



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

LEANDRO DE SOUSA BATISTA

**ESTUDO INTEGRADO DE DADOS GEOFÍSICOS, GEOLÓGICOS E  
GEOQUÍMICOS PARA PROSPECÇÃO DE GRAFITA, NA REGIÃO DE PINTADAS,  
ESTADO DA BAHIA**

Niterói,  
2021

LEANDRO DE SOUSA BATISTA

**ESTUDO INTEGRADO DE DADOS GEOFÍSICOS, GEOLÓGICOS E  
GEOQUÍMICOS PARA PROSPECÇÃO DE GRAFITA, NA REGIÃO DE PINTADAS,  
ESTADO DA BAHIA**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação dinâmica dos oceanos e da terra, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geofísica e Geologia.

Orientadores:  
Prof. Dr. Rodrigo Bijani Santos  
Prof. Dr. Antonio Fernando Menezes Freire

Niterói,  
2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

B333e Batista, Leandro de Sousa  
Estudo integrado de dados geofísicos, geológicos e  
geoquímicos para prospecção de grafita, na região de  
Pintadas, estado da Bahia / Leandro de Sousa Batista ; Rodrigo  
Bijani Santos, orientador ; Antonio Fernando Menezes Freire,  
coorientador. Niterói, 2021.  
101 p. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Niterói, 2021.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDOT> .2021.m.14298372766

1. Geofísica. 2. Prospecção geofísica. 3. Métodos  
elétricos. 4. Grafita. 5. Produção intelectual. I. Santos,  
Rodrigo Bijani, orientador. II. Freire, Antonio Fernando  
Menezes, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense.  
Instituto de Geociências. IV. Título.

CDD -

LEANDRO DE SOUSA BATISTA

**ESTUDO INTEGRADO DE DADOS GEOFÍSICOS, GEOLÓGICOS E  
GEOQUÍMICOS PARA PROSPECÇÃO DE GRAFITA, NA PROVÍNCIA DE  
PINTADAS, ESTADO DA BAHIA**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação dinâmica dos oceanos e da terra, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geofísica e Geologia.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Rodrigo Bijani Santos (Orientador) - UFF

---

Prof. Dr. Antonio Fernando Menezes Freire (Orientador) - UFF

---

Prof. Dr. Carlson Leite - UFBA

---

Prof. Dr. Cleverson Guizan - UFF

---

Dr. Júlio Lyrio - Petrobras

Niterói,  
2021

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Lúcia e João, que sempre me deram suporte necessário e a oportunidade de seguir o caminho dos estudos. Sempre serão as pessoas em que me espelho. Sou muito orgulhoso em tê-los como pais e grato por cada ensinamento que me passaram.

Aos meus avós, Maria e Manuel, que sempre estiveram juntos a mim, como se fossem meus pais. À minha vó que é a pessoa mais bondosa que conheço e que sempre me amparou quando precisei. Agradeço ao meu avô, que partiu em 2019, mas nunca partirá do meu coração, como todos que mencionei, sempre batalhou por um futuro melhor para sua família.

À todos os meus amigos, que sempre estiveram comigo, me enchendo de alegria, me motivando e sempre aguentando minhas piadas sem graça. A coisa mais importante que construí até o hoje em minha vida foram as amizades que eu tenho. Gostaria que fosse possível citar todos, pois todos são de extrema importância para mim. Um agradecimento em especial, ao João, Brenda e à Sophia. Ao João, minha amizade mais antiga, eu sei que posso ficar tempos sem e vê-lo que mesmo assim teremos as mesmas risadas de quando criança, quando nos encontrarmos. À Brenda, que parece que conheço há muito mais tempo do que realmente é e que mesmo sendo bem brava, tem paciência comigo e eventualmente ri de alguma das minhas piadas. E à Sophia, a amizade que fiz no começo da graduação que levo até hoje, que me motiva e que sempre está ao meu lado, alguém com quem sempre pude contar e que sei que estará comigo por toda a vida.

Aos meus orientadores, Rodrigo Bijani e Antonio Fernando Menezes Freire, que com muito esforço me guiaram neste mestrado e que me ensinaram a cada conversa que tivemos. Muito obrigado à ambos! Obrigado por acreditarem em mim, por toda a paciência e por todo o conhecimento que compartilharam comigo, serei eternamente grato. Agradeço também à Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM) por ter cedido os dados para o estudo e a Seequent por além de ter fornecido o software, Oasis Montaj, possibilitou conhecer pessoas maravilhosas com as quais tenho prazer de trabalhar junto. Meus mais sinceros agradecimentos à Telma, Luana, Diego, Monia e ao Hilton, que me ajudaram na construção deste trabalho.

Por fim, agradeço a UFF, que me proporcionou desde a graduação a oportunidade de um ensino superior de altíssima qualidade que eu nunca teria a oportunidade caso não fosse pública. Que me apresentou a Geofísica e que me motiva a cada vez mais aprender sobre as Geociências.

## RESUMO

O grafeno é atualmente um dos mais promissores nanomateriais, o que vem impulsionando pesquisas sobre o mesmo. Esse material não é encontrado na natureza, mas pode ser fabricado a partir da grafita. Sabe-se que existem diferenciações qualitativas em depósitos de grafita para a transformação em grafeno. Existem diversos depósitos conhecidos de grafita no Brasil, alguns deles no estado da Bahia, o que motivou a escolha da área de estudo. Esta pesquisa foi realizada no domínio do Cinturão Orogênico Salvador-Curaçá de idade paleoproterozoica, mais precisamente na região das cidades de Pintadas e Ipirá, localizadas na região do centro-nordeste do estado da Bahia. O estudo foi uma colaboração conjunta entre a Universidade Federal Fluminense (UFF), a Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM), fornecedora dos dados, e a Seequent Limited, fornecedora do software Oasis Montaj. O presente trabalho integra diferentes métodos geofísicos, dados geológicos e geoquímicos, em diversas escalas, para compreender os fatores geológicos regionais e locais que controlam as ocorrências de grafita estudadas. O estudo regional foi embasado através do uso de dados magnetométricos e gamaespectrométricos, nos quais foram observadas feições geométricas de anomalias que correspondem a estruturação das unidades tectônicas que encerram rochas metamórficas paraderivadas portadoras dos depósitos grafitosos, importantes para o processo exploratório. Para a delimitação de corpos grafitosos, em escala de semi-detalle no município de Pintadas, Bahia, foram utilizados dados elétricos que auxiliaram na identificação da geometria dos depósitos, integrados às informações geológicas e geoquímicas de detalhe, obtidas em um furo de sondagem realizado na área de pesquisa. Desta forma, esse estudo propõe um fluxo de trabalho geofísico-geológico exploração de depósitos grafitosos em áreas de metamorfismo granulítico. Em que obteve resultado satisfatório em um estudo regional através da análise dos produtos aerogeofísicos e em uma escala local apresentou boa correlação entre o corpo já mapeado com as inversões elétricos, além da possibilidade para prospecção de novos alvos na região.

**Palavras-chave:** Geofísica; Magnetometria; Gamaespectrometria; IP; Grafita.

## ABSTRACT

Graphene is currently one of the most promising nanomaterials, which has been driving to research in this area. This material is not found in nature, but it can be manufactured by using graphite. It is known that there are differentiations in graphite deposits, which make certain types of deposits better for transformation into graphene. There are several known graphite deposits in Brazil, some of them in the state of Bahia, which motivated the choice of the study area. This research was carried out in the Salvador-Curaçá domain, more precisely in the region of the towns of Pintadas and Ipirá, located in the northeast of Bahia. The study was a joint collaboration between Universidade Federal Fluminense (UFF), Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM), supplier of the data, and Seequent Limited, supplier of the Oasis Montaj software. This work integrates different geophysical methods, as well as geological and geochemical data, using—different scales in order to understand the regional and local geological factors that control the studied graphite occurrences. The regional study was based on the use of magnetometric and gamma-spectrometric data, to identify specific responses of graphitic deposits, which were crucial for the exploratory process. For the delimitation of graphite bodies, on a semi-detail scale in the area of Pintadas, electrical data were used. This, together with the detailed geological and geochemical information obtained in a borehole drilled made in the study area, helped in the identification of the geometry of the deposits. Besides, based on the integration of the data, geoelectric inversions were performed to define the geometry and depth of the occurrence of graphite deposits. Thus, this study has as a main objective to propose a workflow for a more comprehensive evaluation of graphite deposits, which could be used in other similar areas of study in the future. Which obtained a satisfactory result in a regional study through the analysis of aerogeophysical products. And on a local scale it showed a good correlation between the occurrence already mapped with the results of the electrical inversions. Furthermore, it was able to map the conductive anomalies of the subsurface region, thus generating new targets for future studies.

**Keywords:** Geophysics; Magnetometry; Gammaspectrometry; IP; Graphite.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.1</b> - Reserva e produção mundial de grafita (DALLA COSTA <i>et al.</i> 2017; USGS: MINERAL COMMODITY SUMMARIES, 2014). .....	2
<b>Tabela 3.1</b> - Cargabilidade típica de alguns materiais (modificada de TELFORD <i>et al.</i> 1990). .....	25

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Mapa de Localização da folha de Pintadas, com destaque para a área onde foi realizado o estudo de detalhe. Fonte: CBPM.....	4
<b>Figura 2.2</b> - Mapa geológico com recorte para a área de estudo. Fonte: Modificado de SOUZA et al. 2003.....	8
<b>Figura 3.1</b> - Minério de grafita (JACOBI, 2014). .....	9
<b>Figura 3.2</b> - Estrutura da grafita (Modificado BELÉM, 2018). .....	10
<b>Figura 3.3</b> - Componentes geomagnéticas (KEAREY et al. 2009). .....	14
<b>Figura 3.4</b> - Esquema de um aerolevante (RIBEIRO; MONTAVANI; LOURO, 2014). .....	17
<b>Figura 3.5</b> - Espectro de radiação de um levantamento gamaespectrométrico (RIBEIRO; MONTAVANI; LOURO, 2014). .....	19
<b>Figura 3.6</b> - Exemplo de configuração usual de eletrodos de aquisição (BRAGA, 2006). ....	20
<b>Figura 3.7</b> - Exemplo de arranjo dipolo-dipolo usado em caminhamentos elétricos (modificado de ELLIS, 1998).....	22
<b>Figura 3.8</b> - Gráfico que descreve o fenômeno de polarização induzida (KEAREY et al. 2009). .....	23
<b>Figura 4.1</b> - Mapa de do CMA junto às linhas de voo, com uma ampliação demonstrando a separação entre as linhas de 250 metros entre elas.....	27
<b>Figura 4.2</b> - Mapa de localização das linhas do levantamento elétrico com o furo de sondagem e polígonos das áreas onde foram feitas as inversões geofísicas.....	28
<b>Figura 5.1</b> - Fluxograma do processamento de dados magnetométricos. ....	31
<b>Figura 5.2</b> - Comparação entre grids gerados por interpolação bidirecional e mínima curvatura, respectivamente. ....	33
<b>Figura 5.3</b> - Fluxograma do processamento de dados gamaespectrométricos.....	37
<b>Figura 5.4</b> - Mapa de localização das linhas do levantamento elétrico com o furo de sondagem e polígonos das áreas onde foram feitas as inversões geofísicas.....	38
<b>Figura 5.5</b> - Exemplo da malha de blocos usada para a parametrização do modelo.....	39
<b>Figura 6.1</b> - Mapa do campo magnético anômalo da área de estudo. ....	44
<b>Figura 6.2</b> - Mapa do campo magnético anômalo da área de estudo com os domínios magnéticos interpretados.....	45
<b>Figura 6.3</b> - Mapa da primeira derivada vertical (Dz).....	47
<b>Figura 6.4</b> - Mapa da primeira derivada vertical (Dz) com a interpretação dos domínios magnéticos e lineamentos. ....	48
<b>Figura 6.5</b> - Mapa da amplitude do sinal analítico (ASA).....	49

<b>Figura 6.6</b> - Mapa da inclinação do sinal analítico (ISA) junto aos domínios magnéticos interpretados.....	50
<b>Figura 6.7</b> - Produtos da continuação para cima, com alturas somadas de 100 e 200 metros, respectivamente..	51
<b>Figura 6.8</b> - Mapa da diferença da continuação ascendente..	52
<b>Figura 6.9</b> - Espectro de potência ponderado radialmente para o CMA..	53
<b>Figura 6.10</b> - Aplicação do filtro passa baixa, para criação do grid regional..	54
<b>Figura 6.11</b> - Aplicação do filtro passa baixa, para criação do grid regional..	55
<b>Figura 6.12</b> - Mapa do modelo digital de terreno plotado junto as ocorrências de grafita da região..	56
<b>Figura 6.13</b> - Mapa de percentual de potássio..	57
<b>Figura 6.14</b> – Mapa de percentual de potássio, plotado junto as ocorrências de grafita, furo de sondagem e complexo Tanque Novo – Ipirá (área hachurada).....	59
<b>Figura 6.15</b> - Mapa de concentração de tório.....	60
<b>Figura 6.16</b> – Mapa de percentual de uranio, plotado junto as ocorrências de grafita e furo de sondagem.....	61
<b>Figura 6.17</b> - Mapa ternário da região de Pintadas, plotado junto as ocorrências de grafita e furo de sondagem.....	63
<b>Figura 6.18</b> - Mapa de razão U/K, plotado junto as ocorrências de grafita e furo de sondagem. ....	64
<b>Figura 6.19</b> – Mapa de razão U/Th, plotado junto as ocorrências de grafita e furo de sondagem.....	65
<b>Figura 6.20</b> - Mapa de razão Th/K, plotado junto as ocorrências de grafita e furo de sondagem..	66
<b>Figura 6.21</b> - Mapa de localização das linhas do levantamento elétrico com o mapa geológico de detalhe, furo de sondagem e polígonos das áreas onde foram feitas as inversões geofísicas. Fonte: Autor, sobre Mapa Geológico da CBPM. ....	68
<b>Figura 6.22</b> - Perfis de ajuste do modelo de resistividade para a linha L8682300..	69
<b>Figura 6.23</b> - Mapa com as seções empilhadas de resistividade aparente.....	70
<b>Figura 6.24</b> - Perfis de ajuste do modelo de resistividade para a linha L8682300. ....	71
<b>Figura 6.25</b> - Mapa com as seções empilhadas de cargabilidade aparente..	72
<b>Figura 6.26</b> - Perfil Geológico do Furo 860121-SS-FGL-0001 com teores pontuais e médios de carbono medidos nas duas faixas mineralizadas. Notar que o intervalo mais profundo possui maiores teores de carbono que o intervalo mais raso. Fonte: CBPM.....	74
<b>Figura 6.27</b> - Perfis das razões Ti/Ca, Fe/Ca e Fe/Ti. ....	75

<b>Figura 6.28</b> - Perfis das razões Mg/Ti, Mg/Ca, Fe/Ti, Fe/Ca e Fe/S, respectivamente. Notar que o corpo 2 possui maiores valores de Ti e Fe, relativos ao Ca, enquanto o corpo 1 possui uma menor concentração de Ti em relação ao Mg. Também é possível observar um baixo teor de enxofre (S) nos dois corpos, podendo indicar que eles estão oxidados. Detalhes no texto.....	76
<b>Figura 6.29</b> - Mapa do CMA, junto com os domínios magnéticos interpretados, ocorrências de grafita (X) e Unidade litoestratigráfica do complexo Tanque Novo – Ipirá (área hachurada).. .....	77
<b>Figura 6.30</b> - Vista 2D com o furo de sondagem plotado sobre a seção de resistividade L8682300. As cores mais quentes indicam maiores resistividades, enquanto as mais frias indicam maior condutividade. Os teores de carbono são representados pela largura da forma geométrica em marrom, ao redor do furo, sendo mais largos os intervalos com maiores teores. ....	79
<b>Figura 6.31</b> - Vista 3D com todas as seções de resistividade junto ao mapa geológico, com uma transparência aplicada.....	80
<b>Figura 6.32</b> - Vista 3D com todas as seções de resistividade limitadas a valores até 30 ohm.m junto ao mapa geológico, com uma transparência aplicada.....	81

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO .....	2
<b>2. ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>4</b>
2.1 LOCALIZAÇÃO .....	4
2.2 GEOLOGIA REGIONAL .....	4
2.2.1 Cinturão Salvador-Curaçá.....	4
2.2.1.1 Suíte São José do Jacuípe.....	5
2.2.2.2 Complexo Caraíba.....	6
2.2.2.4 Granitoides.....	7
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>9</b>
3.1. GRAFITA.....	9
3.1.1. MINERALOGIA.....	10
3.1.2. OCORRÊNCIA.....	11
3.1.3. TIPOS DE DEPÓSITO.....	13
3.2 MAGNETOMETRIA.....	14
3.3 GAMAESPECTOMETRIA .....	18
3.4 MÉTODOS ELÉTRICOS .....	19
3.4.1. Eletrorresistividade .....	20
3.4.2 Polarização Induzida (IP) .....	22
<b>4. MATERIAIS</b> .....	<b>26</b>
4.1 LEVANTAMENTO AEROGEOFÍSICO DE PINTADAS .....	26
4.2 LEVANTAMENTO GEOELÉTRICO.....	27
4.3 FURO ROTOPNEUMÁTICO .....	29
5.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS .....	30
5.1.1. Interpolação dos Dados Aeromagnetométricos.....	32
5.1.2 Primeira Derivada Vertical (Dz).....	33
5.1.3 Amplitude do Sinal Analítico (ASA) .....	34
5.1.4 Inclinação do Sinal Analítico (ISA) ou <i>Tilt Derivate</i> .....	34
5.1.5 Diferença da Continuação Ascendente .....	35
5.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROGAMAESPECTOMÉTRICOS.....	36
5.2.1 Interpolação dos Dados Aerogamaespectométricos .....	36
5.3. MODELAGEM E INVERSÃO DOS DADOS ELÉTRICOS .....	37
5.4 GEOQUÍMICA DO FURO DE SONDAGEM ROTOPNEUMÁTICA .....	40
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>42</b>

6.1 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS .....	42
6.1.1 Campo Magnético Anômalo (CMA).....	42
6.1.2 Primeira Derivada Vertical (Dz).....	46
6.1.3 Amplitude do Sinal Analítico (ASA) .....	48
6.1.4 Inclinação do Sinal Analítico (ISA) .....	50
6.1.5 Diferença da Continuação Ascendente .....	51
6.1.6 Separação Regional/Residual.....	52
6.2 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGAMAESPECTOMÉTRICOS .....	55
6.2.1 Modelo Digital de Terreno (MDT).....	55
6.2.2 Potássio.....	56
6.2.3 Tório .....	59
6.2.4 Urânio .....	61
6.2.5 Mapa Ternário .....	62
6.2.6 Razões U/K, U/Th e Th/K.....	63
6.3 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DO LEVANTAMENTO ELÉTRICO .....	66
6.3.2 Interpretação das Seções de Polarização Induzida.....	70
6.4 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GEOQUÍMICOS DO FURO DE SONDAGEM .....	72
6.5 INTEGRAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS .....	76
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>82</b>
<b>8. RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>84</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>

# 1. INTRODUÇÃO

O grafeno é um material que tem despertado interesse em pesquisas nas mais diversas áreas do conhecimento, devido às suas excelentes propriedades físico-químicas, mecânicas, térmicas, elétricas e ópticas. O grafeno é um material constituído por uma fina camada de carbono cujos átomos individuais estão distribuídos em uma estrutura hexagonal. Essa estrutura única fornece ao grafeno várias propriedades superiores, tais como altas condutividades elétricas e térmicas, boa transparência, boa resistência mecânica, flexibilidade inerente e enorme área superficial específica (SUN, WU & SHI, 2011).

Mostra-se de extrema importância a investigação e o aprofundamento nas pesquisas sobre o grafeno, visto que a tendência do mercado para uma produção em escala industrial nos próximos anos deverá crescer. Graças às diversas propriedades do grafeno, este aparece como um dos prováveis substitutos do silício na indústria da microeletrônica (DE JESUS, FREIRE & GUIMARÃES, 2012).

Com efeito, a prospecção mineral de grafita é de igual importância para a viabilização da produção deste material. No contexto nacional, já existem diversos depósitos conhecidos, mas já foi comprovado que existem diferenciações químicas que tornam uma grafita melhor do que outra para a produção do grafeno, como teor de carbono e de impurezas. O Brasil se encontra entre os principais produtores do mineral e com uma vasta reserva ainda não explorada, como pode ser visto na Tabela 1.1.

Existem diversos estudos que utilizam métodos geofísicos na prospecção de grafita, inclusive no Brasil (FLEISCHER & DE OLIVEIRA, 1994; GONÇALVES & DE CARVALHO, 2001; ZACCHI, 2007), mas com os avanços tecnológicos e novas perspectivas geradas pela expansão do estudo do grafeno, são necessárias pesquisas mais atuais em áreas já mapeadas. A capacidade computacional atual pode gerar, por exemplo, inversões geofísicas que irão produzir modelos em profundidade, inexistentes em certas regiões.

Este estudo é resultado da colaboração entre a Universidade Federal Fluminense (UFF), a Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM), e a Seequent Limited. A CBPM disponibilizou os dados da região estudada e a Seequent Limited contribuiu com a liberação do software Oasis Montaj e a tecnologia de inversão na nuvem, VOXI. A UFF disponibilizou a estrutura acadêmica necessária para a realização desse mestrado.

**Tabela 1.1** - Reserva e produção mundial de grafita (DALLA COSTA *et al.* 2017; USGS: MINERAL COMMODITY SUMMARIES, 2014).

