

**APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS PARA MAPEAMENTO E  
AVALIAÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS DE DEPÓSITOS W-SKARNS**

Asmminey Ariane da Silva Nascimento

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Observatório Nacional, como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Orientador(a): Dr. Juarez Lourenço

Co-orientador(a): Dr. Andrés Reinaldo  
Rodriguez Papa

Rio de Janeiro

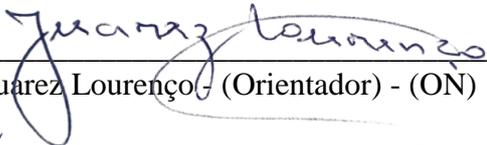
Agosto de 2023

“APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS PARA MAPEAMENTO E  
AVALIAÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS DE DEPÓSITOS W-SKARNS”

Asmminey Ariane da Silva Nascimento

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU  
DE MESTRA EM GEOFÍSICA.

Aprovada por:

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Juarez Lourenço - (Orientador) - (ON)

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Liliane Paiva Panetto - (ON)

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Miguel Angelo Mane - (UERJ)

RIO DE JANEIRO – BRASIL

15 DE AGOSTO DE 2023

Resumo da Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Observatório Nacional como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Geofísica.

## **APLICAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS PARA MAPEAMENTO E AVALIAÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS DE DEPÓSITOS W-SKARNS**

Asmminey Ariane da Silva Nascimento

Agosto/2023

Este trabalho aborda os principais conceitos de depósitos minerais do tipo W-skarns e sua correlação com os contrastes geofísicos para obtenção de novos alvos passíveis à exploração. A área de estudo fica localizada na região do Seridó, delimitada pelas cidades de Currais Novos, Cruzeta, Pícuí, Pedra Lavada e Santa Luzia, pertencentes ao estado do Rio Grande do Norte (RN). O objetivo do trabalho é investigar e avaliar áreas potenciais para ocorrência de mineralizações em skarns, averiguando o comportamento e distribuição das rochas ígneas da região associadas com este depósito mineral. Os dados geofísicos utilizados são referentes ao Projeto Aerogeofísico Paraíba - Rio Grande do Norte (1092) executado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), cedidos para esta pesquisa. Os mapas geofísicos gerados ao longo do trabalho descrevem o comportamento geológico da área de estudo com base nas propriedades físico-químicas dos materiais e rochas inseridas na mesma, onde, os mapas gamaespectrométrico dos canais K, U e Th e Ternário realçaram as principais litologias que podem estar associadas com ocorrências dos elementos W na região de interesse. Os mapas magnéticos temáticos dos filtros DZ e ASA auxiliaram na visualização do comportamento estrutural associadas a estas ocorrências, possibilitando a criação de um mapa interpretado com alvos potenciais. Os métodos geofísicos realçaram a sua importância em estudos e sistemas metalogenéticos, fornecendo subsídios para pesquisas e explorações geológicas de novas discussões na Faixa Seridó.

Abstract of the Dissertation presented to the National Observatory's Graduate Program in Geophysics as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Geophysics.

## **APPLICATION OF GEOPHYSICAL METHODS FOR MAPPING AND EVALUATION OF POTENTIAL AREAS OF W-SKARNS DEPOSITS**

Asmminey Ariane da Silva Nascimento

August/2023

This work address the main concepts of W-skarms mineral deposits and their correlation with the geophysical contrasts to obtain new targets for exploration. The study area is located in the Seridó region, delimited by the cities of Currais Novos, Cruzeta, Pícuí, Pedra Lavada and Santa Luzia, belonging to the state of Rio Grande do Norte (RN). The objective of this work is to investigate and evaluate potential areas for the occurrence of mineralizations in skarns, investigating the behavior and distribution of igneous rocks in the region associated with this mineral deposit. The geophysical data used refer to the Aerogeophysical Paraíba - Rio Grande do Norte Project (1092) carried out by the Geological Survey of Brazil (CPRM). The geophysical maps generated throughout the work describe the geological behavior of the study area based on the physicochemical properties of the materials and rocks inserted in it, where the gammaspectrometric maps of the K, U and Th and Ternary channels highlighted the main lithologies that may be associated with occurrences of W elements in the region of interest. Geophysical methods enhanced their importance in studies of metallogenic systems, providing subsidies for geological research and exploration of new discussions in Seridó belt.

## AGRADECIMENTOS

Finalizo esse ciclo com muita gratidão ao Observatório Nacional e a tudo que me foi fornecido.

Pandemia, perdas afetivas, troca de orientação, oportunidades profissionais, acolhimento e descoberta. Posso resumir a minha passagem no ON com a palavra **resiliência**, pela capacidade de me adaptar a diversas situações ao longo dessa trajetória.

Agradeço imensamente aos meus orientadores, Prof. Dr. Juarez Lourenço e Prof. Dr. Andrés Papa, por terem me acolhido com paciência e disposição, me ajudando no processo de estruturação da minha nova temática e desenvolvimento da mesma.

Agradeço a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa concedida durante o período do mestrado. Esse incentivo financeiro me proporcionou a possibilidade da compra do primeiro computador que tive em minha vida, além de ter sido meu sustento por diversos meses. Jamais esquecerei isto.

Obrigada às pessoas que mais acreditam em mim: meus pais, meu marido e meus sobrinhos. Vocês são à base de tudo. São as forças emanadas para a minha motivação e evolução.

Aos amigos que conheci ao longo dessa trajetória do mestrado: Manu, Reynerthy e Gabriel. Vocês foram essenciais nesse intervalo de tempo, tornando tudo mais leve. Aos amigos da empresa Borborema Mineração por reconhecerem fielmente o meu trabalho e pelo apoio no dia a dia.

Aos meus professores e grandes amigos Prof. Alexandre, Prof. Vanildo, Prof. Rogério Mau e Prof. Leão. Vocês me ajudaram a construir o que eu sou hoje!

Por fim, e não menos importante, agradeço a mim, por nunca ter desistido de ser o que sou. Amo ser Geofísica. Amo atuar na exploração mineral.

Que venham os próximos desafios. Deus sempre me abençoou!

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	10
1.2	OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICO	11
<b>2</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>11</b>
2.1	ASPECTOS FÍSICOS	13
2.1.1	<i>Hidrografia</i>	13
<b>3</b>	<b>CONTEXTO GEOLÓGICO</b>	<b>14</b>
3.1	UNIDADES LITOLÓGICAS	15
3.1.1	<i>Complexo Caicó (PP2cai)</i>	15
3.1.2	<i>Unidade metavulcanossedimentar (PP2caivs)</i>	15
3.1.3	<i>Rochas Metamáficas-ultramáficas (PP2δycai)</i>	15
3.1.4	<i>Formação Jucurutu (NP3sju)</i>	16
3.1.5	<i>Formação Equador (NP3se)</i>	16
3.1.6	<i>Formação Seridó (NP3ss)</i>	16
<b>4</b>	<b>PROVÍNCIA BORBOREMA</b>	<b>17</b>
4.1	FAIXA SERIDÓ	17
4.1.1	<i>Depósitos tipo W-Skarns</i>	19
<b>5</b>	<b>MINERALOGIA</b>	<b>20</b>
5.1	ILMENITA ( $\text{Fe}^{2+}\text{TiO}_3$ )	21
5.2	MAGNETITA ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )	21
5.3	MONAZITA ((Ce, La, Y, Th) $\text{PO}_4$ )	22
5.4	ZIRCÃO ( $\text{ZrSiO}_4$ )	23
5.5	SCHEELITA ( $\text{CaWO}_4$ )	24
<b>6</b>	<b>GEOMORFOLOGIA</b>	<b>24</b>
6.1	DEPRESSÃO SERTANEJA	25
6.2	TABULEIROS COSTEIROS	25
<b>7</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>25</b>
7.1	DADOS GEOFÍSICOS	26
7.1.1	<i>Etapa 1</i>	27
7.2.1	<i>Etapa 2</i>	29
7.1.2	<i>Etapa 3</i>	30
<b>8</b>	<b>O CAMPO MAGNÉTICO DA TERRA</b>	<b>30</b>
8.1	MAGNETIZAÇÃO INDUZIDA E REMANESCENTE	31
<b>9</b>	<b>LEVANTAMENTO AEROGEOFÍSICO</b>	<b>31</b>
9.1	MÉTODO AEROGAMAESPECTROMÉTRICO	33

9.1.1 Radioelementos: fundamentos.....	34
9.1.2 Decaimento radioativo .....	35
9.1.3 Interações de raios gamas com a matéria.....	36
<b>9.2 MÉTODO AEROMAGNETOMÉTRICO .....</b>	<b>37</b>
9.2.1 Filtragens.....	39
<b>10 RESULTADOS .....</b>	<b>40</b>
<b>10.1 DADOS AEROGAMESPECTROMÉTRICOS.....</b>	<b>40</b>
10.1.1 Canal Potássio (K).....	40
10.1.2 Canal Urânio (U).....	41
10.1.3 Canal Tório (Th).....	43
10.1.4 Ternário .....	44
<b>10.2 DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS .....</b>	<b>45</b>
10.2.1 Derivada Vertical (DZ).....	45
10.2.2 Amplitude do Sinal Analítico .....	46
10.2.3 Modelo VOXI.....	48
<b>10.3 MAPA ALVOS POTENCIAIS .....</b>	<b>49</b>
<b>11 DISCUSSÕES .....</b>	<b>52</b>
<b>12 CONCLUSÕES.....</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas para formação de um depósito mineral. ....	9
Figura 2 – Mapa da localização da área de estudo. ....	12
Figura 3 – Mapa das principais bacias hidrográficas do estado do Rio Grande do Norte. Destaca-se na cor verde escuro a Bacia do Rio Piranhas-Açu. ....	14
Figura 4 – Mapa da Faixa Seridó. Adaptado de Jardim de Sá <i>et al.</i> (1995) e Dantas, (1997). ....	18
Figura 5 – Modelo metalogenético proposto para representação dos depósito W-skarns da Província Mineral do Seridó. ....	20
Figura 6 – Representação do sistema das soluções sólidas mais importantes para a magnetização das rochas. As linhas tracejadas indicam série de razão Ti:Fe. ....	22
Figura 7 – Fluxograma das atividades desenvolvidas para obtenção dos dados, sendo divididas em duas etapas. ....	27
Figura 8 - Mapa do Campo Magnético Anômalo (CMA) bruto com ausência dos filtros magnéticos. ....	28
Figura 9 – Representação do campo magnético da Terra. ....	30
Figura 10 – Esquema de um aerolevante baseado na CPRM. ....	33
Figura 11 – Campo de visão do espectrômetro, representando a superfície de captação do método. ....	34
Figura 12 – Representação do efeito fotoelétrico para as rochas. ....	36
Figura 13 – Mapa Gamaespectrométrico do canal Potássio (K). O tracejado branco ressalta a localização do Pluton Acari. ....	41
Figura 14 – Mapa Gamaespectrométrico do canal Urânio (U). O tracejado branco ressalta a localização do Pluton Acari. ....	42
Figura 15 – Mapa Gamaespectrométrico do elemento Tório (Th). O tracejado branco ressalta a localização do Pluton Acari. ....	43
Figura 16 – Mapa Ternário evidenciando o contraste dos três canais. O tracejado vermelho ressalta a localização do Pluton Acari. ....	44
Figura 17 – Mapa da Derivada Vertical no eixo Z. ....	46
Figura 18 – Mapa da Amplitude do Sinal Analítico. Os tracejados de cor branca evidenciam as bordas das principais zonas de cisalhamentos e corpos da área geológicos. ....	47
Figura 19 – VOXI ....	48
Figura 20 – Mapa dos Alvos Potenciais representados pelas litologias e zonas passíveis a ocorrência do elemento W. ....	50
Figura 21 – Mapas das Estruturas extraídas a partir dos dados magnéticos (ASA). ...	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas de localização da área de estudo.....	12
Tabela 2 – Propriedades do mineral zircão.....	24
Tabela 3 – Pré processamento dos dados geofísicos referentes ao projeto 1092.....	27
Tabela 4 – Parâmetros do aerolevanteamento geofísico.....	29
Tabela 5 – Valores de susceptibilidade em minerais e rochas em S.I.....	38
Tabela 6 – Relação dos radioelementos para rochas e solos de diferentes tipos.....	53

## 1 INTRODUÇÃO

A Mineração é uma das atividades mais antigas da humanidade que moldou, ao longo do tempo, as paisagens culturais e influenciou a evolução das civilizações em todas as partes do mundo (AMARANTE, 2017). As ferramentas utilizadas para a extração desses materiais eram rudimentares e pouco resistentes, feitas normalmente de ferro caldeado (GERMANI, 2002).

A mineração no Brasil remonta à época colonial, com a chegada dos portugueses em solo brasileiro no século XVII. No século XVIII ocorreu o primeiro grande incremento mineral ocasionado pela descoberta do ouro, iniciando-se assim, ao surgimento das bases para a constituição do setor mineral brasileiro e colocando o Brasil como o primeiro grande produtor mundial de ouro (BARRETO, 2001).

Com a expansão da globalização e o aumento do consumo de metais, os conflitos territoriais relacionados à mega-mineração a céu aberto no continente latino-americano recrudesceram (ARAUJO & FERNANDES, 2016), trazendo um fato marcante na década de 1940, com a criação da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) em 1942 (FIGUEIRÔA, 2006), sendo considerada pioneira nas décadas de 1960.

A Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) se consolidou no cenário mundial como um dos grandes produtores e exportadores de minério de ferro (ARAUJO & FERNANDES, 2016). Destacaram-se também os metálicos não ferrosos, como alumínio, cobre, zinco, entre outros e a partir de 1968, a mineração brasileira registrou taxas anuais de crescimento de mais de 10% (LINS, LOUREIRO, & ALBUQUERQUE, 2000).

Com o grande avanço no setor mineral, na década de 70, foi criado à empresa de economia mista, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, com a missão estratégica de organizar e sistematizar o conhecimento geológico do território brasileiro: a Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM, 2001).

A década de 70 e 80 foi o momento em que se descobriram inúmeras jazidas, muitas das quais, ainda hoje, abastecem a indústria nacional, onde, segundo Marini (2016) duas principais províncias metalogenéticas brasileiras

são responsáveis pela maior parte das minas e depósitos minerais de porte significativo: Província Mineral Ferro-Aurífera do Quadrilátero Ferrífero (MG) e Província Mineral Polimetálica de Carajás (PA).

O conhecimento atual da geologia e da metalogenia das províncias e distritos minerais nacionais é ainda insuficiente para orientar devidamente a prospecção mineral, visto que, países como o Canadá e a Austrália possuem mapas geológicos nas escalas 1/20.000 ou 1/50.000 (ROSIÉRE & ROLIM, 2016), fornecendo informações geológicas com melhor detalhamento. No Brasil, de acordo com Rosière & Rolim (2016) são raros as províncias ou distritos minerais mapeados na escala 1/50.000.

Quando o mapeamento de superfície encontra-se limitado, a ciência da geofísica desenvolve um papel relevante para determinar as distribuições das propriedades físicas, em diversas profundidades, nas quais, refletem a geologia de subsuperfície localmente ou em grande escala (KEAREY *et al.*, 2009).

A pesquisa e a exploração de recursos minerais com o uso da geofísica tornam-se cada vez mais freqüentes, haja vista que, grande parte dos depósitos minerais economicamente viáveis são encontrados em subsuperfície, podendo fornecer, na maioria dos casos, um comportamento distinto do meio circundante (OLIVA, 1985). Este fato colabora para a localização e descoberta de alvos potenciais em seus respectivos ambientes geológicos, favoráveis a sua formação.

Segundo Cox & Singer (1986) uma “ocorrência mineral” é uma concentração de um mineral que é considerada valiosa por alguém em algum lugar, ou que seja de interesse técnico-científico, e um “depósito mineral” é uma ocorrência mineral de dimensões e potencial suficientes para viabilidade econômica de exploração.

Para ambos, os métodos geofísicos de magnetometria e gamaespectrometria contribuem no mapeamento e identificação de anomalias, estruturas, que podem estar associadas às mineralizações. A Figura 1 sintetiza a compreensão de como acontece a formação de um depósito mineral e em quais etapas a geofísica colabora. As etapas são: energia, ligação, fonte, transporte, trapa e destino final.

A etapa da energia, podemos correlacioná-la com o fator calor, onde a atuação da pressão e temperatura são os fatores primordiais. A etapa da

ligação pode ser relacionada à presença de fluidos, os quais são elementos essenciais para a interconexão da energia com a fonte, gerando uma canalização. A etapa fonte pode ser presumida como o local de origem da mineralização.

A fase de transporte ressaltado nessa imagem também possui relação com os fluidos, que dependem da permeabilidade do meio e da existência (ou não) de estruturas geológicas, permitindo a passagem dos mesmos. O termo trapa refere-se ao mesmo significado utilizado para o sistema petrolífero, sendo elas, as responsáveis pelo acúmulo da mineralização.

Vale salientar que as trapas podem ser estruturas geológicas, meandro dos rios, marmitas e outras. Por fim, ocorre a etapa do destino final, na qual, acontece a dispersão da parte residual (PEREIRA *et al.*, 2005).

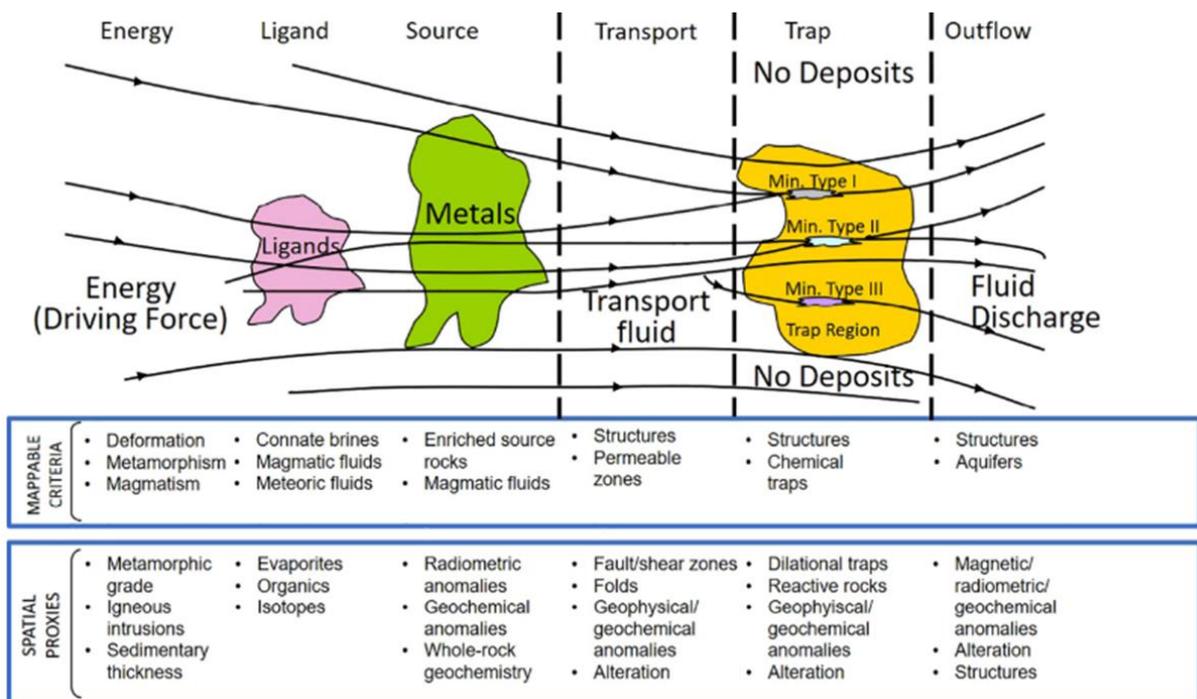


Figura 1 – Etapas para formação de um depósito mineral.  
 Fonte: Knox-Robinson & Wyborn (1997).

