos litológicos com a finalidade de, somente, caracterizar as unidades da área de estudo. É possível constatar as altas taxas de exposição da CT nos locais onde o Granito Iporá aflora e na ocorrência do corpo nefelina sienito, conforme o esperado para as composições félsicas destas rochas e pela localização em regiões de relevo elevado, onde há pouco desenvolvimento de regolito com respostas mais diretas das rochas (WILFORD *et al.*, 1997). Os gabros e piroxenitos, com taxas de CT médias de 1592  $\mu$ R/h se destacam pelos baixos valores que ajudam a definir seus

contatos que estão bem correlacionados com os baixos topográficos. O traquito, sienito e microsienito estão bem marcados por taxas de exposição médias a altas de CT.



**Figura 20:** Mapas radiométricos, contatos litológicos e drenagens; **A:** Imagem ternária RGB (K-Th-U); **B:** Bloco diagrama com 3,5 de exagero vertical, com as taxas de exposição da Contagem Total (CT) associadas às elevações; **C:** Concentrações de potássio (K); **D:** Concentrações de tório (Th) e; **E:** Concentrações de urânio (U). Altimetria: ALOS-PALSAR (ASF DAAC, 2014).

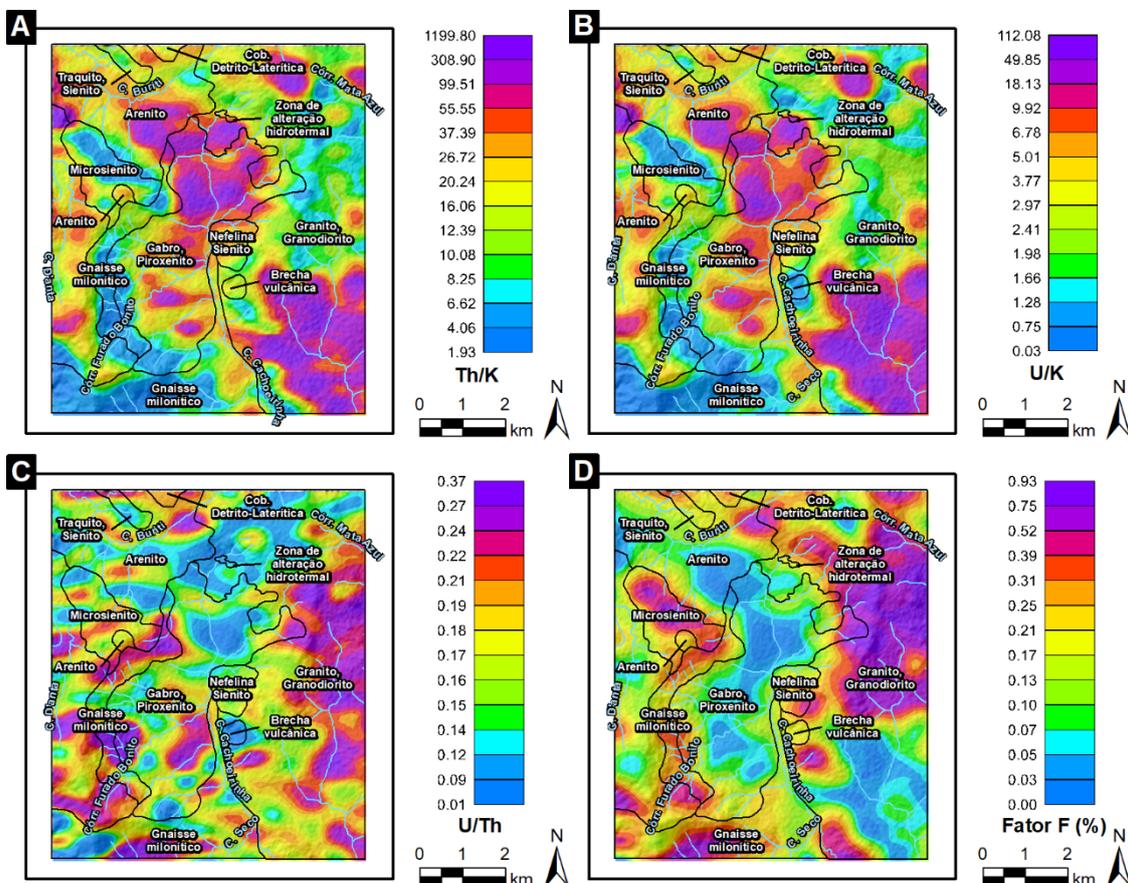
A **Figura 20-C** mostra a distribuição do potássio (K) junto aos contatos litológicos. Os gabros e piroxenitos estão bem marcados com baixas contagens e mostram uma assinatura de potássio com valores médios de 0,6%, conforme a **Tabela 1**. As abundâncias mais elevadas de K são observadas no microsienito e nos afloramentos do Granito Iporá, onde a composição félsica tem significativa influência nas concentrações de K, Th e U (DENTITH; MUDGE, 2014). O traquito, sienito, nefelina sienito e gnaisse tem valores intermediários de K devido à presença de feldspato potássico.

O Th, representado na **Figura 20-D**, com os contatos geológicos, mostra um enriquecimento das concentrações da zona de alteração hidrotermal, na qual os valores médios são os maiores encontrados na área de estudo, 50 ppm, com valores máximos de 53 ppm, segundo a **Tabela 1**. Concentrações mais elevadas são observadas, também, nas áreas de exposição do Granito Iporá e no corpo nefelina sienito onde os valores médios

de concentração são de 28 ppm e 32 ppm, respectivamente, devido as suas composições graníticas e regiões de alto topográfico que concentram Th por ser um mineral resistato.

O comportamento do U na área de estudo acompanha o do Th, conforme a **Figura 20-E**. As concentrações de U são elevadas na brecha hidrotermal (enriquecimento por fluidos), no Granito Iporá e no nefelina sienito (composições graníticas). Os gabros e piroxenitos, assim como os gnaisses miloníticos, possuem baixas concentração deste radioelemento.

Com o intuito de ressaltar feições não evidentes nos mapas primários, os dados radiométricos foram calculados com o uso de operações aritméticas simples (DENTITH; MUDGE, 2014) e pela estimativa do Fator F (GNOJEK; PŘICHYŠTAL, 1985). A **Figura 21-A** mostra a razão Th/K, na qual resalta os locais onde há enriquecimento de Th em relação ao K. Além das altas concentrações de Th destacadas na brecha hidrotermal, chama a atenção a região à SE, onde se verifica concentrações moderadas de Th acentuadas pela razão aplicada.



**Figura 21:** Razões calculadas entre os canais dos dados radiométricos potássio (K), tório (Th) e urânio (U). A: Razão Th/K; B: Razão U/K; C: Razão U/Th e; D: Fator F estimado (EFIMOV, 1978 apud GNOJEK; PŘICHYŠTAL, 1985). Relevo sombreado com altimetria do sensor *ALOS-PALSAR* (ASF DAAC, 2014).

Como as concentrações elevadas ou baixas do U mostram uma tendência de acompanhar as concentrações do Th na área de estudo, a razão U/K tem um padrão idêntico ao da razão Th/K (**Figura 21-B**). As altas concentrações de U na brecha hidrotermal são bem definidas, assim como a SE da área de estudo, no Granito Iporá. A razão U/Th (**Figura 21-C**) mostra o enriquecimento de U em detrimento das perdas das concentrações de Th. Em algumas regiões é possível perceber essa relação, como, por exemplo, a E-NE da área de estudo, na qual o Granito Iporá aflora. O Fator F estimado (**Figura 21-D**) não favoreceu a identificação de possíveis zonas de hidrotermalismo, todavia ressaltou as concentrações de K, principalmente nos gnaisses miloníticos e no microsienito. Os baixos valores do Fator F delimitaram com precisão os limites dos contatos da intrusão alcalina Fazenda Buriti.

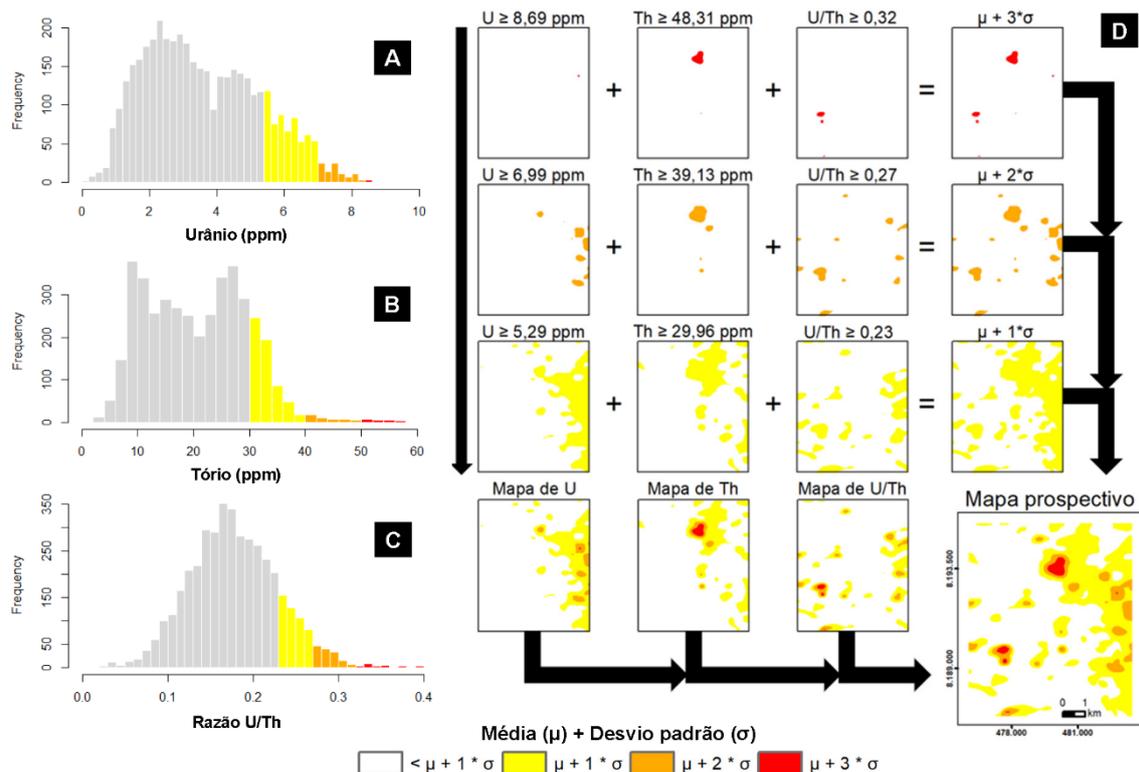
### 3.4.5. Delimitação de alvos prospectivos

O resultado da delimitação de alvos prospectivos por limiares e lógica booleana das camadas de U, Th e razão U/Th (**Figura 23**) favoreceu a identificação de duas áreas potenciais para pesquisa de ETR e, posterior investigação de maior detalhe. A **Tabela 2** lista os valores estatísticos utilizados para selecionar os limiares anômalos, dentro de cada tema de informação.

**Tabela 2:** Valores de média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) utilizados na seleção de alvos prospectivos.

Camada de informação	$\mu$	$\sigma$	$\mu + 1*\sigma$	$\mu + 2*\sigma$	$\mu + 3*\sigma$
<b>U ppm</b>	3,59	1,70	5,29	6,99	8,69
<b>Th ppm</b>	20,78	9,17	29,96	39,13	48,31
<b>Razão U/Th</b>	0,18	0,05	0,23	0,27	0,32

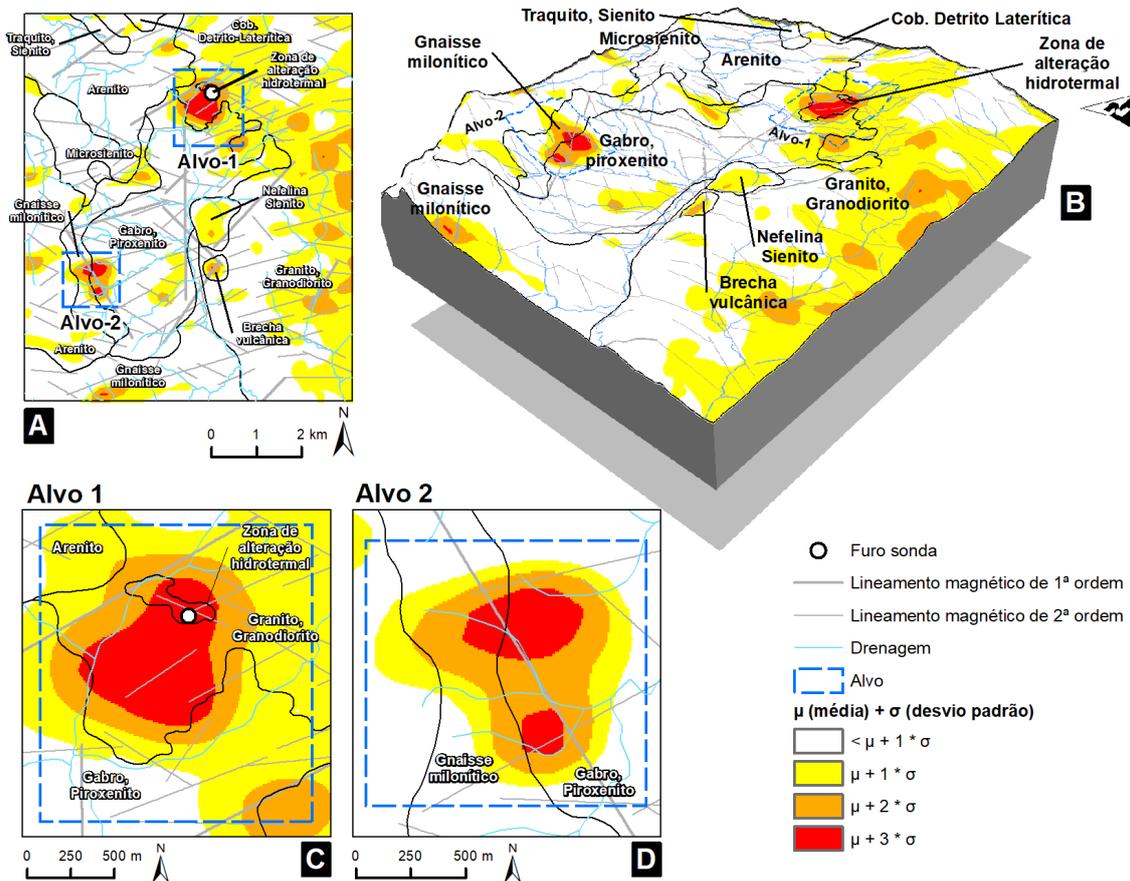
A **Figura 22** mostra os gráficos de distribuição das frequências dos radioelementos U (**Figura 22-A**) e Th (**Figura 22-B**) e da razão U/Th (**Figura 22-C**), além do fluxograma de produção do mapa prospectivo (**Figura 22-D**), com a sobreposição dos temas de informação utilizados para produzir o mapa prospectivo final, com as anomalias de primeiro, segundo e terceiro limiar. Os valores mais restritivos representam as anomalias de maior concentração para Th e U, sobretudo onde ocorre enriquecimento do U em relação ao Th, na razão U/Th. A sobreposição dos limiares evidenciou os halos de enriquecimento. Os gráficos de distribuição das frequências foram coloridos segundo os limiares utilizados no mapa prospectivo para facilitar a visualização das anomalias selecionadas em cada tema.



**Figura 22:** Gráficos de distribuição das frequências de urânio (U), tório (Th) e razão U/Th. **A:** Distribuição de U; **B:** Distribuição de Th; **C:** Distribuição da razão U/Th e; **D:** Fluxograma de integração das anomalias de U, Th e Razão U/Th com uso da média aritmética ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) para o primeiro limiar ( $\mu + \sigma$ ), segundo limiar ( $\mu + 2\sigma$ ) e terceiro limiar ( $\mu + 3\sigma$ ). As setas indicam o sentido de sobreposição.

A **Figura 23-A** mostra o mapa com todos os limiares sobrepostos por classes, conforme a média e o desvio padrão. Os contatos litológicos e os lineamentos magnéticos mapeados foram correlacionados para facilitar a interpretação dos possíveis alvos. Ao todo dois alvos foram selecionados em função de anomalias radiométricas mais restritivas de U, Th e U/Th, representadas pela  $\mu + 3\sigma$ . Estes alvos se situam nos contatos geológicos da intrusão plutônica com o Granito Iporá (Alvo 1) e com os gnaisses miloníticos (Alvo 2). O Alvo 1 aponta para elevadas concentrações de Th e U. Já o Alvo 2 para um processo de depleção do Th em relação ao U, o que sugere um enriquecimento sutil deste radioelemento. Na **Figura 23-B** é mostrado o bloco diagrama com o mapa prospectivo associado as elevações e aos contatos litológicos na área de estudo. Os dois alvos selecionados (**Figura 23-C e D**) se situam em meia encosta e em zonas de contato litológico.

O Alvo 1 foi escolhido como principal, por estar localizado nas proximidades do contato entre a intrusão plutônica e o Granito Iporá, o que sugere um enriquecimento de Th e U por metassomatismo de contato, uma vez que a rocha encaixante tem elevadas concentrações destes radioelementos e a intrusão baixas.