Discriminação Países	Reserva (10 <sup>3</sup> t)	Produção (10 <sup>3</sup> t)		
	2013 <sup>(p)</sup>	2012 <sup>(o)</sup>	2013 <sup>(p)</sup>	(%)
Brasil	<b>72.064</b>	<b>88<sup>(2)</sup></b>	<b>92<sup>(2)</sup></b>	<b>7,8</b>
China	55.000	800	810	68,9
Índia	11.000	160	160	13,6
Coréia do Norte	nd	30	30	2,6
Canadá	nd	25	25	2,1
Rússia	nd	14	14	1,2
Madagascar	940	4	10	0,9
México	3.100	8	8	0,7
Ucrânia	nd	6	6	0,5
Zimbábwe	nd	6	6	0,5
Outros Países	nd	13	14	1,2
<b>Total</b>	<b>142.104</b>	<b>1.154</b>	<b>1.175</b>	<b>100</b>

Para o presente estudo, a CBPM cedeu dados geofísicos, geológicos e geoquímicos da região de Ipirá-Pintadas, localizada no nordeste da Bahia. Nesta região, foram iniciadas investigações em áreas de titularidade da CBPM, no domínio do Cinturão Salvador-Curaçá, onde foi investigada uma mineralização de grafita. Além desta ocorrência, esta região apresenta outras mapeadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

## 1.1 OBJETIVO

Este trabalho visa a prospecção de depósitos de grafita, na região de Pintadas, no Estado da Bahia, bem como para novas áreas de interesse de grafita. Na escala regional de trabalho, procurou-se entender o comportamento magnetométrico e gamaespectrométricos das ocorrências de grafita já mapeadas para ser possível inferir novas áreas propícias para identificação de depósitos deste tipo de mineralização. Levando em consideração a escala de semidetalhe, o estudo se utilizou de dados físicos e químicos de furo de sondagem exploratório da CBPM de uma das ocorrências de grafita para calibração dos dados geofísicos regionais, bem como para identificar melhores zonas para exploração-

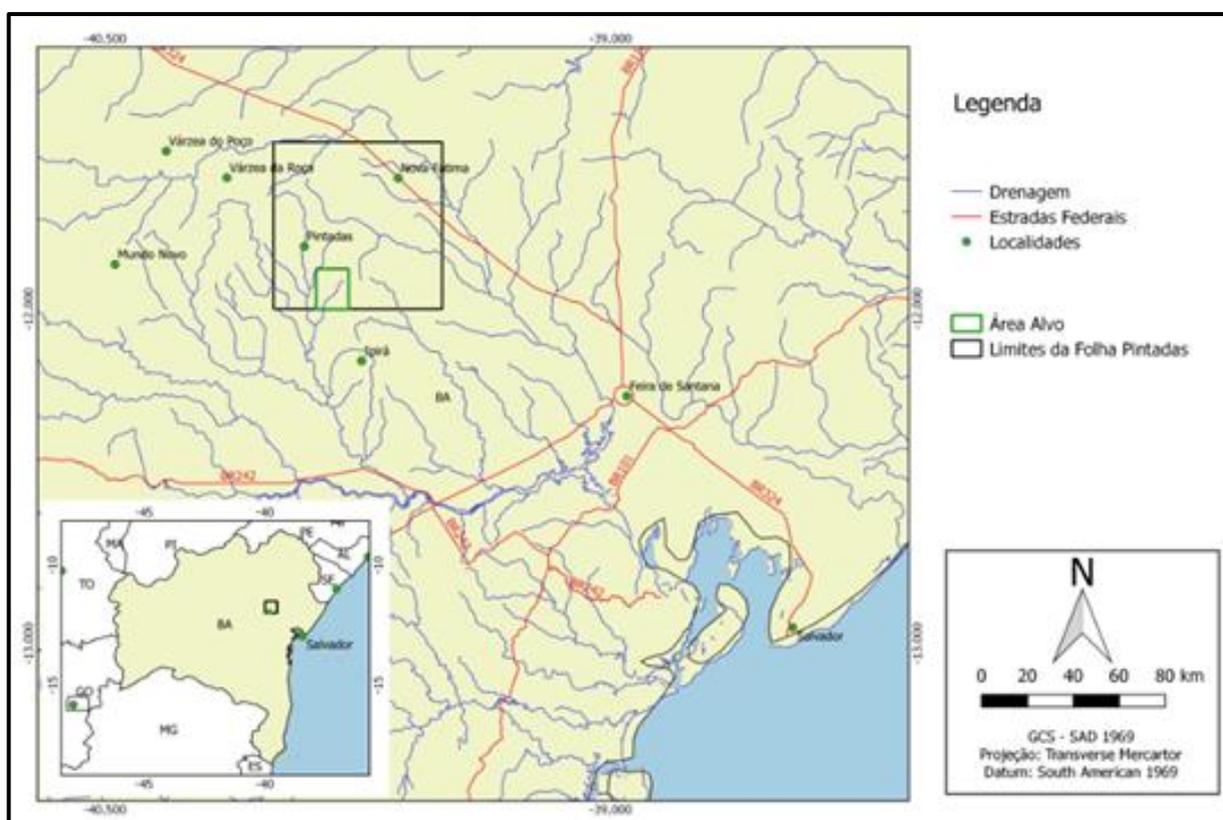
A pesquisa busca realizar Além da correlação dos dados geoquímicos, geológicos e geofísicos com a ocorrência de grafita testemunhada por furo de sondagem, esse estudo

objetivou interpretar o ambiente e fazer inferência paleodeposicional da matéria orgânica que originou esses depósitos. Espera-se com isso ser possível a identificação das características deste depósito nos métodos geofísicos e o mapeamento em subsuperfície dos corpos grafitosos já mapeados na escala local.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 LOCALIZAÇÃO

A região estudada está localizada na região centro-nordeste do Estado da Bahia, nos arredores das cidades de Ipirá e Pintadas, cidade a qual dá nome a folha de articulação cedida com os dados para a pesquisa, pela CBPM. Na figura 2.1 pode ser vista a área de pesquisa destacada sobre o mapa da Bahia, além da região escolhida para o mapeamento de detalhe, região próxima ao município de Ipirá.



**Figura 2.1** - Mapa de Localização da folha de Pintadas, com destaque para a área onde foi realizado o estudo de detalhe. Fonte: CBPM

### 2.2 GEOLOGIA REGIONAL

#### 2.2.1 Cinturão Salvador-Curaçá

O sistema orogênico Itabuna-Salvador-Curaçá (BARBOSA & SABATÉ, 2004) está localizado no Estado da Bahia, se estendendo de norte a sul do Estado, ao longo de

aproximadamente 700 km, sendo denominado a norte de Cinturão Salvador-Curaçá e a sul Cinturão Itabuna.

O Orógeno/ Cinturão Salvador-Curaçá (CSC) pode ser dividido em três grandes domínios litológicos principais (MELO *et al.* 1991; KOSIN *et al.* 2003): Suíte São José do Jacuípe, Complexo Caraíba e Complexo Tanque Novo-Ipirá. O sistema orogênico além de abrigar corpos máficos-ultramáficos, alguns deles mineralizados em cobre ou cromita, e diversas gerações de granitoides intrusivos paleoproterozoicos (KOSIN *et al.* 2003).

Segundo Souza (2003), a porção norte deste segmento é constituída, em sua maioria, por ortognaisses de composição tonalítica–trondhjemítica–granodiorítica (Complexo Caraíba) com idades de formação de rocha  $2.695 \pm 12$  Ma e  $2.634 \pm 19$  Ma (FIGUEIREDO 1989; TEIXEIRA 1997; SILVA *et al.* 1997; OLIVEIRA, DE CARVALHO; MCNAUGHTON, 2004), incluindo intercalações de paragnaisses aluminosos, calcissilicáticas, metacarbonatos e quartzitos (Complexo Tanque Novo-Ipirá) (MELO, LOUREIRO, PEREIRA, 1995), além de ocorrências de rochas máficas-ultramáficas denominada de Suíte São José do Jacuípe, também de idade arqueana (MELO, 1991; TEIXEIRA, 1997; SILVA *et al.* 1997). Todo este segmento crustal foi fortemente deformado pela tectônica paleoproterozoica com todos os seus litotipos reequilibrados na fácies granulito (BARBOSA & SABATÉ, 2004).

#### **2.2.1.1 Suíte São José Do Jacuípe**

A Suíte São José do Jacuípe ocorre na porção sudoeste do Cinturão Salvador-Curaçá (LOUREIRO, 1991; MELO, 1991; SAMPAIO, 1992 apud KOSIN *et al.*, 2003). Esta suíte é composta por uma associação de rochas máficas-ultramáficas, em forma de lentes descontínuas com direções N-S a NNW-SSE, metamorfisadas na fácies granulito e tectonicamente imbricadas com rochas dos Complexos Caraíba e Tanque Novo - Ipirá (DALTRO, 2016).

Na porção oriental da Suíte a litologia é composta, principalmente, de biotita ou hornblenda norito, gabronorito com níveis cumuláticos e restritamente leucogabro. Já na porção leste da Suíte, as litologias mais frequentes são ferrograbro e ultramáficas peridotíticas e piroxeníticas. Essa sequência litológica sugere um zoneamento máfico-ultramáfico de oeste para leste (KOSIN *et al.* 2003).

Associados à suíte São José do Jacuípe, ocorrem diques máficos distintos que truncam todas as unidades litoestratigráficas nessa porção do cinturão. Esses diques apresentam de 0,6m a 2m de espessura e são constituídos por gabros, dioritos e dacitos alcalinos, ricos em Fe e Ti com assinatura geoquímica continental (KOSIN *et al.* 2003). Esses diques foram submetidos a metamorfismo em diferentes fácies, desde xisto verde até granulito, existindo também diques que não foram metamorfizados (MELO *et al.* 1995 apud KOSIN *et al.* 2003).

#### **2.2.2.2 Complexo Caraíba**

Segundo Kosin *et al.* (2003), o Complexo Caraíba é a unidade litoestratigráfica de maior ocorrência do Cinturão Salvador-Curaçá. A distribuição das rochas no Complexo se dá de forma contínua à leste, sendo interrompida por corpos granitoides; e a oeste, em forma de megalentes imbricadas tectonicamente com rochas da Suíte São José do Jacuípe, do Complexo Tanque Novo-Ipirá e granitoides intrusivos.

O Complexo Caraíba é composto por uma suíte bimodal metamorfizadas na fácies granulito, na qual o polo félsico é constituído por ortognaisses enderbítico, charnoenderbítico e raramente charnockítico, cinza a esverdeados (DALTRO, 2016). Segundo Teixeira (1997), os protólitos desses ortognaisses foram de dois tipos: cálcio-alcálico juvenil de baixo K e cálcio-alcálicos tanto normais, quanto de alto K, considerados produtos de reciclagem de uma crosta ígnea com maior ou menor participação de material sedimentar.

#### **2.2.2.3 Complexo Tanque Novo – Ipirá**

O Complexo Tanque Novo-Ipirá, onde se encontra a região de Pintadas, compreende uma sequência metavulcanossedimentar que inclui gnaisses aluminosos, gnaisses bandados, rochas calcissilicáticas, quartzitos, formações ferríferas, xistos grafitosos, metabasitos e metaultrabasitos (MELO *et al.*, 1995). Foram caracterizadas cinco unidades: Pintadas, Serra do Camisão, Juazeirinho, Angico e Umbuzeiro. Na Folha Pintadas (Fig. 2.3) ocorrem apenas as duas primeiras citadas e para separar a unidade Serra do Camisão da unidade Pintadas, o critério utilizado é o grande volume de rochas calcissilicáticas associadas a jazimentos de apatita que ocorrem apenas na Unidade Serra do Camisão e a ausência de gnaisses aluminosos nessa unidade (MELO *et al.* 1991).

Segundo Melo *et al.* (1995) e Kosin *et al.* (1999), o complexo pode ser dividido em seis unidades informais, com diversas variações faciológicas:

- (i) Biotita gnaisses aluminosos, kinzigítico ou rico em granada, quase sempre migmatizado, com associações de rochas calcissilicática, quartzito, formação ferrífera, rochas grafitosas e, principalmente, rochas metamáficas e metaultramáficas;
- (ii) Rochas calcissilicáticas e quartzito; metacalcário, anfíbolito e formação ferrífera;
- (iii) Hornblenda-biotita gnaiss, levemente migmatizado, com bandas quartzofeldspáticas, com ortopiroxênio, e em parte granadíferas, intercalado com abundantes níveis anfíbolíticos de largura desde centimétrica a decamétrica;
- (iv) Gnaiss grafitoso associado a rochas calcissilicáticas com intercalações de quartzito ferrífero, anfíbolito, biotita gnaiss parcialmente migmatizado, gnaiss kinzigítico, gnaiss quartzo-feldspático, com ou sem granada;
- (v) Gnaiss bandado, com alternância de bandas granito-granodioríticas e gabrodioríticas, bem como intercalações de gnaiss tonalítico, anfíbolito e rocha calcissilicática, esta última menos frequente;
- (vi) Gnaiss quartzo-feldspático com ortopiroxênio, com ou sem granada e rara biotita, frequentemente associado a níveis de quartzito recristalizado. Estas rochas apresentam diferentes níveis de migmatização e possuem contatos difusos com corpos de granitóides granadíferos.

#### **2.2.2.5 Granitoides**

Uma das particularidades da geologia da área de estudo é a presença marcante de corpos granitoides intrusivos (Fig. 2.3), que ocupam aproximadamente a metade total da área (DALTRO, 2016). Segundo Barbosa *et al.* (2012), estes granitoides são classificados em sin-tangenciais, tardi-tangenciais, sin-transcorrentes e tardi a pós-transcorrentes.

Os corpos graníticos sin-tangenciais são compostos por quartzomonzonito e monzonito, contendo ortopiroxênio e xenólitos de rochas do Complexo Ipirá e da Suíte São José do Jacuípe (TEIXEIRA, 1997). Os corpos tardi-tangenciais são em geral classificados de monzonito a quartzomonzonito, com alguns tipos de sienogranitos, apresentando, fenoclastos de K-feldspato, além de biotita e hornblenda (MELO *et al.* 1991).

Os sin-transcorrentes são classificados como monzonitos a biotita e hornblenda com textura porfiroclástica. Apresentam uma assinatura geoquímica de cálcioalcalina de alto K (MELO *et al.* 1991). E por último, os tardi a pós-transcorrentes são classificados como sienitos, sienogranitos e monzonitos, com texturas porfiróides e granular média (MELO *et al.* 1991).

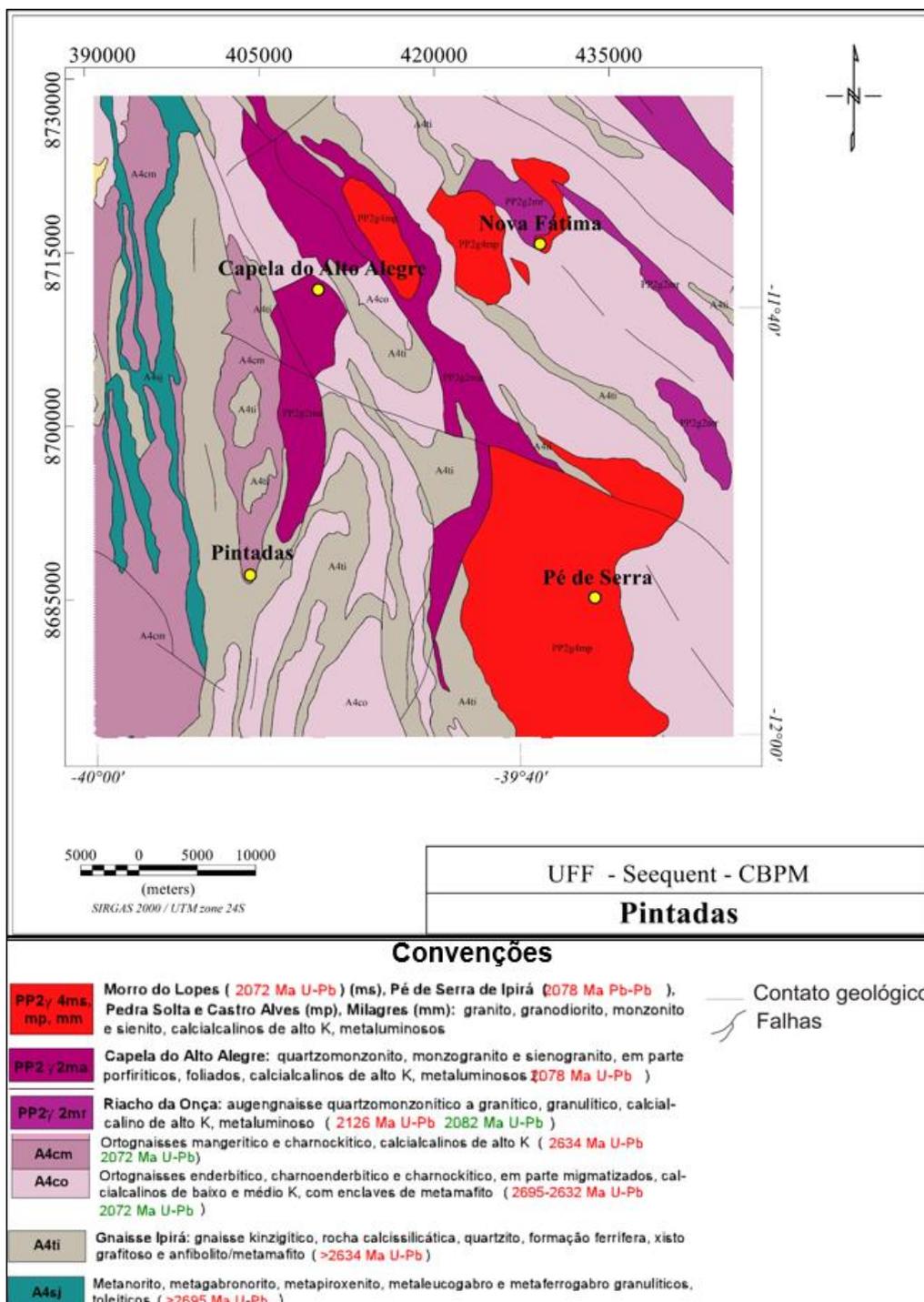


Figura 2.2 - Mapa geológico com recorte para a área de estudo. Fonte: Modificado de SOUZA *et al.* 2003.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. GRAFITA

O carbono é um elemento extremamente abundante na biosfera. Ele forma inúmeras quantidades de compostos e está presente na maior parte das substâncias orgânicas existentes. O carbono também faz parte de um grupo, de menor escala, de compostos inorgânicos naturais com sistema cristalino, no qual se encontra a grafita e, em menor quantidade, o diamante, que são os polimorfos mais comuns do carbono (BELÉM, 2006). Estes minerais, apesar de possuírem composição química idêntica, possuem propriedades físicas, estruturais e cristal químicas completamente diferentes, em função das diferentes condições de pressão e temperatura em que se cristalizam.

A grafita natural (Figura 3.1) raramente é encontrada na forma pura, geralmente há uma parcela de impurezas na sua composição. A economicidade deste mineral está ligada ao tamanho e características originais dos cristais de grafita e à sua adequação aos processos de beneficiamento para a produção dos muitos tipos de concentrados com teor de carbono e granulometria diversos, demandados pela indústria.



**Figura 3.1-** Minério de grafita (JACOBI, 2014).

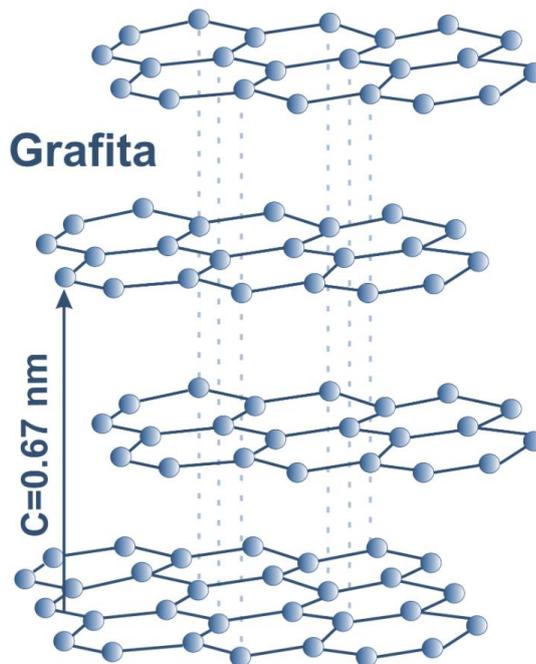
Existem diversas aplicações na indústria para a grafita, sendo que as principais, até a última década, são: tijolos e peças refratárias, cátodo de baterias alcalinas, aditivo na recarburização do ferro e do aço, lubrificantes sólidos ou à base de óleo e água, escovas de

motores elétricos, gaxetas de vedação e, claro, para a fabricação de minas para lápis e lapiseiras (LOBATO, 2009).

Em 2004, com os avanços científicos, pesquisadores da Universidade de Manchester, conseguiram sintetizar pela primeira vez o grafeno (NOVOSELOV *et al.*, 2004), o que lhes rendeu o Nobel de Física em 2010. O grafeno é um material fabricado a partir da exfoliação química da grafita natural. É um material muito promissor para aplicações eletrônicas, químicas e eletromecânicas por apresentar alta resistência mecânica, alta condutividade elétrica e alta condutividade térmica, além de força, flexibilidade, leveza e dureza (BELÉM, 2018). Portanto, o mercado na última década injetou grande investimento no desenvolvimento do estudo do grafeno, o que gerou grandes avanços na sua fabricação e uma grande demanda de prospecção de grafita para sua síntese.

### **3.1.1. MINERALOGIA**

O carbono elementar existe em três formas alotrópicas na natureza, são elas, carbono amorfo, grafita e diamante. A grafita, mesmo sendo polimórfica com o diamante, distingue-se por apresentar um arranjo atômico em camadas, segundo uma rede de planos hexagonais (Figura 3.2). O conjunto desses anéis ordenados formam lâminas conhecidas como Grafeno.



**Figura 3.2** - Estrutura da grafita (Modificado BELÉM, 2018).

Os átomos de carbono, no plano do grafeno ou basal, apresentam uma forte ligação covalente enquanto as ligações entre os planos são fracas e podem ser mecanicamente rompidas, dando a grafita sua característica de maciez e lubricidade. Uma camada de grafeno, rompida do cristal da grafita, criará um filme resistente, que ocupará espaços e diminuirá o atrito entre as superfícies de contato (VIEIRA & VILAR, 2004).

A grafita natural é um mineral não metálico, inerte, que apresenta coloração variando entre o cinza escuro e o preto (HARBEN & BATES 1990, HAND 1996), peso específico entre 2,1 e 2,3 g/cm<sup>3</sup> e brilho semimetálico. É um mineral macio, com dureza entre 1 a 2 na escala de Mohs. As ligações entre os carbonos da grafita são do tipo sp<sup>2</sup> do carbono, com ligações  $\pi$  em diferentes planos, que proporciona a grafita a característica de material condutor (SCARTON, 2017). Portanto, é um excelente condutor de calor e eletricidade, sendo o melhor condutor térmico e elétrico entre os não metais (BELÉM, 2018).