Com base nestas descrições, podemos ressaltar o contexto principal a ser explorado no presente trabalho, que é denominado como a Província Mineral do Seridó. Essa região é conhecida por conter vários depósitos W-

skarn que se formaram durante a Orogenia Brasileira Neoproterozóica-Ediacarana (SOUZA NETO *et al.*, 2008).

Os depósitos do tipo W-skarns têm como mineral predominante o minério a scheelita (CORRÊA *et al.*, 2020). De acordo com Salim (1993), a maioria dos skarns também é controlada litologicamente por paredes de mármore, mas existem depósitos e ocorrências que estão relacionados com xistos e gnaisses, rochas que recobrem predominantemente a região de estudo.

Esta pesquisa abordou as principais características metalogenéticas do sistema W-skarns com base em observações geofísicas, através do contraste das propriedades físicas dos métodos magnético e gamaespectrométrico. Foi feita uma comparação dos dados magnéticos e gamaespectrométricos de áreas já consumadas na produção de W-skarns com novas áreas para possíveis explorações. Ambos os métodos geofísicos auxiliaram no reconhecimento e delimitação de possíveis áreas ricas nestas mineralizações.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

A geofísica tornou-se uma ferramenta importante na área da geociência e tem sido muito utilizada para mapeamentos regionais tanto para indústria do petróleo como para exploração mineral. No âmbito da pesquisa e exploração mineral os métodos geofísicos como o magnético, gravimétrico e gamaespectrométrico tem desempenhado um papel importante na descoberta e delimitação de novas ocorrências de minerais associadas a um viés geológico é de extrema relevância, pois, a mesma possibilita a interpretação conjunta de dados que comumente são aplicados em diversos tipos de mineralizações.

Esses métodos integrados com as informações da geologia da região satisfaz a abordagem proposta no presente trabalho, que tem com justificativa:

- 1) Possibilitar o mapeamento e descoberta de novos alvos através da integração dos métodos geofísicos;

- 2) Ressaltar a correlação entre as propriedades físicas e químicas das rochas ígneas e a influência com as mineralizações da região do Seridó, proporcionando a abertura para novas abordagens metodológicas e científicas;
- 3) Propor novas metodologias geofísicas aplicadas diretamente ao estudo de mineralizações em W-skarns na área de estudo, situada na região do Seridó, no estado do Rio Grande do Norte;

## 1.2 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICO

- **Objetivo geral:** Utilizar dados dos métodos geofísicos integrados aos dados e geológicos na investigação e mapeamento de novos alvos prospectivos que apresentem viabilidade de econômica de exploração.
- **Objetivo específico:** Dentre os principais objetivos deste projeto de pesquisa em estágio de mestrado com o emprego dos métodos geofísicos quantitativos e qualitativos, pode-se destacar:
  1. Elaboração mapa magnetométrico e gamaespectrométrico com maior resolução para identificação de estruturas geológicas;
  2. Utilizar os dados geológicos existentes para analisar o comportamento e distribuição das rochas ígneas da região associadas com a ocorrência das mineralizações em W-skarns;
  3. Integrar as propriedades físicas das rochas e contraste das anomalias geofísicas, possibilitando a sugestão de alvos potenciais, associados aos dados geológicos;
  4. Inferir a geometria e direção preferencial dos corpos mineralizados.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo tem uma área aproximada de 9000 Km<sup>2</sup> cujas coordenadas encontra-se na Tabela 1, e localiza-se na região do Seridó,

abrangendo a interceção entre as cidades de Currais Novos, Cruzeta, Pícuí, Pedra Lavada e Santa Luzia no estado do Rio Grande do Norte. A área apresenta uma topografia com altitudes em torno de 135m na região NW com várias drenagens de direção N-S para E-O, já na região SW, SE e NE estão presentes grandes maciços rochosos que apresentam altitudes de até 914m. A região é cortada pelas rodovias BR 230, 226 e 427 e outras vias secundárias.

ÁREA DE ESTUDO	
1)	6°10'20.76"S / 36°59'29.48"O
2)	7° 5'45.84"S / 36°59'38.95"O
3)	6°10'14.21"S / 36°13'26.17"O
4)	7° 5'16.35"S / 36°13'38.68"O

Tabela 1 – Coordenadas de localização da área de estudo.  
Fonte: autora (2022).

A Figura 2 mostra o mapa com o polígono total da área de estudo, representando uma dimensão regional, na qual, ressaltam as principais ocorrências minerais, o contraste geomorfológico e a presença da mina Brejuí inserida nesta região.

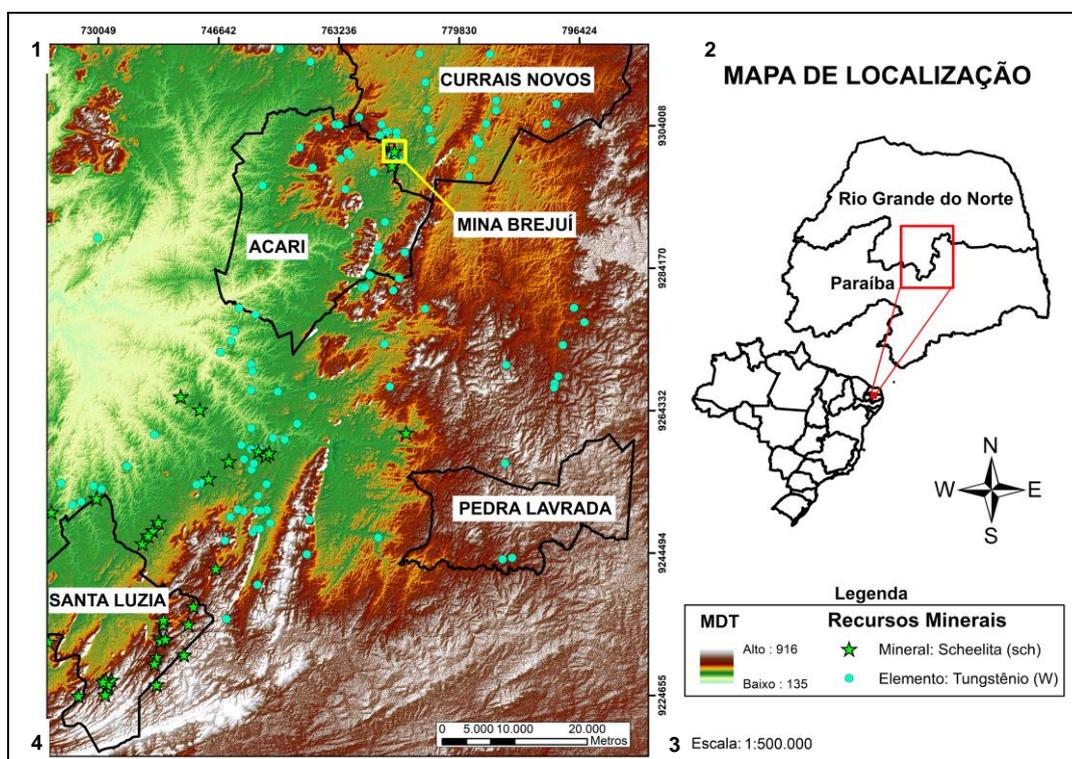


Figura 2 – Mapa da localização da área de estudo.  
Fonte: autora (2022).

Está área foi delimitada por apresentar características relevantes que contribuem para a localização de zonas prospectivas dos depósitos do tipo W-skarns, haja vista que, a região já é comumente conhecida por ser alvo exploratório do tungstênio (W), desde 1940 (SOUSA e CAMELO, 2008), e pela forte influência das estruturas geológicas da região associadas importantes e numerosas ocorrências minerais no estado.

## **2.1 ASPECTOS FÍSICOS**

A região da área de estudo apresenta características fisiográficas onde destaca-se a hidrografia. A seguir segue uma breve descrição sobre as principais feições da área. A drenagem apresenta direção de SW, SE, NW – N de maiores altitudes para W, onde estão as menores altitudes

### *2.1.1 Hidrografia*

A rede hidrográfica tem importância fundamental para a compreensão e a geração de modelos sobre a evolução geomorfológica recente de uma determinada área (AMARAL,1999). Através dela, é possível inferir as mudanças climáticas, ressaltando os períodos em que a rede de drenagem se tornou mais densa ou mais seca e conseqüentemente, quando o clima estava mais seco ou mais úmido (AMARAL, 1999).

Segundo Amaral (1999) o litoral oriental do Rio Grande do Norte é recortado por uma série de canais fluviais que possuem uma orientação geral Leste-Oeste, modificando-se quando alcança a Faixa de Escoamento Difuso. Já na porção mais central do Rio Grande do Norte, região que abrange a área de estudo, localiza-se a Bacia do Rio Piranhas-Açu, possuindo extensão de aproximadamente 43.681 km<sup>2</sup> (SEMARH, 2017).

A área de estudo é caracterizada por rios intermitentes, porém em alguns casos apresentam-se perenizados em função da ação antrópica verificada com a construção de barramentos ao longo dos cursos de alguns rios (MEDEIROS, 2003).

A Figura 3 representa as principais bacias hidrográficas que drenam o estado do Rio Grande do Norte, onde, ressalta-se a Bacia do Rio Piranhas-Açu, principal bacia hidrográfica da área de estudo.

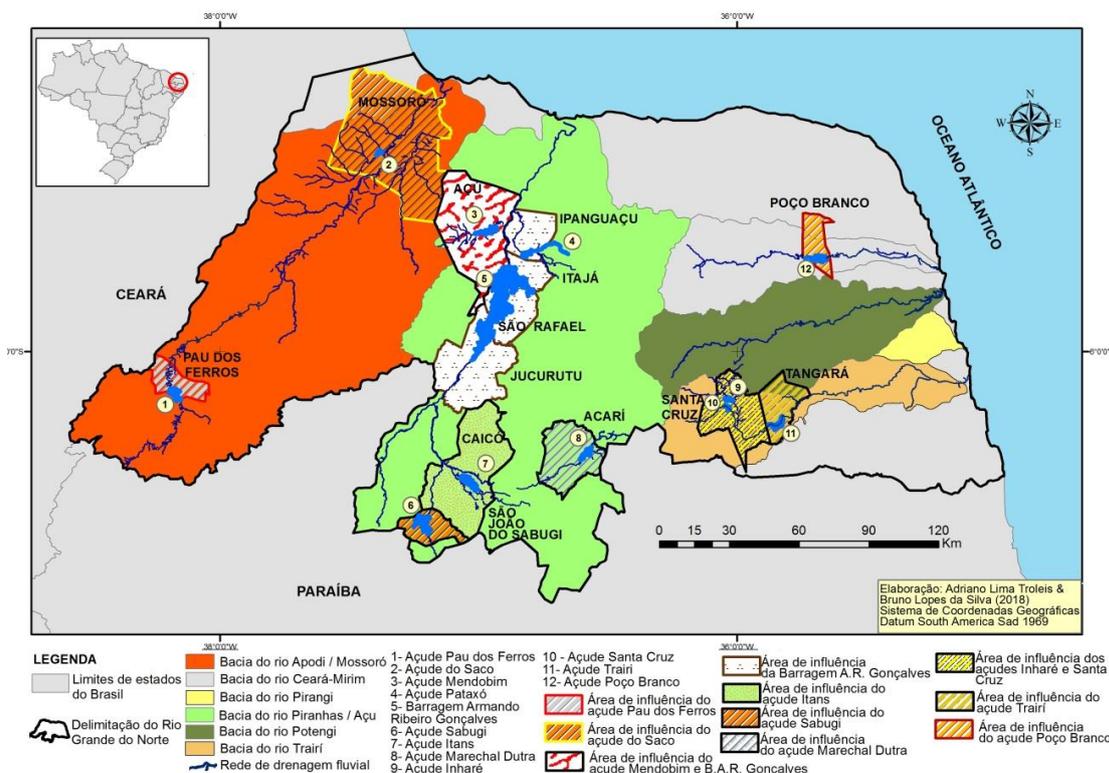


Figura 3 – Mapa das principais bacias hidrográficas do estado do Rio Grande do Norte. Destaca-se na cor verde escuro a Bacia do Rio Piranhas-Açu. Fonte: SEMARH (2017).

Neste trabalho, o enfoque foi compreender o comportamento das incisões fluviais e suas correlações com a geomorfologia da área, buscando identificar a relação dos processos tectônicos com as mudanças climáticas.

### 3 CONTEXTO GEOLÓGICO

A área fica inserida na porção nordeste da Província Borborema (ALMEIDA *et al.*, 1977 e 1981), sendo constituída, essencialmente, por litotipos pré-cambrianos e, em menor percentual, por rochas cenozóicas (MEDEIROS & DANTAS, 2015). A seguir temos uma breve descrição das unidades litológicas que poderiam ter propiciado algumas formações ligadas aos W-skarns.

### 3.1 UNIDADES LITOLÓGICAS

As unidades litológicas pré-cambrianas que recobrem a área de estudos são: Complexo Caicó (PP2cai), Unidade metavulcanossedimentar (PP2caivs), Rochas Metamáficas-ultramáficas (PP2 $\delta$ ycai), Formação Jucurutu (NP3sju), Formação Equador (NP3se) e Formação Seridó (NP3ss).

#### 3.1.1 *Complexo Caicó (PP2cai)*

As unidades do Complexo Caicó são representadas por vários litotipos, sendo eles: uma seqüência de gnaisses e migmatitos indivisos (PP2cai), incluindo gnaisses bandados (PP2caib) e anfibolitos (PP2caia), uma unidade metavulcanossedimentar (PP2caivs) contendo xistos/paragnaisses (PP2caivsp) e quartzitos (PP2caivsq) (MEDEIROS & DANTAS, 2015).

#### 3.1.2 *Unidade metavulcanossedimentar (PP2caivs)*

Na região existem afloramentos com predominância de xistos e paragnaisses (PP2caivsp) e quartzitos (PP2caivsq). Os xistos/paragnaisses (PP2caivsp), além de ocorrerem como corpos isolados, também são encontrados como lentes intercaladas nos gnaisses bandados. São constituídos essencialmente por biotita, quartzo, plagioclásio e granada, tendo como minerais acessórios microclina, clorita, estauroлита, andaluzita, fibrolita, epidoto e zircão (MEDEIROS & DANTAS, 2015).

#### 3.1.3 *Rochas Metamáficas-ultramáficas (PP2 $\delta$ ycai)*

As rochas Metamáficas-ultramáficas (PP2 $\delta$ ycai) estão representadas por metagabros/metadioritos, meta-hornblenditos os quais se distribuem na forma de corpos subcirculares ou elipsoidais. Geralmente, os metagabros preservam

texturas ígneas e são compostos basicamente por plagioclásio e hornblenda (MEDEIROS & DANTAS, 2015).

Os meta-hornblenditos são caracterizados por uma rocha de textura granoblástica ou porfirítica, de coloração verde escura, contendo porfiroblastos de hornblenda, em alguns casos, de até 10 cm de comprimento, além de piroxênio e tremolita-actinolita, tendo como minerais acessórios titanita, opacos e epidoto (MEDEIROS & DANTAS, 2015).

#### *3.1.4 Formação Jucurutu (NP3sju)*

Segundo Medeiros e Dantas (2015), é constituída predominantemente por biotita gnaisses podendo conter anfibólio (NP3sju) granoblásticos, com níveis/camadas de mármore (NP3sjum) de extensões métricas a quilométricas, além de intercalações de rochas calcissilicáticas (NP3sjucs), rochas metaultramáficas (NP3sjuu), anfibolitos (NP3sjua) e formações ferríferas (NP3sjuf).

#### *3.1.5 Formação Equador (NP3se)*

A referida unidade é formada por quartzitos e muscovita-quartzitos apresentando coloração cinza clara a creme (por vezes esbranquiçado) e alguns pontos de minerais escuros. Apresenta homogeneidade mineralógica e uma foliação tectônica bem evidenciada, caracterizando certo estiramento de seus componentes minerais (MEDEIROS & DANTAS, 2015).

#### *3.1.6 Formação Seridó (NP3ss)*

Nesta formação, com base em Medeiros e Dantas (2015), foi possível identificar três fácies principais, baseadas na mineralogia/fáceis metamórfica dos litotipos, sendo elas: i) cloritasericita-biotita xistos/filitos (NP3ssc); ii) micaxistos e granada micaxistos (NP3ss); e iii) cordierita, andaluzita, estauroлита

e/ou sillimanita xistos com granada (NP3ssa), contendo níveis de anfibolito (NP3ssaf).

Os clorita-sericita-biotita xistos/filitos (NP3ssc) ocorrem com coloração cinza escura a levemente esverdeada, apresentando uma textura lepidoblástica. Os micaxistos e granada micaxistos (NP3ss) exibem coloração cinza a marrom, com uma xistosidade penetrativa. Os cordierita, andaluzita, estauroлита e/ou sillimanita, biotita xistos com granada (NP3ssa) compreendem rochas heterogêneas de coloração cinza escura com pontos esbranquiçados quartzofeldspático (MEDEIROS & DANTAS, 2015).

## **4 PROVÍNCIA BORBOREMA**

A Província Borborema (PB) constitui-se de terrenos ou faixas de dobramentos associados às orogêneses do Meso e Neoproterozóico e granitogêneses correlatas, incluindo fragmentos antigos do Arqueano/Paleoproterozóico, bacias sedimentares tafrogênicas mesozóicas e por últimas coberturas superficiais recentes (ALMEIDA *et al.*, 1977).

### **4.1 FAIXA SERIDÓ**

A Faixa Seridó fica localizada no extremo NE da Província Borborema. Foi deformada e metamorfozizada no final do Neoproterozoico, durante a Orogênese Pan-Africana/Brasílica (DOMINGOS *et al.*, 2020).

É caracterizada por uma sequência metavulcanossedimentar submetida a forte deformação transpressional e presença de estruturas transcorrentes num trend N-NE ao longo da faixa (NASCIMENTO, 2002).

A Faixa Seridó é delimitada pelas zonas de cisalhamento de Patos e Portalegre e as bacias da margem continental (JARDIM DE SÁ, 1994). Evento tectônico, no qual, a crosta foi parcialmente fundida (DOMINGOS *et al.*, 2020), gerando intensa presença dos plútons e falhamentos. (JARDIM DE SÁ, 1994).

Essa seqüência metavulcanossedimentar é constituída por paragneisses diversos, anfibolito intercalados com quartzitos, calcossilicáticas, mármore e formações ferríferas (NASCIMENTO, 2002).

A Figura 4 descreve o mapa simplificado da Faixa Seridó sugerido por Jardim de Sá (1994), caracterizando as zonas de cisalhamento dispostas ao longo da Faixa e as principais unidades litoestratigráficas relacionadas à mesma.