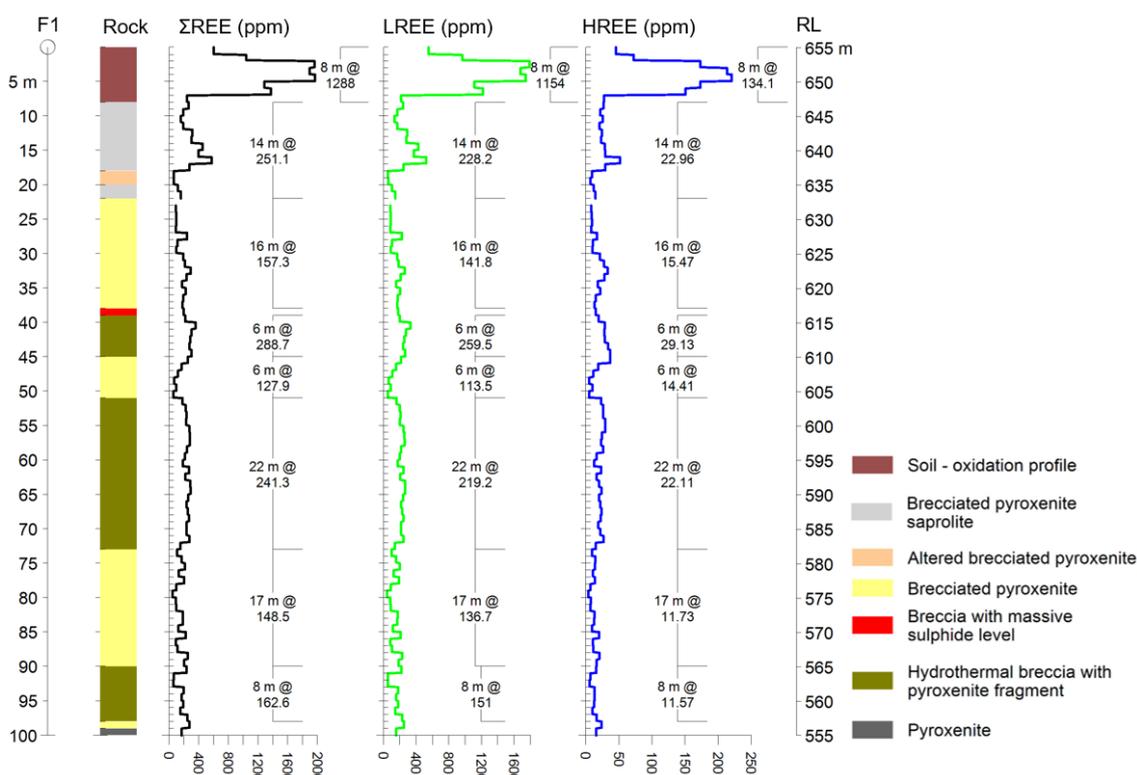
**Figura 23-A:** Anomalias radiométricas selecionadas em função da média ( $\mu$ ) mais o desvio padrão ( $\sigma$ ), indicação de alvos e do furo de sonda realizado; **B:** Bloco diagrama com as anomalias selecionadas sobre o relevo. **C:** Alvo 1; **D:** Alvo 2. Altimetria: ALOS-PALSAR (ASF DAAC, 2014).

Após as etapas de levantamento geoquímico, geofísico e geológico terrestre de detalhe, que não são foco deste trabalho, um furo exploratório de sonda foi realizado no Alvo 1. O furo teve como objetivo investigar a continuidade em profundidade das rochas e anomalias geoquímicas de superfície (**Figura 24**). O furo interceptou uma brecha descrita como parte do Complexo Fazenda Buriti por conter fragmentos de piroxenito em matriz de composição sienítica e com alteração hidrotermal associada.

Os valores dos resultados das análises químicas dos elementos de baixo número atômico do grupo dos lantanídios ( $^{57}$ lantânio,  $^{58}$ cério,  $^{59}$ praseodímio,  $^{60}$ neodímio,  $^{61}$ promécio,  $^{62}$ samário,  $^{63}$ európio) foram agrupados como ETR Leves (LREE) e dos elementos mais pesados ( $^{64}$ gadolínio,  $^{65}$ térbio,  $^{66}$ disprósio,  $^{67}$ hólmio,  $^{68}$ érbio,  $^{69}$ túlio,  $^{70}$ itérbio,  $^{71}$ lutécio e  $^{39}$ ítrio) foram agrupados como ETR pesados (HREE). Também foram agrupados os valores dos resultados das análises químicas dos ETR leves e pesados como somatório total de ETR ( $\Sigma$ REE).

Os resultados das análises geoquímicas evidenciaram a presença de elementos terras raras no perfil de oxidação em maior concentração e na rocha fonte, a brecha

alcalina, com valores mais acentuados de ETR leves ao longo de todo o furo (**Figura 24**). Os teores chegam a 1962 ppm no somatório total de ETR na parte superficial do furo, e 356 ppm na rocha fresca. É possível estabelecer uma relação da anomalia de Th superficial com o enriquecimento de ETR no perfil de oxidação e da rocha fresca, uma vez que Th e U se associam a argilas, siltes e óxidos e se concentram no perfil de alteração, enquanto o K é lixiviado (WILFORD *et al.*, 1997), o que indica a natureza da mineralização como enriquecimento supergênico. Os valores elevados no saprólito do piroxenito e na brecha hidrotermal sugerem a ocorrência de mineralização primária na rocha sã.



**Figura 24:** Log do furo realizado, valores de somatório total de Elementos Terras Raras (ETR) em ppm ( $\Sigma$ REE), valores do somatório de ETR leves em ppm (LREE) e valores do somatório de ETR pesados em ppm (HREE).

### 3.5. CONCLUSÕES

O resultado da interpretação das informações geofísicas e geológicas permitiu definir contatos litológicos, principalmente os relacionados a intrusão alcalina. Os dados magnetométricos auxiliaram na compreensão das estruturas e corpos magnéticos. Os contrastes magnéticos entre o Granito Iporá e o Complexo Fazenda Buriti ajudaram a delimitar o contato destas litologias ao norte da área de estudo. O Gradiente Total contribuiu para o delineamento da intrusão alcalina Fazenda Buriti, uma vez que o filtro centralizou a anomalia magnética e ressaltou suas bordas. Como contribuição ao

---

mapeamento da região, os contornos do mapa geológico do complexo Fazenda Buriti foram atualizados.

As leituras petrofísicas nas amostras de rocha dentro das três unidades principais da área de estudo permitiram estimar o conteúdo médio percentual de magnetita nessas rochas e caracterizar as assinaturas petrofísicas das unidades.

O filtro de separação de bandas utilizado no mapeamento das estruturas primárias e secundárias se mostrou eficiente, como visto nos valores de profundidade das fontes encontrados em estudos anteriores.

A delimitação de alvos com o método aplicado se mostrou eficiente para a área de estudo e de rápida aplicação, uma vez que o resultado positivo do furo de sonda comprovou sua eficácia. Entretanto, cabe ressaltar que o furo de sonda serviu somente para esta confirmação, pois até chegar a esta etapa os alvos devem ser detalhados em escala compatível, por outros métodos de maior precisão.

### **3.6. AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), processo 23106.098384/2022-23. Os autores agradecem a empresa de pesquisa mineral 3 S Ltda. por disponibilizar os dados geológicos para realização deste estudo.

### **3.7. REFERÊNCIAS**

ARAÚJO, I. M. C. P. Gênese e controles da mineralização secundária de P, Ti e ETR no complexo alcalino carbonatítico de Salitre, MG. 2015. 143 f., il. Dissertação (Mestrado em Geologia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

ALMEIDA, F. F. M. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozoicas da região meridional da Plataforma Sul-Americana. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 13, n. 3, p. 139–158, 1983.

ALMEIDA, F. F. M. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozoico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, p. 13, 1986.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. Províncias estruturais brasileiras. . Em: *Simpósio de Geologia do Nordeste*. 1977.

ASF DAAC. PALSAR\_Radiometric\_Terrain\_Corrected\_low\_res. NASA Alaska Satellite Facility DAAC, 2014. Disponível em: <<https://www.asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/>>. Acesso em: 6 jan. 2023

---

BLUM, M. DE L. B. *Processamento E Interpretação De Dados De Geofísica Aérea No Brasil Central E Sua Aplicação À Geologia Regional E À Prospecção Mineral*. [s.l.] Universidade de Brasília, Instituto de Geociência, 1999.

BONHAM-CARTER, G. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. 1st ed ed. Oxford; New York: Pergamon, 1994.

CARLSON, R. W.; ARAUJO, A. L. N.; JUNQUEIRA-BROD, T. C.; GASPAR, J. C.; BROD, J. A.; PETRINOVIC, I. A.; HOLLANDA, M. H. B. M.; PIMENTEL, M. M.; SICHEL, S. Chemical and isotopic relationships between peridotite xenoliths and mafic-ultrapotassic rocks from Southern Brazil. *Chemical Geology*, v. 242, n. 3–4, p. 415–434, ago. 2007.

CERQUEIRA, M. *Geologia e Evolução Petrológica do Complexo Alcalino Fazenda Buriti, Iporá – Goiás*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 1995.

CHAKHMOURADIAN, A. R.; WALL, F. Rare Earth Elements: Minerals, Mines, Magnets (and more). *Elements*, v. 8, n. 5, p. 333–340, 1 out. 2012.

CORDANI, U. G.; PIMENTEL, M. M.; GANADE DE ARAUJO, C. E.; BASEI, M. A. S.; FUCK, R. A.; GIRARDI, V. A. V. Was there an Ediacaran Clymene Ocean in central South America? *American Journal of Science*, v. 313, n. 6, p. 517–539, 1 jun. 2013.

COWAN, D.; DENTITH, M. Appendix: Data processing and presentation. *ASEG Extended Abstracts*, v. 2003, n. 3, p. 283–292, dez. 2003.

COWAN, D. R.; COWAN, S. Separation Filtering Applied to Aeromagnetic Data. *Exploration Geophysics*, v. 24, n. 3–4, p. 429–436, set. 1993.

DENTITH, M. C.; MUDGE, S. T. *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2014.

DICKSON, B.; SCOTT, K. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. *AGSO journal of Australian geology & geophysics*, v. 17, p. 187–199, 1 jan. 1997.

DUTRA, A. C.; MARANGONI, Y. R.; TRINDADE, R. I. F. Aeromagnetic and physical-chemical properties of some complexes from Goiás Alkaline Province. *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, n. 3, p. 361–373, 1 nov. 2014.

EFIMOV, A.V. Multiplikativnyj pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud po aerogamma-spektrometricheskim dannym. In: *Metody rudnoj geofiziki*, edited by: Naucno-proizvodstvennoje objedinenie "Geofizika" Leningrad. 1978.

ELLIS, R. G.; DE WET, B.; MACLEOD, I. N. Inversion of Magnetic Data from Remanent and Induced Sources. *ASEG Extended Abstracts*, v. 2012, n. 1, p. 1–4, dez. 2012.

FEITOZA, L. M. *Assinatura geofísica das rochas alcalinas da porção norte da província alcalina de Goiás*. [s.l.] Universidade de Brasília, Instituto de Geociência, 7 jul. 2011.

---

FEITOZA, L. M.; CARMELO, A. C.; PIRES, A. C. B.; HUELSEN, M. G. V.; de FREITAS, M. E. Assinatura Geofísica dos Complexos Alcalinos Fazenda Buriti e Arenópolis, porção norte da Província Alcalina de Goiás. Em: 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 15-18 August 2011. SEG Global Meeting Abstracts. [s.l.] Brazilian Geophysical Society, 2011. p. 682–690.

FUCK R. A., PIMENTEL M. M., SILVA L. J. H. D. Compartimentação tectônica da porção oriental da Província Tocantins. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 38(1): 215- 216. 1994.

GIBSON, S.; THOMPSON, R.; LEONARDOS, O.; DICKIN, A.; MITCHELL, J. The Late Cretaceous Impact of the Trindade Mantle Plume: Evidence from Large-volume, Mafic, Potassic Magmatism in SE Brazil. *Journal of Petrology*, v. 36, fev. 1995.

GNOJEK, I.; PŘICHYSTAL, A. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexploration*, v. 23, n. 4, p. 491–502, dez. 1985.

GOMIDE, C. S. Geoquímica e química mineral de carbonatitos e isótopos estáveis em carbonatitos da província ígnea do alto Paranaíba. 253 f., il. Tese (Doutorado em Geologia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

HAWKES, E. H.; WEBB, J.S. *Geochemistry in Mineral Exploration*. London: Academic Press, 1st. ed., p. 30. 1962.

IAEA. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2003.

ISLES, D. J.; RANKIN, L. R. *Geological Interpretation of Aeromagnetic Data*. [s.l.] Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists, 2013.

JUNQUEIRA-BROD, T. C.; ROIG, H. L.; GASPAR, J. C.; BROD, J. A.; MENESES, P. R. A província alcalina de Goiás e a extensão do seu vulcanismo kamafugítico. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 32, n. 4, p. 559–566, 1 dez. 2002.

JUNQUEIRA-BROD, T. C.; BROD, J. A.; GASPAR, J. C.; JOST, H. Kamafugitic diatremes: facies characterisation and genesis—examples from the Goiás Alkaline Province, Brazil. *Lithos*, v. 76, n. 1–4, p. 261–282, set. 2004.

JUNQUEIRA-BROD, T. C.; GASPAR, J. C.; BROD, J. A.; JOST, H.; BARBOSA, E. S. R.; KAFINO, C. V. Emplacement of kamafugite lavas from the Goiás alkaline province, Brazil: constraints from whole-rock simulations. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 18, n. 3–4, p. 323–335, mar. 2005.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. *An introduction to geophysical exploration*. 3rd ed. Malden, MA: Blackwell Science, 2002.

LASA Engenharia e Prospecções S.A. "Projeto Levantamento Aerogeofísico do Estado de Goiás – 1ª Etapa – Arco Magmático de Arenópolis – Complexo Anápolis - Itauçu – Sequência Vulcano-Sedimentar de Juscelândia - Relatório Final do Levantamento e

---

Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos”, Convênio de Cooperação Técnica entre a SGM/MME/CPRM e SIC/SGM/FUNMINERAL/Estado de Goiás, Relatório Final, 22 vol., Texto e Anexos (mapas), Rio de Janeiro, 2006.

LI, X. Understanding 3D analytic signal amplitude. *GEOPHYSICS*, v. 71, n. 2, p. L13–L16, 1 mar. 2006.

MARANGONI, Y. R.; ZHANG, H.; FERREIRA, H. J. Gravity and magnetic integrated data interpretation of the corrêgo dos bois complex, goiás alkaline province, central Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 33, n. 4, 26 ago. 2016.

MARTINS, E. S. F. Contribuição geofísica à análise do arcabouço tectônico na Província Alcalina de Goiás. 13 ago. 2021.

MARTINS, E. S. F.; VIDOTTI, R. M. Another way of looking at an Alkaline Province. *Journal of Geodynamics*, v. 143, p. 101811, jan. 2021.

MILLER, H. G.; SINGH, V. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, v. 32, n. 2–3, p. 213–217, ago. 1994.

MORAES ROCHA, L. G.; PIRES, A. C. B.; CARMELO, A. C.; ARAÚJO FILHO, J. O. Geophysical characterization of the Azimuth 125° lineament with aeromagnetic data: Contributions to the geology of central Brazil. *Precambrian Research*, v. 249, p. 273–287, ago. 2014.

MORAES ROCHA, L. G.; PIRES, A. C. B.; CARMELO, A. C.; OKSUM, E. Curie surface of the alkaline provinces of Goiás (GAP) and Alto Paranaíba (APAP), central Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 297, p. 28–38, maio 2015.

MOURA, C. O. Geologia do sudoeste do estado de Goiás: Integração de dados geológicos e aerogeofísicos de alta densidade. Dissertação de Mestrado—[s.l.] Universidade de Brasília, Instituto de Geociência, 2007.

NABIGHIAN, M. N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, v. 37, n. 3, p. 507–517, jun. 1972.

PIMENTEL, M.; FERREIRA FILHO, C.; ARMSTRONG, R. SHRIMP U–Pb and Sm–Nd ages of the Niquelândia layered complex: Meso (1.25 Ga) and Neoproterozoic (0.79 Ga) extensional events in central Brazil. *Precambrian Research - PRECAMBRIAN RES*, v. 132, p. 133–153, 1 jun. 2004.

PIMENTEL M.; RODRIGUES J.; SCHUTESKY M.; JUNGES S.; MATTEINI M.; ARMSTRONG R. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, Central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS U–Pb sedimentary provenance: a review. *Journal of South American Earth Sciences - J S AMER Earth SCI*, v. 31, p. 345–357, 1 abr. 2011.

PIMENTEL, M. M. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil: a geochronological and isotopic approach. *Brazilian Journal of Geology*, v. 46, n. suppl 1, p. 67–82, jun. 2016.

---

PIMENTEL, M. M.; FUCK, R. A. Neoproterozoic crustal accretion in central Brazil. *Geology*, v. 20, n. 4, p. 375–379, 1 abr. 1992.

PIMENTEL, M. M.; FUCK, R. A.; BOTELHO, N. F. Granites and the geodynamic history of the neoproterozoic Brasília belt, Central Brazil: a review. *Lithos*, v. 46, n. 3, p. 463–483, mar. 1999.

RADAELLI, V. A. Níquel de Santa Fé - Estado de Goiás. - Goiânia: CPRM, 2000a.

RADAELLI, V. A. Níquel do Morro do Engenho - Estado de Goiás. - Goiânia: CPRM, 2000b.

REEVES, C. *Aeromagnetic Surveys: Principles, Practice and Interpretation*. Geosoft. 2005.

RIBEIRO, C. C. Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do complexo carbonatítico Catalão I, GO. 15 ago. 2008.

SALLES, R. R. Depósito Metamórfico-Hidrotermal de U-ETR Mary Kathleen, noroeste de Queensland, Austrália: uma investigação baseada em assinaturas hiperespectrais e aeroradiométricas. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas – UniCAMP, Instituto de Geociências. 121 p. 2010.

SGARBI, P. B. A.; HEAMAN, L. M.; GASPAR, J. C. U–Pb perovskite ages for brazilian kamafugitic rocks: further support for a temporal link to a mantle plume hotspot track. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 16, n. 8, p. 715–724, jun. 2004.

SOUZA, J. O.; GOLLMANN, K. Carta geológica-geofísica: folha SE.22-V-B-III Iporá. Goiânia: CPRM. Escala 1:100.000. (Projeto Oeste de Goiás). 2020.

TAKEHARA, L.; SHINTAKU, I.; RABELO, D. M.; SILVEIRA, F. V. Avaliação do potencial de terras raras no Brasil. 2015.

VONCKEN, J. H. L. *The Rare Earth Elements*. Cham: Springer International Publishing, 2016.

WILFORD, J. R.; BIERWIRTH, P. N.; CRAIG, M. A. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 201–216, 1997.