A grafita natural é uma das formas cristalinas do carbono que ocorre naturalmente. A anisotropia extrema torna a grafita um mineral de propriedades únicas, sendo responsável por uma resistividade elétrica de  $5 \times 10^3$  ohm.m no sentido perpendicular ao plano e  $5 \times 10^{-6}$  ohm.m no sentido paralelo ao plano. A grafita, portanto, é um semicondutor no sentido perpendicular ao plano e um condutor metálico no sentido paralelo ao plano (LOBATO, 2009).

### **3.1.2. OCORRÊNCIA**

Segundo Sampaio *et al.* (2008), a grafita natural corresponde à ocorrência do elemento químico carbono na sua forma nativa. O mineral pode ser classificado em três tipos comerciais: grafita em flocos, em veio cristalino e amorfa, subdivididos em vários “graus” baseando-se no teor de carbono, tamanho da partícula e tipos de impurezas. A seguir os tipos mais comuns de grafita:

**Grafita em flocos** - Como o próprio nome indica, tem a morfologia de flocos. Os ambientes geológicos típicos incluem o metamorfismo de contato ou regional em depósitos de calcários ou argilas com material orgânico. Os flocos podem ocorrer segundo uma distribuição homogênea em todo o corpo do minério ou concentrados em lentes na forma de pacotes. A concentração de carbono no minério pode variar entre 5% e 40% (Sampaio *et al.* 2008). Contudo, esse teor pode ainda variar o suficiente para meramente colorir a rocha, como acontece com veios existentes nos mármore. As impurezas são, usualmente, minerais

comuns de rochas metassedimentares, como quartzo, feldspato, mica, anfibólio, granada, calcita, mica e óxidos de ferro (Sampaio *et al.* 2008). Todos possuem facilidade de remoção, desde que não seja necessária uma moagem muito fina do minério. Lentes de rochas contendo grafita podem atingir a espessura de 35 mm ou mais. Em termos de diâmetro, os flocos de grafita podem variar desde 1 mm a mais de 2,5 cm, com média de 0,25 cm. Os flocos de grafita diferem em dureza e densidade, entre os depósitos e, até mesmo, dentro do próprio depósito (LOBATO, 2009).

**Grafita em veio cristalino** - Esta é a única forma natural do carbono, também chamada de *lump* ou grafita altamente cristalina, encontrada em veios cristalinos bem definidos ou acumulada em pacotes ao longo dos contatos intrusivos entre pegmatitos e calcário (SAMPAIO *et al.* 2008). Essa forma de grafita exibe uma morfologia acicular com cristais orientados perpendicularmente à rocha encaixante. As impurezas incluem: quartzo, feldspato, pirita, piroxênio, apatita e calcita (SAMPAIO *et al.* 2008). Esses depósitos, relativamente raros, fornecem grafita maciça, cujos grãos podem ocorrer segundo vários tamanhos, desde aquele do minério *lump* até os microcristais, como a grafita em flocos, e pulverizada, encontrada nas adjacências do veio cristalino.

**Grafita amorfa ou microcristalina**- O termo amorfo é uma designação incorreta, uma vez que se trata de um material com uma estrutura verdadeiramente microcristalina (LOBATO, 2009). A grafita microcristalina possui, caracteristicamente, uma aparência preta terrosa e macia ao tato. Certos depósitos desta forma do mineral foram formados por metamorfismo de contato, enquanto outros são, provavelmente, resultados da dinâmica do metamorfismo regional. A grafita microcristalina pode ser encontrada com teor de carbono que varia entre 75% e 90%, e seu tamanho pode variar desde 5 µm até 75 mm (SAMPAIO *et al.* 2008). Os depósitos economicamente viáveis exigem um teor mínimo de carbono da ordem de 8%. A natureza e a quantidade das impurezas dependem da rocha que deu origem ao depósito. O teor de carbono contido em tais depósitos microcristalinos têm relação com a quantidade de sedimentos nestes depósitos.

Os principais países produtores de grafita natural são China, Rússia, Madagascar, Coreia, Índia, México e Brasil, onde apenas os estados de Minas Gerais e Bahia possuem reservas significativas (99% das reservas nacionais) (BELÉM, 2018).

### **3.1.3. TIPOS DE DEPÓSITO**

Segundo Harben & Bates (1990), a matéria orgânica original, existente nos sedimentos, é transformada em grafita devido ao metamorfismo, seja ele regional ou de contato. Isto é, o material carbonoso da rocha se cristaliza como grafita à medida que o grau metamórfico evolui progressivamente e atinge o tamanho de grafita em flocos em fácies anfibolito alto a granulito. A grafita natural é largamente distribuída na natureza em rochas ígneas, e metamórficas. A qualidade de um depósito de grafita depende de características físicas dos cristais. As concentrações de origem metamórficas são as que apresentam melhores condições de aproveitamento econômico (LOBATO, 2009). Quatro tipos genéticos de depósitos de grafita, além daqueles que ocorrem em função do enriquecimento residual, são descritos por Kurzvar (1984, apud. BELÉM, 2006):

**Depósitos Magmáticos Primários** - São depósitos extremamente raros, que apresentam material de alta qualidade, em que a grafita maciça predomina. Existem porções internas com ocorrência de grafita em flocos. O principal depósito é o de Botogol, na Rússia.

**Depósitos do Tipo Contato-Metassomáticos (Skarnitos)** - São depósitos que se desenvolvem no contato entre rochas carbonáticas e intrusões ígneas, seja devido à cristalização do carbono ou pela redução do CO<sub>2</sub>. Normalmente, a grafita ocorre na forma de *stocks* ou disseminada em veios no skarnito. O principal exemplo é o depósito de Black Donald, no Canadá.

**Depósitos de Grafita em Veio** - São concentrações de grafita geradas por soluções pós-magmáticas ricas em elementos voláteis, principalmente CO<sub>2</sub>. Os depósitos ocorrem em forma de veios e lentes, e são confinados à zona de contato com a rocha encaixante. Depósitos descritos no Sri Lanka podem ser citados como os principais exemplos deste tipo, onde a grafita ocorre no contato de corpos ígneos com gnaisses, quartzitos e piroxenitos.

**Depósitos Metamórficos** - São gerados por concentração e cristalização do carbono durante processos metamórficos regionais. São formados em rochas sedimentares que contêm concentração anômala de carbono, resultando em camadas ou lentes ricas em cristais de grafita disseminada em ~~filite~~, xisto, quartzito, mármore, gnaiss e granulito. Originam-se durante o metamorfismo regional, desde a transição de fácies xisto verde-anfibolito (ca. 480° C) até a fácies granulito (> 800° C). A grafita é fina e microcristalina (*dust*) nas rochas de baixo grau metamórfico (e.g., xisto). A formação de grafita lamelar (*flake*) ocorreria a partir da fácies

anfíbolito intermediária (ca. 650°C). Os principais depósitos conhecidos de grafita *flake* são os de Sonora no México e os da Província Grafitica Bahia-Minas, objeto deste estudo.

### 3.2 MAGNETOMETRIA

Um dos principais objetivos da magnetometria associada à geofísica aplicada consiste em investigar a geologia com base nas anomalias do campo magnético da Terra, resultantes das propriedades magnéticas das rochas em subsuperfície. Mesmo que em sua maioria os minerais formadores de rochas não sejam magnéticos, existem diversos tipos de rochas contendo minerais magnéticos o suficiente para gerar anomalias significativas.

Do ponto de vista geomagnético o planeta Terra pode ser dividido em três partes: núcleo, manto e crosta (REEVES, 2005). A definição para a medição de um campo geomagnético em qualquer região da Terra é um vetor que pode ser representado por três quantidades fundamentais: a intensidade do campo total, a orientação do vetor em Inclinação e Declinação magnética (REEVES, 2005). Para se descrever o vetor do campo geomagnético, são utilizadas algumas convenções para seus componentes. O vetor campo total  $B$  tem uma componente vertical  $z$  e uma componente horizontal  $H$  na direção do norte magnético, como pode ser visto na figura 3.3. O ângulo formado pelo mergulho de  $B$  com relação ao plano horizontal é denominado  $I$ , inclinação magnética. Já o ângulo formado entre o norte magnético e o geográfico é descrito como  $D$ , a declinação magnética.

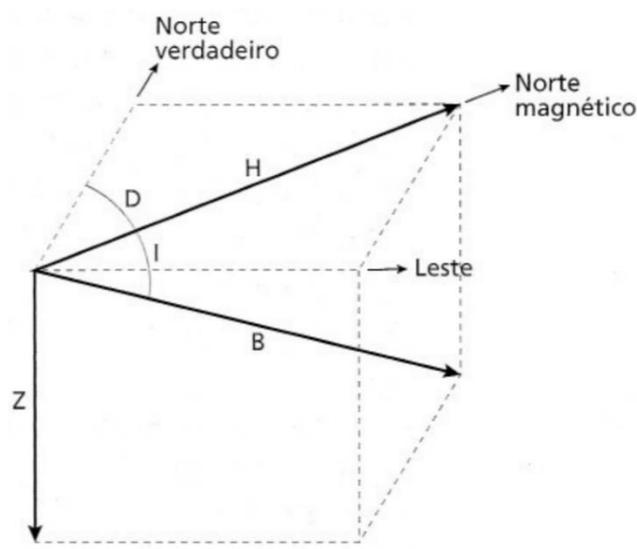


Figura 3.3 - Componentes geomagnéticas (KEAREY et al. 2009).

Para estudos com fins de exploração, o foco é na prospecção da crosta e manto superior. Sendo assim, é de extrema importância, que além de todas as correções de pré-processamento, seja removido os valores relacionados as regiões mais profundas que muitas vezes vão ser responsáveis por suavizar ou até ocultar anomalias que seriam bons alvos prospectivos (RUGENSKI *et al.* 2005; ROSA *et al.* 2009; RIBEIRO, 2011; SILVA *et al.* 2011; OLIVEIRA, 2013; LOURENÇO *et al.* 2014; DE MIRANDA, 2016).

O valor do campo magnético total medido pode variar em média entre  $2 \times 10^4$  nT até  $7 \times 10^4$  nT (REEVES, 2005), sendo que esses valores vão decrescendo dos polos para o equador, como é de se esperar devido ao caráter dipolar do campo magnético principal (TELFORD 1990; BLAKELY, 1996). Pode ser encontrado em biografias com diferentes nomes, mas geralmente é descrito como TMI (*Total Magnetic Intensity*). Já as intensidades de anomalias geradas por corpos localizados na crosta, em sua maioria, não ultrapassam a grandeza de  $10^4$  nT. Para ser possível a separação entre o sinal produzido por essas anomalias na crosta e as de fonte mais profunda, é utilizado um modelo matemático denominado IGRF (*The International Geomagnetic Reference Field*). O IGRF é o modelo matemático que melhor representa a parte dipolar do campo magnético, normalmente considerado resultante do campo mais interno que é gerado na interface manto-núcleo. O produto gerado com a remoção do IGRF é convencionalmente descrito como CMA (Campo Magnético Anômalo) ou também anomalia de campo total.

A propriedade física dos materiais fundamental para o magnetismo é a susceptibilidade magnética, que é uma medida quantitativa da facilidade de um material em adquirir magnetização. A magnetização de um material pode ser expressa como:

$$\mathbf{M} = k\mathbf{H}, \quad (3.1)$$

onde H é o campo indutor externo, M a magnetização e k a suscetibilidade magnética. Por M e H terem a mesma unidade, k é uma medida adimensional. A magnetização de um material por um campo externo se faz através do alinhamento dos momentos dos dipolos internos provocando o aparecimento de um campo adicional que somado ao campo externo H que gera um campo conhecido por indução magnética. O campo magnético induzido B é relacionado ao campo externo H da seguinte forma (LOWRIE, 2007):

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0\mathbf{H}(1 + k)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0\mu\mathbf{H}, \quad (3.2)$$

onde  $\mu_0$  é constante de permeabilidade magnética no vácuo e  $\mu$  é a permeabilidade magnética do material. A permeabilidade magnética é uma medida da capacidade de um material para transportar um fluxo magnético. Metais ferromagnéticos têm altas permeabilidades; em contraste, minerais e rochas têm baixas susceptibilidades e permeabilidades  $\mu \sim 1$ . Anomalias nos campos magnéticos surgem ao longo de estruturas geológicas que causam um contraste de magnetização entre os tipos de rochas.

Segundo Kearey *et al.* (2009), quando um material é colocado sobre influência de um campo magnético, o mesmo adquire uma magnetização na direção do campo. Esse fenômeno é chamado de magnetização induzida ou polarização magnética, e resulta do alinhamento dos dipolos elementares dentro do material na direção do campo. O comportamento magnético de um sólido depende dos momentos magnéticos dos átomos ou íons que ele contém. Momentos magnéticos atômicos e iônicos são proporcionais ao momento angular, associado com o movimento orbital dos elétrons sobre os núcleos e com os spins dos elétrons sobre os seus próprios eixos de rotação. Existem três principais classes de materiais magnéticos podem ser distinguidas com base na susceptibilidade magnética: (i) diamagnetismo, (ii) paramagnetismo e (iii) ferromagnetismo.

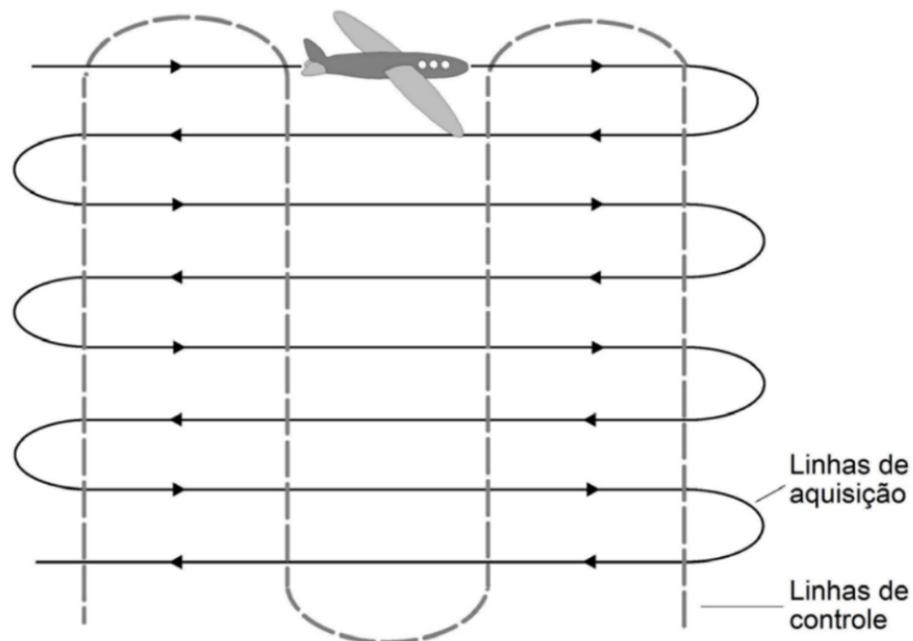
(i): Nos materiais diamagnéticos, a susceptibilidade é baixa e negativa, ou seja, uma magnetização se desenvolve no sentido oposto ao campo aplicado;

(ii): Os materiais paramagnéticos têm susceptibilidades positivas e baixas;

(iii): Já os materiais ferromagnéticos podem ser subdivididos em três categorias. O ferromagnetismo verdadeiro é um fenômeno cooperado, observado em metais como o ferro, o níquel e o cobalto, em que a geometria da estrutura e do espaçamento permite a troca de elétrons entre átomos vizinhos. Isto dá origem a um campo molecular, por meio do qual os momentos magnéticos dos átomos adjacentes reforçam o seu alinhamento mútuo paralelo em uma direção comum (DENTITH & MUDGE, 2014). O comportamento ferromagnético é caracterizado por altas susceptibilidades positivas e propriedades magnéticas fortes.

A maior parte dos minerais presentes nas rochas do planeta apresentam baixos valores de suscetibilidade magnética. E as rochas devem seu caráter magnético à proporção geralmente baixa de minerais magnéticos que contêm (KEAREY *et al.* 2009). Entre os minerais que são magnéticos, o mais comum é a magnetita. O que torna o método magnetométrico de extrema acurácia na diferenciação entre litologias magnéticas e não magnéticas. Um exemplo é a possível identificação de anomalias causadas por um embasamento ígneo ou metamórfico em regiões com cobertura sedimentar, tipicamente não magnética.

Os levantamentos magnéticos são usados amplamente na busca de depósitos de minerais metálicos, uma tarefa realizada de forma rápida e econômica por métodos aerotransportados. Os levantamentos aeromagnéticos, geralmente são realizados concomitantemente a outros métodos como o gravimétrico ou gamaespectrométrico. O dado é adquirido através de diversas linhas paralelas espaçadas por algumas centenas de metros, dependendo do objetivo da aquisição. A escolha da direção do levantamento leva em conta a declinação magnética da área, a direção das estruturas alvo e o layout da área a ser levantada, principalmente, e para motivos de pré-processamento são adquiridas linhas de controle perpendiculares, as linhas de aquisição, espaçadas em até 10 vezes superior ao espaçamento utilizado para aquisição (figura 3.4).



**Figura 3.4** - Esquema de um aerolevante (RIBEIRO; MONTAVANI; LOURO, 2014).

Além da medição do campo magnético, a localização das estações, obtida através do GPS, e a altura de voo, obtida de um altímetro, são medidas e registradas, normalmente, a cada 0,1 segundos (amostragem de 10 Hz) (DENTITH & MUDGE, 2014).

Na maioria dos casos, a grafita apresenta susceptibilidade magnética menor que a das rochas encaixantes, o que indica uma anomalia magnética negativa. Além disso, pela qualidade do depósito estar ligado ao metamorfismo ocorrido na região, a compreensão do contexto tectônico através da magnetometria se torna muito relevante.

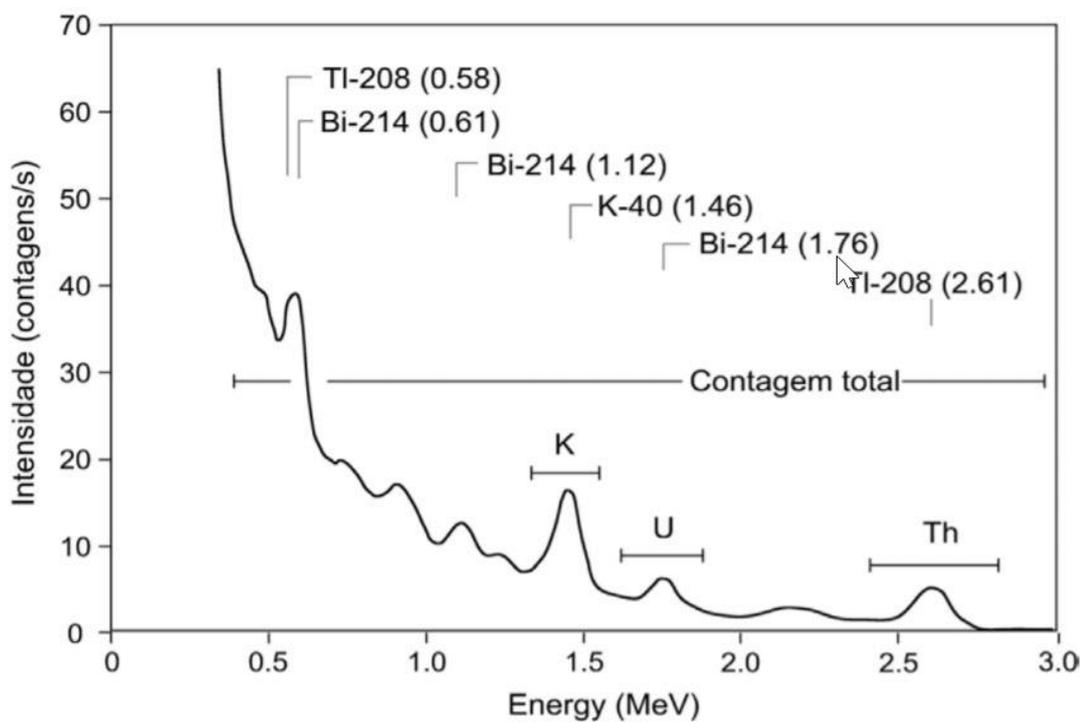
### 3.3 GAMAESPECTOMETRIA

O método radiométrico ou radiometria, consiste em detectar as emissões nucleares das rochas que contêm minerais radioativos (TELFORD *et al.*, 1990). Normalmente a radiação gama é detectada através de um cintilômetro ou contador Geiger. Os instrumentos radiométricos foram desenvolvidos primordialmente para a detecção de urânio, mas logo apareceram outras aplicações importantes. Levantamentos radiométricos para a exploração mineral são rotineiramente aéreos, terrestres ou em furos de sondagem. Radiometria aerotransportada é particularmente comum na exploração mineral, onde os dados radiométricos são adquiridos, em sua maioria, simultaneamente com magnetométricos durante levantamentos aéreos (DENTITH & MUDGE, 2014).

A Gamaespectrometria é uma técnica que mede a intensidade de radiação emitida pelos elementos Urânio (U), Potássio (K) e Tório (Th) encontrados nas rochas. Através da contagem total amostrada em campo é possível realizar uma separação espectral dos três elementos citados. Utilizando a análise espectral é possível retirar o valor centralizado do canal de emissão de raios gama gerados pelo potássio ( $^{40}\text{K}$ ). Já os isótopos  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  não emitem radiação gama, porém seus produtos decorrentes do decaimento radioativo ( $^{214}\text{Bi}$  e  $^{208}\text{Tl}$ , respectivamente) emitem raios gama com energias centradas (Figura 3.5), por isso, geralmente, esses produtos são citados como urânio equivalente (eU) e tório equivalente (eTh) (RIBEIRO; MONTAVANI; LOURO, 2014).

O método é amplamente utilizado no mapeamento geológico, pois diferentes rochas podem ser reconhecidas por suas assinaturas radioativas, da mesma forma que também pode ser empregado na prospecção mineral direta de minerais radioativos, e indireta de sulfetos metálicos, tendo em vista a relação entre zonas mineralizadas associadas a processos de

alteração hidrotermal e desequilíbrios anômalos dos elementos U, Th e K. O método tem diversas aplicações, dependendo do tipo de rocha e da idade esperada, através de observações geológicas (ERNESTO & USSAMI, 2002).