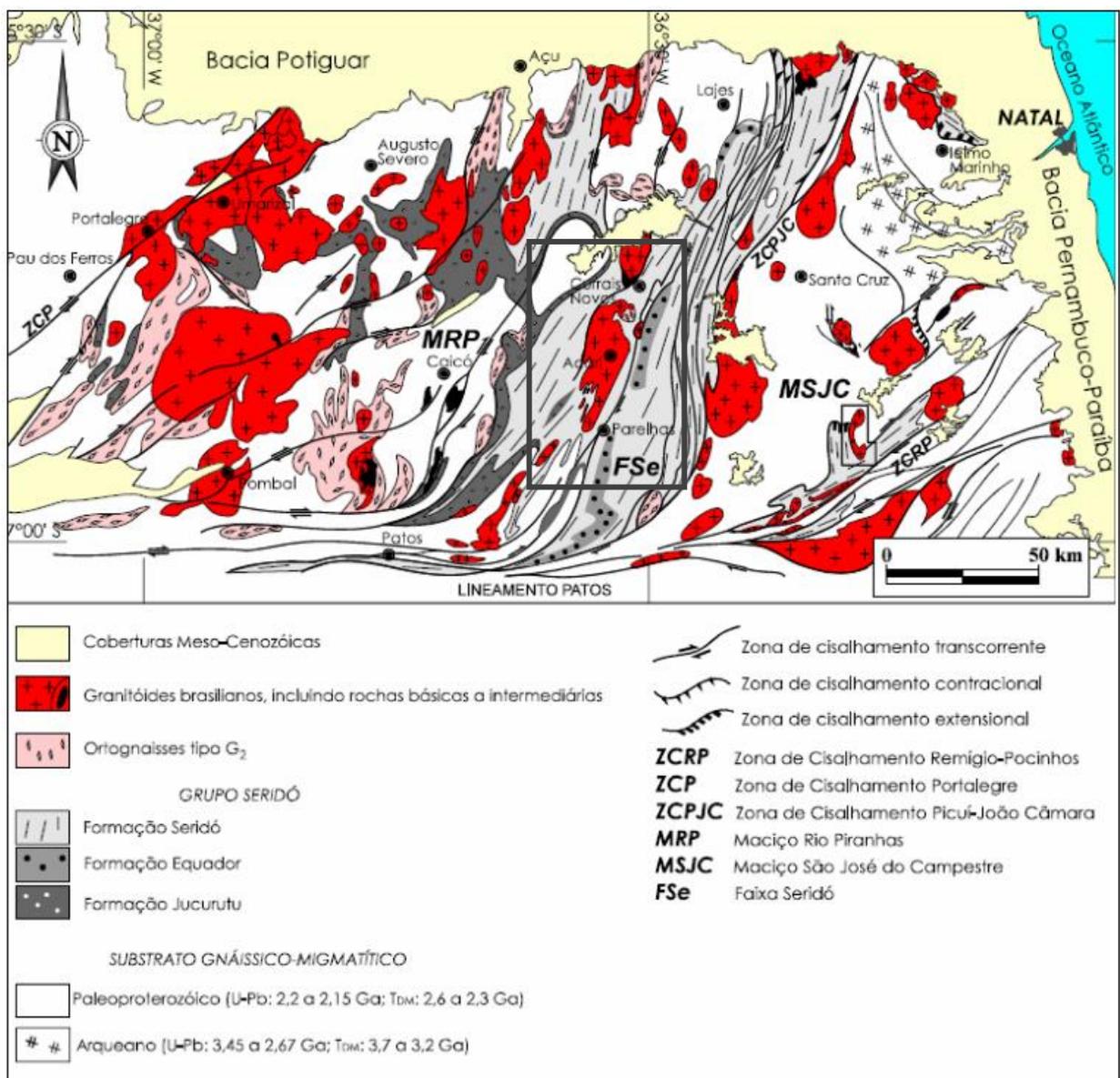


Figura 4 – Mapa da Faixa Seridó. Adaptado de Jardim de Sá *et al.* (1995) e Dantas, (1997).

A área de estudo está destacada no quadrado de cor preta.

Fonte: Cavalcanti Neto & Barbosa (2007).

#### 4.1.1 Depósitos tipo W-Skarns

Os depósitos do tipo skarns, geralmente, referem-se a depósitos em/ou regiões perto de contatos de rochas sedimentares ricas em carbonato com rochas plutônicas intermediárias a félsicas, formadas por processos metassomáticos em temperaturas relativamente alta (CORRÊA, 2020).

O termo metassomatismo de contato, conforme instruído por Winge (2018) caracteriza um processo de alteração e/ou transformação química de uma rocha, principalmente pela ação de fase fluida reagente, resultando em entrada e/ou saída significativa de componentes químicos da rocha com modificação importante de seus minerais.

São caracterizados por uma ganga que consiste em uma mistura de silicatos de Ca-Mg-Fe-Al (EINAUDI & BURT, 1982), a qual, segundo (CORRÊA, 2020), pode ser reduzida ou oxidada.

Os corpos plutônicos ao entrar em contato com fluidos hidrotermais magmáticos migram ao longo de estruturas geológicas presentes no ambiente (por exemplo, falhas, fraturas, zonas de cisalhamento) até atingir um local de precipitação (LENTZ, 1998; SEYMOUR *et al.*, 2009; LECUMBERRI-SANCHEZ *et al.*, 2017, CORRÊA *et al.*, 2020).

A Figura 5 descreve o modelo metalogenético proposto para as associações minerais estudadas e W-skarns da Província Mineral do Seridó, onde os fluidos hidrotermais derivados de magmáticos de uma fonte desconhecida migraram ao longo de zonas de cisalhamento profundas que cortam tanto rochas de embasamento quanto supracrustais.

Outros tipos de depósitos minerais também podem ter sua gênese associada com a mesma relação hidrotermal formadora dos skarns, como exemplo, o depósito de ouro (Au) do Senhor do Bonfim e Bodó (EUGSTER, 1985; LENTZ, 1998);

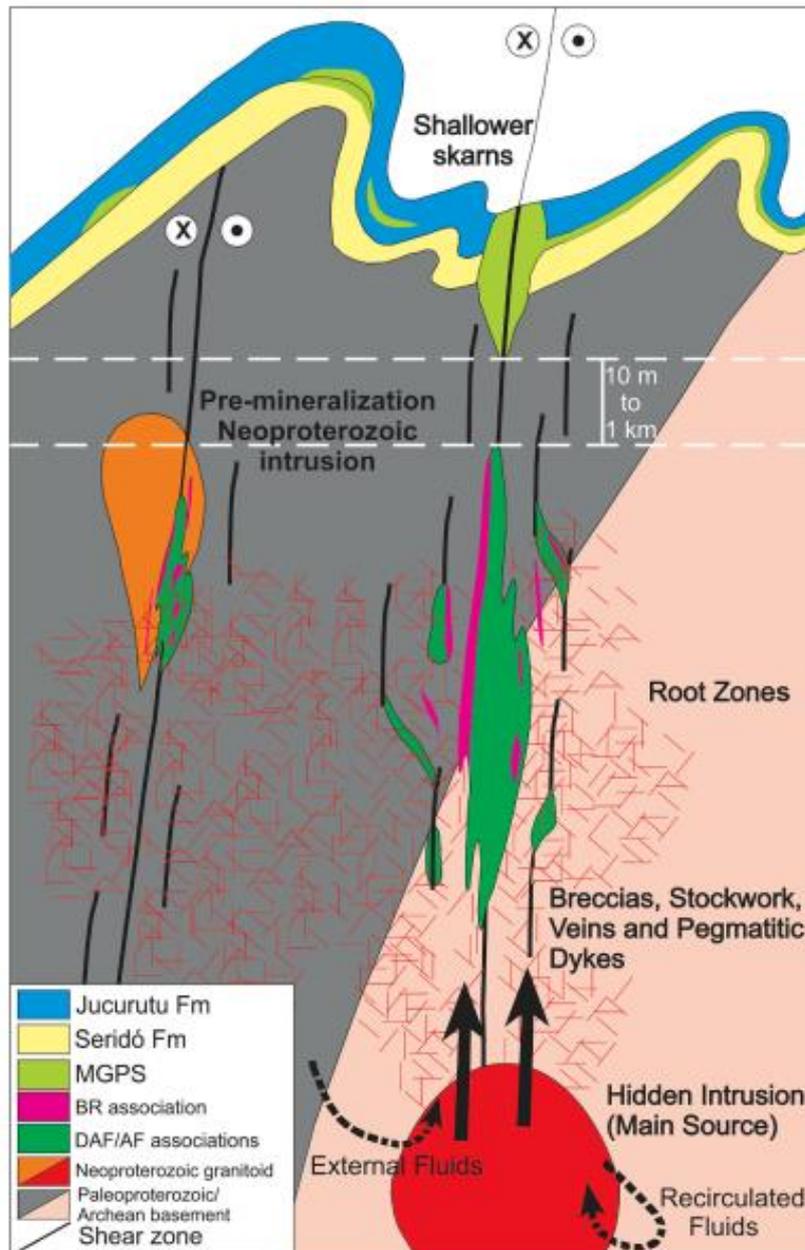


Figura 5 – Modelo metalogenético proposto para representação do depósito W-skarns da Província Mineral do Seridó.  
 Fonte: Soloviev & Kryazhev (2019).

## 5 MINERALOGIA

Neste tópico serão descritas as características físico-químicas predominantes nos depósitos do tipo W-skarns e como as mesmas influenciam nos contrastes das respostas geofísicas discutidas no presente trabalho. As descrições serão baseadas de acordo com Klein & Dutrow (2012).

## 5.1 ILMENITA ( $\text{Fe}^{2+}\text{TiO}_3$ )

A ilmenita é o óxido de titânio e ferro mais comum na crosta terrestre. Não possui clivagem, apresenta fratura conchoidal a irregular (PEREIRA *et al.*, 2005), dureza 5,0 a 6,0 com base na escala de Mohs.

Sua fórmula química é composta pelos elementos  $\text{Fe}^{2+}\text{TiO}_3$ , onde possui 36,8% de Fe e 31,6% de Ti. Sua densidade varia entre 4,4 a 4,7 g/cm<sup>3</sup>, brilho metálico a submetálico, cor preta e sistema cristalino trigonal (PEREIRA *et al.*, 2005).

Apresenta susceptibilidade magnética fraca (ADDAD, 2010), porém, quando ocorrer associado com outros minerais magnéticos, os valores de susceptibilidade tendem a aumentar.

A ilmenita ocorre em todo o ciclo das rochas, principalmente, nas rochas ígneas e metamórficas (PEREIRA *et al.*, 2005), predominando nos gabros, dioritos, pegmatitos, xistos, anfibólitos e gnaisses. Atua como um produto de segregação magmática intimamente associada com magnetita. Quando desagregada de suas rochas hospedeiras ela fica sujeita a intemperismo (ELSNER, 2015).

## 5.2 MAGNETITA ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )

A magnetita é um óxido de ferro encontrado frequentemente na natureza, geralmente, em cristais octaédricos. Possui clivagem variável, fratura subconchoidal a irregular (DANA, 1898) e dureza 6, com base na escala de Mohs. Sua fórmula química é composta pelos elementos  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , onde 72,4% é correspondente ao elemento Fe e 27,6% ao elemento O.

Sua densidade varia entre 4,9 a 5,2 g/cm<sup>3</sup> (PEREIRA *et al.*, 2005), brilho metálico e apresenta um sistema cristalino cúbico (ADDAD, 2010). Cor castanho a preto. É fortemente magnética, apresentando alta susceptibilidade magnética, podendo agir como um ímã natural.

A magnetita ocorre em todo o ciclo das rochas, mas suas concentrações são enriquecidas quando associadas com intrusões ígneas, vulcanismos,

magmas básicos a ultrabásicos e através do metamorfismo de contato (ELSNER, 2015).

A magnetita pode tornar-se um dos principais constituintes da rocha e um grande corpo de minério através da segregação magmática. Nas rochas metamórficas, a magnetita pode estar inserida como mineral acessório nos xistos e gnaisses, onde, segundo Elsner (2015) pode gerar através do metamorfismo de contato um depósito economicamente viável.

É considerada um mineral importante no triângulo de mistura dos elementos FeO – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – TiO<sub>2</sub> representado na Figura 6, no qual, a ocorrência da magnetita associadas com esses minerais depende da temperatura de cristalização, da taxa de resfriamento, disponibilidade de oxigênio, composição de magma e pressão das rochas. Esses minerais ocorrem separadamente um do outro ou em compostos fixos homogêneos ou como inclusões em cada um do outro (MUCKE, 2003).

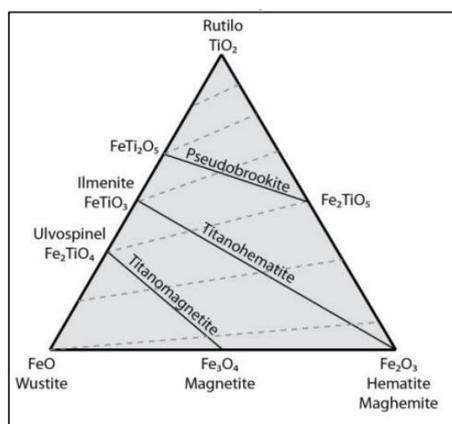


Figura 6 – Representação do sistema das soluções sólidas mais importantes para a magnetização das rochas. As linhas tracejadas indicam série de razão Ti:Fe.

Fonte: modificado de Miranda (2011).

### 5.3 MONAZITA ((Ce, La, Y, Th) PO<sub>4</sub>)

A monazita é um fosfato de lantanídeos que pertence ao grupo dos elementos terras raras. Possui cristais pequenos, clivagem fraca e apresenta fratura subconchoidal de acordo com Pereira *et al.* (2005).

Com base na escala de Mohs, sua dureza varia de 5 a 5,5 e sua fórmula química é composta pelos elementos (Ce, La, Y, Th). Segundo Elsner (2015), o termo terras raras (ER) engloba um grupo de elementos que foram originalmente considerados raros na crosta terrestre. São chamados de lantanídeos por estarem localizados entre o lantânio e o lutécio na tabela periódica.

Possui densidade cerca de 4,6 a 5,4 g/cm<sup>3</sup>, brilho resinoso, cor amarelada a marrom-avermelhado, sistema cristalino monoclinico. Apresenta uma susceptibilidade magnética muito baixa (PEREIRA *et al.*, 2005), mas, em contrapartida, é considerado um mineral altamente radioativo por apresentar concentrações relevantes de Th e U em sua composição.

A monazita é um mineral acessório que ocorre em granitos, pegmatitos e na maioria das rochas metamórficas. É um constituinte das areias provenientes da decomposição dessas rochas (DANA, 1878). Quando desagregada das mesmas, causa um enriquecimento supergênico devido a sua resistência a ataques químicos e à sua alta densidade relativa, ocorrendo associada a outros minerais pesados, tais como: ilmenita, rutilo e zircão.

#### **5.4 ZIRCÃO (ZrSiO<sub>4</sub>)**

O zircão é considerado uma gema oriental, cuja principal fonte durante séculos foram os cascalhos gemológicos do Sri Lanka e Indochina. Possui clivagem imperfeita, fratura conchoidal e dureza de 7,5 de acordo com a escala de Mohs. Sua fórmula química é composta pelos elementos ZrSiO<sub>4</sub>, mas é comum a presença do elemento háfnio e algumas quantidades relevantes de tório e urânio, tornando-o assim, um mineral radioativo.

De acordo com Elsner (2015), essa radioatividade do zircão pode levar à destruição da rede e, portanto, à "metamictização" do mineral, na qual, é processo que resulta do decaimento  $\alpha$  de <sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U e <sup>232</sup>Th e seus isótopos filhos, podendo reduzir a sua densidade, mudança de cor, redução da dureza e aumento na opacidade.

A Tabela 2 ressalta as principais modificações do zircão através do processo de metamictização, onde, para este trabalho, o índice de radiação é o fator mais relevante.

Propriedades	Zircão comum	Zircão modificado (Jacinto)	Zircão altamente modificado (Malacção)
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	4.6 – 4.7	4.2 – 4.6	3.6 – 4.2
Dureza (Mohs)	7,5	7	6,5 – 7
Cor	Branco	Violeta	Marrom
Radioatividade	Baixo	Médio	Alto

Tabela 2 – Propriedades do mineral zircão.  
Fonte: modificado de Garnar (1994).

A densidade do zircão varia entre 4,59 a 4,71 g/cm<sup>3</sup> (ADDAD, 2010). É um mineral transparente a translúcido, cuja coloração pode ser incolor, branco, rosa, lilás, amarelo, acinzentado, marrom e vermelho (PEREIRA *et al.*, 2005). Brilho vítreo, sistema cristalino tetragonal. Não apresenta susceptibilidade magnética alta, mas, é considerado um mineral radiativo (PEREIRA *et al.*, 2005).

Dana (1978) discorre que, o zircão é o mineral acessório mais comum em todos os tipos de rochas, principalmente nas rochas ígneas, pois, o mesmo é um dos primeiros minerais a se cristalizar a partir do resfriamento do magma. Ocorre também nos calcários, xistos, gnaisses e associado a areia auríferas.

### 5.5 SCHEELITA (CaWO<sub>4</sub>)

É típica como mineral primário em rochas metamórficas de contato. Possui três direções de clivagens, fratura conchoidal, densidade variando de 5,9 a 6,3 g/cm<sup>3</sup>, dureza de 4,5 a 5,0. Forma-se a temperaturas de 200-500°C e apresenta característica de catoluminescência (DANA, 1978).

## 6 GEOMORFOLOGIA

O Projeto RADAMBRASIL elaborado por Barbosa *et al.* (1985) contribuirá para a descrição geomorfológica presente na área de estudo. Este

projeto descreve as principais unidades geomorfológicas que foram analisadas através de imagens de radar, na escala 1:1.000.000, como suporte para caracterização de sua gênese e semelhanças das formas de relevo.

Com base nas peculiaridades comuns entre a área de estudo e as paisagens predominantes no projeto RADAMBRASIL, foi possível identificar duas unidades geomorfológicas estabelecidas na região, sendo estas: Depressão Sertaneja e Tabuleiros Costeiros.

## **6.1 DEPRESSÃO SERTANEJA**

Constitui um conjunto de relevos variando entre ondulações e planos que estão situados em níveis topográficos inferiores às unidades de relevo vizinhas, mas com composição variada de rochas e criada devido à dissecação do planalto da Borborema. Formas residuais normalmente estão relacionadas à *inselbergs* e serras, na região Agreste (BARBOSA *et al.*, 1985).

## **6.2 TABULEIROS COSTEIROS**

Apresentam formas de relevo de topo plano e geralmente provenientes de rochas sedimentares com limites no litoral formando escarpas e falésias, geralmente, apresentarão altitudes baixas e a extensão limitada às formações sedimentares costeiras. As formas estão normalmente associadas ao domínio de ocorrência do Grupo Barreiras (BARBOSA *et al.*, 1985). Vale salientar que, essa unidade geomorfológica possui uma fração mínima de contribuição dentro da área de estudo.

## **7 MATERIAIS E MÉTODOS**

De acordo com Kearey *et al.* (2009) os métodos geofísicos podem ser utilizados na superfície ou próximos a ela no estudo das propriedades físicas do interior da Terra, variando lateralmente e verticalmente. Assim, a partir da

medida das propriedades físicas das rochas, podem-se identificar diferenças na litologia do subsolo, uma vez que elas estão relacionadas às características geológicas como litologias, grau de alteração, falhamentos, fraturas e etc.

A temática da Exploração Mineral abrange a utilização dos métodos geofísicos, pelo fato de encontrarmos na natureza quantidades significativas de minerais que são economicamente viáveis, tais como: ouro, prata, cobre, scheelita e outros (PEREIRA *et al.*, 2005).

Os minerais encontrados na natureza apresentam propriedades físicas e químicas vinculadas ao mesmo, que possibilitam a captação dos contrastes geofísicos entre a rocha hospedeira, mineralização e o ambiente geológico envolvido (DENTITH & MUDGE, 2014). Neste estudo, será ressaltada a utilização dos métodos magnético e gamaespectrométrico.