---

## CAPÍTULO IV (ARTIGO)

### **Assinaturas geofísicas e petrofísicas de brecha hidrotermal enriquecida em Elementos Terras Raras no Complexo Máfico-Ultramáfico Fazenda Buriti, Província Alcalina de Goiás, Brasil**

#### **RESUMO**

A escassez global dos Elementos Terras Raras (ETR) em 2009 direcionou o interesse dos países para a busca de novas fontes desses metais. O Brasil, que já foi líder de exportações de monazita em meados do século XX, possui um potencial mineral pouco explorado em suas províncias alcalinas. A Província Alcalina de Goiás carece de estudos de caráter prospectivo para estes elementos, em especial o Complexo Fazenda Buriti, na região norte de Iporá, Goiás. Este estudo avaliou uma ocorrência de ETR em zona de alteração hidrotermal com ocorrência de brecha neste complexo intrusivo. Foram realizados ensaios geofísicos de magnetometria; eletrorresistividade e polarização induzida no domínio da frequência, em conjunto com medidas diretas de suscetibilidade magnética e radiometria em testemunhos de um furo de sonda, que interceptou uma brecha enriquecida em ETR, para caracterizar a sua zona de ocorrência. Uma modelagem inversa do Vetor de Magnetização também foi realizada. Os resultados mostraram que os mapas magnéticos oriundos do levantamento magnetométrico terrestre favoreceram o mapeamento da zona de ocorrência da brecha hidrotermal, uma vez que as descrições dos testemunhos do furo evidenciaram a presença de magnetita associadas as litologias da intrusão. A correlação de dados magnéticos com dados elétricos se mostrou eficiente, principalmente na definição de contatos em subsuperfície e na zona de continuidade da brecha. O modelo inverso de Amplitude Total do Vetor de Magnetização associado as anomalias de Resistividade, Percentual do Efeito Frequência e Fator Metal ressaltaram as diferenças de intercalação na zona de ocorrência da brecha. Essa intercalação foi evidenciada no furo, onde ocorrem, principalmente, a brecha hidrotermal enriquecida em

---

ETR de baixo magnetismo e o piroxenito brechado, responsável pela assinatura magnética intermediária da zona de ocorrência da brecha hidrotermal.

**Palavras-chave:** Província Alcalina de Goiás; Complexo Fazenda Buriti; Elementos terras raras; Magnetometria; Resistividade; IP Frequência; Petrofísica.

### **ABSTRACT**

*The global scarcity of Rare-Earth Elements (REE) in 2009 directed the interest of countries towards the search for new sources of these metals. Brazil, which was already a leader in monazite exports in the mid-twentieth century, has a little explored mineral potential in its alkaline provinces. The Goiás Alkaline Province lacks prospective studies for these elements, especially the Fazenda Buriti Complex, in the northern region of Iporá, Goiás. This study evaluated an occurrence of REE in a hydrothermal alteration zone with the occurrence of a breccia in this intrusive complex. Magnetometry geophysical tests were carried out; electroresistivity and induced polarization in the frequency domain, together with direct measurements of magnetic susceptibility and radiometry in cores from a borehole, which intercepted a breach enriched in REE, to characterize its zone of occurrence. An inverse modeling of the Magnetization Vector was also carried out. The results showed that the magnetic maps from the terrestrial magnetometric survey favored the mapping of the hydrothermal breccia occurrence zone, since the descriptions of the borehole cores evidenced the presence of magnetite associated with the intrusion lithologies. The correlation of magnetic data with electrical data proved to be efficient, mainly in defining subsurface contacts and in the breach continuity zone. The inverse model of Total Amplitude of the Magnetization Vector associated with the Resistivity, Percentage of Frequency Effect and Metal Factor anomalies highlighted the intercalation differences in the breccia occurrence zone. This intercalation was evidenced by the hole, where the hydrothermal breccia enriched in low magnetism REE and the brecciated pyroxenite, responsible for the intermediate magnetic signature of the zone of occurrence of the hydrothermal breccia, occur mainly.*

**Keywords:** Goiás Alkaline Province; Fazenda Buriti Complex; Rare-earth elements; Magnetometry; Resistivity; Frequency-domain IP; Petrophysics.

---

## 4.1. INTRODUÇÃO

A Crise das Terras Raras em 2009 direcionou o interesse global para a busca de novas fontes de Elementos Terras Raras (ETR). Sobretudo quando o maior exportador mundial destes metais (China) criou cotas de produção e exportação, taxou as exportações e proibiu novas concessões de exploração com uma legislação ambiental mais restritiva (VONCKEN, 2016).

O Brasil já figurou como um dos líderes mundiais nas exportações de ETR no período de 1885 até 1952, no qual explorou areias monazíticas em seu litoral (LAPIDO-LOUREIRO, 2013). Atualmente, as reservas e ocorrências de mineralizações no país são classificadas como primárias, nos complexos carbonatíticos/alcalinos, granitos diferenciados e como secundárias em depósitos do tipo *placers* fluvial/marinho, enriquecimento residual e supergênico (TAKEHARA *et al.*, 2015). A **Tabela 3** lista os principais depósitos brasileiros, classificados quanto aos processos de ocorrência, associações e tipos.

**Tabela 3:** Principais depósitos brasileiros de terras raras classificados quanto ao tipo de ocorrência. Takehara (2015)

	Associação	Tipos	Exemplos
<b>Primário</b>	Carbonatito	Magmáticos / Veios e Stockworks	Araxá (MG), Catalão (GO), Seis Lagos (AM)
	Rochas peralcalinas subsaturadas em sílica	<i>Plutons/stocks</i> e diques	Repartimento (RR), Morro do Ferro (MG)
	Rochas graníticas	Granitos diferenciados	Pitinga (AM), Serra Dourada (GO), Granitos Rondonianos (RO)
<b>Secundários</b>	<i>Placer</i> marinho	Sedimentar	Buena (RJ), Guarapari (ES), Cumuruxativa (BA)
	<i>Placer</i> fluvial	Sedimentar	São Gonçalo do Sapucaí (MG), Pitinga (AM)
	Argilas com íons adsorvidos	Perfil laterítico	Serra Dourada (GO)

No Brasil os principais depósitos de ETR ocorrem associados a rochas ígneas, sobretudo em complexos carbonatíticos/alcalinos, além de granitos diferenciados (LAPIDO-LOUREIRO, 2013; TAKEHARA *et al.*, 2015). As intrusões máficas-ultramáficas das províncias alcalinas se destacam como importantes áreas de exploração de ETR. Desta maneira a Província Alcalina de Goiás (PAGO) necessita de estudos com foco no potencial para exploração destes elementos.

---

Os estudos de caráter geofísico desenvolvidos na PAGO tiveram um acréscimo significativo nas últimas décadas, impulsionados, principalmente, pela disponibilidade de dados de levantamentos aerogeofísicos de alta resolução (DUTRA; MARANGONI, 2009; FEITOZA, 2011; FEITOZA *et al.*, 2011; MARANGONI; MANTOVANI, 2013; MORAES ROCHA *et al.*, 2014, 2015; MARTINS; VIDOTTI, 2021).

Dutra *et al.* (2012) definiram as respostas gravimétricas e magnéticas das rochas dos complexos alcalinos desta província, com o uso de inversões de dados em 3D das estruturas em subsuperfície. Sugerem, ainda, que o formato das intrusões é mais adequado ao de câmaras magmáticas inseridas na crosta superior, erodidas e expostas como complexos alcalinos

A partir do uso de métodos geofísicos Moraes Rocha *et al.* (2014) avaliaram a influência do Azimute 125° nos complexos alcalino-carbonatíticos e na província de kimberlitos nas margens norte da Bacia do Paraná. Estimaram a cronologia de eventos desta estrutura em três sistemas de idades diferentes: L1, com limite superior em 790 Ma, L2, com limite inferior em 622 Ma e, L3, entre 188 e 622 Ma. Moraes Rocha *et al.* (2015) realizaram uma abordagem espectral das anomalias magnéticas da PAGO ao longo do Azimute 125°, no qual definem que as profundidades médias da superfície de Curie variam de 7 km a 40 km. Segundo os autores, as profundidades mais rasas estimadas estão ligadas as áreas da PAGO, de 12 km a 25 km.

Em um dos estudos mais recentes, Martins e Vidotti (2021) analisaram dados magnéticos e gravimétricos para compreender as estruturas tectônicas da Província Tocantins e suas relações com o Arco Mágico de Goiás e com a PAGO. Os autores descrevem que o evento que originou a PAGO ocorreu durante a desagregação do Gondwana, nas bordas das estruturas NW-SE e NE-SW, ao final Orogênese Brasileira e de estruturas formadas durante o Mesozoico. Sugerem, ainda, que a PAGO não se alocou sob a tendência do Azimute 125°, mas em estruturas criadas ou reativadas pelo rompimento do Gondwana.

Contribuições relevantes foram realizadas no âmbito da PAGO e de seus complexos intrusivos. Entretanto, na avaliação do potencial mineral de ETR a geofísica pode contribuir com modelos prospectivos oriundos de assinaturas geofísicas e petrofísicas de ocorrências destes metais na província.

Desta maneira, este estudo utiliza dados geofísicos multifonte, associados a medições petrofísicas para caracterizar as assinaturas de uma ocorrência de brecha hidrotermal mineralizada em ETR, no Complexo Mágico-Ultramágico Fazenda Buriti, na

---

PAGO. Dessa forma, visa contribuir para o desenvolvimento de um modelo geofísico-geológico prospectivo para a localização de novos alvos em complexos alcalinos.

## 4.2. CONTEXTO GEOLÓGICO

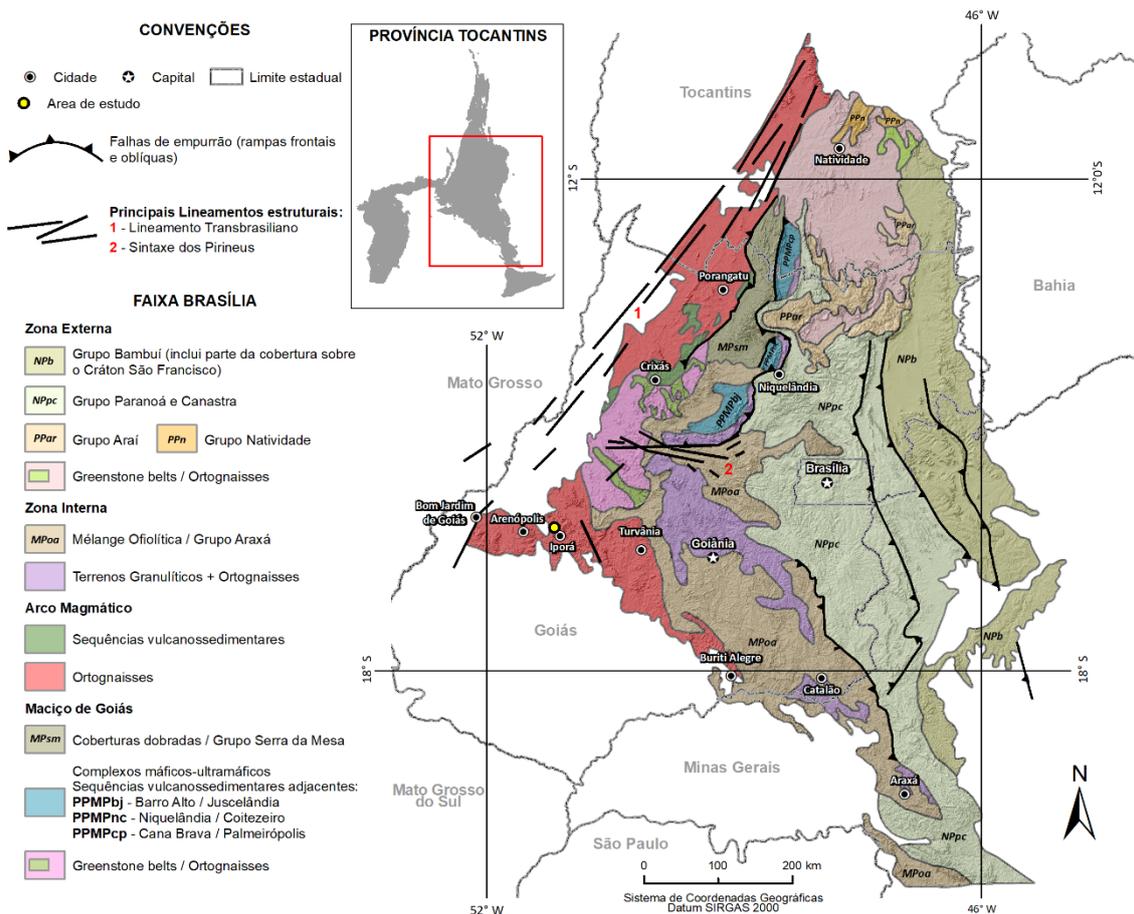
A área de estudo está inserida na Província Tocantins (PIMENTEL, 2016). O estudo foi desenvolvido no contato entre o Granito Iporá e o Complexo Alcalino Fazenda Buriti, pertencente a Província Alcalina de Goiás (PAGO), porção S-SW do estado de Goiás (JUNQUEIRA-BROD *et al.*, 2002, 2004, 2005).

Conforme Pimentel *et al.* (2000) a Província Tocantins é caracterizada como um orógeno Neoproterozoico, que se formou pela colisão cratônica Brasileira/Pan-Africana. Localiza-se na parte centro-norte do Brasil e se situa entre os crátons Amazônico, São Francisco e Paranapanema (**Figura 25**). Segundo Valeriano *et al.* (2004) são incluídas nesta província as faixas móveis Brasília, Araguaia e Paraguai compostas por rochas supracrustais vulcano-sedimentares, intrusões graníticas e corpos básicos ultrabásicos subordinados. No contexto da Província Tocantins, a Faixa Brasília está localizada na margem oeste do Cráton São Francisco, a Faixa Araguaia na borda leste do Cráton Amazônico e a Faixa Paraguai na borda sudoeste deste mesmo cráton.

De acordo com Pimentel e Fuck (1992) a Faixa Brasília se formou como decorrência de uma série de eventos colisionais durante o Neoproterozoico (**Figura 25**). Contudo, os eventos colisionais que originaram o supercontinente Gondwana são divididos em dois estágios: o rifteamento, datado em 900-800 Ma, designado Tafrogênese Toniana, e a colisão continental, entre 650-600 (VALERIANO *et al.*, 2008). Segundo Valeriano *et al.* (2004) um protocontinente central se formou a partir de colisões continentais ocorridas entre 780 e 640 Ma, dessa forma, agregou gradualmente as massas continentais que culminaram na amalgamação final de Gondwana em cerca de 520 Ma.

Predomina na Faixa Brasília a direção N-S, que se estende por cerca de 1100 km com início no sudoeste estado de Minas Gerais e finda no estado Tocantins (**Figura 25**). Suas principais feições e unidades podem ser descritas como: (i) sequência espessa de rochas metassedimentares e sedimentares, depositadas e deformadas ao longo da margem oeste do Cráton São Francisco; (ii) Bloco Arqueano de Goiás definido como um bloco síalico alóctone que ocorre, sobretudo, na região de Crixás-GO; (iii) na parte central o Complexo Granulítico Anápolis-Itauçu e, por fim; (iv) uma das unidades mais importantes da Faixa Brasília, o Arco Magmático de Goiás, com extensas associações

plutônicas e vulcânicas neoproterozóicas, que se subdivide em Arco de Mara Rosa, na parte norte e Arco de Arenópolis, na parte sul (PIMENTEL *et al.*, 2011).



**Figura 25:** Mapa simplificado da geologia do setor centro-leste da Província Tocantins. Em detalhe a Faixa Brasília com a área de estudo marcada com um ponto de cor amarela. Adaptado de Pimentel *et al.* (2004) e Moura (2007).

O Arco Magmático de Goiás está inserido na parte ocidental da Faixa Brasília (Figura 25) e se estende desde a região dos municípios de Arenópolis e Bom Jardim até Porangatu e Mara Rosa, limitado a oeste pelo lineamento Transbrasiliiano (PIMENTEL *et al.*, 2000). Sua formação se deu como desfecho de dois eventos de acreção crustal, com o primeiro evento há ~900 e ~800 Ma e o segundo há ~670 e ~600 Ma (PIMENTEL *et al.*, 2004; HENRIQUE LAUX *et al.*, 2005).

O Arco Magmático de Goiás concentra um conjunto de rochas metaplutônicas de composições que variam de tonalitos a granodioritos, além de alguns corpos de dioritos e granitos entre as faixas estreitas das sequências vulcano-sedimentares (PIMENTEL *et al.*, 2011). Em associação com as rochas metaplutônicas e sequências vulcano-sedimentares ocorrem granitos pré-sin e tardi pós tectônicos, como exemplo os granitos Caiapó, Fazenda Nova, Iporá, Israelândia, Novo Brasil, Serra do Irã e Serra Negra. Além disso,

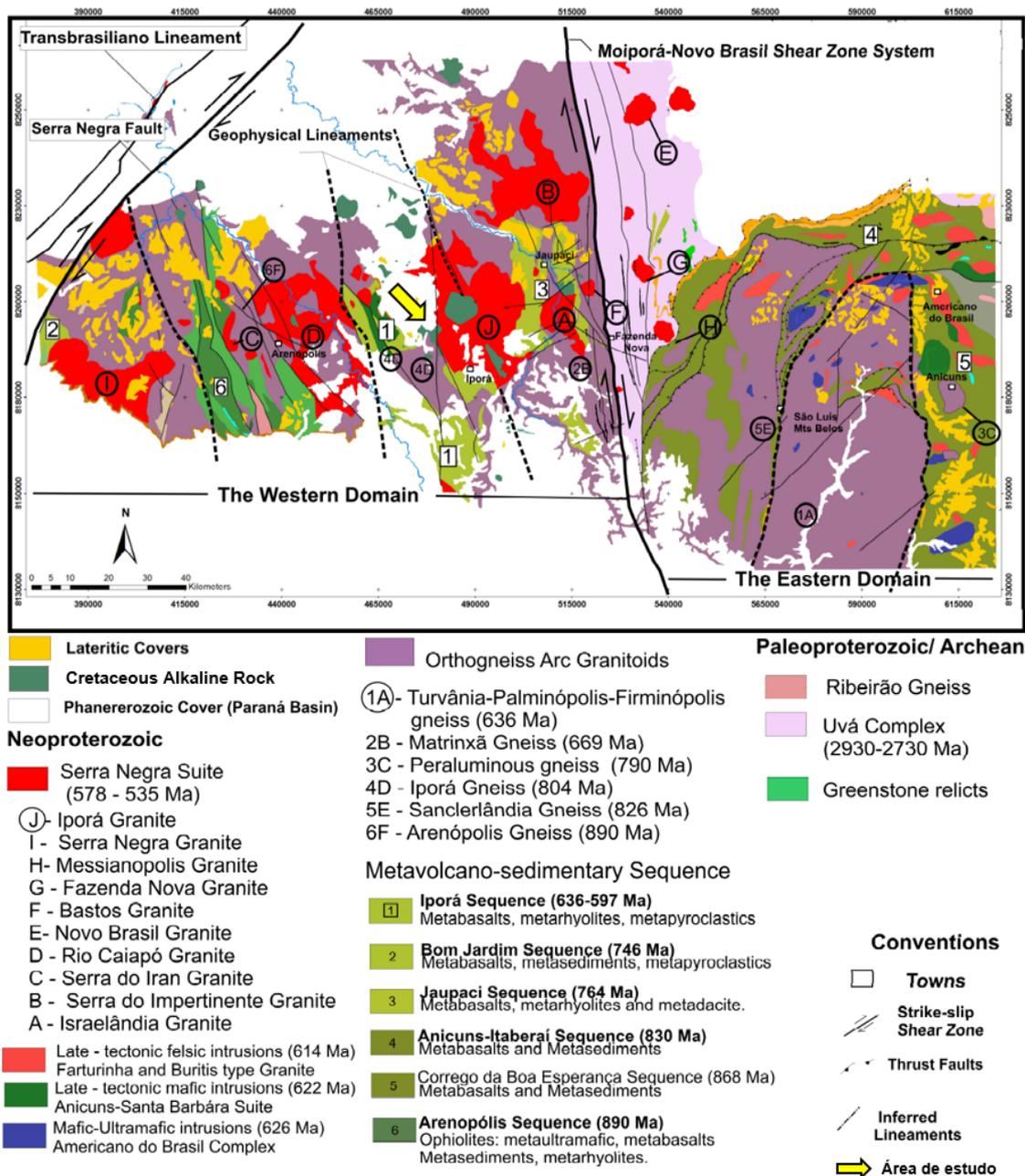
---

ocorrem corpos máficos-ultramáficos acamadados sin-orogênicos, resultado de magmatismo bimodal relacionados a colisão brasileira como o Complexo Americano do Brasil e o corpo intrusivo Anicuns-Santa Bárbara (HENRIQUE LAUX *et al.*, 2005; PIMENTEL *et al.*, 2011).