**Figura 3.5** - Espectro de radiação de um levantamento gamaespectrométrico (RIBEIRO; MONTAVANI; LOURO, 2014).

Zacchi *et al.*, (2007) já demonstraram, na porção sul do Cráton do São Francisco, a aplicabilidade do método gamaespectrométrico na prospecção de grafita, que por ser rica em carbono, oriundo de material orgânico marinho enriquecido em urânio, tem um bom sinal de resposta ao método.

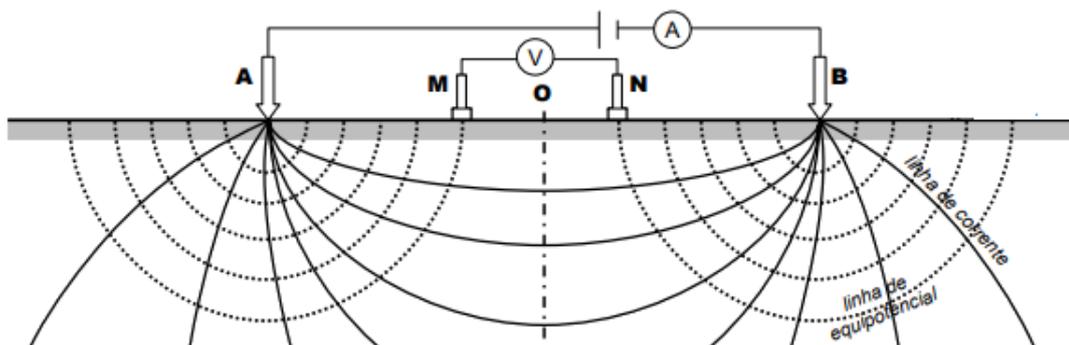
### 3.4 MÉTODOS ELÉTRICOS

Os métodos elétricos são utilizados em distintas atividades, como na exploração mineral, na exploração de água subterrâneas, em estudos relacionados ao meio ambiente e na geotecnia. O estudo, através destes métodos, consiste na investigação das propriedades condutivas da subsuperfície. Existem diversos tipos de técnicas, as mais utilizadas são de eletrorresistividade, polarização induzida (IP) e potencial espontâneo (SP).

Neste estudo, foram cedidos dados de eletrorresistividade e IP que foram realizados de forma concomitante. A seguir, as duas técnicas serão descritas em maior detalhe, juntamente com a metodologia aplicada na pesquisa.

### **3.4.1. Eletrorresistividade**

O método da eletrorresistividade tem como objetivo verificar a distribuição da resistividade elétrica dos materiais que ocorrem em subsuperfície. A técnica consiste em injetar uma corrente contínua ou de baixa frequência no solo, através de um conjunto de eletrodos e medir a resposta da interação elétrica com as rochas em subsuperfície. A figura 3.6 apresenta um arranjo esquemático para exemplificar a aquisição de dados geoeletricos. Os eletrodos injetores de corrente são denominados como A e B. Já M e N são responsáveis pela medição da diferença de potencial.



**Figura 3.6** - Exemplo de configuração usual de eletrodos de aquisição (BRAGA, 2006).

Conhecendo a corrente injetada ( $I$ ), a diferença de potencial ( $V$ ) e as distâncias relativas entre os pontos A, B, M e N, é possível calcular o valor da resistividade ( $\rho$ ) dos materiais que se encontram abaixo da superfície, conforme:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}. \quad (3.3)$$

A equação 3.3 mostra o cálculo da resistividade quando um modelo de camadas homogêneas e isotrópicas é considerado, onde  $K$  é o fator geométrico calculado a partir das posições dos eletrodos e  $\Delta V$  é diferença de potencial de voltagem. Entretanto, a premissa de um meio homogêneo e isotrópico pode ser considerada frágil. Sendo assim, com que os valores de resistividade elétrica variem de ponto a ponto, lateralmente e verticalmente (GANDOLFO,

2007). Por isso, o valor medido em superfície vai variar tanto para cada posição que for medido, tipo de arranjo de eletrodos e sentido do levantamento.

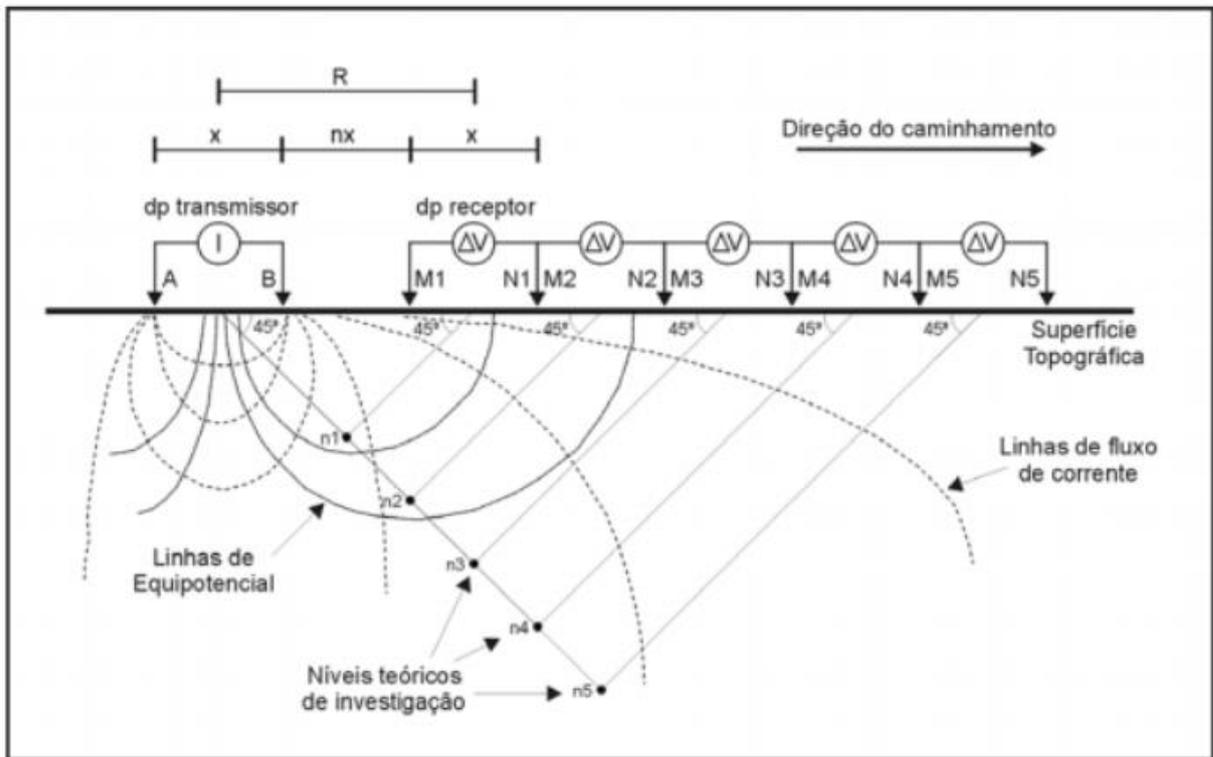
Para meios heterogêneos e anisotrópicos, utiliza-se da mesma fórmula descrita acima, mas é denominada de resistividade aparente. Não é, propriamente, um parâmetro físico do meio, mas sim um valor que representa o efeito integrado do semiespaço sobre o qual a medida é efetuada (GANDOLFO, 2007). Trata-se de um conceito formal, não podendo ser considerada uma média das resistividades em subsuperfície (ORELLANA *et al*, 1972).

Existem diferentes arranjos geométricos para a aquisição geoeletrica, como dipolo-dipolo, polo-dipolo, polo-polo, Werner e Schlumberger. O que irá influenciar na velocidade de aquisição, na precisão, na profundidade de investigação e no resultado do dado. Além de diversos procedimentos de aquisição, como a sondagem elétrica vertical (SEV) e o caminhamento elétrico (CE). Os dados cedidos para a pesquisa foram adquiridos através de uma aquisição por caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo. A técnica de CE, aplica-se em pesquisas que visam determinar descontinuidades laterais na distribuição da resistividade elétrica em subsuperfície a uma ou mais profundidades determinadas. Sendo um levantamento que busca a variação bidimensional de resistividade (diferentemente da SEV) pois não tem apenas um ponto associado em superfície, mas sim, uma série de pontos que formam um perfil geofísico (Bortolozzo, 2017). Em um arranjo dipolo-dipolo os eletrodos são dispostos em linha e o espaçamento entre os dois eletrodos de corrente e potencial permanece fixo durante o levantamento.

A aquisição consiste em realizar uma série de medidas mantendo-se fixo os espaçamentos os dipolos AB e MN, de emissão e recepção, respectivamente, e gradualmente aumentar o afastamento entre AB e MN. Cada um destes afastamentos corresponde a um nível de profundidade de investigação. Sendo que quanto maior for o afastamento entre os dipolos, maior será a profundidade alcançada. A figura 3.7 ilustra o modelo de aquisição de um caminhamento elétrico utilizando o arranjo dipolo-dipolo.

O parâmetro resistividade é o inverso da condutividade elétrica e depende da natureza e do estado físico do material. A resistividade elétrica está relacionada aos mecanismos de propagação de corrente elétrica nos materiais, sendo que a condutividade em solos e rochas pode ser associada à presença de minerais metálicos ou grafita em sua matriz, o que é denominado de condutividade eletrônica. A condutividade também pode ser devida ao

deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras dos solos e rochas, o que é denominado de condutividade eletrolítica (ULISBOA, 2018).



**Figura 3.7** - Exemplo de arranjo dipolo-dipolo usado em caminhamentos elétricos (modificado de ELLIS, 1998).

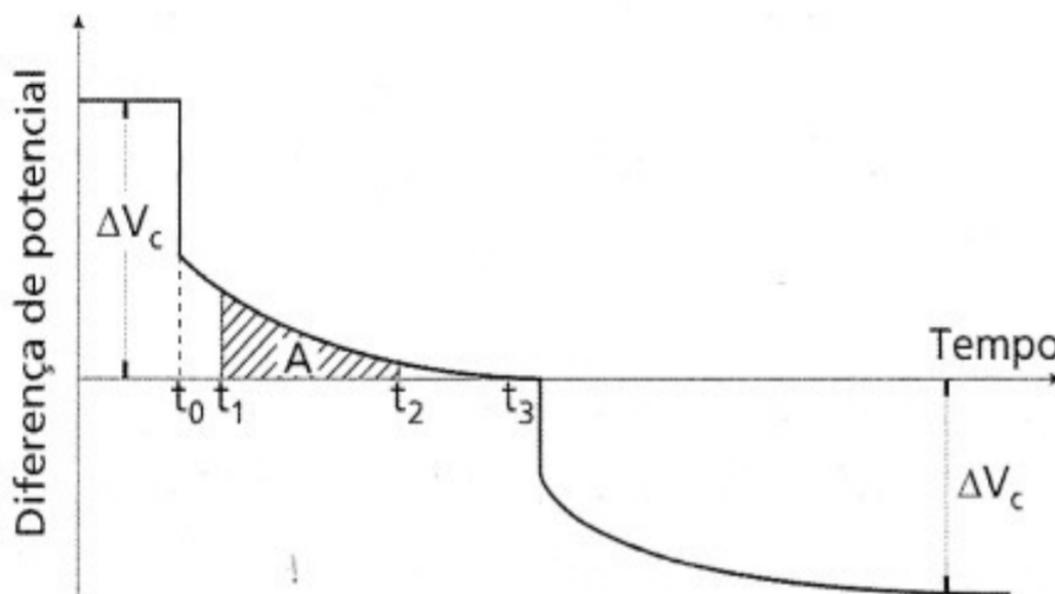
Este método tem sido amplamente utilizado no estudo de formações aquíferas, em correlações estratigráficas em campos de petróleo e na prospecção de minerais metálicos. Mas apesar de ser simples e barato, sofre com algumas limitações como, por exemplo, a ambiguidade na interpretação, a grande interferência de topografias irregulares e ter profundidade de investigação bastante limitada. Neste estudo o método geoeletrico é fundamental devido as características condutivas da grafita que tem grande contraste com as suas rochas encaixantes, que tendem a ter caráter mais resistivo.

### **3.4.2 Polarização Induzida (IP)**

Levantamentos de eletrorresistividade e IP tem muito em comum em termos de aquisição, visualização dos dados e interpretação (DENTITH & MUDGE, 2014). Se um arranjo básico com uma corrente contínua for desligado abruptamente, a tensão entre os eletrodos não cai para zero imediatamente. Depois de uma rápida queda, a corrente segue uma queda

gradual no decorrer do tempo, o mesmo ocorrendo de forma inversa quando a corrente é religada. O lento decaimento e o crescimento de parte do sinal são devidos à polarização induzida, que resulta de dois efeitos similares, relacionados à estruturação da rocha: polarização de membrana e polarização de eletrodo (LOWRIE, 2007). O comportamento do solo é semelhante ao de um capacitor e pode ser interpretado para analisar as propriedades em subsuperfície (Figura 3.8).

Segunda Braga (2006), a polarização de eletrodo é observada quando em uma superfície limite de um corpo ou partícula metálica submetida à uma corrente elétrica, há uma passagem da condução iônica para a eletrônica, e vice-versa. Isso resulta no fato de que em duas superfícies opostas do corpo foram produzidas concentrações de íons, os quais não cederam suas cargas ao corpo, ou seja, não tomaram elétrons do corpo nem cederam a ele. Já na polarização de membrana, o efeito ocorre em rochas carentes de substâncias metálicas, e é devido a uma diferença de mobilidade entre os ânions e cátions, produzida pela presença de minerais de argila.



**Figura 3.8** - Gráfico que descreve o fenômeno de polarização induzida (KEAREY *et al.* 2009).

Segundo Silva e Sampaio (2017), o pressuposto para utilizar a IP é: quanto maior for a quantidade de partículas disseminadas, sejam elas de minerais metálicos, tais como magnetita, hematita especular, pirita e outros sulfetos de cobre e de níquel, ou de grafita ou

de argilas, maior será a variação da condutividade elétrica, no domínio da frequência, e maior o valor da cargabilidade (M), no domínio do tempo.

O parâmetro medido em IP é chamado de cargabilidade (M) e pode ser expressa em %, mV/V, ou ainda ms, dependendo do equipamento utilizado. A medição do efeito de Polarização Induzida no domínio do tempo consiste em analisar o decaimento temporal da voltagem que é gerado após o desligamento dos pulsos de corrente injetados no solo, que pode ser expresso através da seguinte equação:

$$M_a = \frac{1}{(t_2 - t_1) V_P} \int_{t_1}^{t_2} V_{IP}(t) dt, \quad (3.4)$$

em que  $M_a$  é a polarização aparente em mV/V,  $t_1$  é o tempo inicial da janela em milissegundos,  $t_2$  é o tempo final da janela,  $V_P$  é a voltagem primaria durante a transmissão de corrente e  $V_{IP}$  é a voltagem transiente medida durante o período de integração ( $t_2 - t_1$ ) com a corrente desligada.

O método IP é extensivamente usado na exploração de metais básicos, porque tem uma alta taxa de sucesso em localizar depósitos de minério com baixo teor condutivo, tais como sulfetos disseminados. Também pode ser utilizado em estudos de hidrogeologia e ambientais.

Embora o tipo e o grau de mineralização não possam ser generalizados com os valores da resposta Polarização Induzida, Telford *et al.* (1990) apresenta valores médios de cargabilidade e de Fator Metal para alguns materiais geológicos (Tabela 3.1). Mas devido à sobreposição considerável de valores em medições de campo, não é possível distinguir, apenas numericamente, entre rochas mineralizadas e vários tipos estéreis (TELFORD *et al.* 1990).

Análogo ao método de resistividade, as propriedades condutivas da grafita são evidenciadas em um levantamento de IP. Havendo a presença de grafita, ocorre a formação de uma dupla camada elétrica composta de íons do eletrólito que circunda a partícula, balanceados por elétrons ou prótons de cargas opostas, concentrados na superfície do grão de grafita (GALLAS, 2006). Isto irá fornecer um contraste com minerais metálicos, disseminados ou não, na mesma região.

**Tabela 3.1** - Cargabilidade típica de alguns materiais (modificada de TELFORD et al.1990).

	<b>Material</b>	<b>Cargabilidade (ms)</b>	<b>Fator Metal (mhos/cm)</b>	
Minerais	<b>Pirita</b>	13,4	100 a 10000	
	<b>Calcocita</b>	13,2		
	<b>Cobre</b>	12,3		
	<b>Grafite</b>	11,2		
	<b>Calcopirita</b>	9,4		
	<b>Bornita</b>	6,3		
	<b>Galena</b>	3,7		
	<b>Magnetita</b>	2,2		3 a 3000
	<b>Malaquita</b>	0,2		
	<b>Hematita</b>	0		
%Sulfetos	<b>20% sulfetos</b>	2000 a 3000		
	<b>8 a 20% sulfetos</b>	1000 a 2000		
	<b>2 a 8% sulfetos</b>	500 a 1000		
Rochas ígneas	<b>Tufos vulcânicos</b>	300 a 800	1 a 100	
	<b>Vulcânicas básicas</b>	100 a 500	1 a 80	
	<b>Granito e granodiorito</b>	10 a 50	0 a 60	
	<b>Vulcânicas Ácidas</b>	8 a 20	0 a 20	
Rochas sedimentares	<b>Calcários e dolomitos</b>	10 a 20	4 a 60	
	<b>Arenitos</b>	3 a 12	2 a 200	
	<b>Argilitos</b>	3 a 10	1 a 300	
Rochas metamórficas	<b>Gnaisses pré-cambrianos</b>	6 a 30	10 a 100	
	<b>Xistos</b>	5 a 20	10 a 60	
	<b>Quartzitos</b>	5 a 12		
Sedimentos	<b>Cascalhos</b>	3 a 9		
	<b>Aluviões</b>	1 a 4	0 a 200	

## 4. MATERIAIS

Para o presente estudo foi cedido pela CBPM uma variada gama de dados geofísicos, além de dados geológicos e geoquímicos de um furo de sondagem rotopneumático e um mapa geológico de detalhe da área de estudo dessa dissertação. A pesquisa mineral desenvolvida pela CBPM foi subdividida em duas partes. A primeira, uma análise regional através do uso de levantamentos aerogeofísicos de gamaespectrometria e magnetometria. Já a segunda parte, contou com o mapeamento de detalhe e semidetalhe dos corpos grafitosos através do levantamento geoeletrico e do furo de sondagem, que foi realizado na mesma região do levantamento geofísico.

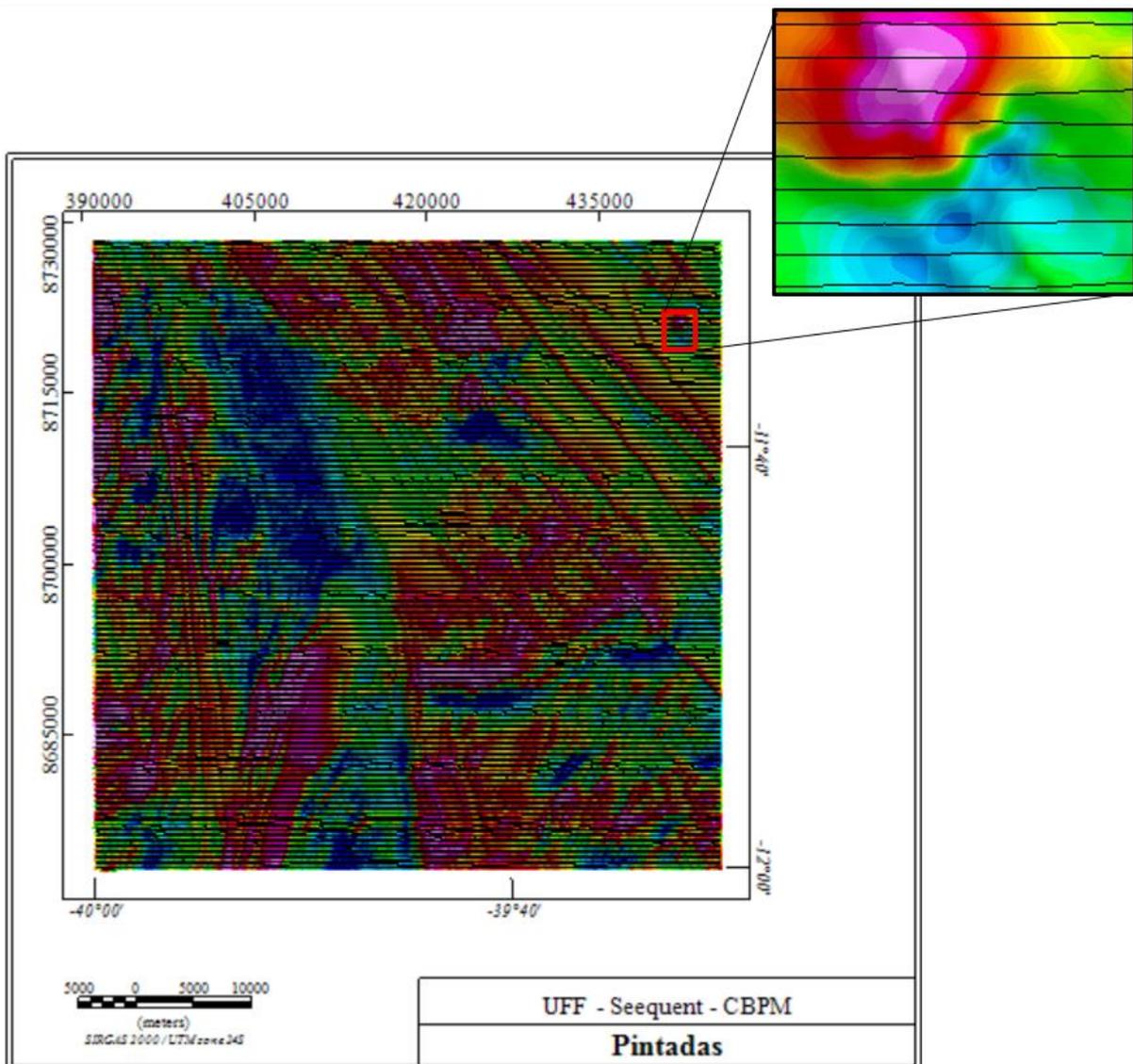
### 4.1 LEVANTAMENTO AEROGEOFÍSICO DE PINTADAS

O levantamento aerogeofísico realizado na região de Pintadas faz parte do projeto da CBPM, ANDORINHA - IPIRÁ - PIRITIBA. A região utilizada para o estudo está contida na folha de articulação Pintadas SC-24-Y-D-V, em escala 1:100000.