## **7.1 DADOS GEOFÍSICOS**

O banco de dados utilizado no presente trabalho refere-se ao Projeto Aerogeofísico Paraíba - Rio Grande do Norte (1092), executado pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM), disponibilizando dados aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos no formato .XYZ. Os dados foram processados no software *Oasis Montaj – Educational version 2021.2.1*, pertencente à *Seequent Ltd.*, através de uma licença educacional.

O fluxograma abaixo descreve, de maneira sumarizada, os processos que foram realizados (Figura 7):

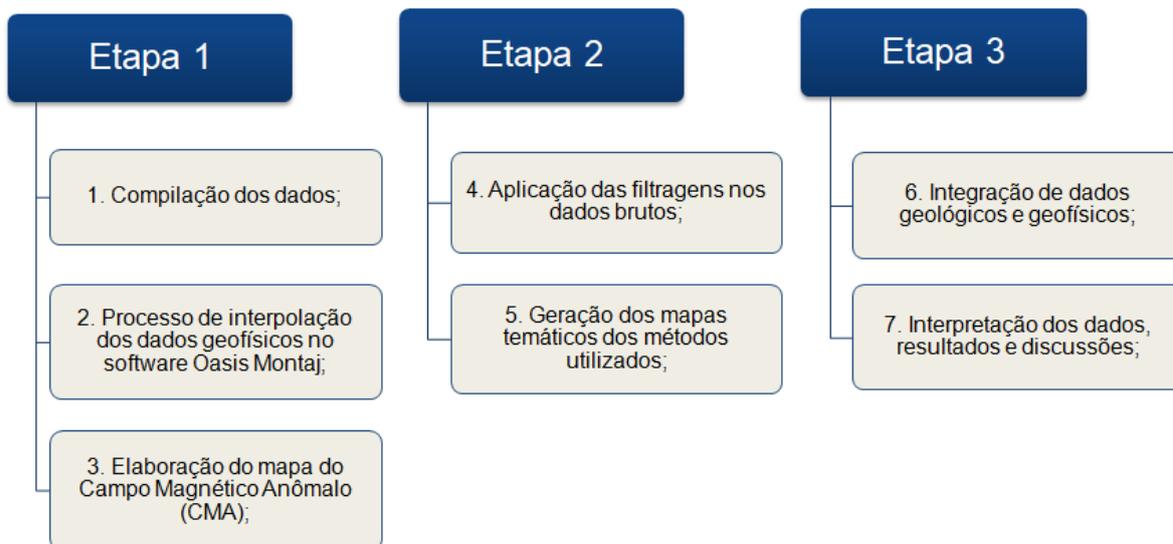


Figura 7 – Fluxograma das atividades desenvolvidas para obtenção dos dados, sendo divididas em duas etapas.

Fonte: autora (2022).

### 7.1.1 Etapa 1

Conforme mencionado na Figura 7, a primeira etapa consistiu na compilação do banco de dados referentes ao projeto 1092, dos métodos aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos. O banco de dados disponibilizado pela CPRM já dispõe um pré-processamento básico, sumarizados na Tabela 3.

<b>DADO AEROMAGNETOMÉTRICO</b>	<b>DADO AEROGAMAESPECTOMÉTRICO</b>
Correção do erro de Paralaxe	Correção do Tempo Morto
Remoção Variação Magnética Diurna	Correção do erro de Paralaxe
Nivelamento de perfis	Remoção do <i>background</i> do Radônio
Micronivelamento de perfis	Correção do Efeito Compton
Remoção do IGRF	Correção Altimétrica

Tabela 3 – Pré processamento dos dados geofísicos referentes ao projeto 1092.

Fonte: adaptado da CPRM (2010).

O processo gridagem do banco de dados foi feito através da ferramenta matemática de interpolação dos dados, por meio da técnica Bi-Direcional, com

tamanho de célula de 125m (correspondendo a  $\frac{1}{4}$  do espaçamento entre as linhas de vô). O Sistema de Coordenada projetado foi o *Universal Transversa de Mercator* (UTM), zona 24 (hemisfério Sul) e *Datum* WGS 84.

Com base nestas premissas, o mapa do Campo Magnético Anômalo (Figura 8) bruto foi confeccionado, podendo então, serem aplicadas as filtragens dos dados magnéticos sob o mesmo.

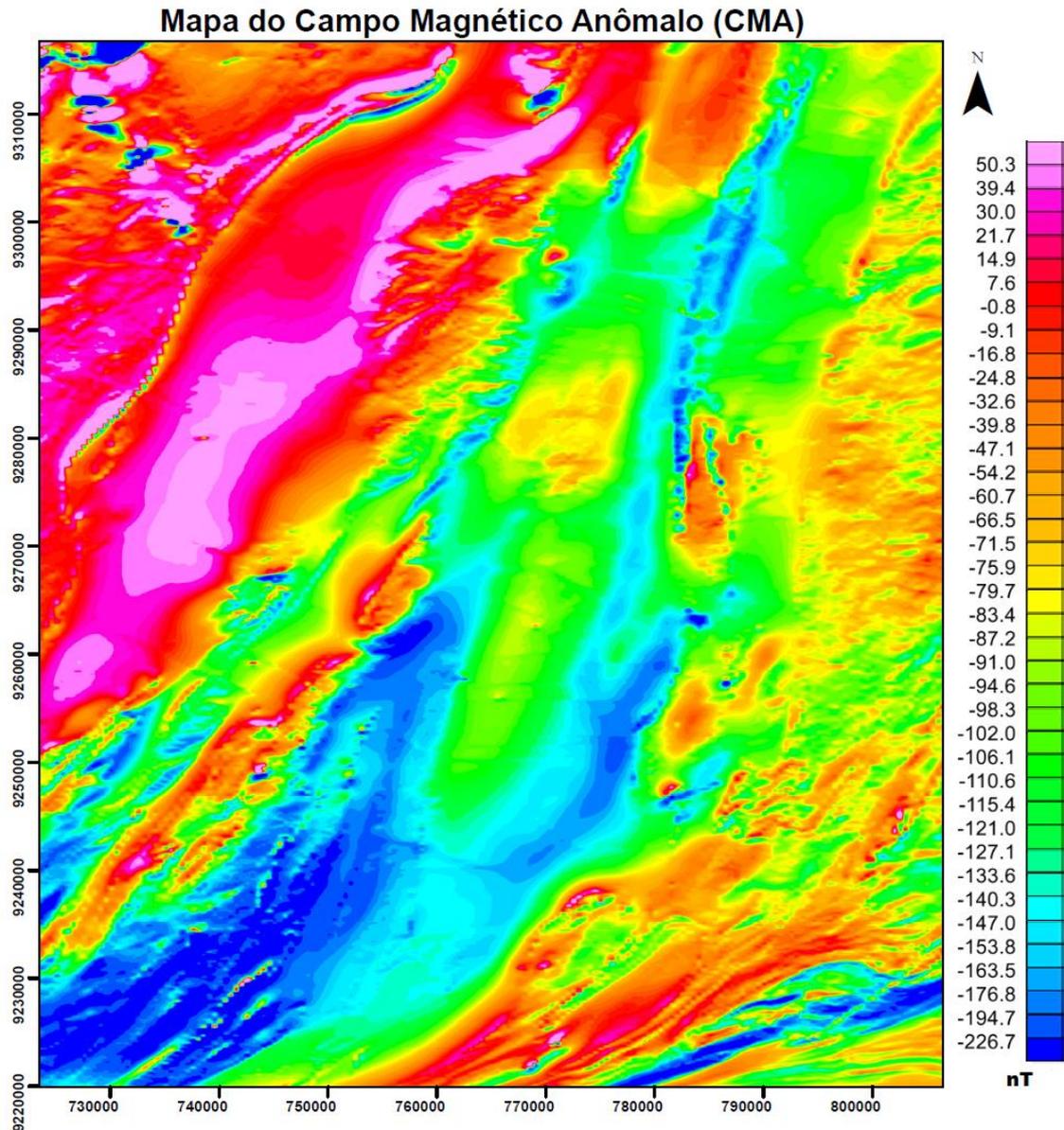


Figura 8 – Mapa do Campo Magnético Anômalo (CMA) bruto com ausência dos filtros magnéticos.

Fonte: autora (2022).

### 7.2.1 Etapa 2

Para os dados magnéticos, as filtragens aplicadas para a confecção dos mapas temáticos foram: Amplitude do Sinal Analítico (ASA - NABIGHIAN, 1972,1974; ROEST *et al.*, 1992), Derivada Vertical (DZ).

Estas abordagens contribuíram positivamente para a análise estrutural que recobre a área de estudo, possibilitando também, a correlação das rochas ígneas e suas influências com as mineralizações da região do Seridó.

Também com os dados magnéticos tornou-se possível confeccionar a modelagem geofísica de anomalia expressiva da área (Figura 19) com células de 50x50, usando a técnica da Susceptibilidade Magnética através da ferramenta *VOXI Earth Modeling* do software Oasis Montaj.

O VOXI é considerado um método utilizado para criar modelos geofísicos em 3D a partir de dados magnéticos e gravimétricos (GEOSOFT, 2019; ELLIS *et al.*, 2012), fornecendo maior compreensão sobre as estruturas em subsuperfície.

Para os dados gamaespectrométricos, foram elaborados os seguintes mapas temáticos: mapa Gamaespectrométricos dos canais K, U e Th e mapa Ternário. Estas abordagens contribuíram para uma correlação direta com a química mineral presente nas rochas da região e o Modelo Digital de Terreno (MDT), permitindo obter resultados através da litogeofísica.

Os principais parâmetros dos dados geofísicos mencionados podem ser encontradas no relatório final do projeto 1092 da CPRM (2010) e estão sumarizadas na Tabela 4:

<b>PROJETO AEROGEOFÍSICO PB - RN (1092)</b>
Direção das linhas de voo: N-S
Espaçamento entre as linhas de voo: 500m
Direção das linhas de controle: E-W
Espaçamento entre as linhas de controle: 10 km
Altura média do voo: 100m
Intervalo das medições: 0,1s

Tabela 4 – Parâmetros do aerolevanteamento geofísico.  
Fonte: adaptado da CPRM (2010).

### 7.1.2 Etapa 3

A terceira etapa consistiu na integração dos dados geofísicos e geológicos corroborando para a obtenção dos resultados deste presente trabalho, onde, foram descritos, de maneira detalhada no Tópico 11, as vantagens e as limitações envolvidas na abordagem proposta.

## 8 O CAMPO MAGNÉTICO DA TERRA

Aproximadamente, 90% do campo magnético da Terra pode ser representado, hipoteticamente, por um grande ímã localizado no interior da Terra (Figura 9), representação para compreender um complexo sistema de correntes elétricas fluindo no núcleo da Terra e impulsionado por processos relacionados à convecção. O pólo norte de uma agulha de bússola magnética atrai o pólo sul magnético do campo da Terra por terem pólos diferentes (DENTITH & MUDGE, 2010).

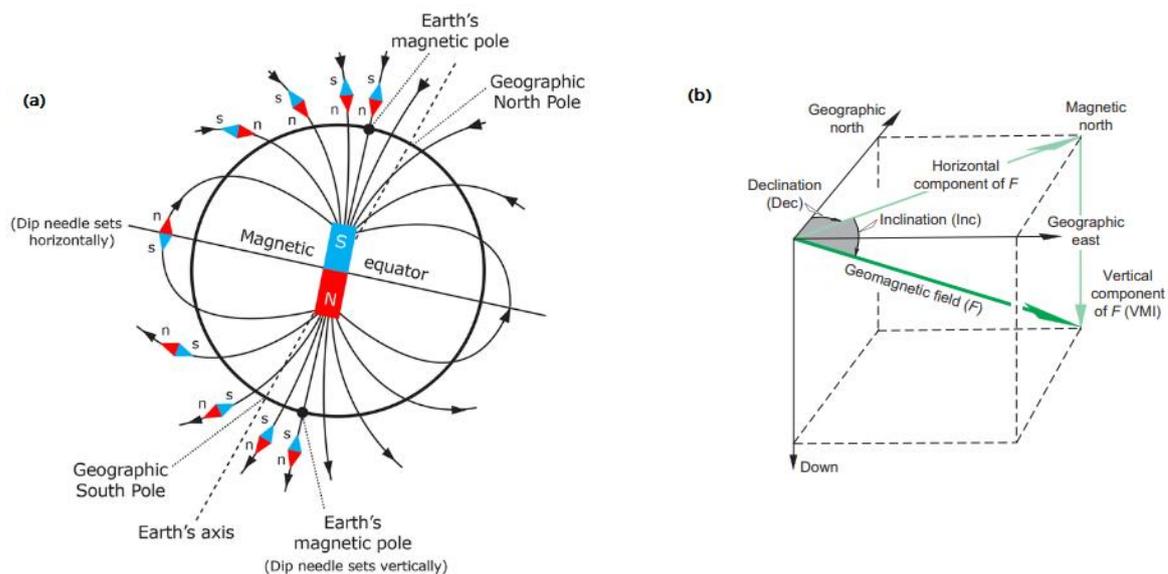


Figura 9 – Representação do campo magnético da Terra.  
Fonte: Dentith & Mudge (2010).

A figura 9 descreve (a) aproximação do campo geomagnético por um dipolo inclinado em relação ao eixo de rotação da Terra, onde, os pólos

magnéticos reais não coincidem com o pólo geomagnético do dipolo ou os pólos geográficos. Na parte (b), descreve os elementos que definem o campo geomagnético (F). A direção do campo é definida pelos ângulos de inclinação (Inc) e declinação (Dec).

O campo principal relativamente estável originário do núcleo é conhecido como campo interno. É responsável pelo magnetismo induzido e remanescente das rochas. Mudanças no magnetismo da rocha na crosta superior causam variações espaciais de comprimento de onda curto no campo, que são sobrepostas às variações de comprimento de onda longo originadas no núcleo. Mapear as mudanças espaciais no campo magnético devido às características da crosta é o principal objetivo do levantamento magnético (DENTITH & MUDGE, 2010).

## **8.1 MAGNETIZAÇÃO INDUZIDA E REMANESCENTE**

No processo de magnetização das rochas e minerais existem dois tipos de processos de magnetização que devem ser ressaltados, sendo estes: a magnetização induzida e a magnetização remanescente.

Segundo Reeves (2005) quando um material magnético é colocado em um campo magnético, o material torna-se magnetizado e o campo magnetizante externo é reforçado pelo campo magnético induzido no próprio material. Isso é conhecido como magnetização induzida.

Quando o campo externo é “desligado”, a magnetização induzida desaparece imediatamente, mas alguns materiais retêm uma magnetização. Isso é conhecido como magnetização permanente ou remanescente e sua direção será fixada dentro da amostra na direção do campo indutor (KEAREY *et al.*, 2009).

## **9 LEVANTAMENTO AEROGEOFÍSICO**

Mapas de alta qualidade derivados de observações geológicas de superfície são importantes e necessários para muitos propósitos (HANNA,

1984). No entanto, parte dessa qualidade é concernente ao conjunto de operações realizadas para a obtenção dos dados, sejam eles, dados de informações geológicas, ou geofísicas e na definição da escala para tal estudo (NASCIMENTO, 2019).

A maioria das informações geológicas é obtida a partir de estudos em escalas que variam de 1:24.000 a 1:250.000 e para investigações nestas escalas, a geofísica aerotransportada fornece uma abordagem mais universal para observações em subsuperfície do que qualquer outro tipo de método (HANNA, 1924).

Algumas vantagens do aerolevanteamento podem ser sumarizadas, de acordo com Hanna (1984), sendo estas: (1) Os sensores podem ser utilizados simultaneamente, permitindo que num mesmo levantamento seja realizada a coleta de dados de dois ou mais tipo de métodos geofísicos. Como exemplo, os projetos aerogeofísicos da CPRM, contendo dados aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos; (2) Obtenção de imagens recobrimdo um grande faixa com uma única passagem da aeronave; (3) Dados coletados de forma digital, adequados para um processamento imediato; (4) Podem ser coletados por aeronaves em áreas que são inacessíveis no solo, onde, atualmente, essa mesma abordagem pode ser executada com o sensor acoplado em drones; e (5) Muito econômico quando aplicado em áreas de grandes extensões.

A Figura 10 representa o esquema de um aerolevanteamento e a distribuição das linhas de aquisição e das linhas de controle ao longo de uma superfície. Ambas as linhas são utilizadas para realização do micronivelamento dos dados geofísicos.

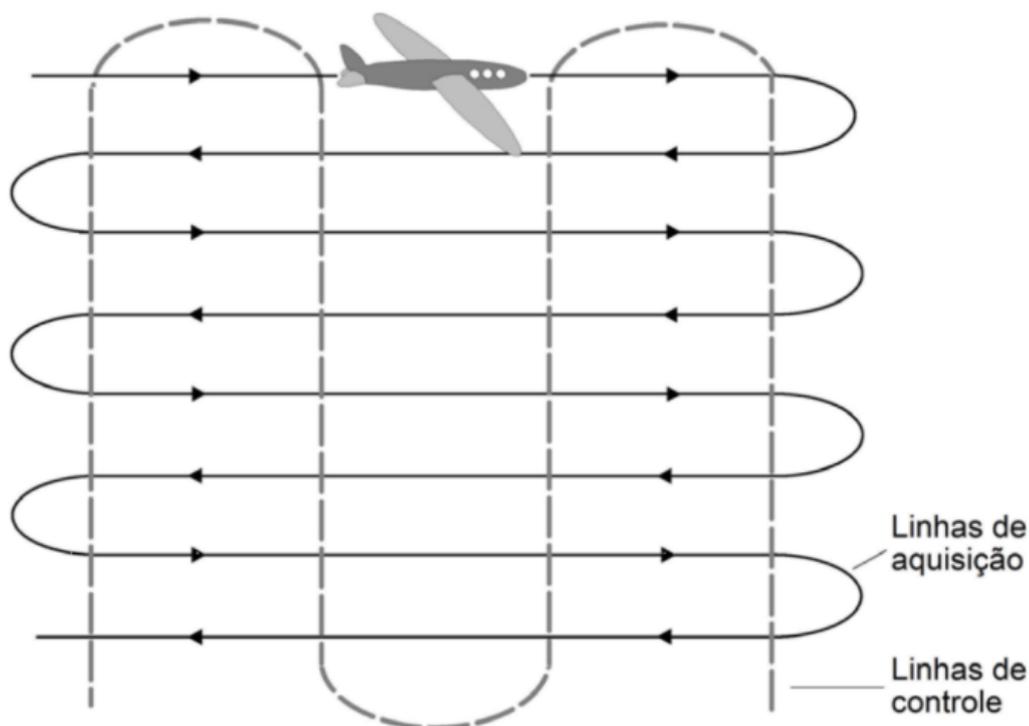


Figura 10 – Esquema de um aerolevante baseado na CPRM.  
 Fonte: Ribeiro et al. (2003).

## 9.1 MÉTODO AEROGAMAESPECTROMÉTRICO

O método gamaespectrométrico favorece, de maneira quantitativa, a possibilidade de subdividir um mesmo ambiente geológico que possui diferentes litologias, de acordo com suas respostas gamaespectrométricas (IAEA, 1979). Isto permite uma vasta aplicabilidade nos estudos geológicos, além de fornecer o detalhamento da área de estudo.

Segundo Grosz (1983), levantamentos aerogamaespectrométricos têm como objetivo fundamental a exposição de materiais radioativos na superfície e suas respectivas emissões de raios gamas. A principal propriedade física captada neste método é a taxa de emissão de raios gamas, sendo registrada pelos instrumentos geofísicos devido à existência de três radioelementos naturais: Potássio (K%), Urânio (U ppm) e Tório (Th ppm).