O Arco Magmático de Arenópolis está situado desde Bom Jardim de Goiás a oeste até o município de Buriti Alegre a sudeste, como a expressão sul do Arco Magmático de Goiás (**Figura 25**). São encontrados granitos tipo I e A, tardi a pós-orogênicos em associação a corpos máficos e ultramáficos, além de ortognaisses cálcicos a cálcio-alcalinos e unidades supracrustais (PIMENTEL; FUCK, 1992).

As sequências vulcano-sedimentares (Iporá, Bom Jardim de Goiás, Jaupaci, Anicuns-Itaberaí, Córrego da Boa Esperança e Arenópolis) são compostas por associações de rochas metavulcânicas e subvulcânicas, com composições que variam de basaltos toleíticos a riolitos, com fácies xisto verde e anfibolito (MARQUES, 2017). As intrusões graníticas que se destacam são os granitos Iporá, Serra Negra, Messianópolis, Fazenda Nova, Bastos, Novo Brasil, Rio Caiapó, Serra do Iran, Serra do Impertinente e Israelândia (**Figura 26**). Ocorrem corpos cálcio-alcalinos com alto teor de potássio, caracterizados como biotita granitos isotrópicos e equigranulares de idades entre 578 e 535 Ma (MARQUES, 2017).

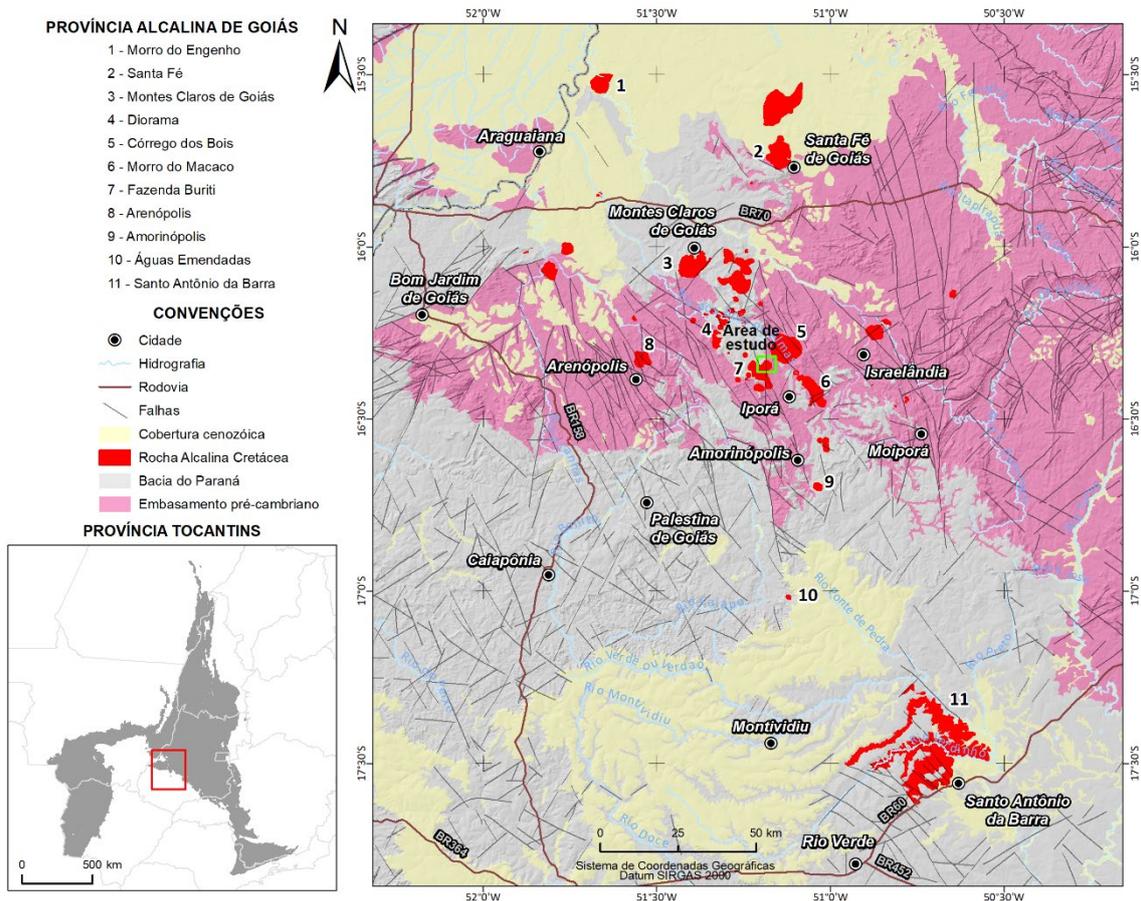
Na área de estudo ocorrem arenitos da Formação Furnas pertencentes a Bacia do Paraná. A Bacia do Paraná corresponde a um grupo espesso de rochas sedimentares e vulcânicas desenvolvidas sobre o embasamento cristalino. Corresponde às supersequências Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I e Gondwana II (RAMOS, 2010). As litologias da Formação Furnas se caracterizam por arenitos de coloração branca, caulíníticos e por conglomerados depositados em ambiente fluvial transicional (RAMOS, 2010). De acordo com Almeida e Hasui (1977) ocorreu um magmatismo alcalino nas regiões da borda da Bacia do Paraná durante o Cretáceo Superior. Esse evento originou a PAGO.



**Figura 26:** Mapa geológico do Arco de Arenópolis com seqüências metavolcano-sedimentares e granitoides do arco, bem como seus limites oeste e leste. Adaptado de Marques (2017).

De acordo com Junqueira-Brod *et al.* (2002) a PAGO está localizada na margem norte da Bacia do Paraná e resulta da associação de diversas rochas alcalinas vulcânicas, sub-vulcânicas e plutônicas. A PAGO é formada por onze complexos com corpos plutônicos na porção norte, rochas alcalinas na região central da província e na porção sul rochas vulcânicas (JUNQUEIRA-BROD *et al.*, 2002). A **Figura 27** mostra a localização dos onze complexos com detalhe para a área de estudo. De norte para o sul temos: Morro do Engenho, Santa Fé, Montes Claros de Goiás, Diorama, Córrego dos Bois, Arenópolis,

Morro do Macaco, Fazenda Buriti, Amarinópolis, Águas Emendadas e Santo Antônio da Barra.



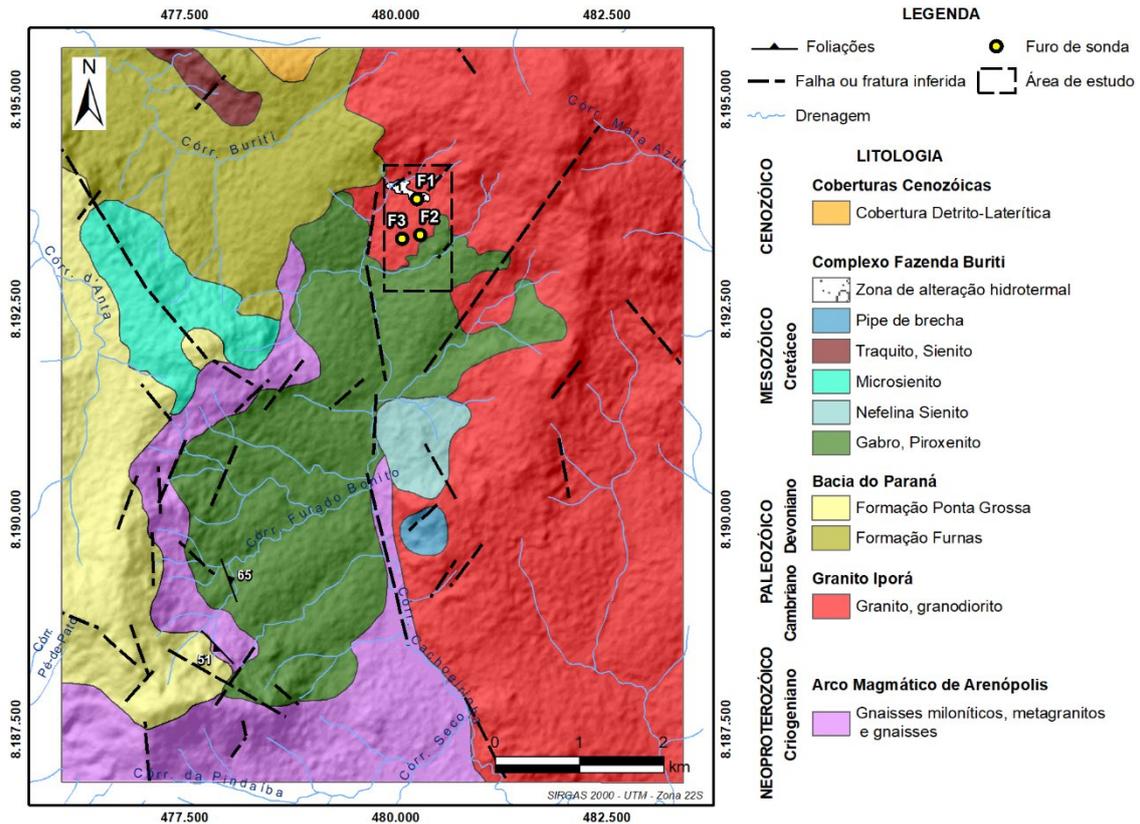
**Figura 27:** Mapa da Província Alcalina de Goiás e sua localização na Província Tocantins. Área de estudo marcada com um polígono de cor verde. Modificado de Junqueira-Brod *et al.* (2002).

O Complexo Alcalino Fazenda Buriti é situado ao norte da cidade de Iporá e possui cerca de 35 km<sup>2</sup>. Ocorrem neste complexo litotipos alcalinos intrusivos constituídos por clinopiroxenitos, melagabros, sienogabros, olivina sienitos, peridotitos, piroxenitos, essexitos, teralitos, gabros alcalinos, nefelina sienitos, fonólitos, traquitos, diques lamprófiros, além de produtos, resultado de processos de fenitização (DANNI 1974, 1978; CERQUEIRA, 1995; JUNQUEIRA-BROD *et al.*, 2005; FEITOZA, 2011).

#### 4.2.1. Geologia Local

O Granito Iporá (**Figura 28**) está incluído na Suíte Serra Negra e situado entre as sequências metavulcano-sedimentares Jaupaci e Iporá. O Granito Iporá é um corpo de dimensões batolíticas com várias fácies, constituídas principalmente por biotita granito vermelho róseo, de granulação média a grossa, equigranular a localmente porfirítico. Rico em feldspato potássico com traços de microclina, quartzo, titanita, apatita e zircão, além de fluorita em alguns pontos e enclaves máficos com tamanhos que variam de centímetros

a decímetros (MARQUES, 2017). Segundo Marques (2017), análises isotópicas U-Pb indicam a idade de intrusão do granito em  $511 \pm 7$  Ma.



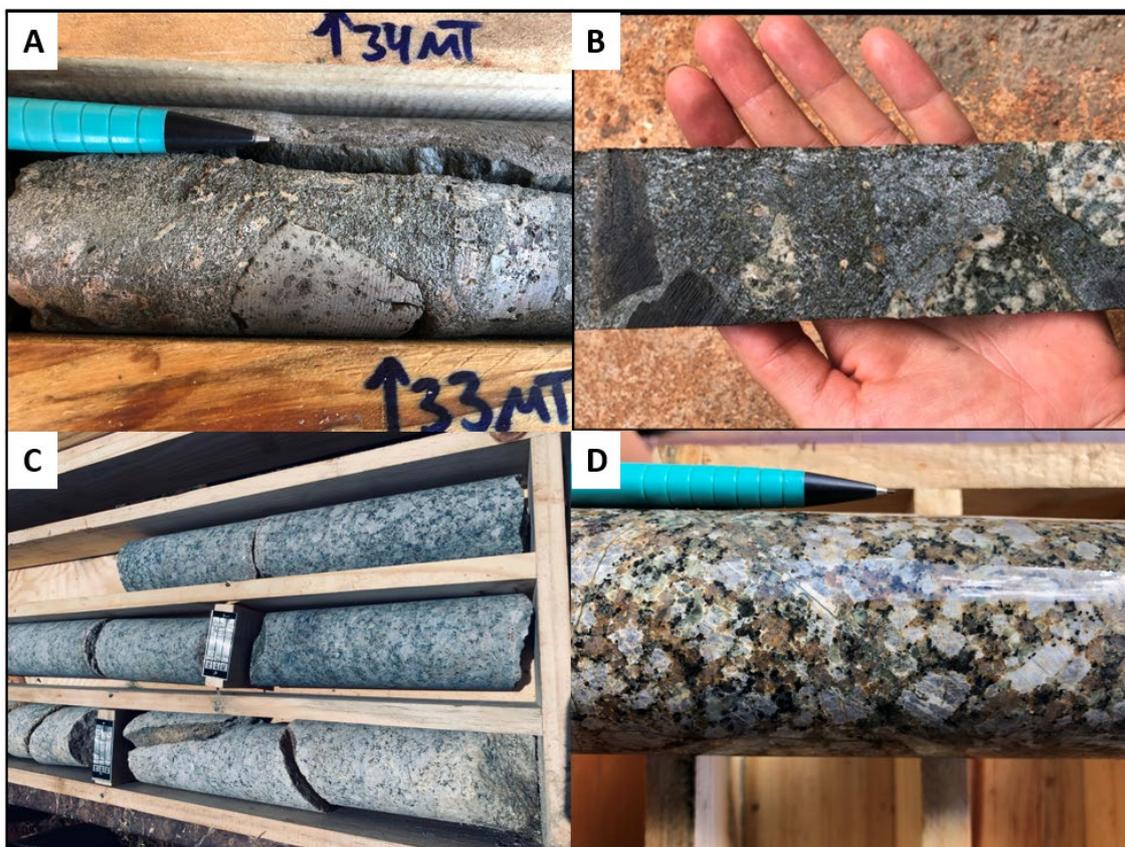
**Figura 28:** Mapa das unidades geofísico geológicas do Complexo Alcalino Fazenda Buriti, com furos de sonda e detalhe da área de estudo.

O Complexo Fazenda Buriti é composto por rochas alcalinas intrusivas com litotipos constituídos por clinopiroxenitos, melagabros, sieno-gabros, olivina sienitos, dunitos, peridotitos, piroxenitos, essexitos, teralitos, gabros alcalinos, nefelina sienitos (DANNI 1974, 1978). Entretanto, ocorrem intrusões subvulcânicas, além de produtos resultantes de processos de fenitização e brecha alcalina hidrotermal no contato com o Granito Iporá, na porção norte da intrusão plutônica.

Dois eventos magmáticos distintos ocorreram na região de Iporá-GO de acordo com Danni (1974; 1978). No primeiro evento se deram as intrusões do tipo central com séries de diferenciações magmáticas. O segundo evento se relaciona com a reativação dos sistemas de falhas ligado ao evento anterior, em que se desenvolveram intrusões subvulcânicas ao longo do Cretáceo Superior. Feitoza (2011) descreve os tipos principais de diques na área do Complexo Fazenda Buriti como diques de basanita e no Granito Iporá como sieno-dioritos e fonólitos tefrítico com tamanhos que variam de 0,3 a 1,5 metro de largura, na qual se caracterizam as texturas afaníticas com coloração escura.

Pode ocorrer, ainda, fenocristais de plagioclásio com magnetização diversa. Contudo, os diques preenchem zonas de fraqueza com direções principais N80°E, N40°E e NS.

Além dos diques, acredita-se que a brecha alcalina esteja relacionada à intrusão de fluidos enriquecidos no evento tectônico secundário, relatado por Danni (1974; 1978) ocorrido na região de Iporá ou em um evento posterior de natureza máfica-alcalina, o que poderia ter causado um processo de somatização que enriqueceria fluidos e partes do Granito Iporá no contato com a intrusão plutônica.