A área está localizada na porção nordeste do estado da Bahia e todo o levantamento foi realizado entre os anos de 2002 e 2003, com a finalidade de cobertura aerogeofísica de alta resolução com os métodos magnético e gamaespectrométrico nas escalas 1:50000 e 1:100000.

O Levantamento Aerogeofísico (figura 4.1) utilizou como plataforma aerogeofísica uma aeronave de asa fixa, contendo um multisistema aerogeofísico configurado pelos métodos magnético (sensor de vapor de césio, com resolução de 0,001 nT) e gamaespectrométrico (256 canais espectrais/cristal 2048 pol cúbicas). Os parâmetros utilizados para a execução do aerolevanteamento foram:

- Espaçamento entre as linhas de produção de 250 metros;
- Espaçamento entre as linhas de controle de 2.500 metros;
- Direção de voo das linhas de produção E-W e direção das linhas de controle N-S;
- Intervalo entre medições geofísicas consecutivas com intervalo de 0.1 segundo (magnetômetro) e 1,0 segundo (gamaespectrômetro);
- Altura de vôo de 100 metros;
- Sistema de navegação GPS Astech CA- 12 canais.



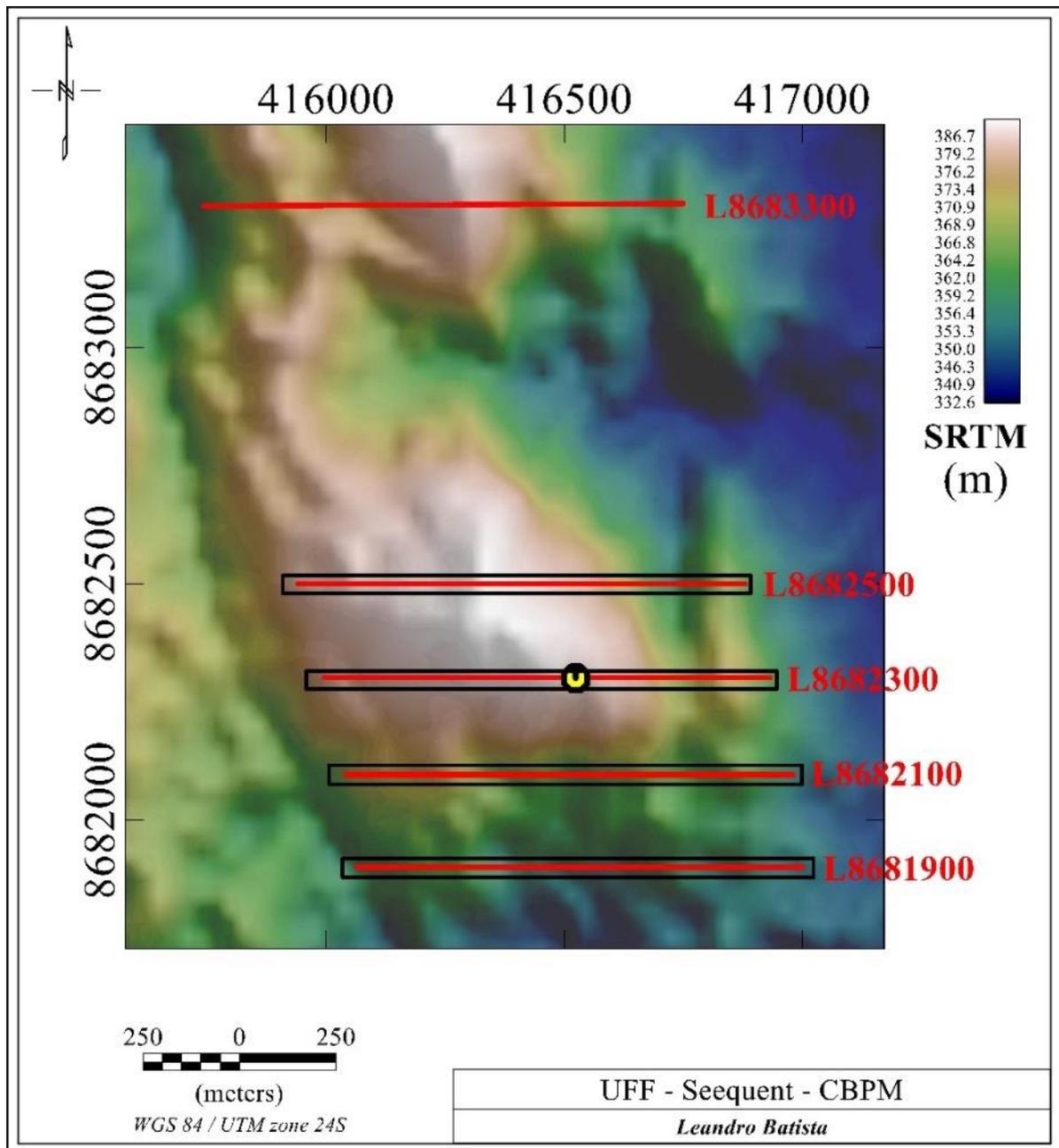
**Figura 4.1** - Mapa do CMA junto com as linhas de voo, com uma ampliação demonstrando a separação de 250 metros entre elas.

No processamento dos dados do levantamento, foi empregado o software Oasis Montaj Versão 5.1.8 da Seequent.

## 4.2 LEVANTAMENTO GEOELÉTRICO

O levantamento geoeletrico foi realizado ao longo de linhas (figura 4.2), objetivando a detecção de corpos de minério. Cada linha teve a extensão de 1km. Foi utilizado o arranjo de eletrodos no sistema dipolo-dipolo, com separação de 25 metros e 6 níveis de investigação,

sendo executado ao longo de 4 linhas equidistantes de 250 metros e uma linha mais ao norte, espaçada por mais de 1 km. Esta última linha citada não foi utilizada para o estudo.



**Figura 4.2** - Mapa de localização das linhas do levantamento elétrico com o furo de sondagem (círculo preenchido em amarelo) e polígonos das áreas onde foram feitas as inversões geofísicas.

No levantamento geofísico de Polarização Induzida (IP)/eletrorresistividade foi empregado um sistema IP Espectral no domínio do Tempo da IRIS, composto por um receptor ELRECPro, um transmissor VIP4000 de 4 KVA e um gerador de alimentação de 6.5KVA. Além

de eletrodos de potencial do tipo não polarizável (cerâmica) e eletrodos de corrente de aço inoxidável.

#### **4.3 FURO ROTOPNEUMÁTICO**

Na região onde se adquiriu a linha L8682300, do levantamento geológico, foi realizado o furo de sondagem rotoneumático número 860121-SS-FGL-0001, sendo coletada amostras em intervalos de 1m, até a profundidade de 84m, de material triturado de granulometria variando de argila a grânulo (3mm), sendo posteriormente analisadas no laboratório da SGS-Geosol para os elementos Hg, S, C (Grafítico) e para os compostos óxidos  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $MnO$ ,  $Na_2O$ ,  $P_2O_5$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $V_2O_5$ .

## **5. METODOLOGIA**

Foi utilizado uma interpretação integrada, por meio de gráficos e mapas temáticos, dos dados geofísicos, geológicos e geoquímicos disponíveis, utilizando dados cedidos pela CBPM:

- Geofísicos: Aerogamaespectrometria, aeromagnetometria e geolétrico;
- Geológicos: Descrição de furo de sondagem e mapa geológico de detalhe;
- Geoquímicos: Análises geoquímicas de furo de sondagem.

Com base nesses dados foi realizada uma interpretação integrada dos diversos métodos, partindo, inicialmente, de um estudo regional, com os dados aerogeofísicos, para maior entendimento da geologia da região e correlação com as ocorrências de grafita já conhecidas. Foi utilizada a mesma metodologia de correlação entre o levantamento gamaespectrométrico e a gênese dos depósitos da área de estudo, proposto por SUSIN (2019).

Seguindo o estudo regional, o enfoque foi transferido para escala de semidetalhe e detalhe, com a interpretação do levantamento elétrico e das análises geoquímicas do testemunho, localizado em uma das linhas geolétricas adquiridas.

Por conta da grafita ser um excelente condutor, os métodos elétricos são os melhores indicadores para uma prospecção geofísica eficiente. Sendo assim, com o processamento dos levantamentos de eletrorresistividade e polarização induzida (IP), que foram adquiridos concomitantemente, é esperado propor não só novos alvos exploratórios, como também o seu comportamento em subsuperfície e sua correlação com o furo de sondagem.

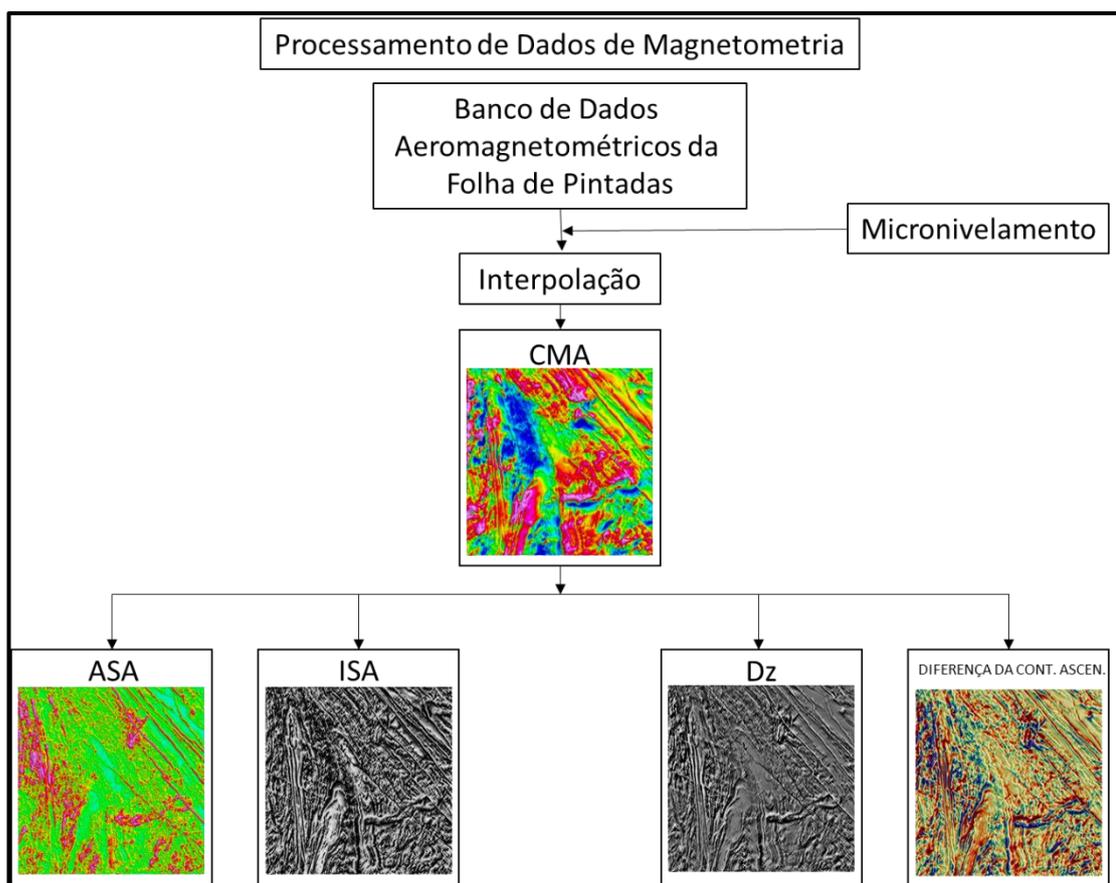
Foram utilizados para o estudo geofísico ao todo três métodos: magnetométrico, gamaespectrométrico e elétrico. A seguir serão descritos, brevemente, cada um dos métodos e técnicas de processamento utilizadas.

### **5.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS**

O Fluxo de trabalho para processamento dos dados Aeromagnetométricos cedidos pela CBPM foi realizado para região de Pintadas. Inicialmente, foi proposto o estudo não só para a folha de articulação de Pintadas, mas também para a folha adjacente a sul, SD-24-V-B-II, pertencente à campanha de aquisição IPIRÁ/ ILHÉUS. O estudo mais amplo não foi

possível pela incongruência entre os dois levantamentos, que gerou grande ruído após a junção dos mesmos. Sendo assim, a região mais ao sul foi descartada, para criação de qualquer produto para interpretação. Na figura 5.1 é possível visualizar o fluxo de processamento dos dados magnéticos, através de mapas temáticos.

Toda a etapa de pré-processamento já havia sido realizada pela CBPM. Portanto, como tarefas complementares, foi realizada a escolha do sistema de referência geográfica (DATUM), a escolha do melhor método para a interpolação dos dados e a geração dos produtos através de determinados *grids*. Para a elaboração de todos os mapas utilizados neste trabalho foi utilizado o software Oasis Montaj, versão 9.8, da empresa Sequent. Mas, foi constatado um ruído na direção de aquisição do levantamento, sendo necessário tornar o dado micro nivelado. A técnica consiste na aplicação conjunta de um filtro passa alta e de um filtro de cosseno direcional, criando um *grid* de altas frequências com sentido do levantamento aéreo. Esse *grid* é subtraído do CMA, realizando o processo de decorrução.



**Figura 5.1** - Fluxograma do processamento de dados magnetométricos.

Após a remoção do IGRF do canal TMI, gerando assim o canal CMA, foram aplicados diversos filtros matemáticos, no *grid* gerado por este último canal, com intuito de criar produtos para auxílio na interpretação regional da área de estudo. Assim, foram obtidos, a **amplitude do sinal analítico (ASA)**, a **primeira derivada vertical (Dz)**, a **inclinação do sinal analítico (ISA)** ou ***tilt derivative*** e a **diferença da continuação ascendente**, que serão detalhadas a seguir.

### **5.1.1. Interpolação dos Dados Aeromagnetométricos**

A interpolação de dados é usada para estimar o valor de um atributo em locais não amostrados, utilizando pontos de amostragens obtidos em regiões próximas daquelas que vão ter seus valores estimados. O termo comum para interpolação dos dados do levantamento é a "gridagem", que é descrita como a geração de uma malha regular de pontos contendo o valor do dado adquirido.

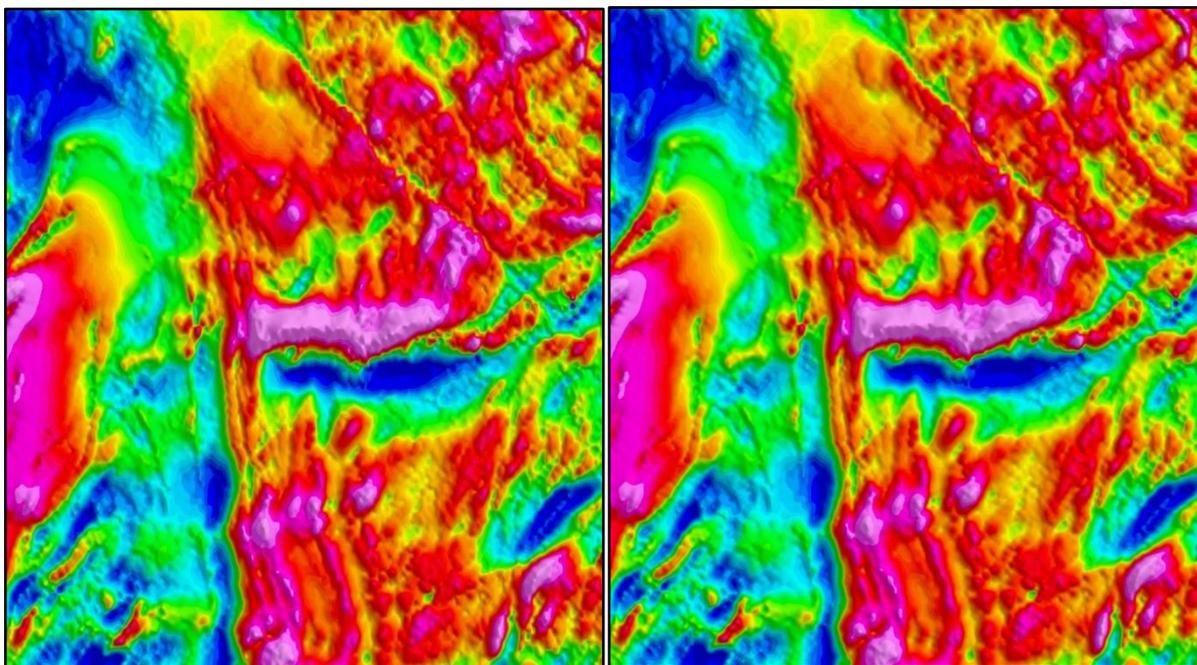
A escolha do tamanho da célula de interpolação vai depender do espaçamento entre as linhas de aquisição e do método matemático empregado. Variando entre 1/2 até 1/8 do espaçamento entre pontos do conjunto. Neste estudo, foram analisados os métodos de mínima curvatura e bidirecional, para escolha do que melhor se ajustava para o conjunto de dados existentes.

O método de Mínima Curvatura gera uma superfície suavizada na qual todos os dados são cruzados. Portanto, ele se caracteriza por ser um interpolador não exato e como consequência os dados nem sempre são apresentados com seus valores reais. O método gera uma nova malha de pontos, aplicando sucessivamente o modelo de regressão por mínimos quadrados sobre a grade de modo iterativo, de forma que a cada passagem é possível atingir um melhor nível de suavização (MEDINA & QUINTAS, 2008).

O método bidirecional é uma técnica utilizada para dados dispostos em linhas paralelas, ortogonais e irregulares. Tendo maior eficácia, quando a densidade de dados alinhados é muito alta (BILLINGS & RICHARDS, 2001). Por isso, normalmente, apresenta um bom resultado em dados de aerolevantamentos.

Para o conjunto de dados estudado o método que apresentou menor nível de ruído provocado por altas frequências foi o método de mínima curvatura com um tamanho de célula

de 125 metros. A figura 5.2 ilustra a comparação dos resultados pelos dois métodos empregados, onde no mapa a direita (mínima curvatura) é possível notar menor interferência do ruído de altas frequências.



**Figura 5.2** - Comparação entre grids gerados por interpolação bidirecional e mínima curvatura, respectivamente.

### **5.1.2 Primeira Derivada Vertical (Dz)**

Tanto derivadas horizontais têm grande sensibilidade à borda de anomalias, portanto, são ótimos marcadores das mesmas (DENTITH & MUDGE, 2014). O filtro da derivada vertical (Dz), tem como objetivo realçar anomalias no eixo Z (Equação 1). Através dessa técnica, que é aplicada no domínio de Fourier, é capaz de realçar anomalias de baixo comprimento de onda, destacando fontes mais rasas em detrimento das mais profundas.

A primeira derivada vertical para a exploração mineral é comumente aplicada em conjunto com outros filtros para a interpretação de fontes rasas, como, por exemplo, o mapa ternário extraído de levantamentos gamaespectrométricos. O primeira derivada vertical pode ser expressa conforme a seguinte equação:

$$Dz = \left( \frac{\partial A}{\partial z} \right), \quad (5.1)$$

onde A é amplitude do CMA. A equação 5.1 é normalmente utilizada para ressaltar as variações de um determinado dado de campo potencial em profundidades rasas.

### **5.1.3 Amplitude do Sinal Analítico (ASA)**

A amplitude do sinal analítico (ASA) é formada através da combinação dos gradientes horizontais e vertical do dado de campo potencial, neste caso o campo magnético anômalo. O método para tais anomalias foi desenvolvido por Nabighian (1972), a técnica é amplamente utilizada para mapear os principais domínios magnéticos, pelo fato de tender a colocar o máximo da anomalia sobre o centro do corpo causador, diminuindo assim a natural ambiguidade do método magnetométrico. Isto é de grande utilidade para o mapeamento regional, pois as anomalias geradas por essa técnica estão diretamente ligadas a intensidade de magnetização no local.

$$ASA(x, y, z) = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial z}\right)^2}, \quad (5.2)$$

em que x, y, z são os eixos direcionais e a ASA terá nT/m como unidade. A partir da equação 5.2 pode se ressaltar que a técnica é independente da direção do vetor de magnetização levando em consideração apenas as derivadas do campo. Em casos em que a extensão lateral da anomalia for maior que a vertical o método é útil na delimitação de bordas das anomalias magnéticas, principalmente em regiões com presença de remanência ou em baixas latitudes.

### **5.1.4 Inclinação do Sinal Analítico (ISA) ou *Tilt Derivative***

A inclinação do sinal analítico (ISA), também conhecida como *Tilt Derivative* ou *local fase* do sinal analítico, é uma técnica que permite inferir, através do contraste da anomalia magnética variações no sinal que podem estar associadas as direções de inclinação das fontes causadoras (THURSTON & SMITH, 1997). Pode assim, ser utilizada para delimitar fontes magnéticas e fornecer informações sobre suas extensões horizontais, sendo útil no mapeamento de estruturas rasas.

Segundo Verduzco *et al.* (2004), as vantagens deste método são a capacidade de normalizar imagens provenientes de dados do campo magnético e obter resultados satisfatórios mesmo na presença de ruído.

$$ISA = \theta = \tan^{-1} \left( \frac{\frac{\partial A}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2}} \right). \quad (5.3)$$

A equação para este filtro pode ser expressa como definida pelo arco tangente da razão entre a derivada vertical pela amplitude do gradiente horizontal total ou amplitude do sinal analítico (Equação 5.3). Pelo fato da técnica ser baseada no ângulo que tangencia às derivadas, o alcance deste varia de  $-\pi/2$  a  $+\pi/2$ . Este filtro tem a propriedade de ser positivo acima da fonte, cruzar o zero próximo nas bordas e ser negativo fora da fonte, sendo capaz de responder igualmente bem tanto para fontes rasas quanto para profundas. A comparação entre a amplitude e a fase do sinal analítico torna mais segura a interpretação de continuidade das estruturas.