É um método que apresenta baixa penetrabilidade, podendo ter um alcance até 50 cm em rochas e solos para ocasiões com levantamento terrestre, e até 30 cm de profundidade, em dados aerotransportados (IAEA, 2003). A gamaespectrometria pode ser decisiva para evidenciar variações

regionais dos radioelementos, mostrando utilidade para o estudo do presente trabalho.

### 9.1.1 Radioelementos: fundamentos

O método de espectrometria de raios gama tem sido amplamente utilizado no mapeamento geológico, exploração mineral, mapeamento de solo, e monitoramento de radiação ambiental (MADEN & AKARYALI, 2015).

É um método geofísico passivo porque mede uma fonte natural de energia e possui diversas características que o tornam único entre os métodos geofísicos, pois, a radioatividade medida se origina apenas nos primeiros centímetros da crosta terrestre (DENTITH & MUDGE, 2014), podendo transmitir o realce do comportamento topográfico de uma dada região, o processo de alteração de um perfil de solo ou até mesmo depósitos minerais associados a minerais radioativos.

Quando realizada de forma aérea, a radiação captada no espectrômetro de raios gamas no ar possui fonte emissora posicionada em um ponto terrestre, com isso, a influência da fonte emissora irá alterar a medida lateral obtida no equipamento, de modo que, a emissão de um ponto terrestre a 100 m de altura refletirá uma concentração média dos radioelementos em uma grande área de observação (IAEA, 2003).

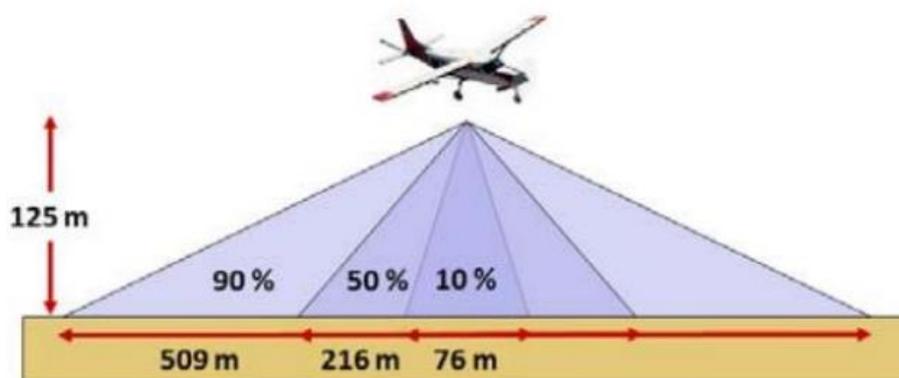


Figura 11 – Campo de visão do espectrômetro, representando a superfície de captação do método.

Fonte: Fortin *et al.* (2017) apud Grasty *et al.* (1979b).

A Figura 11 representa o campo de visão do espectrômetro de raios gama, demonstrando a área fonte dos fótons gama captados no detector, onde

90% seria proveniente de um círculo de 509 m de diâmetro a uma altura de vôo de 125 m.

### *9.1.2 Decaimento radioativo*

Os núcleos radioativos possuem meias-vidas diferentes, variando de segundos a bilhões de anos, e podem ser significativos em escalas de tempo geológicas (DENTITH & MUDGE, 2014).

Segundo IAEA (1979) o tempo necessário para que uma série completa de decaimento seja estabelecida depende das várias meias-vidas de seus componentes. Quando a série está totalmente estabelecida, a quantidade relativa de cada componente permanece constante e a série de decaimento é dita estar em equilíbrio secular.

Isso significa que, se a abundância de um componente for conhecida, a abundância de outro componente pode ser determinada. Se qualquer membro da série de decaimento for perturbado, ou seja, o material for removido ou adicionado, as quantidades relativas de são alteradas e ocorre um estado de desequilíbrio (DENTITH & MUDGE, 2014).

Quimicamente, observando o comportamento dos radioelementos é possível propor diferentes abordagens mediante sistemas abertos e fechados. Segundo IAEA (1979), o processo de decaimento radioativo dos radioelementos em um sistema fechado se comporta de tal forma que a taxa de formação de isótopos filhos é a mesma em que os isótopos instáveis decaem, possuindo uma relação de abundância entre isótopos filhos, onde os com meias vidas mais longas se encontram mais abundantes que os de meias-vidas mais curtas.

Os ambientes geológicos superficiais e subsuperficiais favorecem a existência de sistemas quimicamente abertos, causando desequilíbrio nas séries de decaimento, com isso o grau de desequilíbrio irá depender do clima, topografia e hidrologia, existindo assim o domínio de processos supergênicos e introduzindo ou removendo materiais, proporcionando também uma possível dispersão química e física dos isótopos pais e filhos (IAEA,1979).

### 9.1.3 Interações de raios gamas com a matéria

As interações são compostas por um fluxo de partículas elementares, podendo ser classificadas de acordo com seu caráter físico e de energia, determinando assim como a radiação irá interagir com a matéria, sendo três os processos de interação entre os raios gama e a matéria: Efeito Fotoelétrico, Espalhamento Compton e Produção em pares (IAEA, 2003), demonstrados na Figura 12.

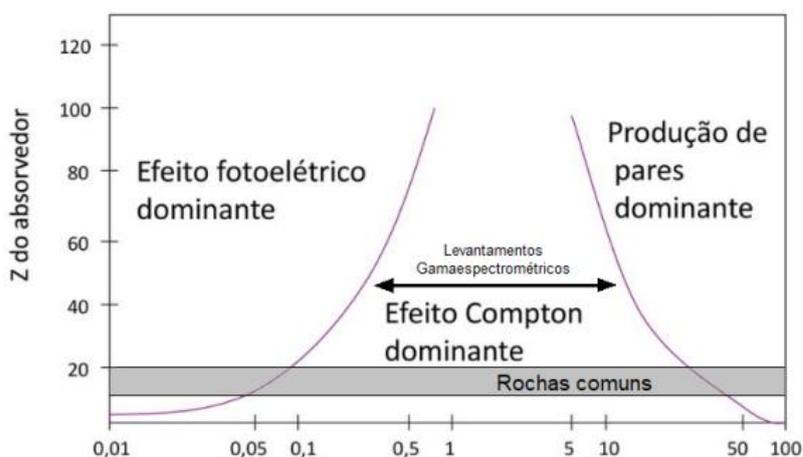


Figura 12 – Representação do efeito fotoelétrico para as rochas.  
Fonte: modificado de Minty (1997).

O efeito fotoelétrico foi definido por IAEA (1991) como toda energia de um fóton gama com baixa energia sendo absorvida durante uma colisão com um elétron atômico. O espalhamento Compton, segundo Minty (1997), se trata de um processo onde um fóton incidente perde uma parcela de energia para um elétron, sendo então espalhado em relação a sua direção original, dessa forma ocorre à transferência desta energia perdida para o elétron como energia cinética, predominando em níveis moderados de energia.

O IAEA (1991) relata o fato dos dois efeitos envolverem colisões em elétrons, sendo então a atenuação dos raios gamas em materiais, diretamente proporcional a sua densidade eletrônica.

## 9.2 MÉTODO AEROMAGNETOMÉTRICO

O levantamento aeromagnetométrico desempenha um importante papel na exploração mineral, mapeando a distribuição das propriedades dos minerais presentes no embasamento cristalino (GRANT, 1984) e em ambientes sedimentares associados, por exemplo, ao enriquecimento secundário destes minerais.

A principal propriedade física captada neste método é a magnetização, ocorrendo de forma intrínseca, onde o material inerentemente pode conter magnetismo ou o magnetismo pode ser induzido através do material, sendo afetado por um campo magnético externo, por exemplo, o campo magnético da Terra (DENTITH & MUDGE, 2014).

Os contrastes magnéticos podem estar associados com a formação ou destruição de minerais magnéticos, haja vista que, as magnetizações, sejam elas baixas ou altas caracterizam alguma formação de minério ou o conteúdo magnético presente na rocha hospedeira (HANNA, 1984). Esses contrastes também podem ser chamados de assinaturas magnéticas e o parâmetro básico para caracterizá-las é através da susceptibilidade magnética ( $\kappa$ ), expressa no S.I.

O objetivo de um estudo magnético é investigar a variação de susceptibilidade magnética e associá-la à geologia subsuperficial com base em anomalias do campo magnético da Terra, resultantes das propriedades magnéticas das rochas subjacentes. Embora a maioria dos minerais constituintes das rochas não são efetivamente magnéticos, alguns tipos de rochas contêm minerais magnéticos suficientes para produzir significativas anomalias magnéticas (KEAREY *et al.*, 2009).

A técnica é amplamente utilizada e a velocidade de operação de levantamentos aéreos torna o método bastante eficaz na busca de tipos de depósito de minério que contêm minerais magnéticos, e também no estudo de bacias sedimentares.

Os minerais formadores de rocha mais comuns exibem uma susceptibilidade magnética muito baixa, e as rochas devem seu caráter magnético à proporção geralmente baixa de minerais magnéticos que contêm. Há somente dois grupos geoquímicos que geram tais minerais. O grupo ferro-

titânio-oxigênio possui uma série de soluções sólidas de minerais magnéticos que vão da magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) ao ulvoespínélio ( $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ). O outro óxido de ferro comum, a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), é antiferromagnético e, assim, não gera anomalias magnéticas (KEAREY *et al.*,2009).

A Tabela 5 apresenta os parâmetros da variação de susceptibilidade magnética contida em algumas rochas e minerais, nas quais, podemos observar de maneira prévia, que os valores de susceptibilidade magnéticas mais relevantes são pertencentes às rochas ígneas (granito, gabro, basalto, peridotito), sendo totalmente significativos para a proposta de analisar um dos objetivos dispostos no decorrer desta pesquisa.

<b>ROCHAS E MINERAIS – SUSCEPTIBILIDADE</b>	
<b>Material</b>	<b>Susceptibilidade x 10<sup>-3</sup> (S.I)</b>
Ar	Cerca de 0
Quartzo	-0.01
Calcita	-0.001 – 0.1
Esfalerita	0.4
Pirita	0.05 – 5
Hematita	0.5 – 35
Ilmenita	300 – 3500
Magnetita	1200 – 19.200
Calcário	0 – 3
Arenito	0 – 20
Folhelho	0.01 – 15
Xisto	0.3 – 3
Gnaisse	0.1 – 25
Ardósia	0 – 2
Granito	0 – 50
Gabro	1 – 90
Basalto	0.2 – 175
Peridotito	90 – 200

Tabela 5 – Valores de susceptibilidade em minerais e rochas em S.I.  
Fonte: adaptado de Keary *et al.* (2009).

### 9.2.1 Filtragens

Os filtros são ferramentas matemáticas utilizadas na entrada de um sistema a fim de modificar e/ou transformá-los em sinais de saídas (MARQUES FILHO & VIEIRA NETO, 1999). Na Geofísica, quando aplicados nos dados originais, geram produtos que melhoraram a qualidade dos dados e facilitar a interpretação dos mesmos, baseando-se na integração das informações geológicas (OLIVEIRA, 2008).

Neste trabalho foram aplicadas duas metodologias extremamente utilizadas quando se tratam dos dados de magnetometria, são estes: o filtro da Derivada Vertical (DZ) e da Amplitude do Sinal Analítico (ASA).

O filtro da Derivada Vertical são rotineiramente usados como no processo de interpretação auxiliando no aprimoramento dos detalhes e acentuando as anomalias geofísicas (COOPER & COWAN, 2004). É caracterizado por realçar as fontes geológicas rasas (DENTITH & MUDGE). Este filtro é descrito pela Equação 1, onde A é a amplitude da anomalia, em função do eixo vertical (z):

$$Dz = \frac{\partial A}{\partial z} \quad (1)$$

O filtro da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) tem o intuito de maximizar o limite das estruturas magnéticas, sendo especialmente utilizado para delinear os limites das unidades litológicas (WEMEGAH *et al.*, 2015). Este filtro foi proposto por Nabighian (1972) num caso 2D, cujo, a principal característica é sua independência quanto a direção de magnetização da fonte (MACLEOD *et al.*, 1984). Este filtro é descrito pela Equação 2, onde, | A (x,y) | é a amplitude do sinal analítico em (x,y) e M o valor do campo magnético observado em (x,y).

$$| A (x,y) | = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2} \quad (2)$$

## **10 RESULTADOS**

Neste t3pico foram discutidos os resultados referentes ao presente trabalho, apresentados de acordo com os dois m3todos geof3sicos aplicados. Tornou-se poss3vel ressaltar a contribui3o destes m3todos na compreens3o do contexto geol3gico, conduzido por um conjunto de estruturas e uma diversidade litol3gica.

### **10.1 DADOS AEROGAMESPECTROM3TRICOS**

Os resultados abordados ser3o baseados na confec3o dos seguintes mapas tem3ticos: canal Pot3ssio (K), canal Ur3nio (U), canal T3rio (Th) e Tern3rio. Estes mapas tem3ticos est3o diretamente relacionados a litogeof3sica e sua interpreta3o.

#### *10.1.1 Canal Pot3ssio (K)*

O mapa (Figura 13) resalta o contraste relacionado 3 presen3a do elemento Pot3ssio (%) distribu3o ao longo da 3rea de estudo. 3 poss3vel observar atrav3s da legenda de cores varia3o entre os intervalos de 0,3 a 5,3 (%). As cores mais frias representam regi3o com baixas concentra3o (0,3 a 1,4) e as cores mais quentes representam regi3o com altas concentra3o (3,1 a 5,3).

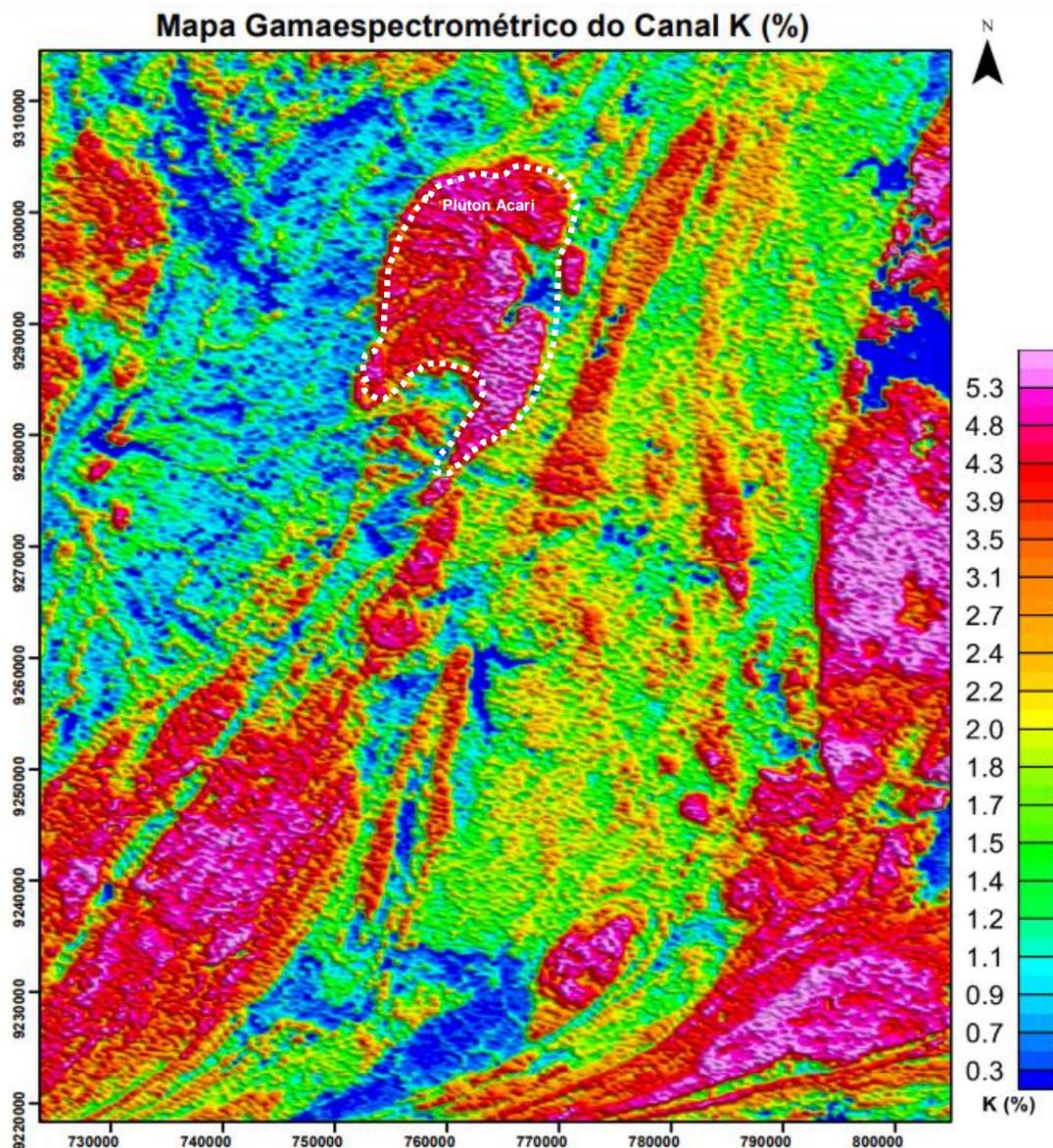


Figura 13 – Mapa Gamaespectrométrico do canal Potássio (K). O tracejado branco ressalta a localização do Pluton Acari.  
Fonte: autora (2022).

Essas concentrações altas são conseqüências de alguns tipos de rochas silicáticas aflorantes na área de estudo, tais como: os xistos da Fm. Seridó, os paragneisses e granitóides do Complexo Caicó, que possuem em suas composições minerais ricos em potássio, como o feldspato, que ao ser alterado, sofre o processo de caulinição.

#### 10.1.2 Canal Urânio (U)

O mapa (Figura 14) ressalta o contraste relacionado à presença do elemento Urânio (ppm) distribuído ao longo da área de estudo. Para este

elemento, os intervalos de concentrações variam entre 0,3 e 4,6 (ppm). Os baixos contrastes variam de 0,3 a 1,5 e os altos contrastes variam de 2,2 a 4,6.