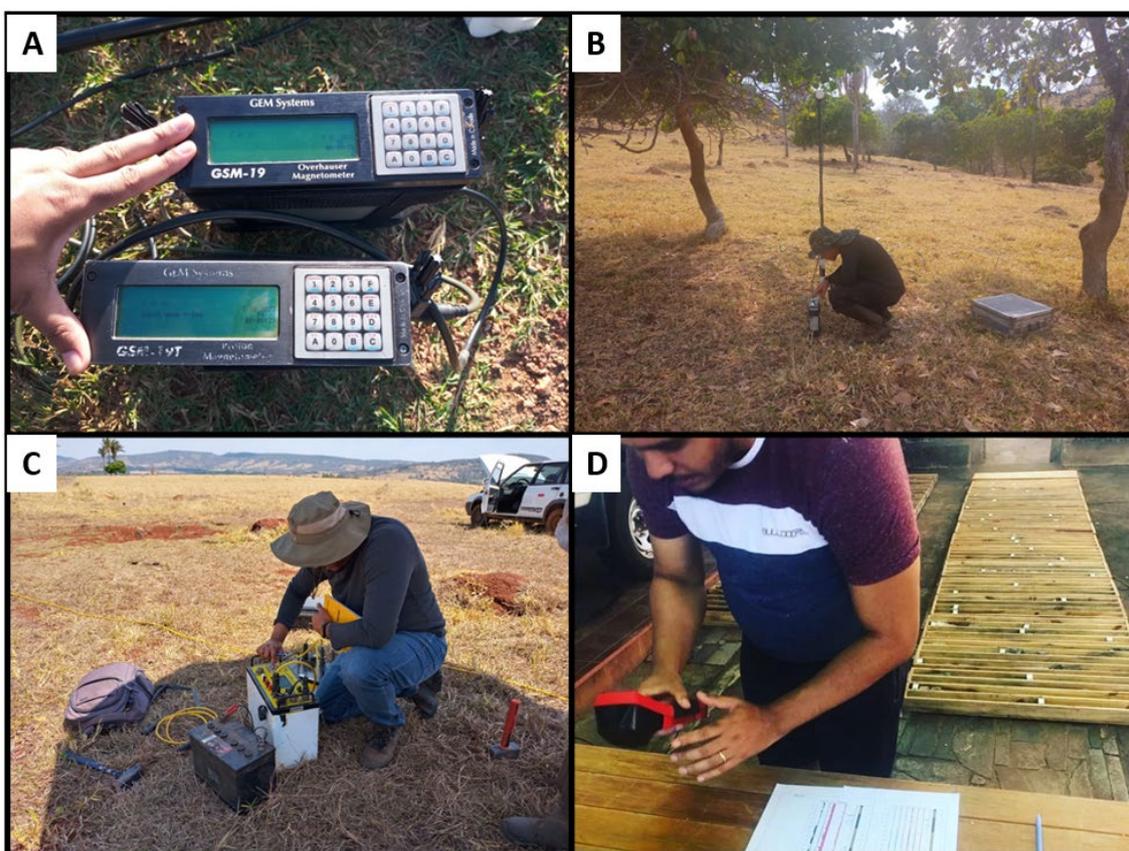
**Figura 29:** Testemunhos dos furos de sonda. **A e B:** Testemunho do furo F1 com evidência de piroxenito brechado; **C:** Testemunhos do Furo F2 que interceptou o Granito Iporá; **D:** Amostra de testemunho do furo F3 que interceptou o Granito Iporá.

Na área de estudo foram realizados três furos de sonda exploratórios com o intuito de investigar as rochas em subsuperfície, além de examinar as anomalias geoquímicas identificadas nos estudos de exploração mineral realizados anteriormente (**Figura 28**). O furo de sonda F1, com 100 m de profundidade, interceptou uma brecha hidrotermal associada ao Complexo Fazenda Buriti, com fragmentos de piroxenito em uma matriz sienítica, com presença de pirita, calcopirita, pirrotita, magnetita e, subordinadamente, esfarelita (**Figura 29-A e B**). Os furos F2 e F3 interceptaram o Granito Iporá, rocha encaixante da intrusão alcalina e perfuraram até a profundidade de 30 m (**Figura 29-C e**

D). Neste estudo o furo de sonda F1 foi escolhido para realizar as medidas petrofísicas e servir de parâmetro para os ensaios geofísicos realizados.

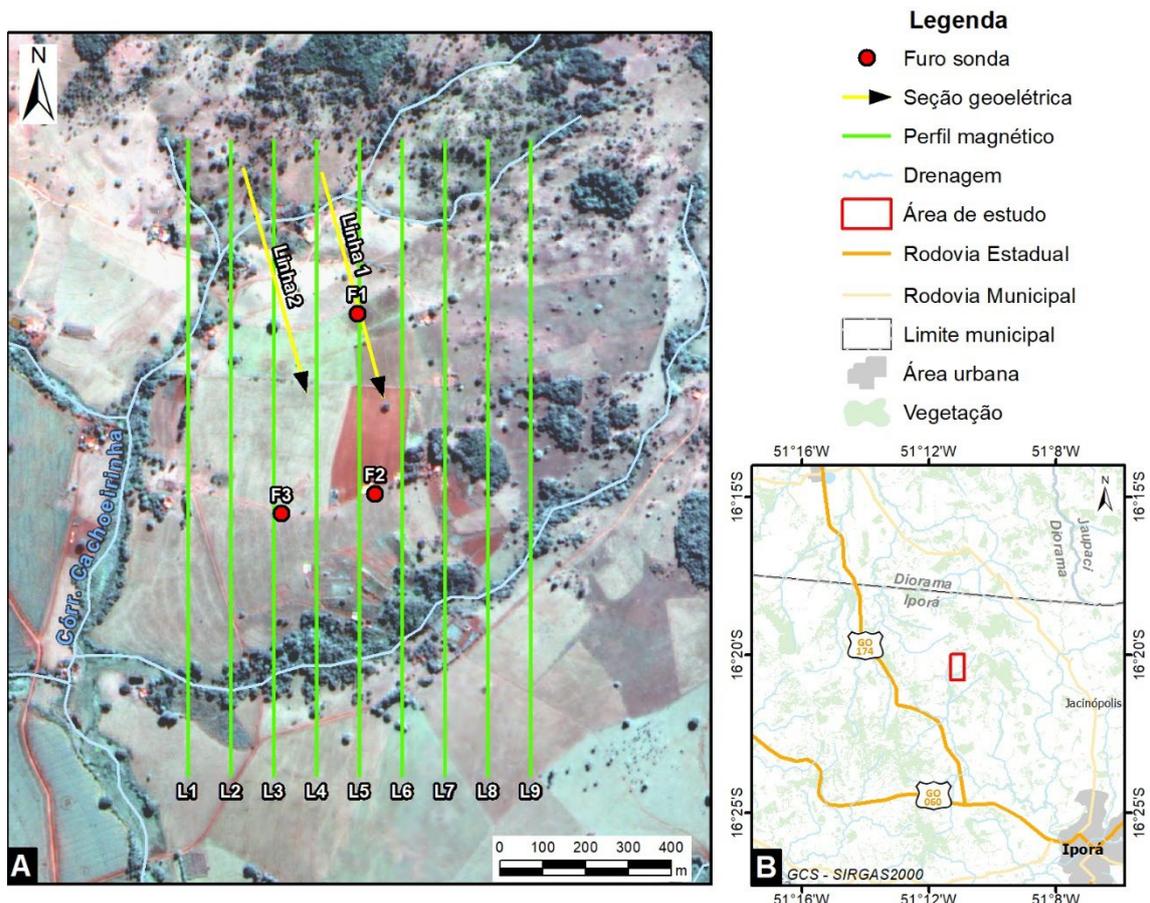
### 4.3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste estudo os seguintes ensaios geofísicos foram realizados: magnetometria terrestre (**Figura 30-A e B**); eletrorresistividade e polarização induzida (IP) no domínio da frequência para delimitar contatos e estruturas em subsuperfície (**Figura 30-C**).



**Figura 30:** Registro dos levantamentos realizados; **A:** Sincronização de magnetômetros; **B:** Montagem do magnetômetro base; **C:** Aquisição de Eletrorresistividade e IP e; **D:** Leitura com susceptibilímetro nos testemunhos do furo de sonda.

Além disso, foram realizadas medidas de suscetibilidade magnética e radiometria nos testemunhos do furo de sonda F1 efetuado sobre a zona de alteração hidrotermal, com o intuito de caracterizar as assinaturas petrofísicas e compreender as respostas geofísicas das litologias e solos encontrados (**Figura 30-D**). O furo de sonda F1 foi amostrado a cada metro até a profundidade de 100 m. A amostragem geoquímica adotou o padrão IMS95R – determinação por fusão com metaborato de lítio – terras raras – ICP MS.



**Figura 31-A:** Ensaios geofísicos realizados e localização dos furos na área de estudo; **B:** Área de estudo em relação ao município de Iporá. Imagem do sensor CBERS-4, data 24/06/2020. Dados cartográficos IBGE (2019).

As aquisições de eletrorresistividade e IP no domínio da frequência ocorreram simultaneamente na área de interesse. As aquisições ocorreram ao longo de duas seções de 550 metros de extensão cada (**Figura 31-A**) que cruzaram as anomalias magnéticas. A Linha 1 teve seu centro posicionado próximo ao local onde se realizou o furo de sonda F1, em que se evidenciou a ocorrência de uma zona brechada mineralizada com ETR, sulfetação disseminada e maciça. A Linha 2 foi posicionada com o intuito de verificar a continuidade lateral, a oeste da zona brechada.

O arranjo utilizado na aquisição das seções geoeétricas foi o dipolo-dipolo com emprego da técnica de caminhamento elétrico e espaçamento 10 metros entre os eletrodos. Este arranjo possui mais pontos para seções de mesma extensão em comparação com outros arranjos. Além disso, é bastante sensível a mudanças horizontais, mas pouco sensível a mudanças verticais, com isso se torna um método adequado para o mapeamento de estruturas verticais (LOKE, 2004).

Nas aquisições geoeétricas utilizou-se o resistímetro *SUPER STING R8/IP*, 56 eletrodos de aço-inox, 4 cabos multieletródicos e uma bateria de 12V como fonte de energia. Após a instalação dos eletrodos ao longo dos perfis, as leituras ocorreram

---

conforme estabelecido no protocolo de aquisição de dados elaborado no programa computacional *Electre Pro (Iris Instruments)*. Para reduzir a resistência elétrica de contato entre os eletrodos e o solo superficial usou-se bentonita e uma solução salina (NaCl dissolvido em água).

A configuração dos intervalos de medição da corrente injetada (máximo de 0,8 A) foi estabelecida em 200 ms e 800 ms. Dessa forma, com estes intervalos foi possível realizar o cálculo do IP Espectral apoiado no efeito de frequência (EF). A resistividade em um meio tem variação em função da frequência da corrente injetada e suas propriedades elétricas, o que simula o efeito IP. As seções 1 e 2 foram levantadas com arranjo dipolo-dipolo e 550 metros de extensão.

Os nove perfis de magnetometria foram adquiridos com espaçamento entre linhas de 100 m e estações de medidas a cada 10 m, com 1,5 km de extensão cada. Os dados de Intensidade do Campo Magnético Total (TMI) foram coletados durante quatro dias com o emprego de dois magnetômetros: um *GSM-19T* (base) e outro *GSM-19* (móvel) de marca *GEM SYSTEM*, com sensibilidade de até 0,05 nT e resolução de 0,01 nT. Os dados de localização foram coletados com o GPS acoplado ao aparelho *GSM-19*, no *Datum WGS84*, posteriormente convertidos para o *Datum SIRGAS2000*. Os perfis levantados obedeceram à direção N-S conforme a **Figura 31-A**.

Para monitoramento da variação diurna, o magnetômetro base foi instalado no mesmo ponto durante todos os dias do levantamento. Este equipamento registrou a intensidade do campo magnético total a cada minuto. A instalação e operação do equipamento teve como premissa realizar as medidas antes e depois da operação do magnetômetro móvel. No processamento de remoção da variação diurna foi utilizado o programa *GEMLINK*.

Nas medidas de suscetibilidade magnética realizadas nos testemunhos do furo de sonda foi empregado o susceptibilímetro *KT-20 (Terraplus)*. As medidas foram realizadas com a configuração *Measure Mode*, em que são seguidos três passos: uma leitura ao ar livre; uma leitura na amostra e novamente, uma leitura ao ar livre.

Em cada amostra foram efetuadas três leituras consecutivas no mesmo ponto do testemunho para validar as medidas. A média destas medidas foi considerada o valor final de suscetibilidade magnética em cada ponto. Já as medidas diretas de radiometria nos testemunhos do furo de sonda tiveram o emprego do gamaespectrômetro *RS-125 (Radiation Solutions INC)*. O tempo de medição de cada amostra foi configurado em 120 segundos para diminuir possíveis contribuições locais do *background* nas leituras.

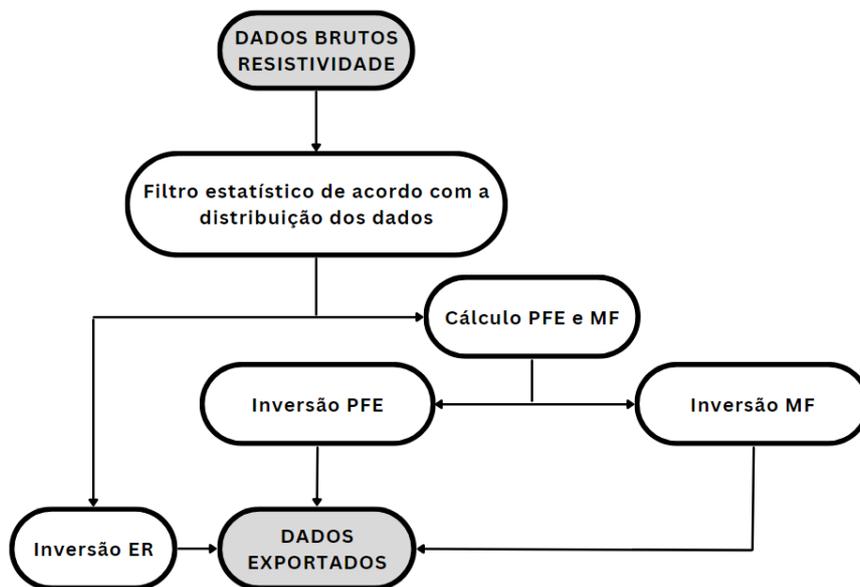
---

#### 4.4. PROCESSAMENTO DE DADOS

O processamento dos dados geoeletricos foi realizado com o *software RES2DINV*, por fim para a apresentação e correlação dos perfis aos dados magnéticos foi utilizado o programa *OASIS MONTAJ*. Os dados de magnetometria foram processados nos *softwares GEMLINK* e *OASIS MONTAJ*. Os dados de suscetibilidade magnética e radiometria foram tratados no *software Excel* e correlacionados aos demais dados no *software OASIS MONTAJ*.

##### 4.4.1. Dados geoeletricos

No processamento dos dados de eletrorresistividade (ER), foram seguidas as etapas conforme a fluxograma da **Figura 32**. Os valores espúrios foram removidos com a avaliação dos dados brutos em um histograma. Os valores muito discrepantes ou próximos de zero foram considerados ruído e foram removidos.



**Figura 32:** Fluxograma com as etapas de redução, filtragem e modelagem dos dados de resistividade elétrica, PFE e MF.

Após o processo de filtragem, aplicou-se a inversão por mínimos quadrados aos dados, em que se presumiu que a área de estudo possuía uma zona de contato lateral gradativo, em função dos níveis de alteração das rochas e estruturas associadas. Para a visualização dos modelos geoeletricos obtidos após o processo de inversão optou-se pelo *software OASIS MONTAJ* em função da necessidade de integração com os dados geológicos e geofísicos.

---

#### 4.4.2. Cálculo do PFE e MF

Após o processo de filtragem estatística nos dados brutos de ER, conforme a **Figura 32**, procederam-se os cálculos do PFE e do MF.

O Percentual do Efeito Frequência (PFE) é obtido em função do Efeito Frequência (FE) calculado conforme Reynolds (2011), na qual duas resistividades aparentes são usadas para expressar essa característica. Ao se medir a resistividade aparente em duas frequências distintas, menores que 10 Hz e utilizar a mesma configuração de arranjo de eletrodos, a resistividade aparente medida em baixa frequência ( $\rho a0$ ) será maior que a medida em frequência mais alta ( $\rho a1$ ), pois a sobretensão medida em um breve período é menor em relação à medida em um maior período de carga. A Equação 16 a seguir resume o cálculo do PFE:

$$PFE = 100 \frac{(\rho a0 - \rho a1)}{\rho a1} = 100 FE \quad (16)$$

De acordo com Telford (1990) o MF é calculado pela normalização do PFE em função da resistividade aparente medida em baixa frequência ( $\rho a0$ ), a partir da Equação 17:

$$MF = \frac{PFE}{\rho a0} 2\pi 10^3 \quad (17)$$

Após o processo de modelagem inversa por mínimos quadrados os dados foram exportados para o programa *OASIS MONTAJ* para correlação com as demais informações.

#### 4.4.3. Dados magnéticos

Para executar a etapa de correção da variação diurna aos dados do levantamento da Intensidade do Campo Magnético Total (TMI) foi empregada a rotina do programa *GEMLINK*. A rotina utiliza a hora exata dos arquivos do campo base e do campo móvel para realizar a correção.

O Datum consistiu na média de todos os registros de campo magnético total obtidos durante a etapa de campo na área de estudo, que resultou no valor de 24258 nT. Os dados de um mesmo ponto, com amostragem a cada minuto, registrados ao longo do dia serviram para remover as tendências de variação diurna nos dados do magnetômetro móvel. Os valores resultantes dessa etapa corresponderam ao TMI.

As etapas seguintes foram realizadas no programa *OASIS MONTAJ*. O banco de dados com os valores de TMI passou por reduções e filtragens com o intuito de ressaltar

---

as fontes magnéticas de interesse. A redução do campo geomagnético terrestre (*International Geomagnetic Reference Field* - IGRF) resultou no Campo Magnético Anômalo (CMA). Após esta etapa aplicou-se o filtro de Gradiente Total (GT) para evidenciar as bordas dos corpos magnéticos de menor profundidade (RAJAGOPALAN, 2003; ISLES; RANKIN, 2013).

Também foram aplicados os filtros Dz e GHT (BLUM, 1999) para realçar as bordas de corpos e estruturas. Os mapas magnéticos com os produtos dos filtros e reduções foram interpolados com o método de curvatura mínima, com célula de tamanho 25x25 m (1/4 do espaçamento entre linhas). O método foi escolhido, pois foi o que melhor suprimiu a ocorrência de artefatos de direção E-W, além de produzir superfícies mais suaves, uma vez que há na área de estudo uma tendência de ocorrência de feições estruturais nesta mesma direção (CERQUEIRA, 1995; FEITOZA, 2011; MARTINS, 2021).

Para evitar os ruídos ocasionados pelos efeitos de borda, os mapas magnéticos foram recortados nos limites dos perfis do levantamento (**Figura 31-A**).

#### **4.4.4. Modelagem inversa do Vetor de Magnetização**

A Modelagem Inversa do Vetor de Magnetização (MIVM) considera a magnetização induzida, a remanência, a desmagnetização e a anisotropia dos materiais para a construção de modelos 3D (ELLIS *et al.*, 2012; BARBOSA; PEREIRA, 2013). A partir de uma fonte de dados magnéticos 2D é possível recuperar corpos e estruturas geológicas em 3D (ELLIS *et al.*, 2012).