### **5.1.5 Diferença da Continuação Ascendente**

A continuação ascendente pode ser descrita como o cálculo do dado campo potencial observado  $A(x,y,z)$  para uma cota de altitude maior do que a adquirida. Isso pode ser analisado como se estivéssemos realizando um novo aerolevanteamento em uma outra altitude. Com o efeito, o sinal sofre alterações significativas. Sendo assim, quando mais for extrapolada a altura de voo de um levantamento magnetométrico, menos ele irá imagear os menores comprimentos de onda. Segundo Reeves (2005), esse operador de continuação ascendente (*upward continuation*) pode ser descrito, no domínio do número de onda como:

$$F(\omega) = e^{-h\omega}, \quad (5.4)$$

em que  $h$  é altura continuada para cima,  $\omega$  é o número de onda. Através dessa função é possível observar que quanto maior o número de onda, mais atenuado o sinal será, o que justifica o predomínio das anomalias com maiores comprimentos de onda. Para gerar um *grid*

de diferença da continuação ascendente é necessário realizar subtração entre os produtos da continuação ascendente para alturas distintas. Gerando um grid em que as anomalias regionais são suavizadas e remove grande parte do ruído altas frequências, que muitas vezes interfere na interpretação da Dz, por exemplo (CUNHA, 2018).

No presente estudo, foram utilizadas continuações ascendentes com altitudes de voo de 100m e 200m para além da altura de voo real do levantamento. Para se extrair o conteúdo do sinal que foi gerado por fontes mais profundas, deve-se subtrair o grid com maior altura de voo do menor.

## 5.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROGAMAESPECTOMÉTRICOS

Os dados gamaespectrométricos pertencem à mesma campanha do levantamento magnetométrico de forma concomitante. A folha de Pintadas foi a escolhida para realização do estudo.

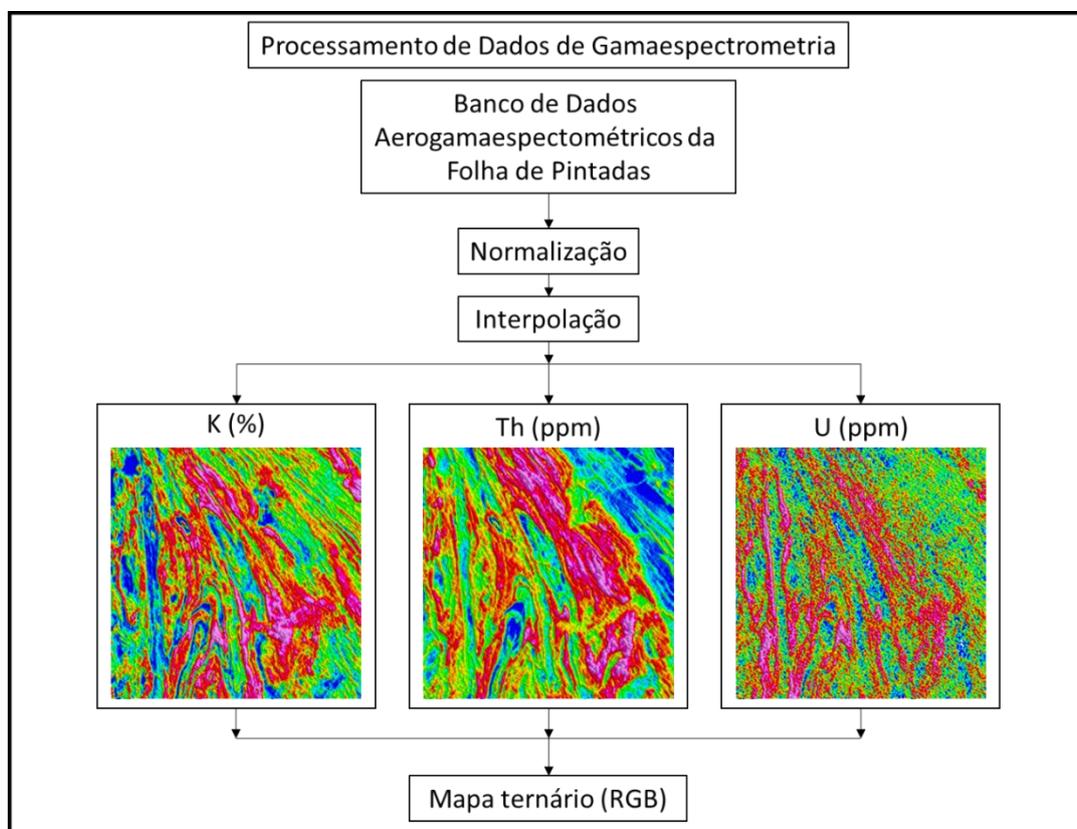
A figura 5.3 ilustra o fluxograma que foi aplicado nesse estudo, através do *software* Oasis Montaj. As etapas de pré-processamento já haviam sido realizadas pela CBPM e somente foi necessário realizar um controle de qualidade nos canais de Th, U e K. Em que foram removidos de valores negativos, nos canais citados, para serem gerados os mapas temáticos de **Tório (eTh)**, **Urânio (eU)** e **Potássio (K%)**. Dessa forma, foi criado a composição ternária destes elementos, conhecido como **mapa ternário**, na escala RGB (*Red-Green-Blue*).

### 5.2.1 Interpolação dos Dados Aerogamaespectométricos

Para a interpolação dos grids de Tório (ppm), Urânio (ppm) e Potássio (%) foi utilizado o método de mínima curvatura. Pelo espaçamento entre linhas ser de 250 metros, para respeitar o critério de 1/4 a 1/2 para tamanho de célula, foram gerados grids com 125 metros de tamanho de célula. Para os mapas de razão foi utilizado o mesmo método de interpolação e tamanho de célula.

Para ser criado o mapa ternário, utilizou-se os grids de Tório (ppm), Urânio (ppm) e Potássio (%), usando a distribuição de cores RGB (*Red-Green-Blue*). Sendo assim, a cada

um dos canais é atribuída uma cor, sendo verde para o Tório, azul para o Urânio e vermelho para o Potássio.



**Figura 5.3-** Fluxograma do processamento de dados gamaespectrométricos.

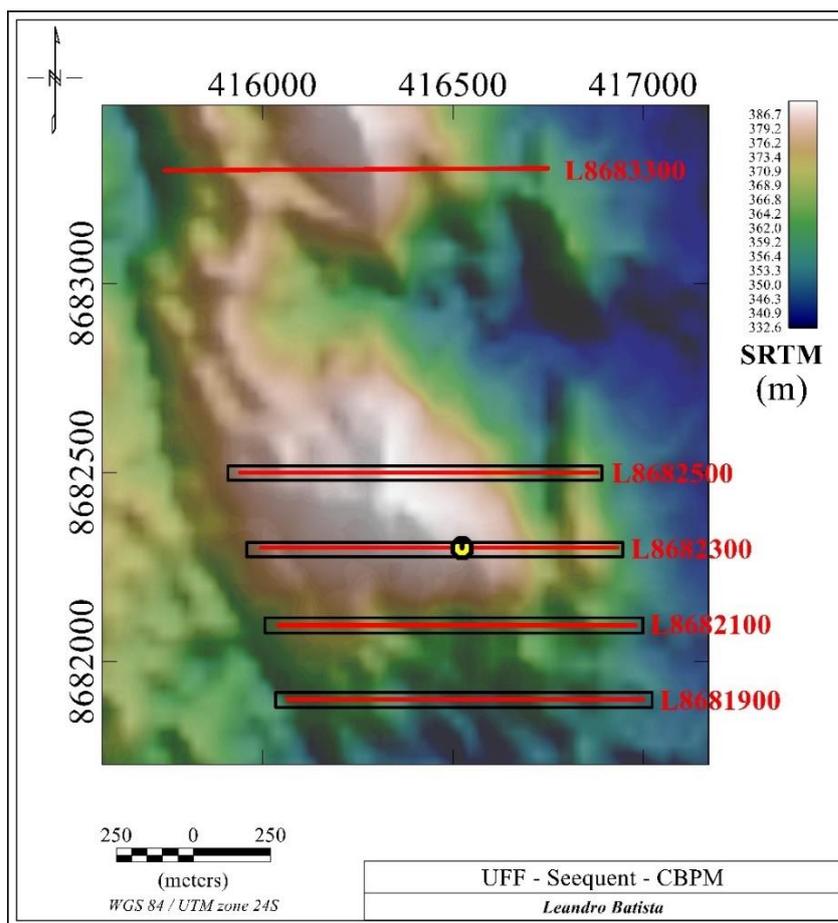
### 5.3. MODELAGEM E INVERSÃO DOS DADOS ELÉTRICOS

Foram cedidos dados de eletrorresistividade/IP de 5 linhas adquiridas na região contida na folha de articulação de Pintadas. Na figura 5.3, pode ser visualizado o modelo digital de terreno, produzido pela *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), onde podem ser observadas as linhas de aquisição dos dados geoeletricos, o furo de sondagem e o polígono escolhido para a inversão dos dados geofísicos.

O processo de pré-processamento e controle de qualidade já havia sido realizado pela CBPM, sendo apenas necessária a escolha do polígono que foi usado para a inversão geofísica. A linha mais ao norte, L8683300, foi descartada por estar há mais de 2 km de distância das demais e assim impossibilitando a interpretação do comportamento lateral das anomalias encontradas nesta linha. Já com o polígono definido foi, inicialmente, realizada uma

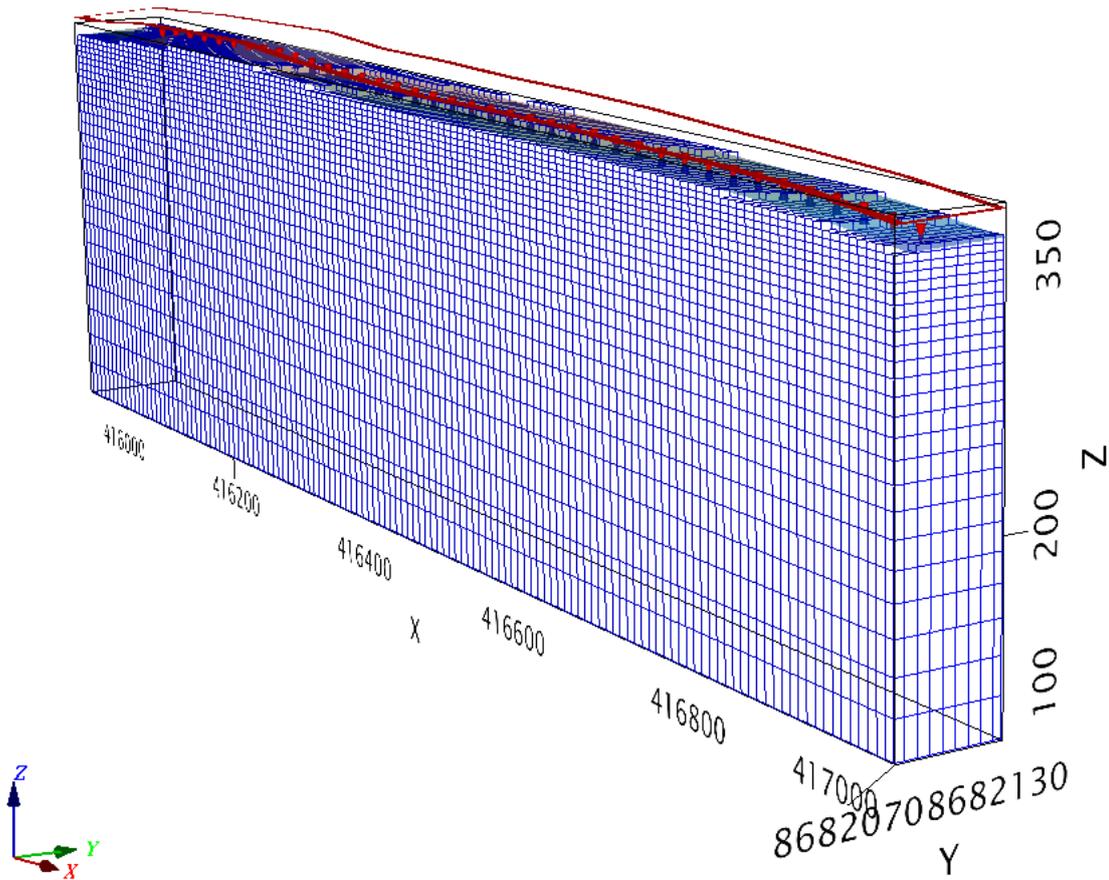
inversão 3D, mas como cada linha está espaçada em 200 metros e o espaçamento entre eletrodos em 25m, isso gerou uma grande quantidade de corpos com uma continuação lateral que não pode ser garantida. Por isso, optou-se pela inversão de cada linha separadamente.

Para criar o ambiente de entrada para uma inversão através do VOXI, são necessárias três informações: o polígono da área de interesse, o modelo de terreno e o tipo de dado geofísico que será invertido, no caso resistividade DC-IP. Em seguida, adiciona-se o dado através do banco de dados com o controle de qualidade realizado, para importação os dados de Vp. O próximo passo foi a definição do *mesh* (conjunto de células que parametrizam a subsuperfície em blocos). Neste trabalho, o *mesh* utilizado apresenta variação em profundidade, conforme pode ser observado na figura 5.4. Devido às limitações computacionais impostas pelo serviço de inversão na nuvem da Seequent, é possível definir um mesh de no máximo 250x250 células no plano (x,y).



**Figura 5.4** - Mapa de localização das linhas do levantamento elétrico com o furo de sondagem e polígonos das áreas onde foram feitas as inversões geofísicas.

Pelo fato de os eletrodos de aquisição do dado elétrico estarem espaçados por 25 metros e pelo próprio *software* recomendar o uso de células cujo tamanho varie entre 1/2 e 1/5 do espaçamento entre os eletrodos de aquisição. Cada célula do *mesh* foi definida com dimensões 8 m x 8 m x 4 m, nos eixos x, y e z, respectivamente. Onde em z com o aumento de profundidade há um incremento no tamanho de célula. A figura 5.4 exemplifica uma das malhas criadas para a inversão.



**Figura 5.5** - Exemplo da malha de blocos usada para a parametrização do modelo.

O problema inverso elétrico basicamente consiste na minimização da seguinte função objetivo:

$$\varphi_T(d, m) = \varphi_d + \lambda \varphi_m, \quad (5.5)$$

em que  $\varphi_d$  é chamada de função do ajuste e pode ser expressa como:

$$\varphi_d(d, m) = \sum_{i=0}^n (dobs_i - f_i(\vec{r}))^2, \quad (5.6)$$

em que  $d_{obs}$  é o vetor contendo as diferenças de potencial (DDPs) observadas nos eletrodos de potencial,  $f_i(r)$  é a função do problema direto que calcula DDPs a partir de um modelo interpretativo baseado em volumes finitos (SILVESTER & FERRAR, 1966; LEVEQUE, 2002; PEIRÓ & SHERWIN, 2005), cujas células são representadas na Figura 5.5. A segunda parcela da equação (5.5) é chamada de função de regularização de Tikhonov e pode ser definida como:

$$\varphi_m = (Rm)^T Rm \quad (5.7)$$

em que R é a matriz de diferença finitas e m é o modelo. A equação 5.7 é uma equação matricial, cuja dimensões estão definidas abaixo:

- R (a,b) – número de dados;
- b – número de células do *mesh*;

já m é o modelo de parâmetros, ou seja, neste caso é a distribuição de resistividades aparentes. A equação 5.7 tem por objetivo impor suavidade ao modelo de resistividades estimados, conferindo estabilidade ao problema inverso geoeletrico.

A minimização da função objetivo no sentido de mínimos quadrados regularizados permite obter a distribuição de resistividades aparentes em subsuperfície que esteja estável e ajuste os dados observados, respeitando um erro considerado aceitável. Lambda é o parâmetro de regularização, cujo propósito é balancear a importância relativa de cada parcela da equação 5.5 (BLAKELY, 1996; LI & OLDENBURG, 1996; ASTER; BORCHERS; THURBER, 2018). Com todos os parâmetros definidos foi possível realizar as inversões através da plataforma VOXI (ELLIS, 2018). Vale salientar que este algoritmo utiliza a curva-L (HANSEN & O'LEARY, 1993) para estabelecer o parâmetro de regularização ideal para o problema inverso geoeletrico.

#### 5.4 GEOQUÍMICA DO FURO DE SONDAGEM ROTOPNEUMÁTICA

A partir dos dados geoquímicos do furo de sondagem cedido, optou-se por gerar perfis de razão entre elementos, através do uso do Microsoft Excel, para fazer inferências sobre a origem da matéria orgânica, presente na região. Além da criação dessas razões, foi analisada a curva de teor de carbono orgânico em função da profundidade, que pode ser relacionada

de forma direta com os corpos grafitosos da região. Além disso, para a interpretação conjunta com os dados elétricos, como o furo de sondagem foi locado sobre a linha L8682300, foi importado para o Oasis Montaj, onde no ambiente 3D, foi possível a visualização conjunta das anomalias elétricas em profundidade junto aos dados do furo.

A CBPM já tinha realizado a interpretação deste furo, o relatório também foi cedido e utilizado para a comparação com as respostas geofísicas. Um mapeamento geológico foi realizado pela CBPM na área com 5 linhas de picadas espaçadas em 200 metros para elaboração de um mapa geológico com escala de 1:5000, o que foi de extrema importância para a correlação com os métodos de maior resolução.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados de cada método utilizado, separadamente. Iniciando pela escala regional, com os dados aerogeofísicos, até a escala de semi-detalhe com o levantamento elétrico e de detalhe, e os dados do furo de sondagem.

Para a interpretação regional, junto aos dados magnetométrico e gamaespectrométrico, foram analisados o modelo digital do terreno (MDT – SRTM) e o mapa geológico da região (figura 2.2), no intuito correlacioná-los com os sinais das respostas geofísicas. Além disso, através das ocorrências de grafita já mapeadas pela CPRM, procurou-se identificar tendências entre os produtos gerados, para ser possível propor novos alvos exploratórios.

### 6.1 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROMAGNETOMÉTRICOS

Serão discutidos a seguir todos os produtos gerados pelo processamento dos dados magnetométricos. Vale ressaltar que a interpretação de dados magnetométricos é uma tarefa desafiadora na geofísica, pois esses dados apresentam uma característica dipolar, além de diferentes fontes produzirem anomalias semelhantes, sendo assim ambíguos, com diversos comprimentos de onda gerados por fontes desde poucos metros até quilômetros, com diferentes amplitudes.

A interpretação envolveu a análise visual dos temas gerados. Foram analisados os mapas de **campo magnético anômalo (CMA)**, **amplitude do sinal analítico (ASA)**, **primeira derivada vertical (Dz)**, **inclinação do sinal analítico (ISA)**, **continuação ascendente** e **diferença da continuação ascendente**. Sendo possível assim a interpretação de domínios magnéticos, marcação de lineamentos, estudo do espectro de frequência e estimativas das profundidades de fontes magnéticas.

#### 6.1.1 Campo Magnético Anômalo (CMA)

O primeiro mapa analisado foi o do campo magnético anômalo (Figura 6.1). Com o objetivo de encontrar padrões de assinaturas de fontes, delimitar feições que poderiam trazer informações importantes para o estudo, como tectônica da área e anomalias magnéticas negativas.