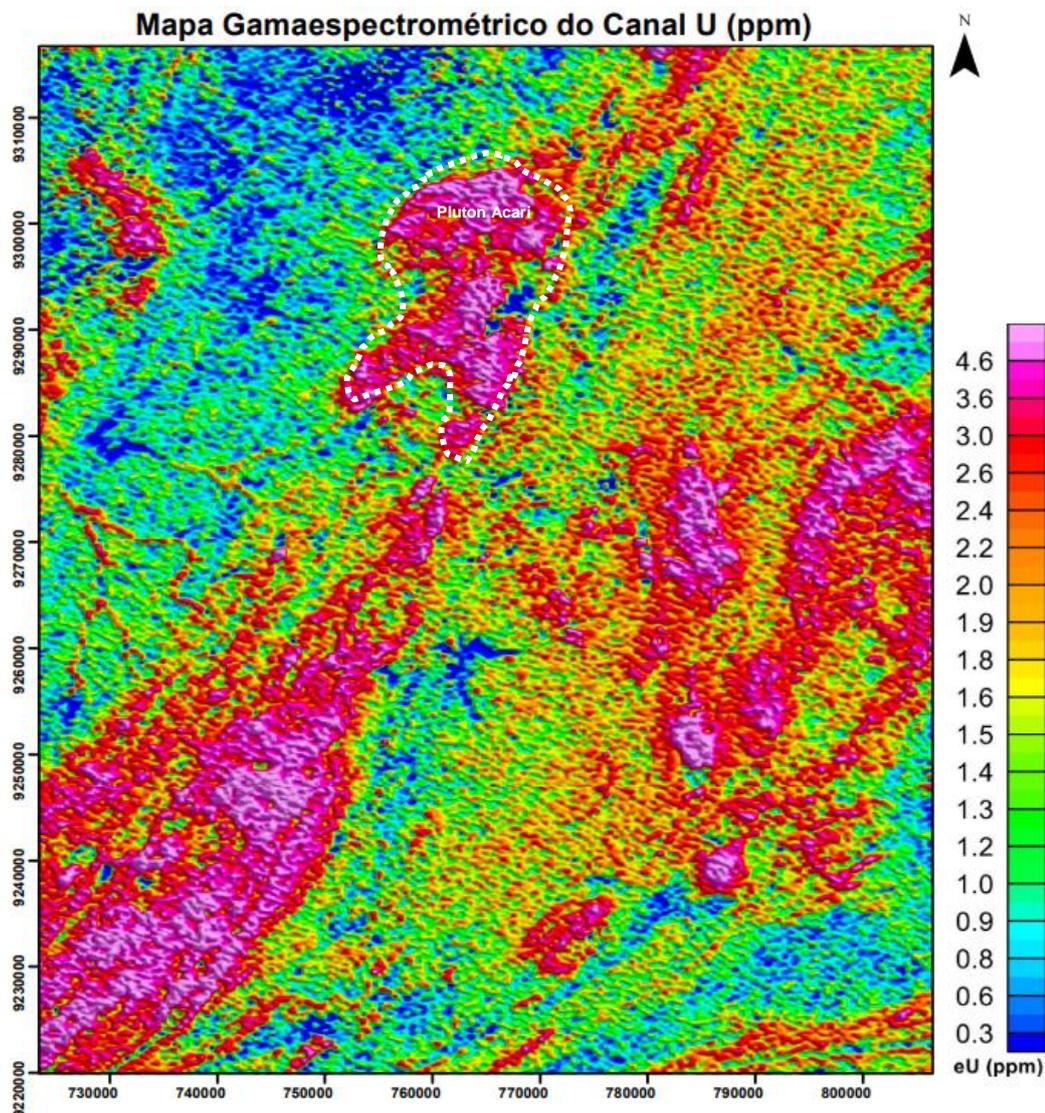


Figura 14 – Mapa Gamaespectrométrico do canal Urânio (U). O traçado branco ressalta a localização do Pluton Acari.  
Fonte: autora (2022).

As rochas do Complexo Caicó inseridas na área de estudo possuem como mineral acessório o zircão, que possui em sua composição química o elemento U. Além disso, há evidências químicas da presença do zircão nas rochas hospedeiras e nos solos *in situ* nas bordas do principal Pluton de Acari. Essas correlações ainda precisam ser discutidas com mais veracidade com base em trabalhos que avaliaram a caracterização química dessas rochas mencionadas. Algumas contribuições podem ser encontradas nos trabalhos de CORRÊA *et al.*, 2020, DANTAS *et al.*, 2015.

### 10.1.3 Canal Tório (Th)

O mapa (Figura 15) ressalta o contraste relacionado à presença do elemento Tório (ppm) distribuído ao longo da área de estudo. Os contrastes realçados pelo presente mapa apresentam semelhanças com o mapa descrito anteriormente, haja vista que, o elemento tório e o elemento urânio possuem muita similaridade, e geralmente ocorrem associados.

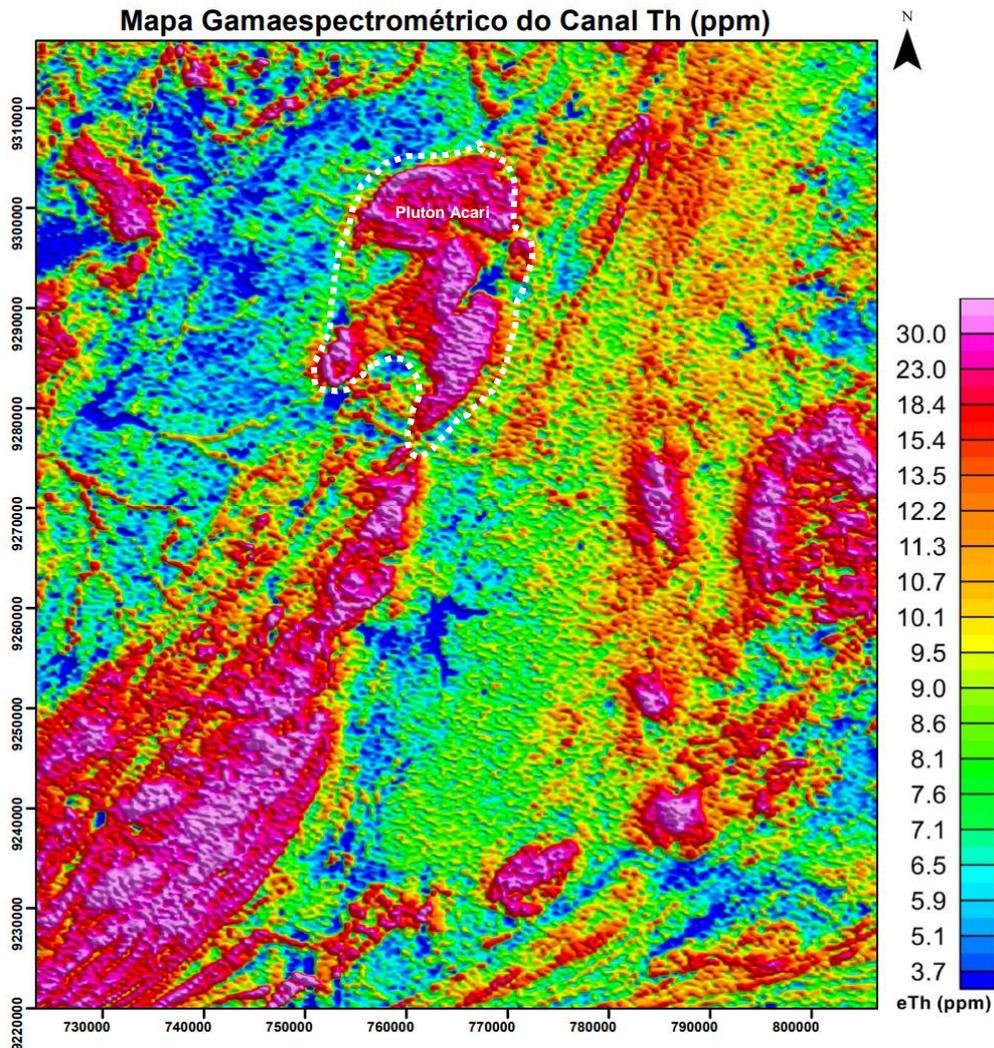


Figura 15 – Mapa Gamaespectrométrico do elemento Tório (Th). O tracejado branco ressalta a localização do Pluton Acari.  
Fonte: autora (2022).

Os intervalos de concentrações variam entre 3,7 e 30 (ppm). Os baixos contrastes variam de 3,7 a 7,1 e os altos contrastes variam de 11,3 a 30.

Assim como o elemento urânio, minerais ricos em tório também estão presentes na composição das rochas do Complexo Caicó e no Pluton Acari, como por exemplo, a monazita, que ocorre como mineral acessório.

### 10.1.4 Ternário

O mapa Ternário (Figura 16) descreve o produto entre o somatório dos três canais radioativos (K, eU, eTh) caracterizados através da composição RGB (*Red-Green-Blue*), sendo esta, o vermelho representando o canal do potássio, o verde representando o canal do tório e o azul representando o canal do urânio.

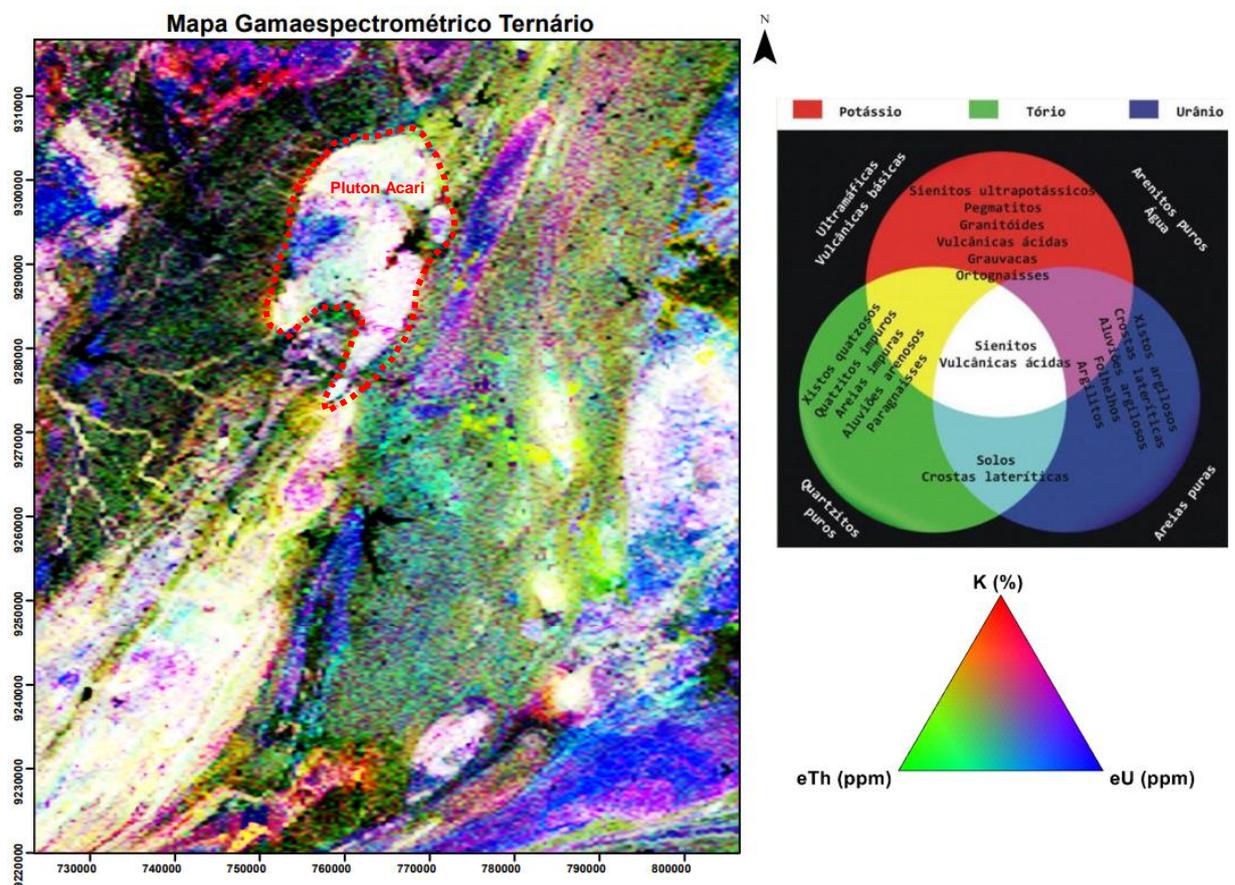


Figura 16 – Mapa Ternário evidenciando o contraste dos três canais. O tracejado vermelho ressalta a localização do Pluton Acari.  
Fonte: autora (2022).

A integração dos três canais radioativos permite observar, de maneira individual, o comportamento das anomalias gamaespectrométrica, além da

correlação entre os elementos que refletem diretamente a química mineral presente nas rochas que recobrem a região.

## **10.2 DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS**

Os resultados abordados foram baseados na confecção dos seguintes mapas temáticos, utilizando os filtros: Derivada Vertical (DZ) e Amplitude do Sinal Analítico (ASA).

### *10.2.1 Derivada Vertical (DZ)*

A filtragem da Derivada Vertical (Figura 17) foi aplicada sob o mapa do Campo Magnético Anômalo (CMA) com o intuito de evidenciar os principais contrastes dos lineamentos magnéticos contidos na área de estudo, haja vista que, o objetivo principal desse filtro é realçar estruturas, nas quais, as fontes são consideradas rasas, auxiliando na interpretação e correlação com as possíveis zonas de cisalhamentos, falhas, fraturas recorrentes na região.

Os intervalos variam de -0,2210 a 0,1970 nT, onde, os contrastes mais altos são, aproximadamente, 0,0135 a 0,1970.

O filtro DZ corrobora o realce de estruturas NE-SW da área, além de pequenos lineamentos apresentando um trend L-W.

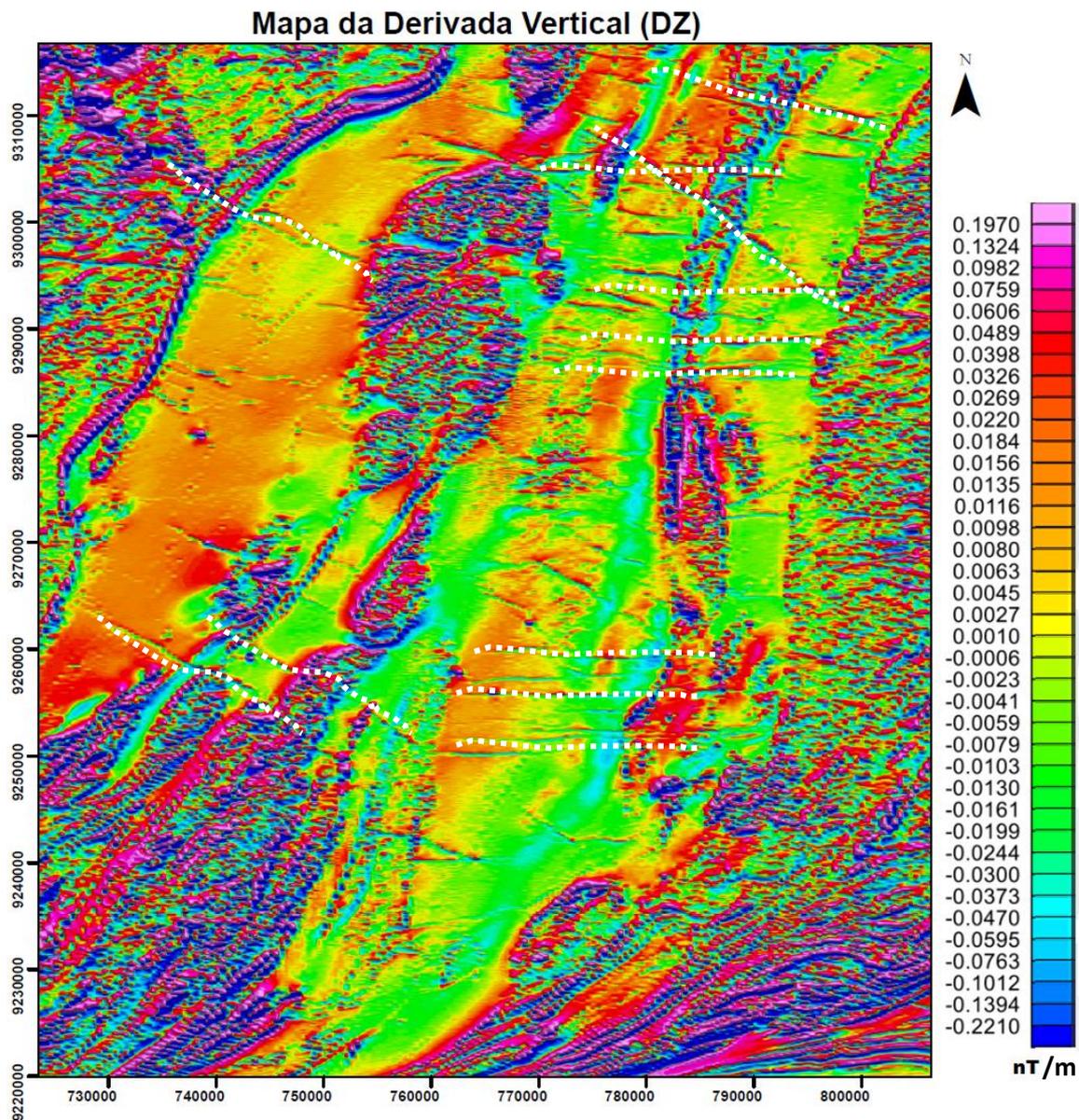


Figura 17 – Mapa da Derivada Vertical no eixo Z. Os tracejados de cor branca evidenciam as principais estruturas (falhas, fraturas) da área.  
 Fonte: autora (2023).

### 10.2.2 Amplitude do Sinal Analítico

A filtragem do Sinal Analítico (Figura 18) foi aplicada sob o mapa do Campo Magnético Anômalo (CMA) a fim de evidenciar o contraste da susceptibilidade magnética distribuído ao longo na área de estudo, bem como, delinear as bordas dos corpos intrusivos e das estruturas geológicas presentes na mesma. Os intervalos variam de 0,0061 a 0,4036 nT, onde, os contrastes mais altos são, aproximadamente, 0,0690 a 0,4036.

### Mapa da Amplitude do Sinal Analítico (ASA)

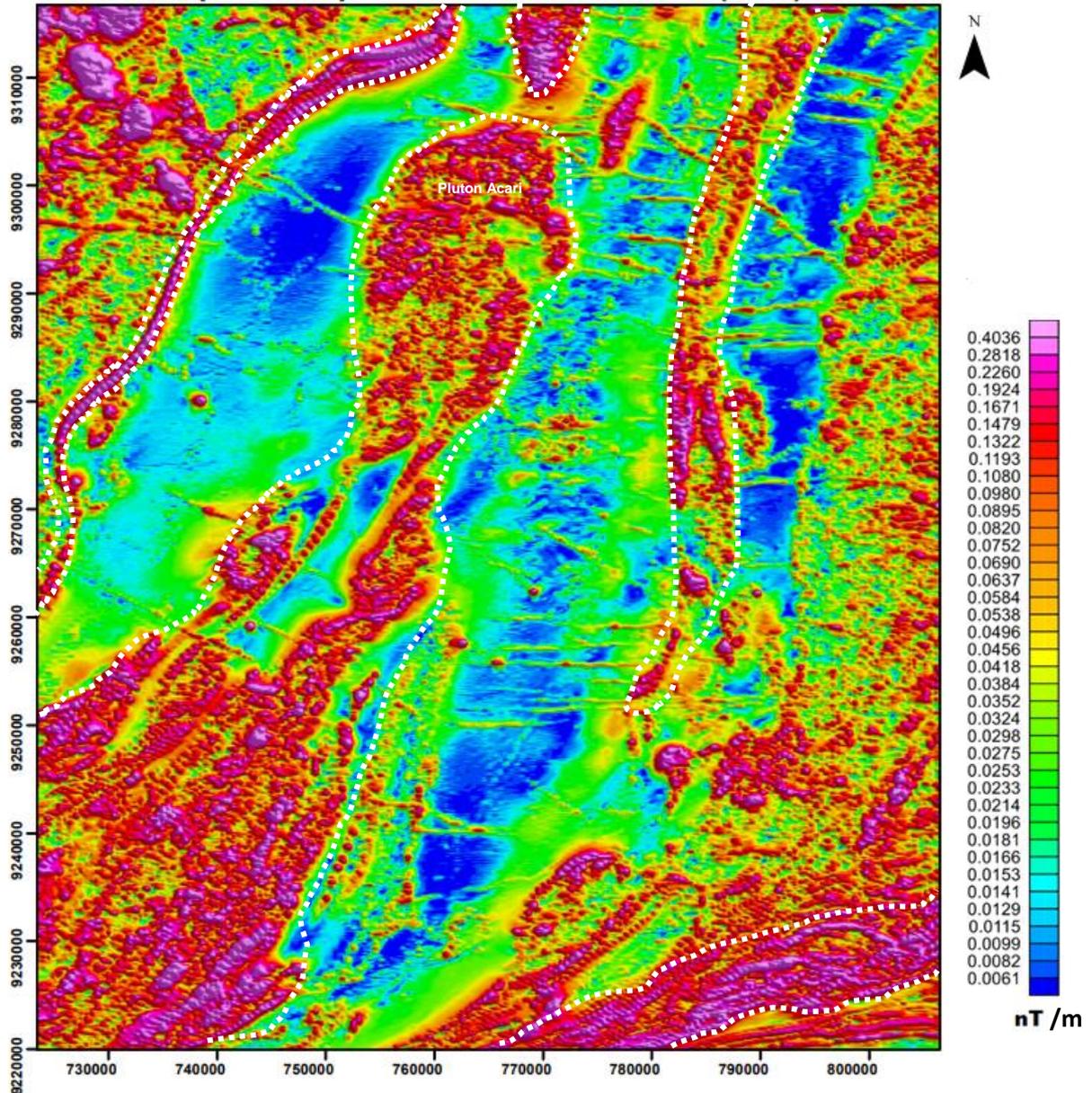


Figura 18 – Mapa da Amplitude do Sinal Analítico. Os tracejados de cor branca evidenciam as bordas das principais zonas de cisalhamentos e corpos da área geológicas.