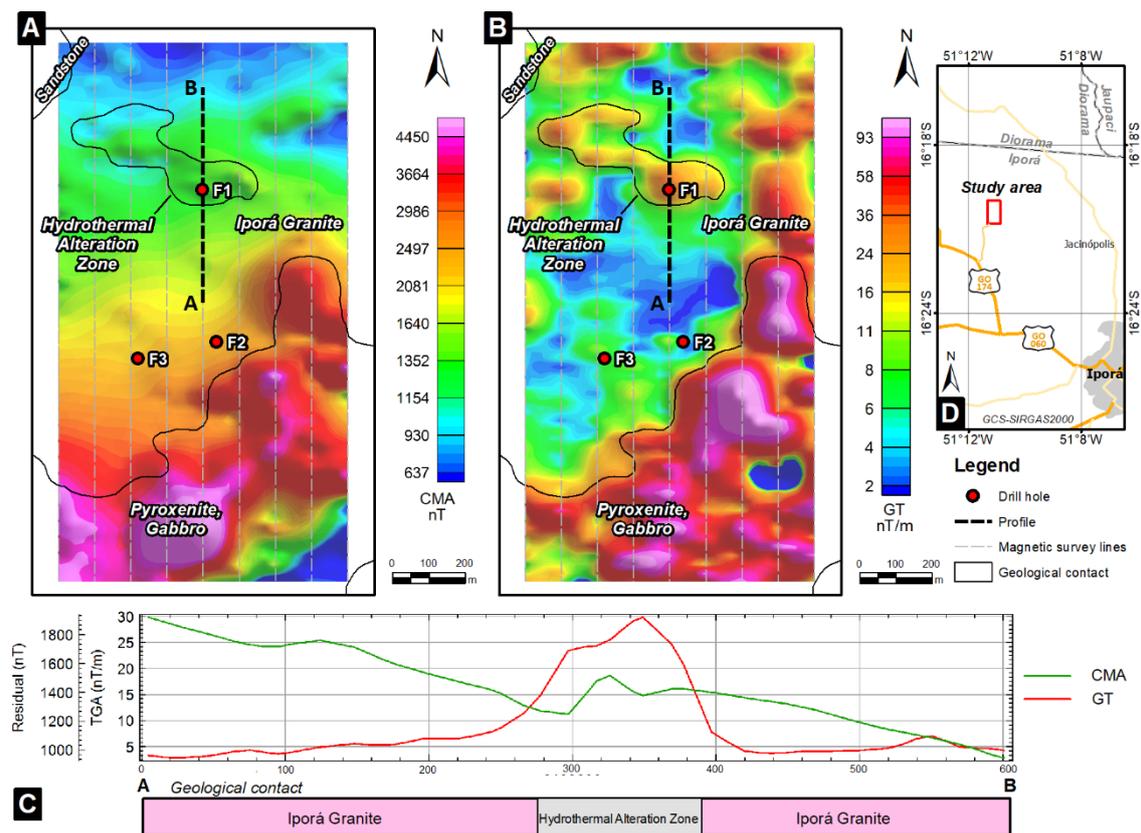
A MIVM foi utilizada dentro da ferramenta *VOXI Earth Modelling* no programa *OASIS MONTAJ*. O TMI Residual serviu como fonte de dados magnéticos para a inversão. O modelo foi construído com células de 10 (X e Y) e 5 (Z) metros. Ao todo o modelo contém 81, 151 e 51 células nas direções X, Y e Z, respectivamente totalizando 623.781 células. A razão de 1,5 foi utilizada para expansão das bordas do modelo com células de amortecimento, com a finalidade de minimizar os efeitos de borda.

Nas posições das seções geoeletricas foram geradas seções magnéticas a partir do modelo 3D recuperado, com a finalidade de comparar essas duas respostas. Os produtos oriundos do modelo inverso da amplitude total do vetor de magnetização (AMPL), componente perpendicular (EPRP) e componente projetada (EPROJ) foram avaliados. Conforme Ellis *et al.* (2012), a amplitude do vetor de magnetização é o produto mais indicado e robusto para interpretação.

#### 4.5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na descrição do furo de sonda F1, que interceptou a brecha hidrotermal, verificou-se a presença de magnetitas nas litologias associadas aos piroxenitos da intrusão principal. Dessa maneira, os mapas magnéticos ajudaram a caracterizar a estrutura magnética associada à ocorrência da brecha hidrotermal.

O mapa magnético do CMA (**Figura 33-A**) ressaltou os contatos da intrusão principal, entretanto os contrastes da brecha hidrotermal foram mascarados pelos gradientes elevados oriundos do corpo magnético principal. Essa influência fica evidente quando se visualiza o perfil do CMA da **Figura 33-C**. No perfil é possível verificar o aumento dos gradientes na direção sul, na ordem de 600 nT.

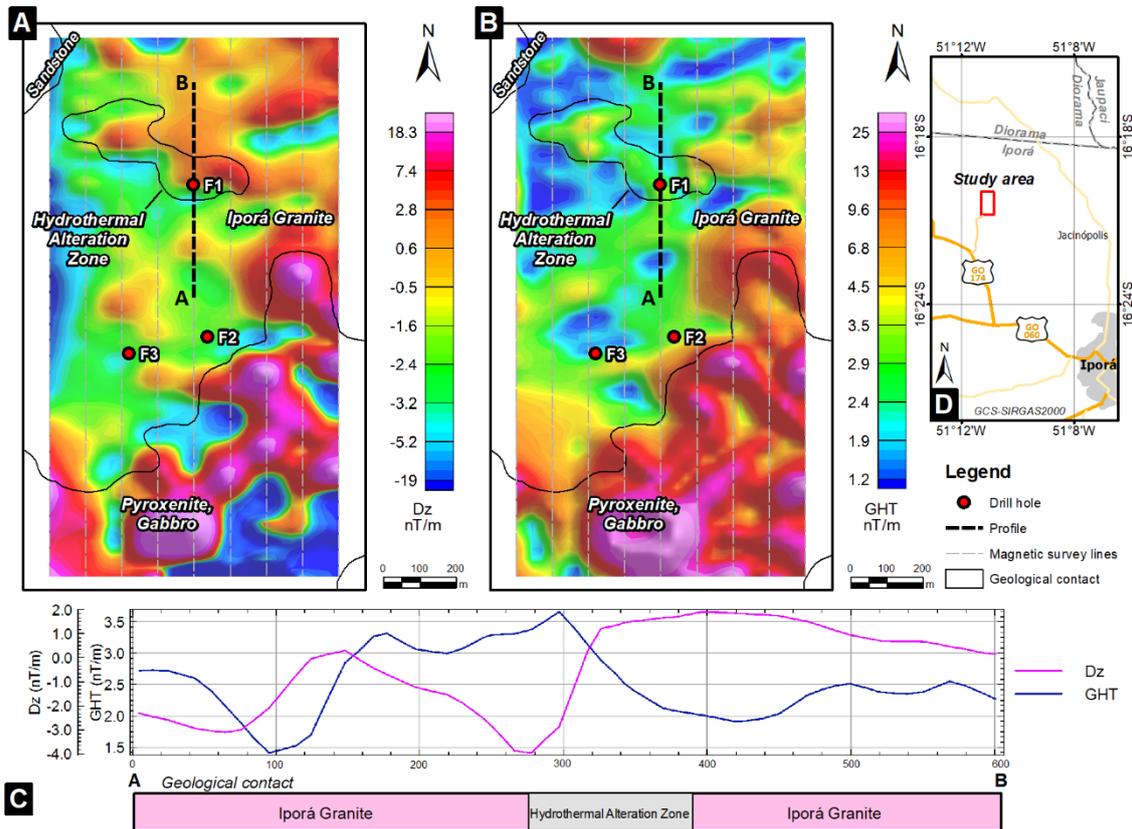


**Figura 33-A:** Campo Magnético Anômalo (CMA); **B:** Gradiente Total (GT); **C:** Perfil com o CMA e o GT sobre a zona de alteração hidrotermal; **D:** Localização da área de estudo.

O filtro do GT ressaltou melhor as estruturas magnéticas secundárias, sobretudo a zona de brecha hidrotermal, conforme o mapa da **Figura 33-B**. Os contatos do corpo magnético principal foram bem marcados com esse filtro. O perfil do GT na **Figura 33-C** confirma a anomalia relacionada à zona de alteração hidrotermal. Estruturas menores na parte noroeste da área de estudo podem indicar a continuidade da zona da brecha (zona de alteração hidrotermal).

O filtro derivativo Dz (**Figura 34-A**) aplicado aos dados do CMA realçou estruturas magnéticas de direções NW-SE e NE-SW, suavizadas no GT, na parte norte da área de estudo. Entretanto, os contornos da zona de brecha não ficaram bem marcados, uma vez que o filtro tornou evidente as altas frequências que indicam fontes mais rasas, sobretudo nas proximidades desta estrutura. Na **Figura 34-C** os perfis da Dz e do GHT, marcaram, respectivamente, as altas frequências das fontes rasas e as bordas da zona de brecha e de um pequeno corpo magnético a sul.

Na **Figura 34-B** é possível comparar os resultados obtidos com o filtro GHT com o GT. As estruturas NE-SW ficaram mais evidentes, o que reforça o padrão das direções preferenciais do complexo Fazenda Buriti (FEITOZA, 2011). Porém, as estruturas secundárias mostraram menores amplitudes.



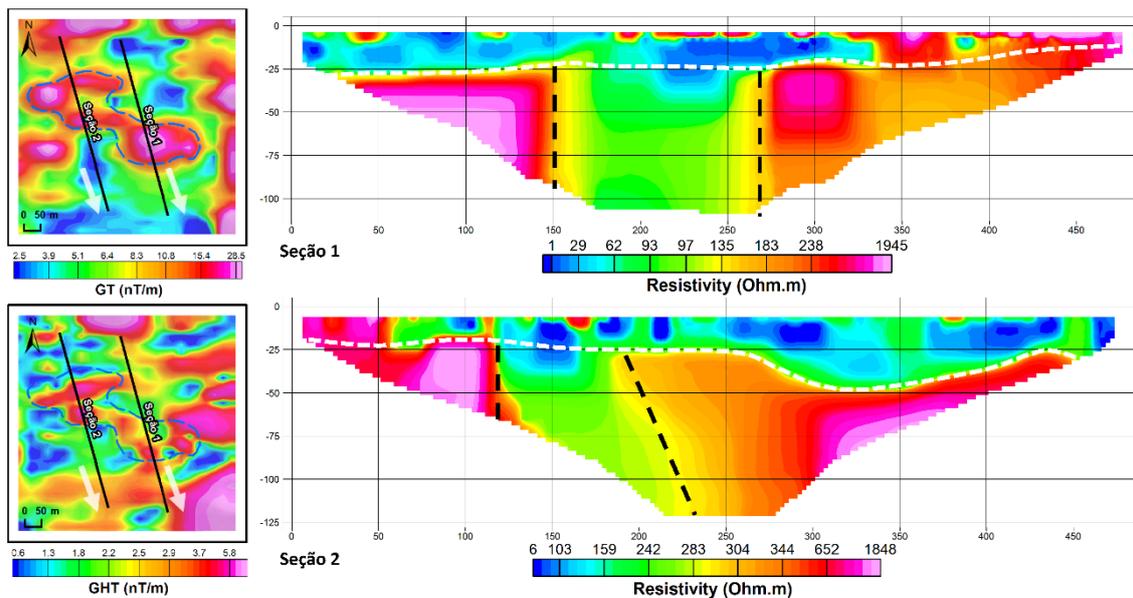
**Figura 34-A:** Primeira Derivada Vertical (Dz); **B:** Gradiente Horizontal Total (GHT); **C:** Perfil com a Dz e o GHT sobre a zona de alteração hidrotermal; **D:** Localização da área de estudo.

As seções de resistividade das linhas 1 e 2 mostraram que existe uma continuidade da zona de brecha em subsuperfície, uma vez que há registro destas rochas no furo de sonda F1 e os contrastes verticais de resistividade elétrica indicam a presença de zonas verticais com contrastes bastante distintos abaixo de horizontes geoeletricos.

Na **Figura 35** constam os recortes dos mapas magnéticos dos filtros GT e GHT que melhor marcaram os contatos da zona de brecha, com o intuito de correlacionar a

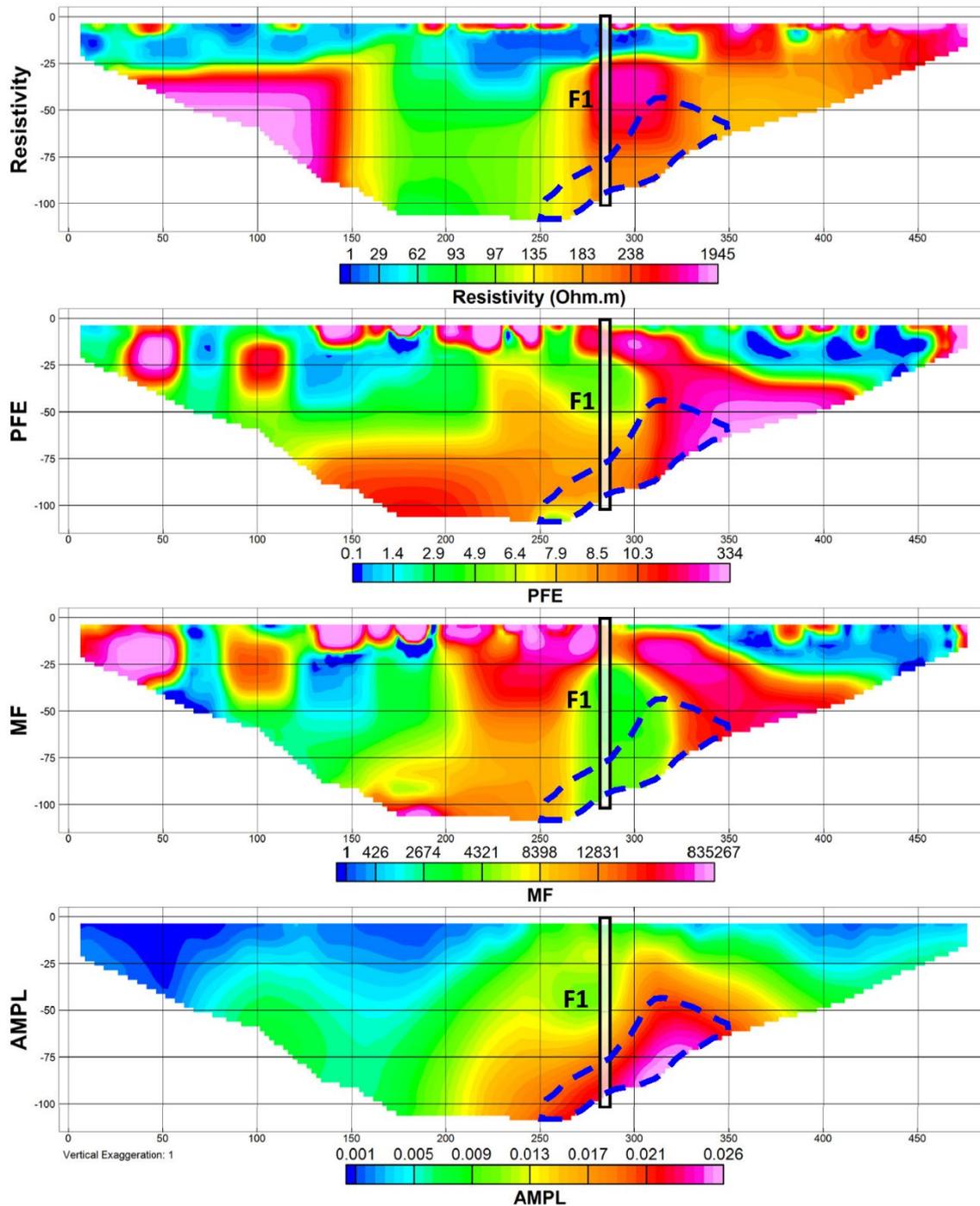
informação magnética com a elétrica. O modelo de resistividade elétrica obtido para a Linha 1 evidencia padrões de resistividade elétrica horizontais e verticais. Na parte superficial da seção notam-se valores de resistividade elétrica abaixo de 300 Ohm.m que é característico de solos argilosos com a presença de água. Nessa camada geoeétrica notam-se alguns pontos com alta resistividade elétrica (acima de 1.000 Ohm.m), que podem ser associados a blocos de rochas no solo.

O padrão vertical de variação de resistividade elétrica nas seções indica rochas com diferentes composições minerais ou variados conteúdos de água. Desse modo, no modelo de resistividade elétrica da Linha 1 nota-se uma estrutura central com resistividades intermediárias entre 70 e 140 Ohm.m, relacionada à zona de brecha mineralizada em ETR (**Figura 35**).



**Figura 35:** Gradiente Total (GT) e Gradiente Horizontal Total (GHT) com localização das seções geoeletricas 1 e 2 em planta e o sentido do levantamento. Seções geoeletricas 1 e 2 com contrastes de resistividade interpretados.

A seção da linha 2 (**Figura 35**) mostra um deslocamento da estrutura central vista na seção da linha 1, além disso, um aumento dos valores de resistividade com valores entre 150 e 280 Ohm.m. De maneira geral os valores de resistividade na seção da linha 2 se mostraram mais elevados do que na seção da linha 1. Entretanto, os contrastes das estruturas são semelhantes nas duas seções, o que sugere que o aumento da resistividade na seção da linha 2 pode estar associado a uma redução de sulfetos no corpo da brecha na direção oeste.