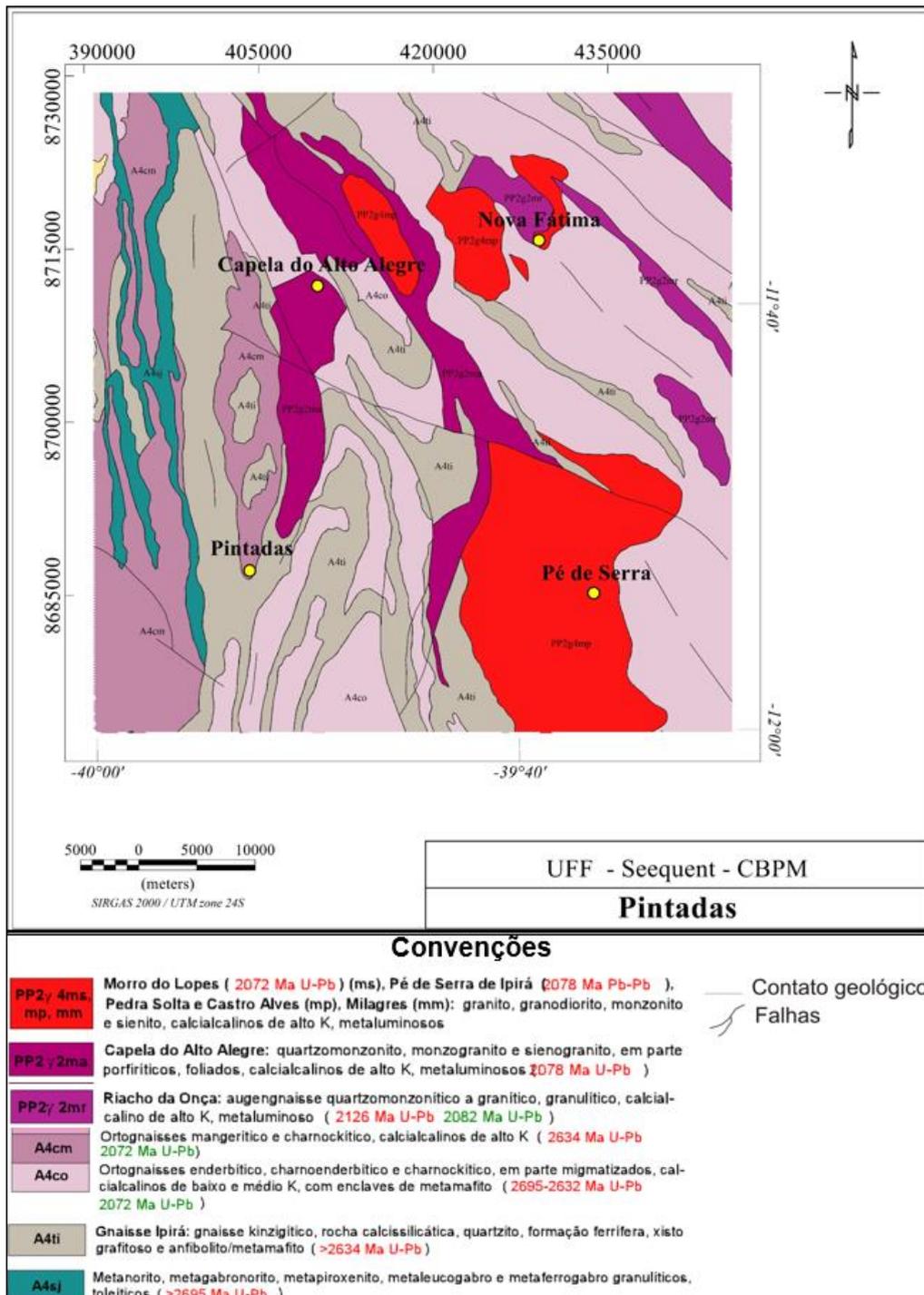
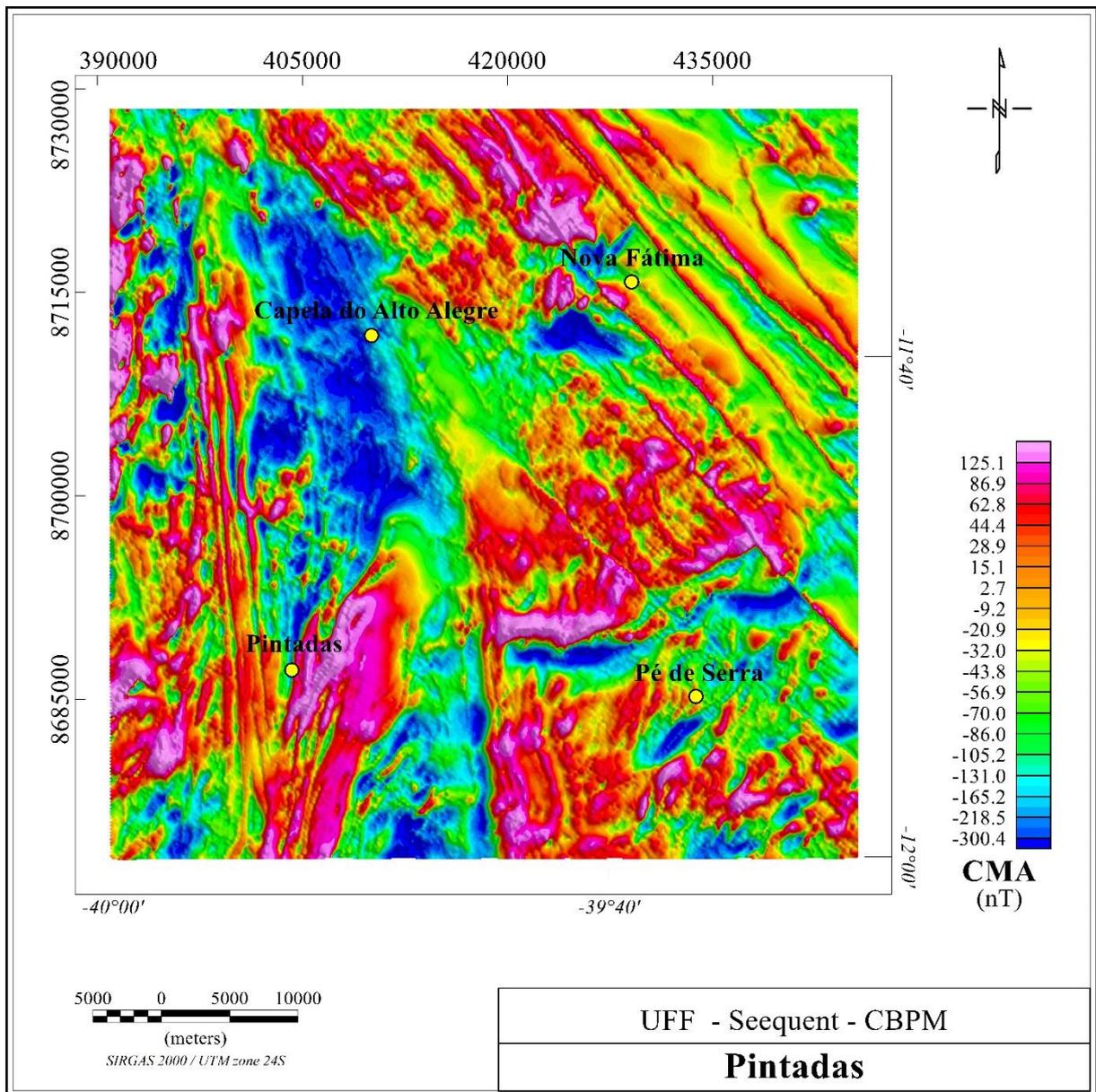


Figura 2.2 - Mapa geológico com recorte para a área de estudo. Fonte: Modificado de SOUZA *et al.* 2003.

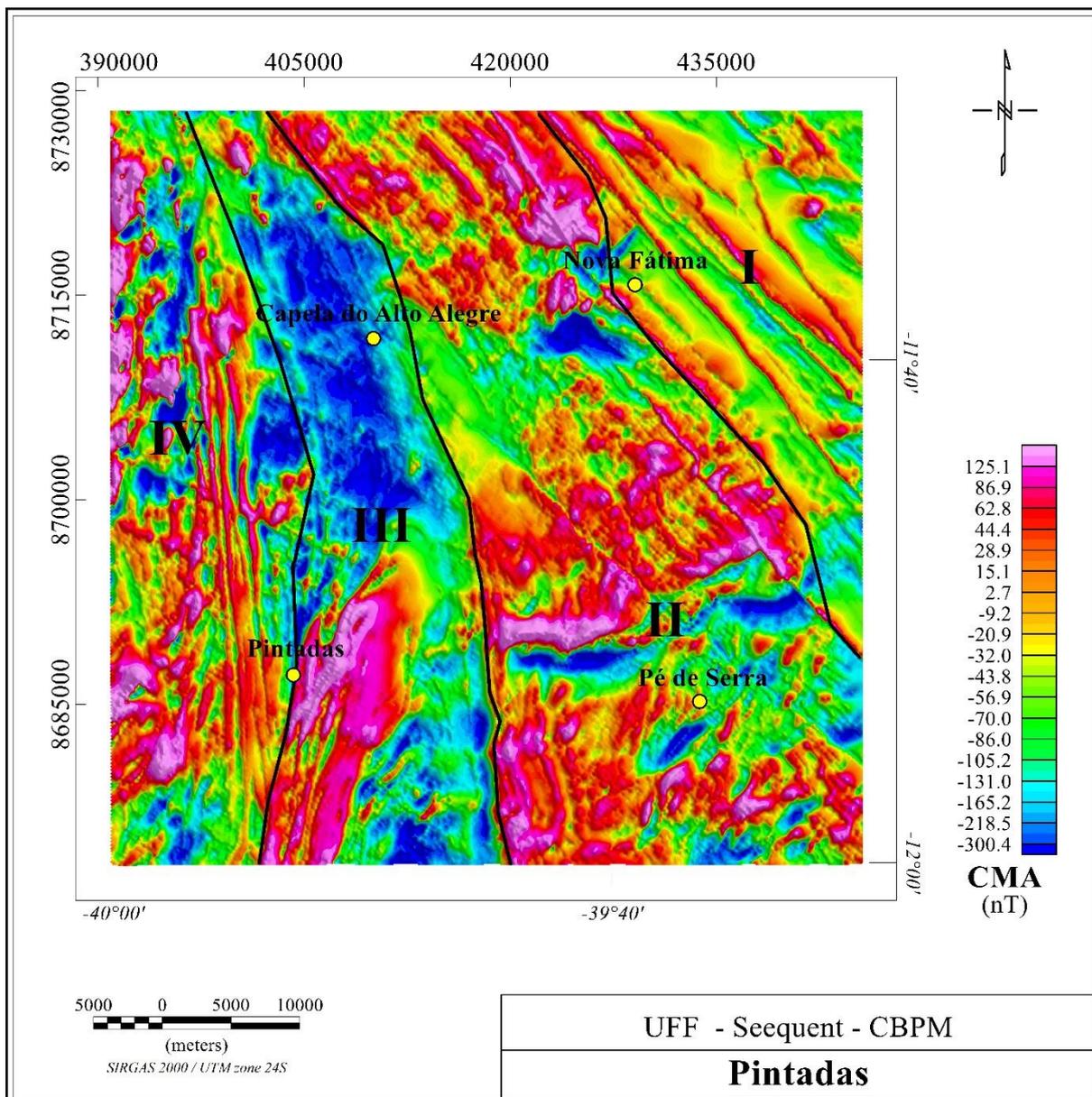
A partir do CMA foi gerado um mapa de domínios magnéticos (Figura 6.2). O produto foi dividido em 4 domínios magnéticos distintos, sendo denominados, domínios I, II, III e IV. Vale ressaltar que, mesmo com a aplicação de um micronivelamento, o dado ainda apresenta uma grande influência de altas frequências, o que ocasiona um aspecto “enrugado” do CMA. Ao decorrer do capítulo, será analisado seu espectro de frequência para que seja possível

entender se essa característica é fruto de uma resposta em subsuperfície ou ocasionada por algum tipo de ruído.



**Figura 6.1** - Mapa do campo magnético anômalo da área de estudo.

Analisando o domínio I, o mapa temático apresentou uma tendência NW-SE, com anomalias positivas bem delimitadas e com grande continuidade. Essas anomalias são mais alongadas e se assemelham a um lineamento magnético. Possivelmente esse tipo de anomalia pode ter sido gerado por rochas máficas ou granitoides granulizados ricos em magnetita (Leite, 2002) do Complexo Caraíba alinhados ao longo do núcleo de zona de cisalhamento de caráter transcorrente.



**Figura 6.2** - Mapa do campo magnético anômalo da área de estudo com os domínios magnéticos interpretados.

Já no domínio II, existem tanto grandes anomalias de característica dipolar quanto anomalias longilíneas com lineamento, que podem ser relacionadas às intrusões graníticas na região, que apresentam de uma forma geral, direção NW-SE.

No domínio III, foi encontrada uma grande anomalia na área. Ao Sul, é possível caracterizar uma região de alto magnético com forma sinuosa que pode ter sido gerada por uma dobra, já mapeada na mesma região. A não ser por esta grande anomalia positiva, a região apresentou um caráter negativo de forma geral.

E, por último, o domínio IV, que apresenta uma tendência N-S e com algumas anomalias com grande continuidade, sem exibir o caráter dipolar, semelhantes as caracterizadas no domínio I. Além de ser possível mapear diversas anomalias dipolares desde algumas dezenas de metros até quilométricas. As anomalias nesse domínio são compatíveis com as rochas máficas-ultramáficas, metamorfasadas na fácies granulito (Leite, 2002), constituintes da Suíte São José do Jacuípe.

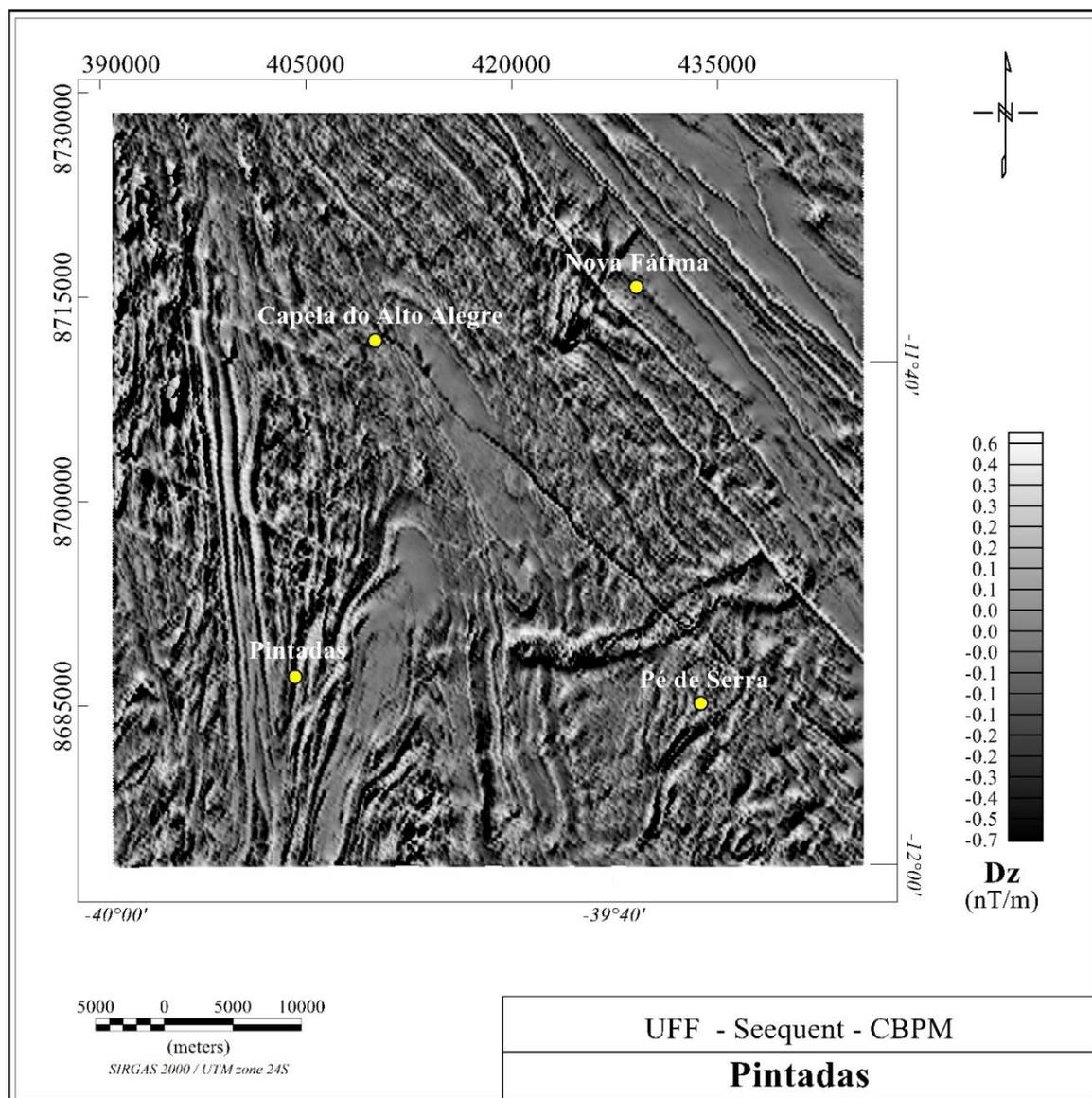
### **6.1.2 Primeira Derivada Vertical (Dz)**

Seguindo o fluxo de trabalho proposto na metodologia, o próximo produto abordado foi o mapa da primeira derivada vertical (figura 6.3). Como já descrito, esse filtro, realça as altas frequências, sendo possível identificar a influência das fontes mais superficiais no dado magnetométrico. Para melhor visualização foi utilizada a escala de tons de cinza, o que ajudou na delimitação das estruturas superficiais.

Como já evidenciado no mapa de CMA, o dado tem um grande conteúdo de altas frequências em quase todas as regiões do mapa. A Dz permitiu amplificar os conteúdos de pequeno comprimento de onda, conseqüentemente, trouxe uma maior influência desta parte do sinal para este mapa.

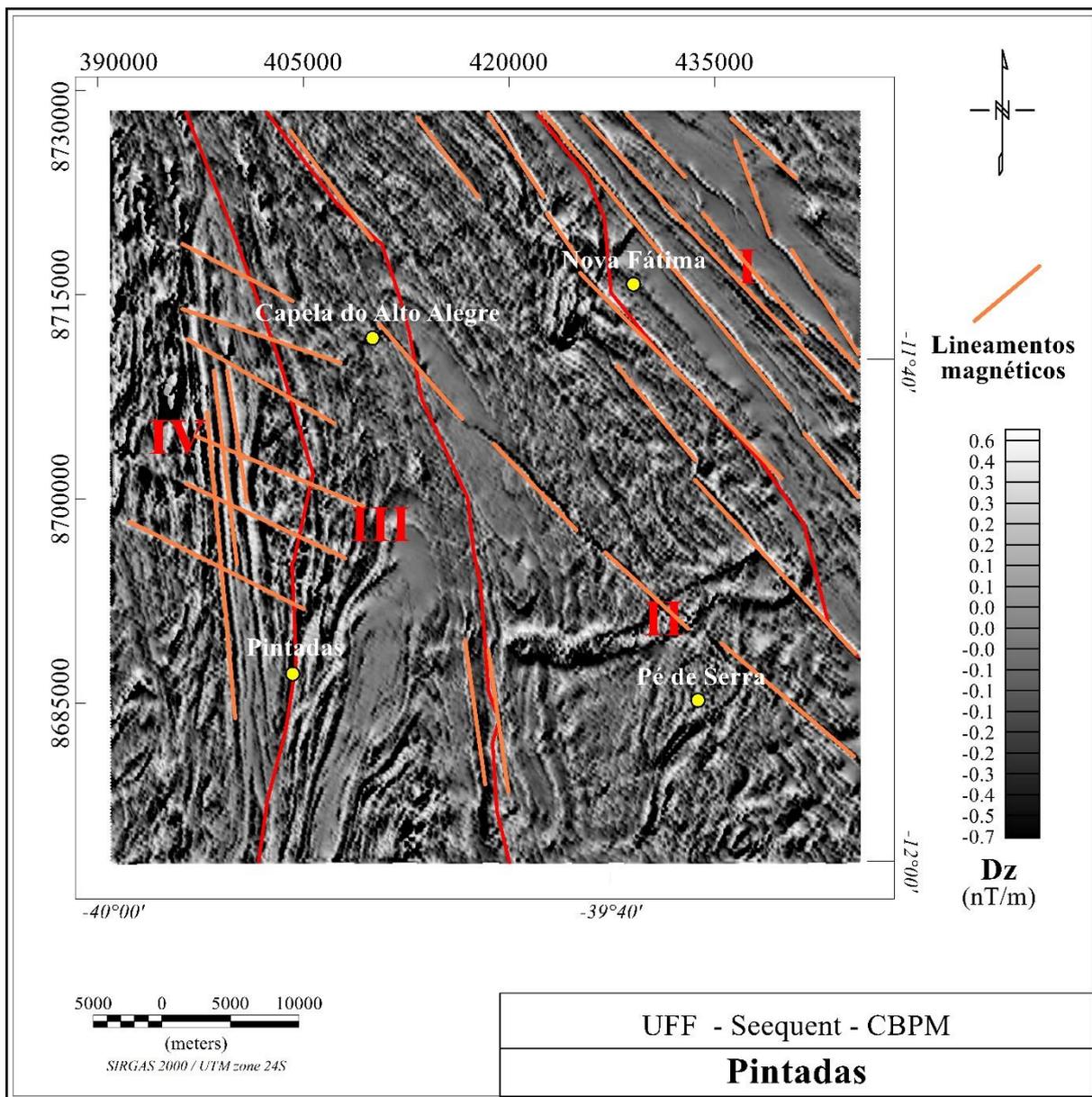
Mesmo com uma amplificação das altas frequências, o que ocasiona neste aspecto de rugosidade no produto, existem regiões com menor interferência deste tipo de sinal, como a região do domínio I e a parte sul do domínio III. O que pode demonstrar que essas regiões têm grande parcela do conteúdo de frequência causado por anomalias de grandes profundidades.

Na figura 6.4 foram interpretados lineamentos magnéticos que podem ser vistos no mapa de Dz. O domínio I apresentou uma grande densidade de lineamentos, sendo que todos na mesma direção NW-SE. O domínio II, por sofrer grande influência de conteúdos de altas frequências, demonstrou menos lineamentos aparentes, mas todos com mesma direção NW-SE.



**Figura 6.3 -** Mapa da primeira derivada vertical (Dz).

Já no domínio III, foi encontrado o mesmo caráter sinuoso que foi observado no mapa de CMA que corrobora a área como uma região de dobramento. Como pode ser visto no domínio IV, que demonstra uma tendência NW-SE como em toda região, mas com um maior azimute, tendendo para direção N-S. Além de apresentar lineamentos WNW-ESE no domínio IV o que provavelmente é decorrente de cisalhamentos ocorridos na unidade São José do Jacuípe.



**Figura 6.4** - Mapa da primeira derivada vertical (Dz) com a interpretação dos domínios magnéticos e lineamentos.

### **6.1.3 Amplitude do Sinal Analítico (ASA)**

O terceiro produto analisado foi a amplitude do sinal analítico (figura 6.5). Nota-se que as anomalias foram ressaltadas e seu background foi suavizado, o que facilita a interpretação do mapa. A análise do mapa de ASA, ajudou a confirmar a tendência das estruturas no sentido NW-SE. Devido à técnica centralizar as anomalias e torná-las positivas quando o contraste de susceptibilidade é positivo, o mapa ajuda em uma interpretação regional do comportamento das principais anomalias, mas tende a agrupar anomalias locais. Novamente,

foram mapeados diversos lineamentos contínuos na região do domínio I. O domínio IV, apresentou uma grande quantidade de anomalias que mantiveram o padrão de direção, mas que sofreram certa fusão.