Fonte: autora (2023).

### 10.2.3 Modelo VOXI

O VOXI *Earth Modelling* foi utilizado com intuito de incorporar resultados ao fluxo de trabalho comumente aplicado a dados magnéticos, pois fornece um modelo muito melhor para representar o ambiente geológico, considerando a natureza complexa do campo magnético.

A Figura 19 (Anexo A) representa apenas uma porção da área de estudo, em células de 50x50 dando ênfase na região de maior influência do sistema mineralizador do tipo W-skarns, englobando o Pluton do Acari e as zonas de cisalhamentos mais expressivas.

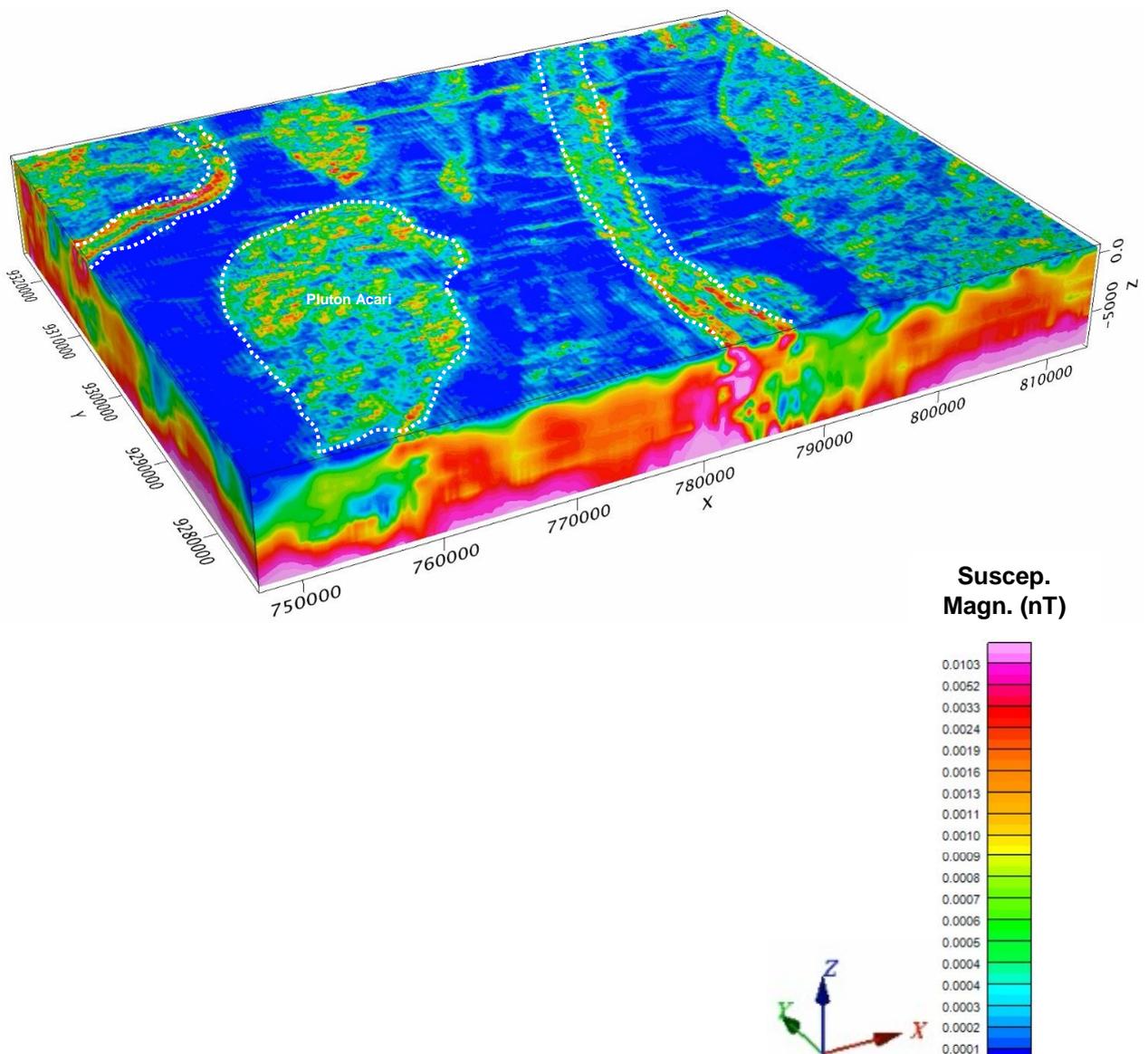


Figura 19 – Modelo VOXI feito através da técnica de Susceptibilidade Magnética.  
Fonte: autora (2023).

### **10.3 MAPA ALVOS POTENCIAIS**

A Figura 20 sumariza todas as ocorrências de W ao longo da área de estudo, registradas pela CPRM, sob as principais litologias distribuídas ao longo da mesma. É possível observar uma forte concentração destes elementos proximais a zona de influência do Pluton Acari e no entorno das principais zonas de cisalhamentos.

Foram abordadas neste mapa, as principais zonas passíveis a ocorrência da principal substância mencionada no presente trabalho. Estas zonas estão representadas por áreas hachuradas e enumeradas conforme a ordem de prioridade.

### Mapa dos Alvos Potenciais

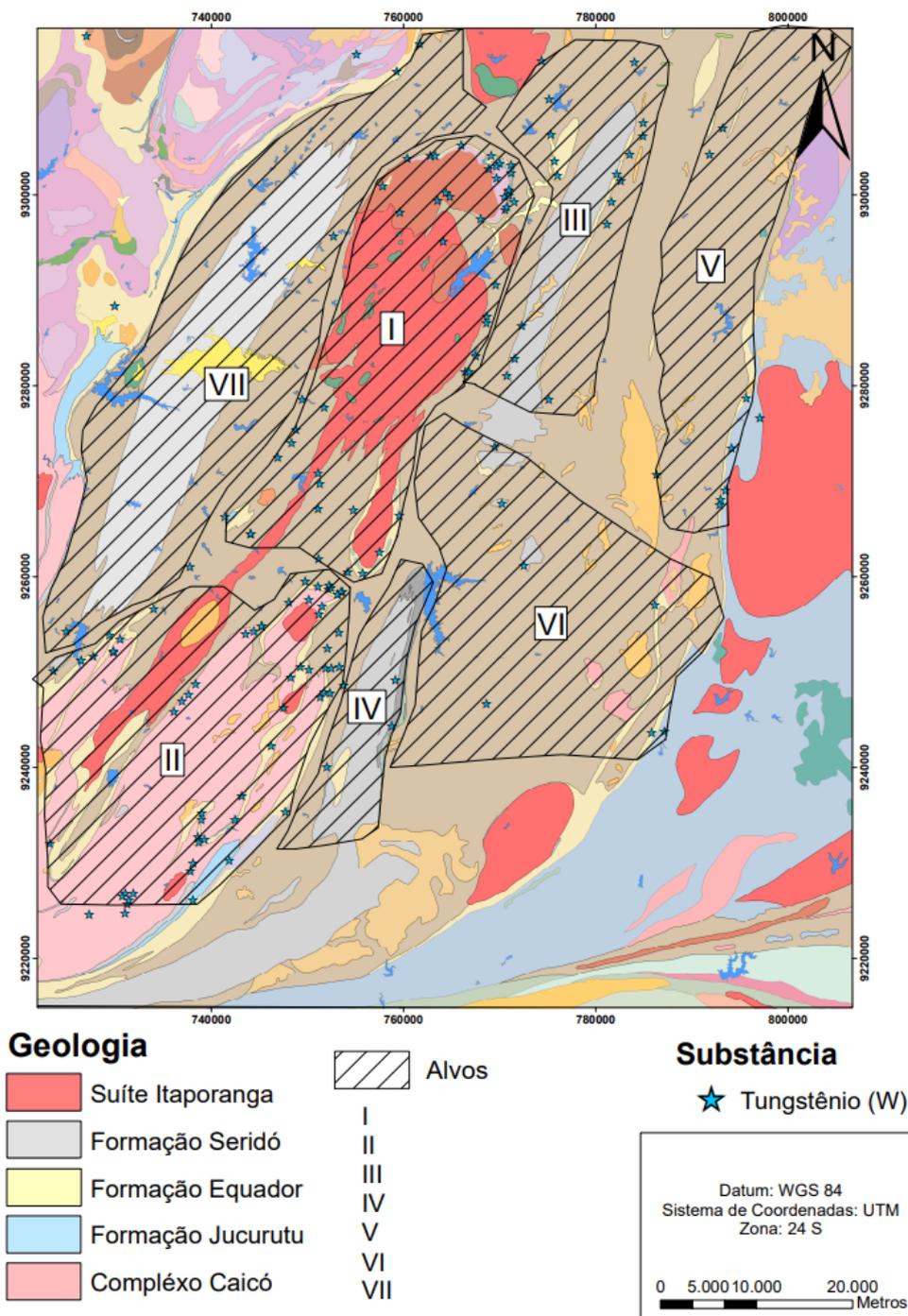


Figura 20 – Mapa dos Alvos Potenciais representados pelas litologias e zonas passíveis a ocorrência do elemento W.  
 Fonte: autora (2023).

A Figura 21 realça o sombreamento das principais estruturas extraídas a partir do mapa da Amplitude do Sinal Analítico (Figura 16), com o intuito de demarcar áreas de influências estruturais que podem servir como sistema canalizador destas ocorrências.

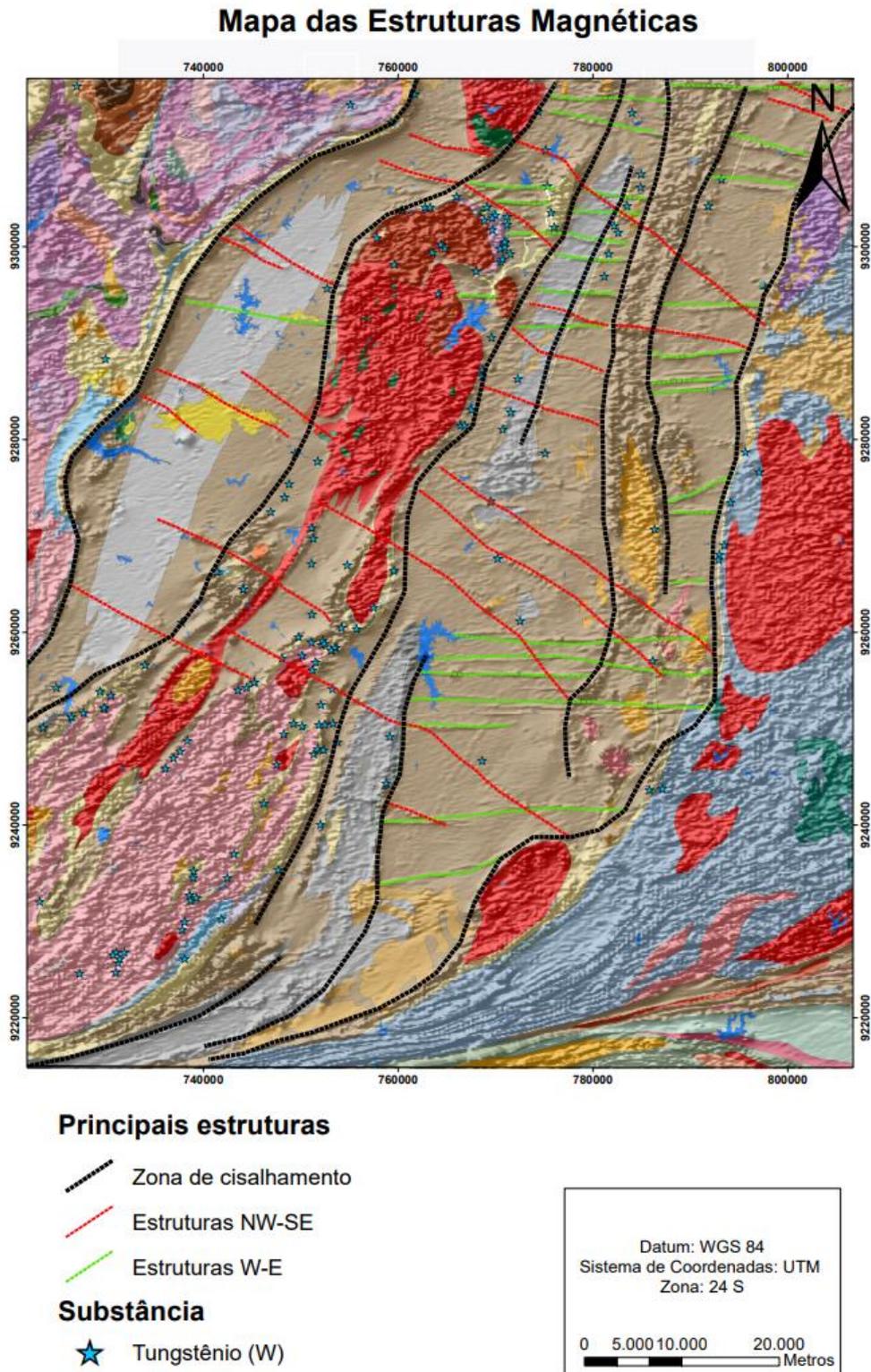


Figura 21 – Mapas das Estruturas extraídas a partir dos dados magnéticos (ASA).  
 Fonte: autora (2023).

## 11 DISCUSSÕES

Os mapas geofísicos gerados ao longo do trabalho descrevem o comportamento geológico da área de estudo com base nas propriedades físico-químicas dos materiais e rochas inseridas na mesma.

Para o contexto gamaespectrométrico, a anomalia realçada no mapa do canal Potássio (Figura 13) representa a distribuição do elemento K, onde, as maiores concentrações estão diretamente associadas com as rochas do Complexo Caicó (2050 Ma – 2300 Ma), rochas peraluminosas e metaluminosas pertencentes à Suíte Dona Inês (485 Ma – 541 Ma) e a Suíte Itaporanga (485 Ma – 541 Ma) contendo os granitóides do Pluton Acari.

Segundo Guimarães *et al.* (2008) a Suíte Dona Inês é descrita por granitos de composição sieno a monzogranítica, apresentando forte afinidade cálcio-alcálica de alto K. A Suíte Itaporanga também possui forte afinidade cálcio-alcálica de alto K, sendo descrita por granitos de granulação variando de grossa a porfírica com mega cristais de feldspato (GUIMARÃES *et al.*, 2008). Segundo Matos *et al.* (2009), essa característica de alta afinidade cálcio-alcálica possibilita a identificação por sensores geofísicos.

Através destas caracterizações petrológicas mencionadas, além dos relatórios da CPRM (BEZERRA *et al.*, 2009; MEDEIROS *et al.*, 2012), podemos interpretar que as principais assinaturas geofísicas presentes predominantemente na porção central e a leste deste mapa, demonstram intensamente a relação do elemento K com essas rochas aflorantes, normalmente, ricas em potássio (ALMEIDA *et al.*, 1967; SANTOS, 1973) na sua composição.

Os valores da distribuição deste elemento (expressos em %) exibido no mapa também podem ser comparados com a Tabela 6 de Dickson e Scott (1997), que mostra a relação dos radioelementos para rochas e solos de diferentes tipos. Podemos observar que o comportamento do elemento K para rochas tipo granitóides e intrusivas intermediárias é, respectivamente, 0.3 – 4.5 % e 0.7 – 5.6 %, sendo compatível com as rochas que recobrem a área de estudo.

Tipos de rochas	Rochas			Solos		
	K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)
Granitóides	0.3 - 4.5	0.4 - 7.8	2.3 - 45	0.4 - 3.9	0.5 - 7.8	2.0 - 7.8
Gnaisses	2.4 - 3.8	2.1 - 3.6	18 - 55	0.7 - 1.9	1.6 - 3.8	6.0 - 19
Pegmatitos	2.6 - 5.5	0.3 - 1.0	0.3 - 9.6	-	-	-
Aplitos	0.6 - 4.0	1.0 - 8	3.0 - 20	-	-	-
Intrusivas intermediárias	0.7 - 5.6	0.1 - 1.2	0.8 - 6.1	0.7 - 3.4	1.5 - 2.3	2.9 - 8.4
Intrusivas máficas	0.1 - 4.0	1.6 - 3.8	0.0 - 3.1	-	-	-
Ardósias	0.1 - 4.0	1.6 - 3.8	10.0 - 55	0.7 - 3.0	1.2 - 5.0	6.0 - 19
Arenitos	0.0 - 5.5	0.7 - 5.1	4.0 - 22	0.1 - 2.4	1.2 - 4.4	7.0 - 18
Carbonatos	0.0 - 0.5	0.4 - 2.9	0.0 - 2.9	-	-	-

Tabela 6 – Relação dos radioelementos para rochas e solos de diferentes tipos.  
Fonte: Dickson e Scott (1997).

A resposta gamaespectrométrica do canal U (Figura 14) apresenta uma descrição geológica semelhante ao contexto abordado no mapa do potássio, por se tratarem das mesmas rochas.

Em relação aos valores da distribuição deste elemento em ppm no mapa do urânio, comparados com a Tabela 6 de Dickson e Scott (1997), é possível observar valores de 0.4 – 7.8 ppm para granitóides, 2.1 – 3.6 ppm para gnaisses (rochas encaixantes) e 0.1 – 1.2 ppm para os granitóides. Respostas estas, concordantes com os valores gerados no mapa. Ademais, espera-se que as concentrações mais altas se sobressaiam dos granitóides, os quais, possuem em sua composição química, minerais acessórios com urânio em sua estrutura.

O mapa do elemento Th (Figura 15) apresenta assinaturas gamaespectrométricas análogas ao mapa do urânio, porém, o tório pode ser altamente móvel quando combinado com complexos orgânicos em águas subterrâneas e solos (DICKSON, 1991), associando-se a minerais resistentes que podem ser concentrados em perfis residuais de regolito (WILFORD *et al.*, 1997).

No contexto da área, o contraste referente à disposição do tório é correlato a composição das rochas recorrentes na região, conforme enfatizado nos parágrafos acima deste tópico, conjuntamente ao processo de intemperismo sofrido pelas mesmas, haja vista que, o tório, quando liberado durante o intemperismo é facilmente adsorvido na argila (DICKSON & SCOTT, 1990).