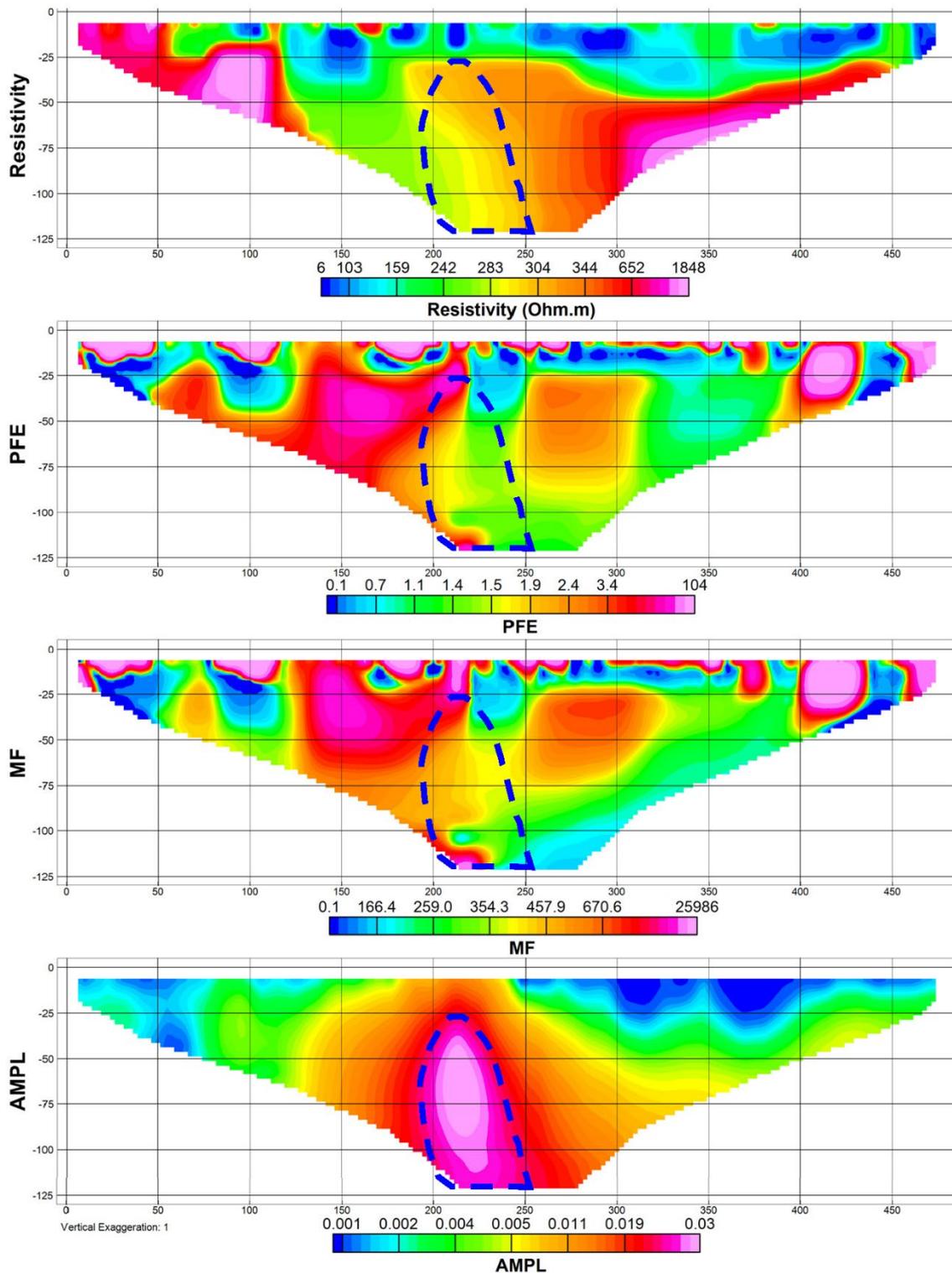
**Figura 36:** Seção geolétrica 1 com a posição do furo de sonda F1. Resistividade (ER); Percentual do Efeito Frequência (PFE); Fator Metal (MF) e modelo inverso de Amplitude Total do Vetor de Magnetização (AMPL) recuperado, com detalhe para a estrutura magnética associada a brecha em linha tracejada de cor azul em todas as seções.

O perfil de solo e a zona saprolitizada ficaram evidentes no modelo de resistividade elétrica da Linha 2, com resistividades abaixo de 300 Ohm.m (**Figura 35**). É possível visualizar do lado esquerdo do perfil, NW, um aumento significativo das resistividades. Isso ocorre porque o Granito Iporá aflora nessa região, o que faz com que as resistividades se elevem.

---

O modelo inverso de AMPL recuperado foi associado ao modelo elétrico nos produtos ER, PFE e MF, com a localização do furo F1 na **Figura 36**. A amplitude do vetor de magnetização recuperou a estrutura associada a brecha com maior detalhe. As anomalias de alto e intermediário MF que ocorrem dentro das estruturas delimitadas no AMPL se devem a intercalações descritas nas litologias do furo F1. A relação da alta cargabilidade e condutividade do meio ressaltada pelo MF (HALLOF, 1964) é relacionada com o perfil de oxidação do solo, em que ocorrem zonas de forte alteração, com material coeso composto essencialmente por argilominerais e porções ferruginosas.

A associação dos produtos da ER, do PFE e do MF ao modelo inverso de AMPL na seção geométrica 2 favoreceu o mapeamento da continuidade da zona de brecha. Na **Figura 37** é possível verificar o corpo magnético interpretado e os contrastes do MF, que podem estar associados a intercalação das litologias, conforme o furo F1 interceptou. A seção recuperada do modelo AMPL mostrou que a zona da brecha está bem marcada nessa região. A anomalia magnética está em uma zona de transição nos modelos ER e PFE. A anomalia de alto MF se desloca para a esquerda do centro da anomalia magnética e na direita surge uma anomalia intermediária de MF. Essa divisão sugere que a brecha, nessa região, possui duas zonas de contrastes diferentes: uma com alto magnetismo e alto MF e outra com alto magnetismo e MF intermediário.

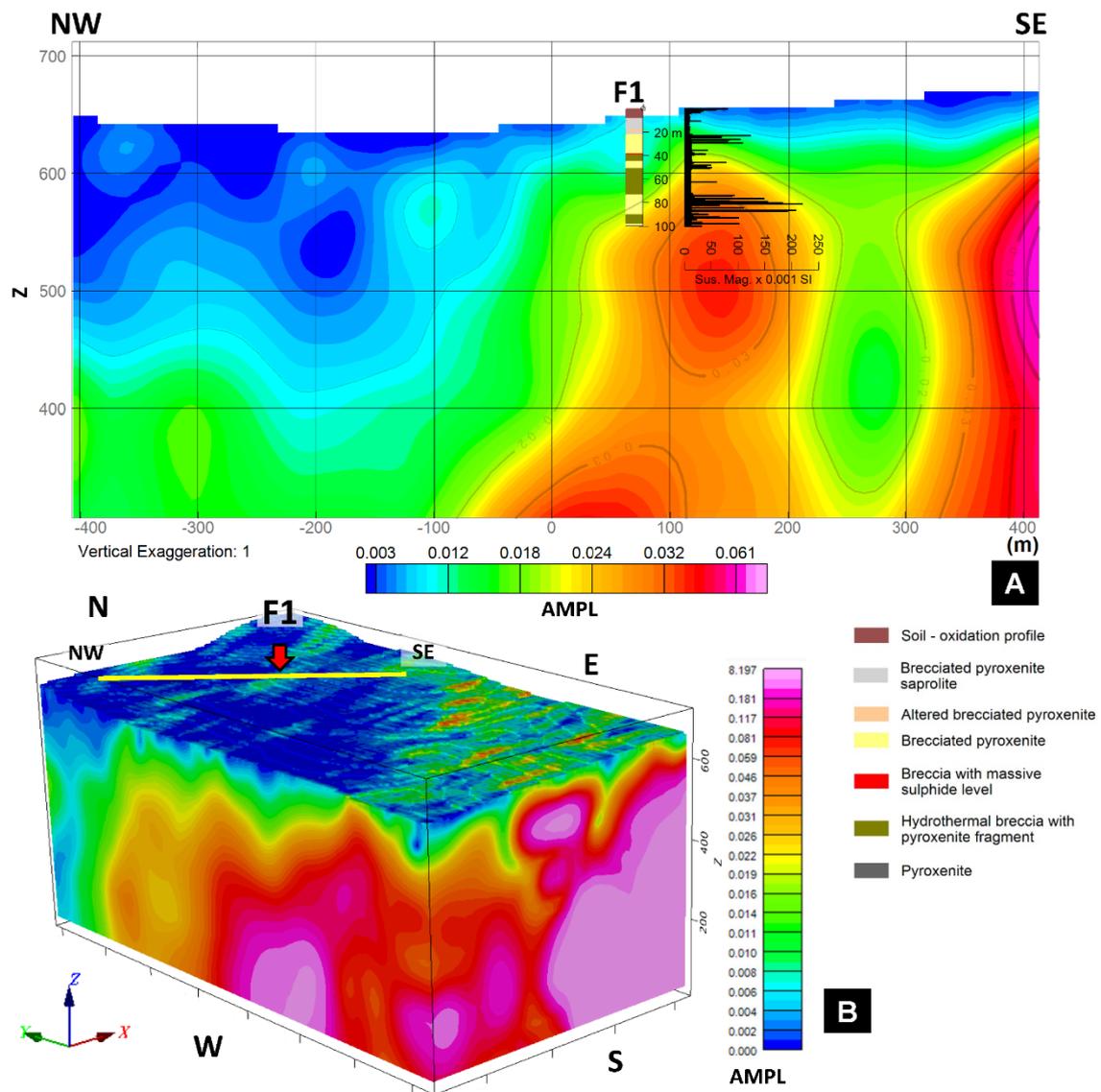


**Figura 37:** Seção geolétrica 2. Resistividade (ER); Percentual do Efeito Frequência (PFE); Fator metal (MF) e modelo inverso de Amplitude Total do Vetor de Magnetização (AMPL) recuperado, com detalhe para a estrutura magnética associada a brecha em linha tracejada de cor azul em todas as seções.

A seção NW-SE da **Figura 38**, evidencia o modelo inverso de amplitude do vetor de magnetização que ressalta a estrutura magnética em profundidade que liga a intrusão alcalina com a zona de brecha interceptada pelo furo de sonda. Esta estrutura pode ser interpretada como um diatrema, o conduto de ejeção dos fluidos hidrotermais a altas

velocidades que conecta a origem do magma expelido a superfície. A zona de alteração hidrotermal forma as brechas de matriz sienítica e os fragmentos de piroxenitos magnéticos, os quais são a fonte da anomalia recuperada.

A parte mais magnética da zona de brecha é vista no centro da seção AMPL. Quando associada ao log do furo F1 é possível verificar que o piroxenito, que ocorre a 100 metros de profundidade, contém um magnetismo mais acentuado, semelhante ao da intrusão principal. Além disso, podemos observar a correlação dos valores de susceptibilidade magnética medida nos testemunhos do furo de sonda (perfil do log em preto) com a amplitude recuperada.



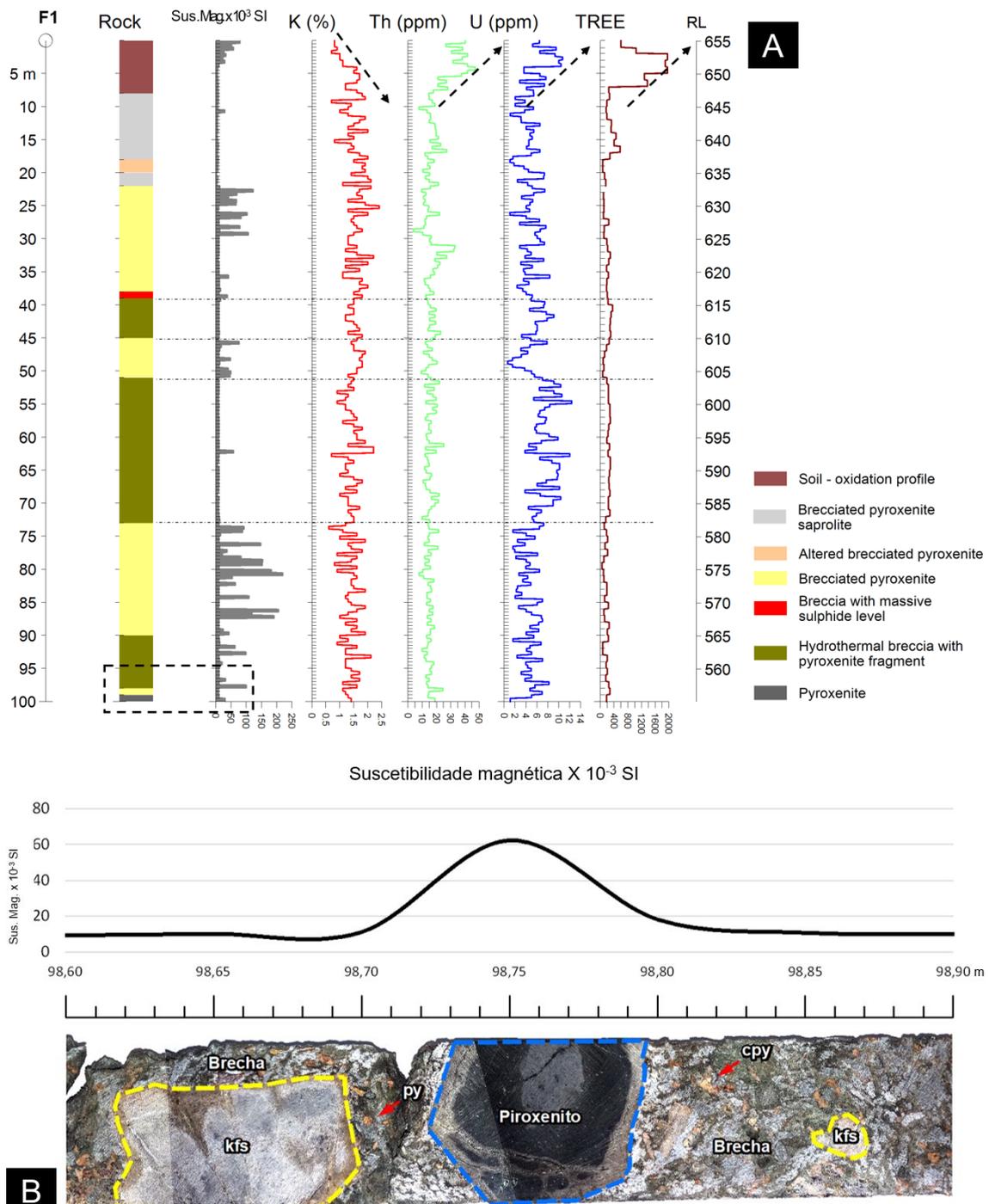
**Figura 38-A:** Seção longitudinal do modelo inverso de Amplitude Total do Vetor de Magnetização – AMPL. Log do furo de sonda F1 com as litologias em cores representadas na legenda e perfil da susceptibilidade magnética medida nos testemunhos no perfil em preto; **B:** Bloco diagrama com a localização do furo e da seção longitudinal (linha amarela).

---

As medidas diretas de suscetibilidade magnética e radiometria nos testemunhos do furo de sonda F1 estabeleceram as assinaturas petrofísicas e ajudaram a compreender a resposta geofísica da brecha hidrotermal. Na **Figura 39-A** é possível verificar uma relação inversa do K com Th, U e somatório de ETR ( $\Sigma$ ETR) no perfil de oxidação. Todavia, o Th e U acompanham o enriquecimento de ETR no perfil de oxidação. Essa relação radiométrica com o enriquecimento de ETR pode ser utilizada para mapear zonas anômalas. Além disso, mostram que a mineralização de ETR ocorre associada a elementos radioativos (VONCKEN, 2016). A brecha hidrotermal tem enriquecimento em U em relação ao piroxenito brechado devido ao processo de alteração hidrotermal.

Os mapas magnéticos caracterizaram a resposta magnética da brecha hidrotermal (**Figura 33 e Figura 34**). A **Figura 39-B** evidencia os picos de suscetibilidade magnética medidas diretamente nos testemunhos do furo de sonda F1. Os resultados mostraram que os picos de suscetibilidade magnética ao longo do furo são causados por fragmentos de piroxenito presentes na zona de piroxenito brechado, em contraste com o caráter não magnético da brecha hidrotermal dominada por matriz sienítica.

O perfil de suscetibilidade magnética mostra que, à medida que aumenta a profundidade, os picos ocorrem em maior quantidade. A fotografia do testemunho do furo de sonda F1, na profundidade de 98,6 a 98,9 metros, com medidas a cada 0,05 metros, evidenciou a fonte dos picos nos fragmentos de piroxenitos (**Figura 39-B**).



**Figura 39-A:** Log do furo F1,  $\Sigma$ ETR e dados petrofísicos de Suscetibilidade magnética, K, Th e U; **B:** Detalhe da profundidade 98,6 a 98,9 com fotografia dos testemunhos e medidas de Suscetibilidade magnética. Feldspato potássico – kfs; Pirita – py; Calcopirita – cpy.

#### 4.6. CONCLUSÕES

Os mapas magnéticos oriundos do levantamento magnetométrico terrestre favoreceram o mapeamento da zona de ocorrência da brecha hidrotermal, uma vez que as

---

descrições dos testemunhos do furo F1 evidenciaram a presença de magnetita associadas as litologias da intrusão.

Entretanto, uma avaliação mais detalhada do furo F1 com uso de petrofísica mostrou que a brecha hidrotermal mineralizada com ETR não é totalmente magnética. Os fragmentos de piroxenito ao longo da brecha ocasionam uma resposta magnética intermediária em relação aos contrastes da área de estudo.

O filtro GT foi o mais preciso para realizar a delimitação da zona de ocorrência da brecha hidrotermal. Além disso, estruturas secundárias que seguem o padrão de orientação da área de estudo puderam ser mapeadas. Com os filtros Dz e GHT não foi possível delimitar a zona de ocorrência da brecha hidrotermal com precisão.

A associação de dados magnéticos com dados elétricos se mostrou eficiente, principalmente na definição de contatos em subsuperfície. Estruturas verticais e subverticais foram bem marcadas quando se associou essas informações.

O modelo inverso de Amplitude Total do Vetor de Magnetização quando associado as anomalias de MF ressaltaram as diferenças de intercalação na zona de ocorrência da brecha hidrotermal. Essa intercalação foi evidenciada pelo furo F1, na qual ocorrem, principalmente, a brecha hidrotermal enriquecida em ETR com baixo magnetismo e o piroxenito brechado, responsável pela assinatura magnética intermediária da zona de ocorrência da brecha hidrotermal.

#### **4.7. AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), processo 23106.098384/2022-23. Os autores agradecem a empresa de pesquisa mineral 3 S Ltda. por disponibilizar os dados geológicos para realização deste estudo.

#### **4.8. REFERÊNCIAS**

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. Províncias estruturais brasileiras. Em: Simpósio de Geologia do Nordeste. 1977.

BARBOSA, R. D.; PEREIRA, J. G. Inversão 3D de dados Magnéticos na Região de Mara Rosa - Goiás, Brasil, utilizando Geosoft VOXI. 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & Expogef, Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013. Anais... Em: 13TH International Congress of the Brazilian Geophysical Society & Expogef, Rio de Janeiro, Brazil, 26-29 august 2013. Rio de Janeiro, Brazil: Brazilian

---

Geophysical Society, 29 ago. 2013. Disponível em: <<https://library.seg.org/doi/10.1190/sbgf2013-109>>. Acesso em: 26 dez. 2022

BLUM, M. DE L. B. Processamento E Interpretação De Dados De Geofísica Aérea No Brasil Central E Sua Aplicação À Geologia Regional E À Prospecção Mineral. [s.l.] Universidade de Brasília, Instituto de Geociência, 1999.