Fazendo o comparativo dos valores do elemento Th com a Tabela 6 de Dickson e Scott (1997), esperam-se valores de aproximadamente 2.3 – 45 ppm para os granitóides, 18 – 55 ppm para os gnaisses e 0.8 – 6.1 para as intrusivas intermediárias. Importante destacar que, os gnaisses encaixantes dispostos na área de estudo não possuem evidências de conter minerais ricos em Th em sua composição química, presumindo que, estas anomalias estejam proporcionalmente interligadas aos granitóides.

O mapa Ternário (Figura 16) resulta na união dos três canais (K, U, Th) mencionados através da composição RGB. A confecção deste mapa foi essencial para auxiliar na análise das assinaturas geofísicas gamaespectrométricas que podem ter associações com processos de alterações hidrotermais dispostos na região.

Uma das principais colocações para inferir alvos potenciais dos depósitos W-skarns é identificar zonas de alterações hidrotermais. Segundo Ostrovskiy (1975) estes processos podem acontecer proximais a altas concentrações de K, onde, geralmente, as concentrações de urânio tendem a acompanhar – lá. Com base nisto, torna-se coerente destacar que, a porção central ocorre à combinação dos três radioelementos, região de maior influência do Pluton Acari, referência clássica dos granitóides do Seridó (JARDIM DE SÁ *et al.*, 1986). A presença de um pluton inserido na área de estudo corresponde à idéia proposta por Meinert *et al.* (2005), onde os autores discorrem que “a proximidade de plutons é requisito para o desenvolvimento dos skarns”.

A combinação dos três elementos volta a se repetir na porção leste do mapa, porém, o canal do urânio se sobressai no entorno, indicando assinaturas gamaespectrométricas relacionadas às rochas do Grupo Seridó, constituídas predominantemente por xistos. O diagrama de composição RGB exemplifica com coerência a relação do mapa ternário e os tipos de rochas discutidas ao longo do trabalho.

A respeito dos dados magnetométricos, o mapa da Derivada Vertical (Figura 17) e o mapa da Amplitude do Sinal Analítico (Figura 18) e possuem correspondência com as principais estruturas (falhas, fraturas, zonas de cisalhamento). Estas assinaturas magnéticas são de extrema importância por

detectarem as possíveis áreas de enriquecimento, que serão, na maioria dos casos, delimitadas ao longo das zonas de cisalhamento.

Outro detalhe relevante descrito por Corrêa et al. (2020) é que a maioria dos depósitos de W-skarns da área de estudo (como exemplo: a mina de Brejuí), são predominantemente oxidados, apresentando abundância dos minerais magnéticos pirita e magnetita.

As direções principais dos alinhamentos realçados nos dois mapas são NE-SW, sendo possível correlacionar às principais zonas de cisalhamento: Umburana, Toró e Santa Mônica. Ademais, ainda é possível identificar discretos lineamentos na direção W-E na porção leste da área, que podem ser correlacionados aos diques do magmatismo Ceará-mirim (DANTAS *et al.*, 2013). É possível verificar no modelo VOXI (Figura 19) essas relações das zonas de cisalhamentos com os lineamentos magnéticos discretos, presumindo que a zona de maior influência para a geração destes lineamentos se deu posteriormente ao Pluton Acari.

O mapa de Alvos Potenciais (Figura 20) sugere a indicação de possíveis locais, onde o sistema mineralizador dos depósitos tipo W-skarns teriam a probabilidade de se formar. Foram separadas sete zonas (I, II, III, IV, V, VI e VII) descritas em ordem de prioridade.

As zonas I e II é fortemente influenciadas pela existência do Pluton Acari e do Complexo Caicó, respectivamente, sendo caracterizado como a prioridade máxima por estar circundando a principal zona de cisalhamento da área. A zona III e IV é destacada pela existência da Faixa Seridó, sendo caracterizada por uma intensa movimentação estrutural com diversas ocorrências de falhas e fraturas destacadas na literatura.

As zonas V, VI e VII são as que possuem menos destaque, porém, ainda são importantes, pois refere-se a uma zona com a presença de lineamentos W-E que cortam outras zonas de cisalhamento secundárias, além de estruturas NW-SE.

A integração dos dados geofísicos, geológicos e das ocorrências minerais documentados pela CPRM (CAVALCANTE *et al.*, 2018) embasaram a confecção do mapa das estruturas magnéticas (Figura 21), podendo destacar que, as zonas indicadas como potenciais são locais que possuem a conexão de zonas de cisalhamento com lineamentos perpendiculares às mesmas.

É sugestivo destacar que esses lineamentos podem servir como canal condutor do fluido mineralizante, apresentando assim, um padrão semelhante ao que já foi registrado anteriormente no histórico de ocorrências minerais deste tipo na região.

## **12 CONCLUSÕES**

Apesar de complexo, o sistema da mineralização dos depósitos skarns possui uma forte relação com dados geofísicos, nos quais, servem como embasamento para caracterizar geologicamente estes eventos que são destacados desde a década de 80 (DNPM/CPRM, ALMEIDA *et al.*, 1980)., através do Projeto Sheelita do Seridó.

Os depósitos W-skarns do Seridó possuem controles estruturais bem marcados ao longo das zonas de cisalhamentos identificados através dos mapas magnéticos temáticos, trazendo evidências de anomalias expressivas que estão associadas as rochas máficas, que podem ter influenciado a origem do fluido mineralizante.

Os resultados gamaespectrométricos nos mostraram a distribuição dos três canais (U, K e Th) radioativos ao longo da área de estudo, abordando uma resposta diretamente a química mineral das rochas inseridas na mesma. Além disto, é possível presumir a ocorrência de alterações hidrotermais ao longo das zonas de cisalhamento, corroborando na identificação de zonas potenciais para a existência de novos alvos com comportamento geofísico semelhantes aos alvos já documentados ao longo dos anos.

Os dados geofísicos 2D dos métodos estreitaram as abordagens do comportamento geofísico-geológico na região do Seridó, lembrando a importância de pesquisar e discutir a possibilidade de novos alvos. Para trabalhos futuros, torna-se indispensável o uso da inversão geofísica 3D utilizando o Vetor de Magnetização Induzida. Estas abordagens irão possibilitar a estimativa de profundidade dos corpos ígneos que aportaram fluidos, dando origem a estas mineralizações.

## REFERÊNCIAS

- ADDAD, J. E.. **MINERAIS PESADOS: uma ferramenta para prospecção, proveniência, paleogeografia e análise ambiental**. 2. ed. São Paulo: Imprensa Universitária, 2010. 208 p.
- ALMEIDA, F. F. M. de; LEONARDOS, Othan Henry; VALENÇA, J.. **Review on Granitic Rocks of Northeast South America**. Recife: Iugs/Unesco, 1967. 41 p.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. 1981. **Brazilian structural provinces: an introduction**. Earth Science Review, 17, p.1-29, 1981.
- AMARAL, R. F. do. **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA EVOLUÇÃO MORFODINÂMICA DO LITORAL ORIENTAL SUL DO RIO GRANDE DO NORTE, ENTRE PONTA DE BÚZIOS E BAIÁ FORMOSA**. 1999. 267 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Natal, 1999.
- AMARANTE, Jose Luiz. **Histórico da mineração**. Minas Gerais: Ministério de Minas e de Energia, 2017.
- ANGELIM, Luiz Alberto de Aquino et al. **GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE**. Recife: Cprm, 2006.
- Cox D. P. & SINGER D. A. 1986. **Mineral Deposit Models**. United States Geological Survey Bulletin 1693.
- ARAUJO, Eliane R.; FERNANDES, Francisco R. Chaves. **Mineração no Brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais**. Minas Gerais: [S.I.], 2016.
- BARBOSA, G. V. et al.. **Evolução da metodologia para mapeamento geomorfológico do projeto RADAMBRASIL**. Salvador: Projeto Radambrasil, 1984. 182 p. (Série Geomorfologia).
- BARRETO, M. L. **Mineração e desenvolvimento sustentável: Desafios para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/ MCT, 2001. 215p.
- BLAKELY, R. J., 1996, **Potential theory in gravity and magnetic applications**. Cambridge university press.
- BEZERRA, Francisco Hilario Rego et al. **Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil**. Journal Of South American Earth Sciences, Natal, v. 14, n. 1, p.61-75, 2001.

BEZERRA, Francisco Hilário Rego; AMARAL, Ricardo Farias do; SILVA, Francisco Oliveira da; SOUSA, Maria Osvalneide Lucena; FONSECA, Vanildo Pereira da; VIEIRA, Marcela Marques. **Folha Jardim do Seridó**. Rio Grande do Norte: CPRM, 2009.

BIONDI, J. C.. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2015. 552 p.

CAVALCANTE, R; CUNHA, A. L .C; COSTA A. P; DANTAS, A. R. **Projeto ARIM Seridó - Folha Picuí - SB.24-Z-B-VI**. Recife: Avaliação dos Recursos Minerais do Brasil. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2018.

CPRM. **RELATÓRIO FINAL DO LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DOS DADOS MAGNETOMÉTRICOS E GAMAESPECTROMÉTRICOS**. Recife: SBG, 2010. 389 p.

CPRM. Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, 2001. Brasil: Brasília. <disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/metassomatismo.htm>>

CORRÊA, R.s.; OLIVEIRA, C.G.; DANTAS, E.L.; BOTELHO, N.F.. **Hydrothermal footprint related to regional-scale shear zone-controlled scheelite mineralization, Seridó W-skarn system, northeastern Brazil**. *Journal Of South American Earth Sciences*, [S.L.], v. 103, p. 102755, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102755>.

COOPER, G. R. J.; COWAN, D. R.. **Filtering using variable order vertical derivatives**. *Computers & Geosciences*, Australia, v. 30, n. 1, p.455-459, mar. 2004.

DANA, Edward Salisbury. **A TEXT-BOOK OF MINERALOGY**. Londres: Forgotten Books, 1898.

DANTAS, E. L., DE SOUZA, Z. S., WERNICK, E., HACKSPACHER, P. C., MARTIN, H., XIAODONG, D., & LI, J. W. (2013). **Crustal growth in the 3.4–2.7 Ga São José de Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil**. *Precambrian Research*, v.227, p.120-156. 2013.

DENTITH, M., MUDGE, S. T., 2014, **Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist**. 1 ed. Perth, Cambridge University Press.

DICKSON, B.L. & SCOTT, K.M., 1990. **Radioelement distributions in weathered granitoids and aeolian soils in NSW**. AM IRA P263: Improving the

interpretation of airborne gamma-ray surveys. CSIRO Division of Exploration Geoscience, 1990.

DICKSON, B.L., 1991. **Thorium migration: evidence from the geological record**. Environmental Radioactivity Workshop, Tahiti, Sept 2-6 1991.

DICKSON, Bruce L.; SCOTT, K. M.. **Interpretation of aerial gamma-ray surveys**. Agso Journal Of Australian Geology e Geophysics, Australia, v. 17, n. 2, p.187-200, dez. 1997.

DOMINGOS, Nitzschia R.R.; MEDEIROS, Walter E.; OLIVEIRA, Roberto G.. **Geophysical evidence for doming during the Pan-African/Brasiliano orogeny in the Seridó belt, Borborema Province, Brazil. Precambrian Research**, [S.L.], v. 350, p. 105870, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105870>.

ELLIS R. G., de Wet B., MACLEOD I. N. 2012. Inversion of magnetic data for remanent and induced sources. ASEG Extended Abstracts, 2012(1): 1-4.

FIGUEIRÔA, Silvia F. de M. (1994). **Mineração no Brasil: aspectos técnicos e científicos de suas história na Colônia e no Império** (séculos XVIII-XIX). América Latina en la Historia Económica, v. 1, n. 1, p. 41-55.

GARNAR, T. E.. Zirconium and hafnium minerals. **Industrial Minerals And Rocks**, Nova York, p.1159-1165, abr. 1994.

GEOSOFT. 2019. VOXI Earth Modelling [online]: Disponível em <https://www.geosoft.com/products/voxi-earth-modelling/>

GRANT, F.S.. Aeromagnetism, geology and ore environments, I. **Magnetite in igneous, sedimentary and metamorphic rocks: an overview**. Geoexploration, 23: 303-333, 1985.

GROSZ, E. A. (1983). **APPLICATION OF TOTAL-COUNT AERORADIOMETRIC MAPS TO THE EXPLORATION FOR HEAVYMINERAL DEPOSITS IN THE COASTAL PLAIN OF VIRGINIA**. US Geological Survey Prof. Paper 1263. 23p.

GUIMARÃES, Ignez de Pinho; BITTAR, Sheila Maria Bretas; SILVA, José Maurício Rangel da; SILVA, Francis Miller J. Virtuoso da; ARAÚJO, Daniel Brito de; ARRUDA, Sharliane Dornelle D'almeida; ALCANTARA, Vanja Coelho. **Geologia da Folha Solânea**. Jardim do Seridó: CPRM, 2008.

HANNA, William F.. **Geologic Applications of Modern Aeromagnetic Surveys**. Lakewood: U.s. Geological Survey, 1987.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Gamma ray Surveys in Uranium Exploration**, Technical Reports Series No. 186, IAEA, Vienna (1979).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying**, Technical Reports Series No. 323, IAEA, Vienna (1991).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, **Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data**, IAEA, Vienna (2003).

JARDIM DE SÁ, Emanuel F.; LEGRAND, Jean M.; GALINDO, Antônio C.; SÁ, Jaziel M.; HACKPACHER, Peter C.. **Granitogênese Brasileira no Seridó: O maciço de Acari (RN)**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 95-105, mar. 1986.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. **Geofísica de exploração**. Brasil: Oficina de Textos, 2006. 438 p.

KNOX-ROBINSON, C. M.; WYBORN, L. A. I.. **Towards a holistic exploration strategy: using geographic information systems as a tool to enhance exploration**. Australian Journal Of Earth Sciences, [S.L.], v. 44, n. 4, p. 453-463, ago. 1997. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/08120099708728326>.

LINS, F. A. F.; LOUREIRO, L. E, V. L.; ALBUQUERQUE, G. A. S. C. eds. **Brasil 500 anos, a construção do Brasil e da América Latina: histórico, atualidade e perspectivas**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2000.

MACLEOD, Ian N.; JONES, Keith; DAI, Ting Fan. 3-D Analytic Signal in the Interpretation of Total Magnetic Field Data at Low Magnetic Latitudes. **Exploration Geophysics**, Canadá, v. 24, n. 1, p.679-688, 1993.

MADEN, Nafiz; AKARYALĐ, Enver. **Gamma ray spectrometry for recognition of hydrothermal alteration zones related to a low sulfidation epithermal gold mineralization (eastern Pontides, NE Türkiye)**. Journal Of Applied Geophysics, [S.L.], v. 122, p. 74-85, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.09.003>.

MATOS, G.M.M., MELLO, I.S.C., GONÇALVES, J.H., 2009. **Área de relevante interesse mineral no Brasil** - ARIM. Belo Horizonte.

MARINI, O.J. **Potencial mineral do Brasil**. Academia Brasileira de Ciências. 2016.

MEDEIROS, V.C., NASCIMENTO, M.A.L., DANTAS, B.L., CUNHA, A.L.C. **Folha SB.24-Z-B-II. Escala 1:100.000**. Programa Geologia do Brasil-PGB.

Currais Novos. Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. Carta Geológica. Recife: CPRM, 2012.

MELO, Mario Tavares de Oliveira Cavalcanti; ROCHA, Alexandre Magno Rocha da. **Noções de prospecção e pesquisa mineral para técnicas de geologia e mineração**. Natal: Ifrn, 2010. 267 p.

MEINERT, Lawrence D.; DIPPLE, Gregory M.; NICOLESCU, Stefan. **World skarn deposits**. 2005.

MEDEIROS, Vladimir Cruz de; DANTAS, Eugênio Pacelli. **GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS DA FOLHA CURRAIS NOVOS**. Natal: CPRM, 2015. 154 p.

MÜCKE, A.. **Magnetite, ilmenite and ulvite in rocks and ore deposits: Petrography, microprobe analyses and genetic implications**. Mineralogy And Petrology, Vienna, v. 77, n. 1, p.215-234, 2003.

MUDGE, Stephen; TEAKLE, Mark. **Geophysical exploration for heavy-mineral sands near Mindarie, South Australia**. Aseg Extended Abstracts, [s.l.], v. 2003, n. 3, p.249- 255, dez. 2003. Informa UK Limited. [http://dx.doi.org/10.1071/asegspec12\\_19](http://dx.doi.org/10.1071/asegspec12_19).

NABIGHIAN, M.N. (1972). **The Analytic Signal of Two-Dimensional Magnetic Bodies with Polygonal Cross-Section: Its Properties and Use for Automated Anomaly Interpretation**. Geophysics, 37, 507-517.

OLIVA, Luiz Antonio. **Métodos e técnicas de pesquisa mineral**. Brasília: DNPM, 1985. 355 p.

OLIVEIRA, Roberto Gusmão de. **ARÇABOUÇO GEOFÍSICO, ISOSTASIA E CAUSAS DO MAGMATISMO CENOZÓICO DA PROVÍNCIA BORBOREMA E DE SUA MARGEM CONTINENTAL (NORDESTE DO BRASIL)**. 2008. 415 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008. Cap. 4.

OSTROVSKIY, E.A. (1975) Antagonism of Radioactive Elements in Well Rock Alteration Fields and Its Use in Aerogamma Spectrometric Prospecting. International Geological Review, 17, 461-468. <http://dx.doi.org/10.1080/00206817509471687> .

PEREIRA, Ronaldo Mello; ÁVILA, Ciro Alexandre; LIMA, Paulo Roberto Amorim dos Santos. **Minerais em Grãos: técnicas de coleta, preparação e identificação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 128 p.

REEVES, Colin. **Aeromagnetic Survey**. África do Sul: Geosoft, 2005.

ROLIM, V.K.; ROSIÈRE, C.A. **The Conceição do Mato Dentro Iron Formation Province in southeastern Brazil**. In: Proceedings of the Eleventh Biennial SGA Meeting, Antofagasta, Chile. Let's Talk Ore Deposits. p. 927-929. 2011.

SALIM, J. 1979. **Geologia e Controle de Mineralizações Scheelitíferas da Região da Serra do Feiticeiro e Bonfim - RN**. Masters Dissertation (Unpublished), Universidade de Brasília.

SANTOS, E. J.. **Província Sheelitífera do Nordeste**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2., 1973, Aracaju. **Anais [...]** . SE: Sbg, 1973. p. 31-46.

Secretaria de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte (SEMARH, 2017).

SOUSA, R. R. A. B. F; CAMELO, G. L. P. **Influência da gestão de uma empresa na alavancagem das exportações: estudo de caso na Mina Brejuí**. Observatório de Monografias em Comércio Exterior, v.1, p.135-142, 2008.

Souza Neto, J.A., Legrand, J.M., Volfinger, M., Pascal, M.L., Sonnet, P., 2008. **W-Au skarns in the neo-proterozoic serido mobile belt, borborema Province in northeastern Brazil: an overview with emphasis on the Bonfim deposit**. Miner. Depos. 43, 185–205.

VAN GOSEN, Bradley S. et al.. **Deposit Model for Heavy-Mineral Sands in Coastal Environments**. Virginia: U.s. Geological Survey, 2014. 62 p.

WEMEGAH, D. D. *et al.* **Geophysical Interpretation of Possible Gold Mineralization Zones in Kyerano, South-Western Ghana Using Aeromagnetic and Radiometric Datasets**. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 3, 67-82, 2015.

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 e Geophysics*, Australia, v. 17, n. 2, p.201-216, out. 1997.