CERQUEIRA, M. Geologia e Evolução Petrológica do Complexo Alcalino Fazenda Buriti, Iporá – Goiás. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 1995.

DANNI, J.C.M. Geologie des complexes ultrabasiques alcalins de la region d'Iporá, Goiás (Bresil). Thèse, Université Sud – Centre d'Orsay, Paris, 101 p. 1974.

DANNI, J.C.M. Magmatic differentiation of the alkaline ultrabasic intrusions of the Iporá region, southwest Goiás, Brazil. In: International Symposium on Carbonatites, 1, p.149-167. 1978.

DUTRA, A. C.; MARANGONI, Y. R. Gravity and magnetic 3D inversion of Morro do Engenho complex, Central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 28, n. 2, p. 193–203, ago. 2009.

DUTRA, A. C.; MARANGONI, Y. R.; JUNQUEIRA-BROD, T. C. Investigation of the Goiás Alkaline Province, Central Brazil: Application of gravity and magnetic methods. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 33, n. 1, p. 43–55, fev. 2012.

ELLIS, R. G.; DE WET, B.; MACLEOD, I. N. Inversion of Magnetic Data from Remanent and Induced Sources. *ASEG Extended Abstracts*, v. 2012, n. 1, p. 1–4, dez. 2012.

FEITOZA, L. M. Assinatura geofísica das rochas alcalinas da porção norte da província alcalina de Goiás. [s.l.] Universidade de Brasília, Instituto de Geociência, 7 jul. 2011.

FEITOZA, L. M.; CARMELO, A. C.; PIRES, A. C. B.; HUELSEN, M. G. V.; de FREITAS, M. E. Assinatura Geofísica dos Complexos Alcalinos Fazenda Buriti e Arenópolis, porção norte da Província Alcalina de Goiás. Em: 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 15-18 August 2011. SEG Global Meeting Abstracts. [s.l.] Brazilian Geophysical Society, 2011. p. 682–690.

HALLOF, P. G. A comparison of the various parameters employed in the variable-frequency induced-polarization method. *Geophysics*, v. 29, n. 3, p. 425–433, jun. 1964.

HENRIQUE LAUX, J.; PIMENTEL, M.; DANTAS, E.; ARMSTRONG, R.; JUNGES, S. Two Neoproterozoic crustal accretion events in the Brasília Belt, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 18, p. 183–198, 31 jan. 2005.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Base Cartográfica Contínua do Brasil, escala 1:250.000 – BC250: versão 2019. Rio de Janeiro, 2019.

ISLES, D. J.; RANKIN, L. R. Geological Interpretation of Aeromagnetic Data. [s.l.] Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists, 2013.

---

JUNQUEIRA-BROD, T. C.; ROIG, H. L.; GASPAR, J. C.; BROD, J. A.; MENESES, P. R. A província alcalina de Goiás e a extensão do seu vulcanismo kamafugítico. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 32, n. 4, p. 559–566, 1 dez. 2002.

JUNQUEIRA-BROD, T. C.; BROD, J. A.; GASPAR, J. C.; JOST, H. Kamafugitic diatremes: facies characterisation and genesis—examples from the Goiás Alkaline Province, Brazil. *Lithos*, v. 76, n. 1–4, p. 261–282, set. 2004.

JUNQUEIRA-BROD, T. C.; GASPAR, J. C.; BROD, J. A.; JOST, H.; BARBOSA, E. S. R.; KAFINO, C. V. Emplacement of kamafugite lavas from the Goiás alkaline province, Brazil: constraints from whole-rock simulations. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 18, n. 3–4, p. 323–335, mar. 2005.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras. Rio de Janeiro: CETEM, MCTI, 2013.

LOKE, M. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys. [s.l.] Geotomo Software, Res2dinv 3.5 Software, 2004.

MARANGONI, Y. R.; MANTOVANI, M. S. M. Geophysical signatures of the alkaline intrusions bordering the Paraná Basin. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 41, p. 83–98, jan. 2013.

MARQUES, Gustavo Campos. Evolução tectônica e metalogenética no contexto do depósito aurífero de Fazenda Nova, Arco Magmático de Arenópolis, Goiás. 2017. xii, 169 f., il. Tese (Doutorado em Geologia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MARTINS, E. S. F. Contribuição geofísica à análise do arcabouço tectônico na província alcalina de goiás. [s.l.] Universidade de Brasília, 13 ago. 2021.

MARTINS, E. S. F.; VIDOTTI, R. M. Another way of looking at an Alkaline Province. *Journal of Geodynamics*, v. 143, p. 101811, jan. 2021.

MORAES ROCHA, L. G.; PIRES, A. C. B.; CARMELO, A. C.; ARAÚJO FILHO, J. O. Geophysical characterization of the Azimuth 125° lineament with aeromagnetic data: Contributions to the geology of central Brazil. *Precambrian Research*, v. 249, p. 273–287, ago. 2014.

MORAES ROCHA, L. G.; PIRES, A. C. B.; CARMELO, A. C.; OKSUM, E. Curie surface of the alkaline provinces of Goiás (GAP) and Alto Paranaíba (APAP), central Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 297, p. 28–38, maio 2015.

MOURA, C. O. Geologia do sudoeste do estado de Goiás: Integração de dados geológicos e aerogeofísicos de alta densidade. Dissertação de Metrado — [s.l.] Universidade de Brasília, Instituto de Geociência, 2007.

PIMENTEL, M.M., FUCK, R.A.; ALVARENGA, C. J. S. Post-Brasiliano (Pan-African) high-K granitic magmatism in central Brazil: late Precambrian/early Paleozoic extension. *Precambrian Research*, 80:p.217-238. 1996.

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

- 
- PIMENTEL M.; RODRIGUES J.; SCHUTESKY M.; JUNGES S.; MATTEINI M.; ARMSTRONG R. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, Central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS U-Pb sedimentary provenance: a review. *Journal of South American Earth Sciences - J S AMER Earth SCI*, v. 31, p. 345–357, 1 abr. 2011.
- PIMENTEL, M.; FERREIRA FILHO, C.; ARMSTRONG, R. SHRIMP U–Pb and Sm–Nd ages of the Niquelândia layered complex: Meso (1.25 Ga) and Neoproterozoic (0.79 Ga) extensional events in central Brazil. *Precambrian Research - PRECAMBRIAN RES*, v. 132, p. 133–153, 1 jun. 2004.
- PIMENTEL, M. M. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil: a geochronological and isotopic approach. *Brazilian Journal of Geology*, v. 46, n. suppl 1, p. 67–82, jun. 2016.
- PIMENTEL, M. M.; FUCK, R. A. Neoproterozoic crustal accretion in central Brazil. *Geology*, v. 20, n. 4, p. 375–379, 1 abr. 1992.
- RAJAGOPALAN, S. Analytic Signal vs. Reduction to Pole: Solutions for Low Magnetic Latitudes. *Exploration Geophysics*, v. 34, n. 4, p. 257–262, 2003.
- RAMOS, L. N. R. A. Dados gamaespectrométricos e magnetométricos aéreos aplicados ao mapeamento geológico e à exploração de ouro na região de Fazenda Nova, porção leste do arco magmático de Arenópolis, Goiás. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 165p. 2010.
- REYNOLDS, J. M. An introduction to applied and environmental geophysics. 2nd ed ed. Chichester, West Sussex; Malden, Mass: Wiley-Blackwell, 2011.
- TAKEHARA, Lucy. Avaliação do potencial de Terras Raras no Brasil. / Organizado por Lucy Takehara. – Brasília: CPRM, 2015. 218 p.: il. – (Informe de Recursos Minerais, Série Minerais Estratégicos, 02).
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. Applied geophysics. 2nd ed ed. Cambridge [England]; New York: Cambridge University Press, 1990.
- VALERIANO, C.; DARDENNE, M.; FONSECA, M.; SIMÕES, L. S.; SEER, H. A. Evolução Tectônica da Faixa Brasília. Em: *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. [s.l: s.n.]. p. 575-592. 2004.
- VALERIANO, C.; PIMENTEL, M.; HEILBRON, M.; ALMEIDA, J.; TROUW, R. A. Tectonic evolution of the Brasilia Belt, Central Brazil, and early assembly of Gondwana. *Geological Society London Special Publications*, v. 294, p. 197–210, 1 jan. 2008.
- VONCKEN, J. H. L. The Rare Earth Elements. Cham: Springer International Publishing, 2016.

---

## **CAPÍTULO V: CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O primeiro estudo permitiu a conclusão de que a interpretação das informações geofísicas e geológicas favoreceram a definição de contatos litológicos, principalmente os relacionados a intrusão alcalina. Os dados magnetométricos auxiliaram na compreensão das estruturas e corpos magnéticos. Os contrastes magnéticos entre o Granito Iporá e o Complexo Fazenda Buriti ajudaram a delimitar o contato destas litologias ao norte da área de estudo. O Gradiente Total contribuiu para o delineamento da intrusão alcalina Fazenda Buriti, uma vez que o filtro centralizou a anomalia magnética e ressaltou suas bordas. Como contribuição ao mapeamento da região, os contornos do mapa geológico do complexo Fazenda Buriti foram atualizados.

As leituras petrofísicas nas amostras de rocha dentro das três unidades principais da área de estudo permitiram estimar o conteúdo médio percentual de magnetita nessas rochas e caracterizar as assinaturas petrofísicas das unidades.

O filtro de separação de bandas utilizado no mapeamento das estruturas primárias e secundárias se mostrou eficiente, como visto nos valores de profundidade das fontes encontrados em estudos anteriores.

A delimitação de alvos com o método aplicado se mostrou eficiente e de rápida aplicação, uma vez que o resultado positivo do furo de sonda comprovou sua eficácia. Entretanto, cabe ressaltar que o furo de sonda serviu somente para esta confirmação, pois até chegar a esta etapa os alvos devem ser detalhados em escala compatível por outros métodos com maior precisão.

O segundo artigo permitiu concluir que os mapas magnéticos produzidos a partir dos dados do levantamento magnetométrico terrestre favoreceram o mapeamento da zona de ocorrência da brecha hidrotermal, uma vez que as descrições dos testemunhos do furo F1 evidenciaram a presença de magnetita associadas as litologias da intrusão.

---

Entretanto, uma avaliação mais detalhada do furo F1 com uso de petrofísica mostrou que a brecha hidrotermal mineralizada com ETR não é totalmente magnética. Os fragmentos de piroxenito ao longo da brecha ocasionam uma resposta magnética intermediária em relação aos contrastes da área de estudo. O aumento das concentrações de urânio nas faixas de ocorrência da brecha hidrotermal evidencia o processo de alteração hidrotermal. As leituras no perfil de oxidação do solo mostraram a correlação entre o enriquecimento de ETR com o aumento das concentrações de tório e urânio.

O filtro GT foi o mais preciso para realizar a delimitação da zona de ocorrência da brecha hidrotermal. Além disso, estruturas secundárias que seguem o padrão de orientação da área de estudo puderam ser mapeadas. Com os filtros Dz e GHT não foi possível delimitar a zona de ocorrência da brecha hidrotermal com precisão.

A associação de dados magnéticos com dados elétricos se mostrou eficiente, principalmente na definição de contatos em subsuperfície. Estruturas verticais e subverticais foram bem marcadas quando se associou essas informações.

O modelo de Amplitude Total do Vetor de Magnetização quando associado as anomalias de MF ressaltaram as diferenças de intercalação na zona de ocorrência da brecha hidrotermal. Essa intercalação foi evidenciada pelo furo F1, na qual ocorrem, principalmente, a brecha hidrotermal enriquecida em ETR com baixo magnetismo e o piroxenito brechado, responsável pela assinatura magnética intermediária da zona de ocorrência da brecha hidrotermal.

O estudo confirmou que a Província Alcalina de Goiás possui elevado potencial para prospecção de elementos terras raras.

---

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, I. M. C. P. Gênese e controles da mineralização secundária de P, Ti e ETR no complexo alcalino carbonatítico de Salitre, MG. 2015. 143 f., il. Dissertação (Mestrado em Geologia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

BLUM, M. DE L. B. Processamento E Interpretação De Dados De Geofísica Aérea No Brasil Central E Sua Aplicação À Geologia Regional E À Prospecção Mineral. [s.l.] Universidade de Brasília, Instituto de Geociência, 1999.

CHAKHMOURADIAN, A. R.; WALL, F. Rare Earth Elements: Minerals, Mines, Magnets (and more). *Elements*, v. 8, n. 5, p. 333–340, 1 out. 2012.

COPPER, G. R. J.; COWAN, D. R. Edge enhancement of potential field data using normalized statistics. *Geophysics*. vol. 73, no. 3, H1–H4. 2008.

DENTITH, M. C.; MUDGE, S. T. *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2014.

DICKSON, B.; SCOTT, K. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. *AGSO journal of Australian geology & geophysics*, v. 17, p. 187–199, 1 jan. 1997.

EFIMOV, A.V. Multiplikativnyj pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud po aerogamma-spektrometricheskim dannym. In: *Metody rudnoj geofiziki*, edited by: Naucno-proizvodstvennoje objedinenie "Geofizika" Leningrad. 1978.

ELLIS, R. G.; DE WET, B.; MACLEOD, I. N. Inversion of Magnetic Data from Remanent and Induced Sources. *ASEG Extended Abstracts*, v. 2012, n. 1, p. 1–4, dez. 2012.

GIBSON, S.; THOMPSON, R.; LEONARDOS, O.; DICKIN, A.; MITCHELL, J. The Late Cretaceous Impact of the Trindade Mantle Plume: Evidence from Large-volume, Mafic, Potassic Magmatism in SE Brazil. *Journal of Petrology*, v. 36, fev. 1995.

GNOJEK, I.; PŘICHYSTAL, A. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexploration*, v. 23, n. 4, p. 491–502, dez. 1985.

GOMIDE, C. S. Geoquímica e química mineral de carbonatitos e isótopos estáveis em carbonatitos da província ígnea do alto Paranaíba. 253 f., il. Tese (Doutorado em Geologia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

HALLOF, P. G. A comparison of the various parameters employed in the variable-frequency induced-polarization method. *Geophysics*, v. 29, n. 3, p. 425–433, jun. 1964.

HAXEL GB, BOORE S, MAYFIELD S. U.S. geological survey. Fact Sheet 087-02. Rare Earth elements—critical resources for high technology. 2005. <http://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/>. Acesso dez 2022

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Base Cartográfica Contínua do Brasil, escala 1:250.000 – BC250: versão 2019. Rio de Janeiro, 2019.

---

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil 2016 - 2018. Rio de Janeiro, 2020.

ISLES, D. J.; RANKIN, L. R. Geological Interpretation of Aeromagnetic Data. [s.l.] Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists, 2013.

JOHNSON, W. J. Applications of the electrical resistivity method for detection of underground mine workings. 2003.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. An introduction to geophysical exploration. 3rd ed. Malden, MA: Blackwell Science, 2002.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras. Rio de Janeiro: CETEM, MCTI, 2013.

LI, X. Magnetic reduction-to-the-pole at low latitudes: Observations and considerations. *The Leading Edge*, 27(8), 990-1002. 2008.

LI, X. Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*, v. 71, n. 2, p. L13–L16, 1 mar. 2006.

LOKE, M. H. Tutorial: 2D and 3D electrical imaging survey. 2004.

LUIZ, J. G.; SILVA, L. M. DA C. E. Geofísica de prospecção. Belém: Editora Universitária UFPA: Editora Cejup, 1995.

MARSHALL, D. J.; MADDEN, T. R. Induced polarization, a study of its causes. *GEOPHYSICS*, v. 24, n. 4, p. 790–816, out. 1959.

MILLER, H. G.; SINGH, V. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, v. 32, n. 2–3, p. 213–217, ago. 1994.

MILLIGAN, P. R.; GUNN, P. J. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, v. 17, n. 2, p. 63-75, 1997.

MINTY, B. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, v. 17, p. 39–50, 1 jan. 1997.

MORAES ROCHA, L. G.; PIRES, A. C. B.; CARMELO, A. C.; ARAÚJO FILHO, J. O. Geophysical characterization of the Azimuth 125° lineament with aeromagnetic data: Contributions to the geology of central Brazil. *Precambrian Research*, v. 249, p. 273–287, ago. 2014.

MORAES ROCHA, L. G.; PIRES, A. C. B.; CARMELO, A. C.; OKSUM, E. Curie surface of the alkaline provinces of Goiás (GAP) and Alto Paranaíba (APAP), central Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 297, p. 28–38, maio 2015.

NABIGHIAN, M. N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *GEOPHYSICS*, v. 37, n. 3, p. 507–517, jun. 1972.

---

PINTO, V. DE P. Polarização induzida espectral: teoria, modelagem e aplicação. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) — [s.l.] Universidade de Brasília, Instituto de Geociência, 2019.

RADAELLI, V. A. Níquel de Santa Fé - Estado de Goiás. - Goiânia: CPRM, 2000a.

RADAELLI, V. A. Níquel do Morro do Engenho - Estado de Goiás. - Goiânia: CPRM, 2000b.

REYNOLDS, J. M. An introduction to applied and environmental geophysics. 2nd ed ed. Chichester, West Sussex; Malden, Mass: Wiley-Blackwell, 2011.

RIBEIRO, C. C. Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do complexo carbonatítico Catalão I, GO. 15 ago. 2008.

ROEST, W. R.; VERHOEF, J.; PILKINGTON, M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *GEOPHYSICS*, v. 57, n. 1, p. 116–125, jan. 1992.

SGARBI, P. B. A.; HEAMAN, L. M.; GASPAR, J. C. U–Pb perovskite ages for brazilian kamafugitic rocks: further support for a temporal link to a mantle plume hotspot track. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 16, n. 8, p. 715–724, jun. 2004.

SUMNER, J. S. Principles of induced polarization for geophysical exploration. Amsterdam Oxford New York: Elsevier, 1985.

TAKEHARA, L. Avaliação do potencial de terras raras no Brasil. Organizado por Lucy Takehara. – Brasília: CPRM. 218 p.: il. – (Informe de Recursos Minerais, Série Minerais Estratégicos, 02). 2015.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. Applied geophysics. 2nd ed ed. Cambridge [England]; New York: Cambridge University Press, 1990.

VAN GOSEN, B. S.; VERPLANCK, P. L.; SEAL II, R. R.; LONG, K. R.; GAMBOGI, J. Rare-earth elements: Professional Paper. Reston, VA: [s.n.]. Disponível em: <<http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1802O>>. 2017.

VONCKEN, J. H. L. The Rare Earth Elements. Cham: Springer International Publishing, 2016.