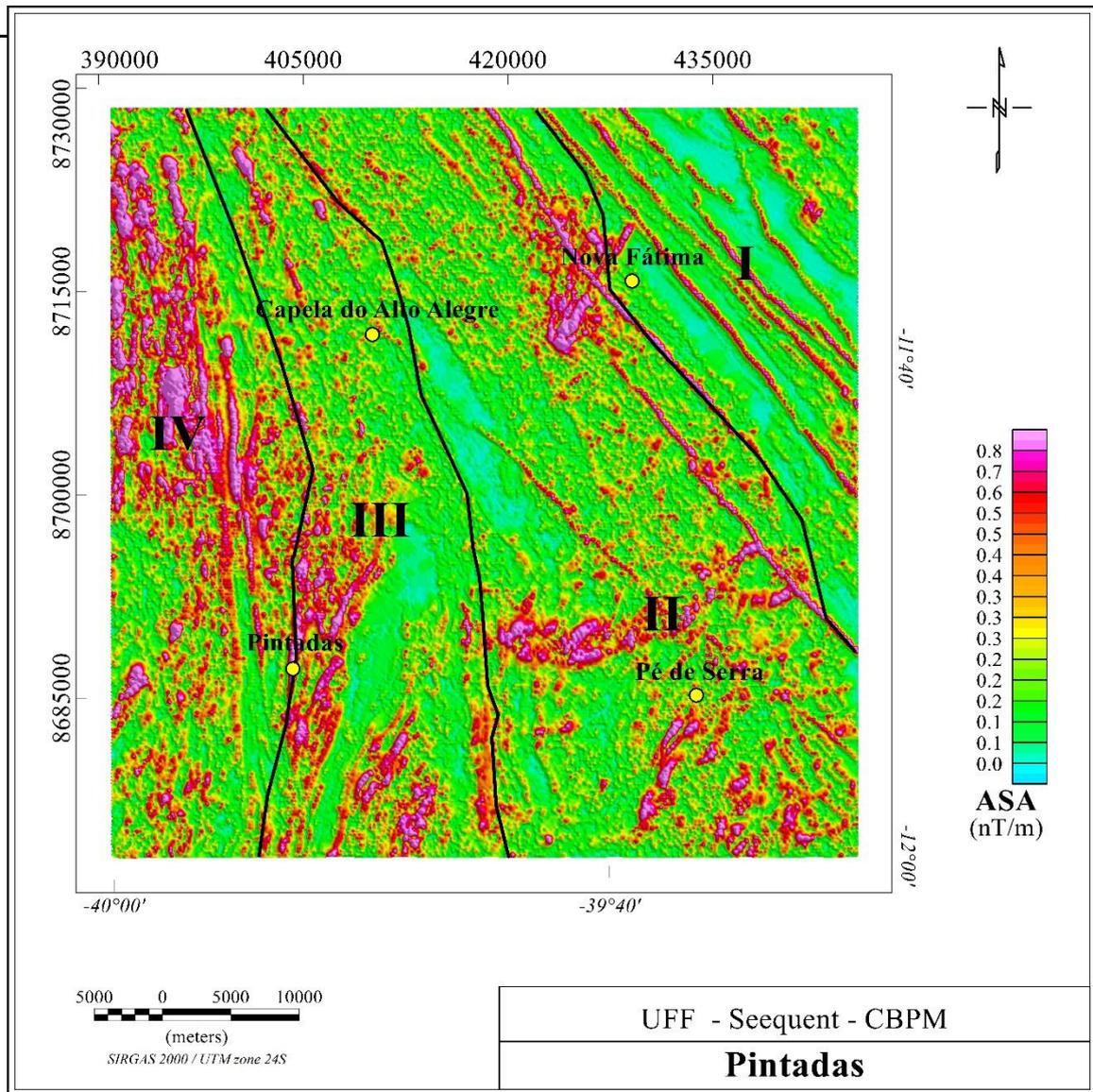


Figura 6.5 - Mapa da amplitude do sinal analítico (ASA).

Nas áreas dos domínios II e III, não foram mapeadas grandes anomalias, porém novamente, um comportamento de dobramento no domínio III, foi evidenciado. Pela grafita não apresentar características magnéticas, foram mapeadas algumas áreas com baixos valores de suscetibilidade no Domínio III que podem representar um bom sinal prospectivo do mineral.

### 6.1.4 Inclinação do Sinal Analítico (ISA)

O próximo mapa analisado foi o de inclinação do sinal analítico (figura 6.6). Como já descrito, este filtro tem a propriedade de ser positivo acima da fonte, cruzar o zero próximo das bordas e ser negativo fora da fonte.

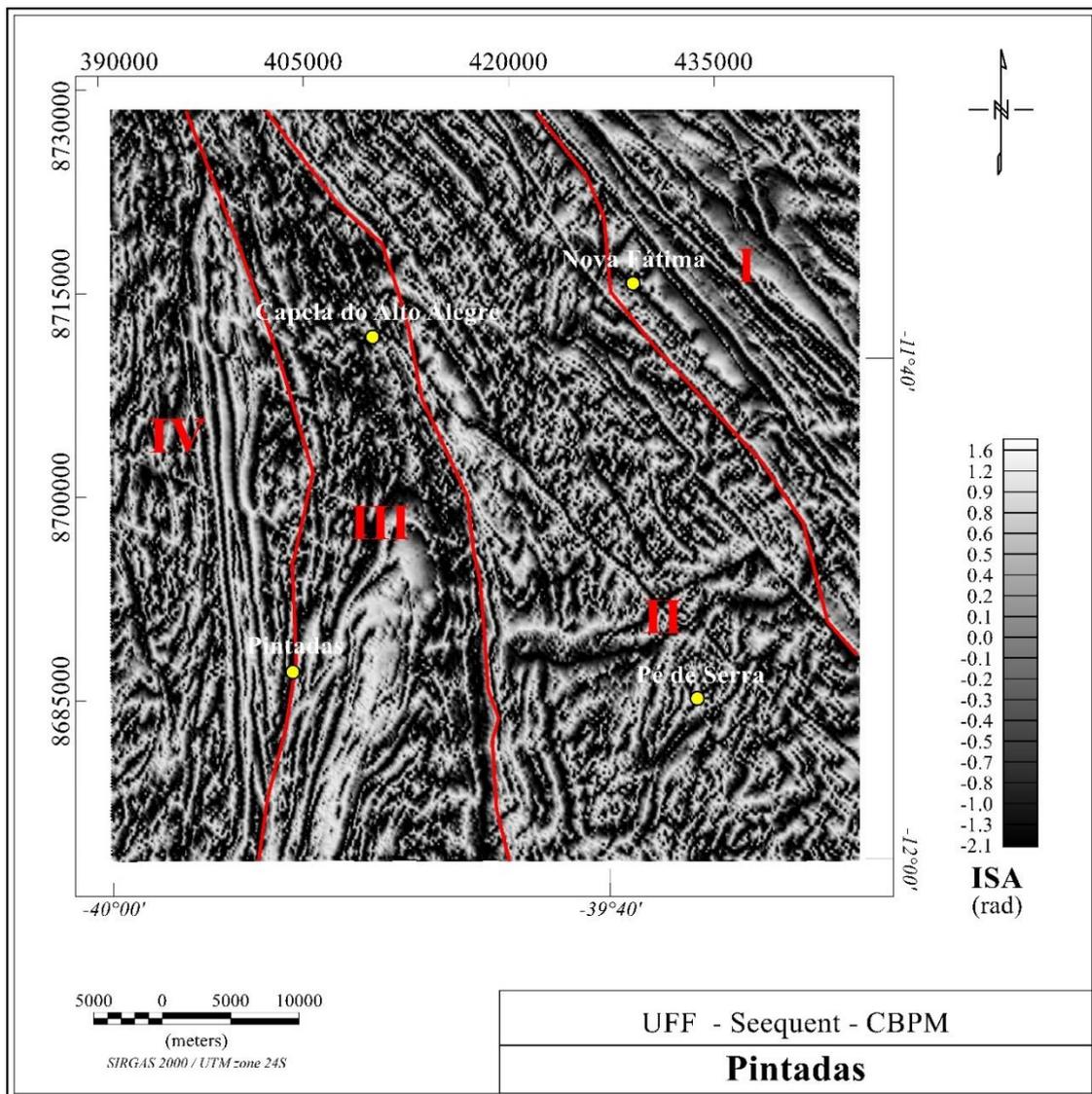


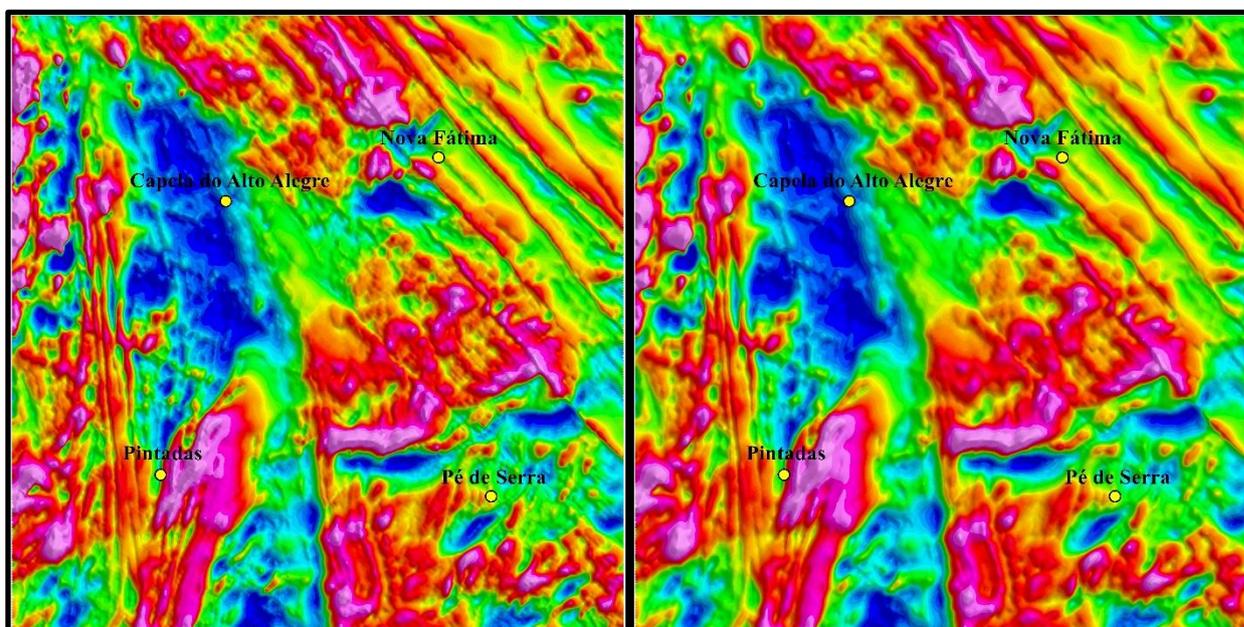
Figura 6.6 - Mapa da inclinação do sinal analítico (ISA) junto com os domínios magnéticos interpretados.

Para a escala de cor escolhida, as fontes das anomalias têm tons mais claros e as regiões fora das anomalias apresentam tons mais escuros. Como visualizado no mapa de CMA e no mapa de Dz, boa parte da região de estudo apresenta grande conteúdo de altas frequências. Foi observado nos domínios I, III e IV, as características mapeadas nos mapas anteriores, tanto a direção das estruturas indo de NW-SE a N-S, a oeste da região, como o

dobramento na região sul do domínio III. Este domínio apresentou um *background* positivo. Portanto, com os temas gerados até o momento, a região apresenta as melhores características para um estudo regional de maior resolução para prospecção de grafita. Por estar em região de metamorfismo, com áreas com menores valores de susceptibilidade magnética e já apresentarem ocorrências de grafita mapeadas.

### **6.1.5 Diferença da Continuação Ascendente**

A diferença da continuação ascendente foi a técnica analisada em seguida. Para ser criado este produto, foram feitas filtragens, simulando alturas acima das adquiridas em 100 e 200 metros (figura 6.7).



**Figura 6.7** - Produtos da continuação para cima, com alturas somadas de 100 e 200 metros, à esquerda e direita, respectivamente.

Analisando os dois temas, é possível perceber que, quanto maior a continuação para cima, maior será a remoção das altas frequências. E assim, o mapa de campo anômalo perde cada vez mais seu aspecto de rugosidade.

Para o dado estudado, o filtro de continuação ascendente ajuda na afirmação de que o dado apresenta um conteúdo de altas frequências, que possivelmente não é gerado por nenhuma fonte geológica e sim algum tipo de ruído. O filtro da continuação para cima funciona como uma passa baixa. Assim, quando se subtrai dois filtros com “alturas de fonte” distintas,

o produto se assemelhará a um filtro passa banda. Este produto evidencia as fontes com menores profundidades. Sendo assim, é possível descrever que uma grande parcela das anomalias do domínio IV estão localizadas em baixas profundidades. O mesmo pode ser descrito para os lineamentos do domínio I e II.

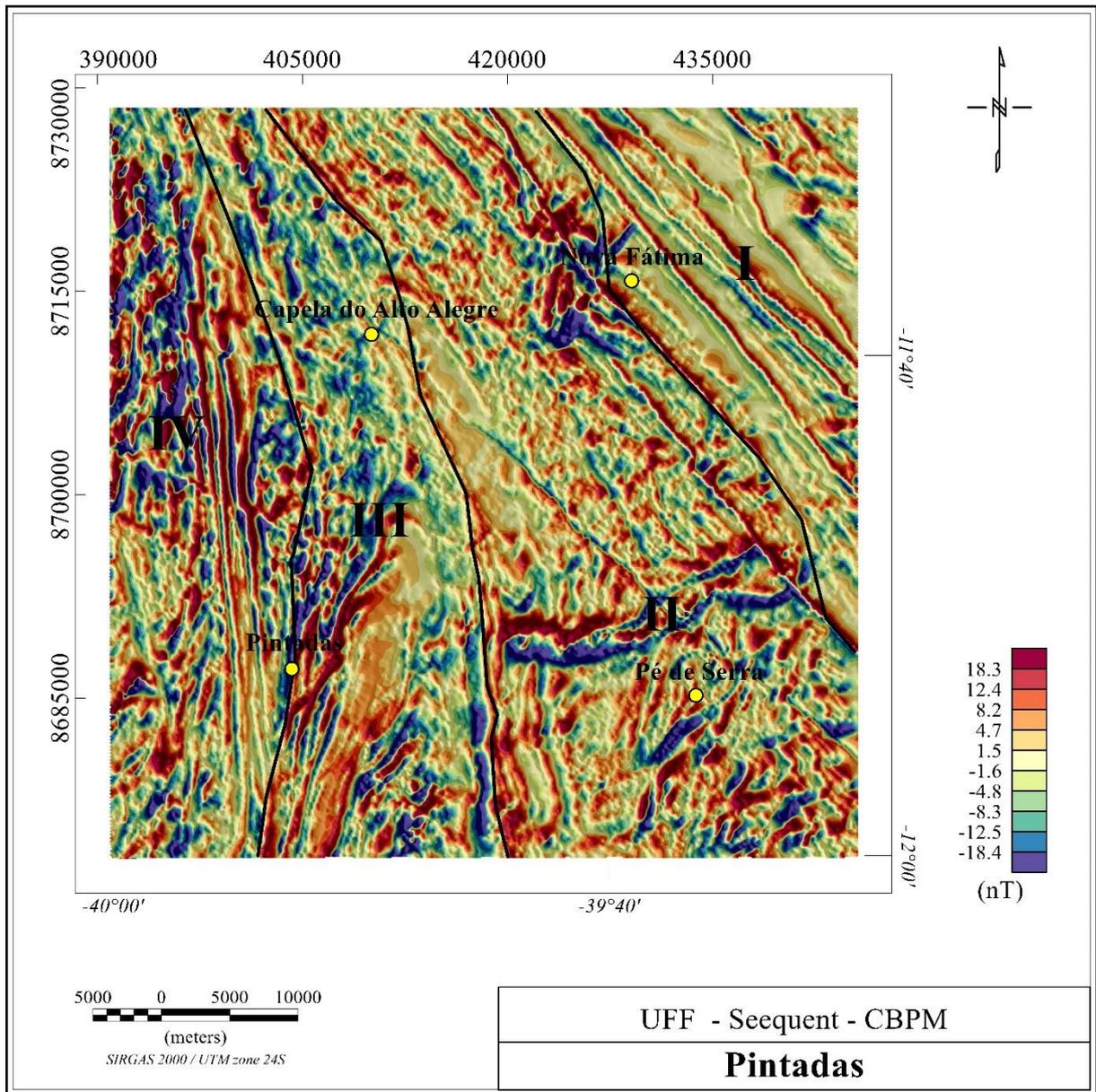


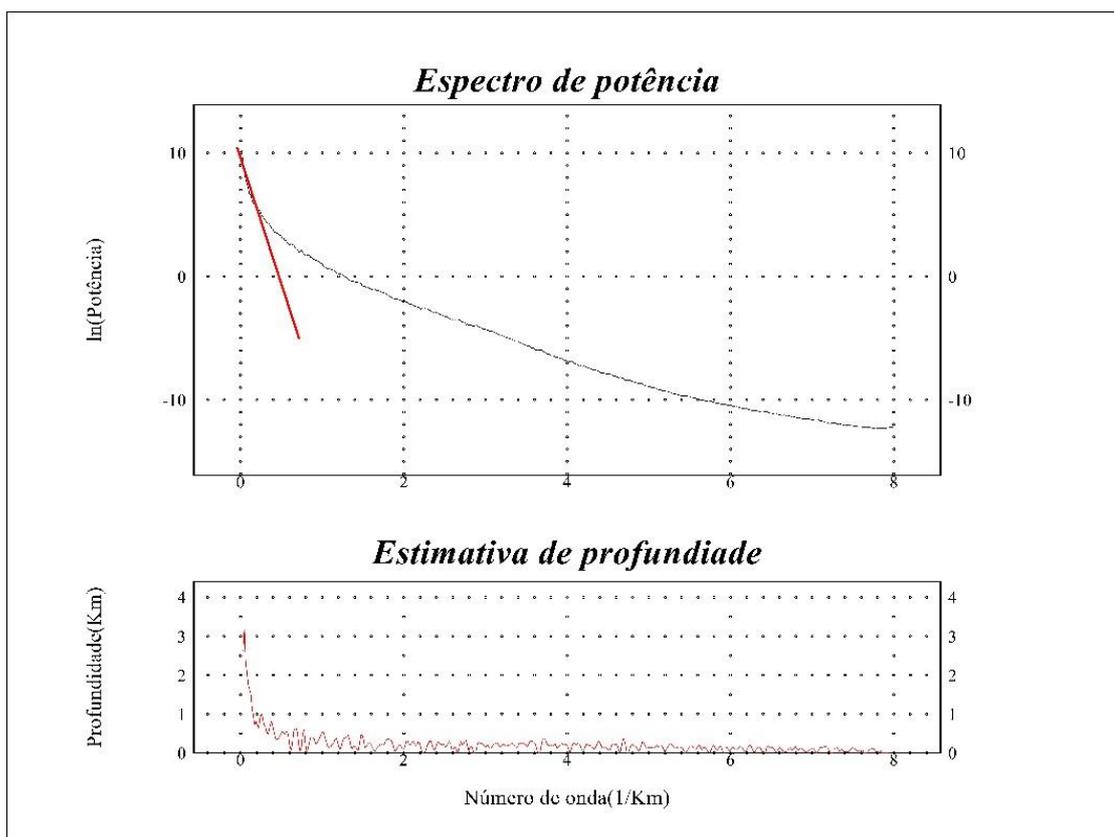
Figura 6.8 - Mapa da diferença da continuação ascendente.

### 6.1.6 Separação Regional/Residual

Para um melhor entendimento da origem das anomalias mapeadas pelos diversos mapas gerados, realizou-se uma análise espectral do dado magnético. Através da ferramenta

MAGMAP, contida no Oasis Montaj, foi produzida uma separação regional/ residual, levando em conta o espectro no domínio de Fourier (WINOGRAD, 1978).

Foram interpretadas duas faixas de profundidade distintas no espectro de potência (figura 6.9), a primeira a uma profundidade de cerca de 3 km e a segunda com fontes numa faixa de menos de 1 km de profundidade.

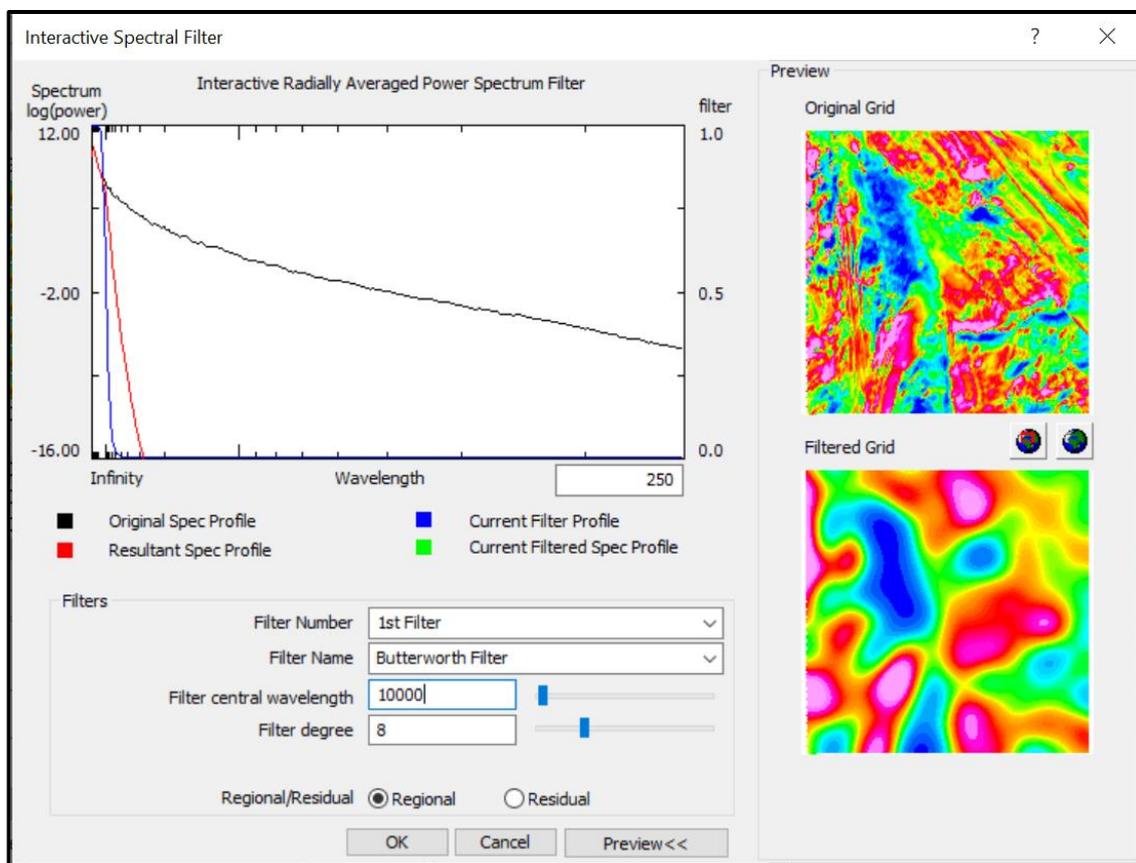


**Figura 6.9** - Espectro de potência ponderado radialmente para o CMA.

A partir da análise deste espectro foi feita uma separação no primeiro ponto de inflexão da função. Segundo Reeves (2005) é possível, através desta separação, dividir a faixa do sinal correspondente às fontes mais profundas (regional) e a correspondente às fontes mais rasas (residual). A aplicação deste filtro pode ser visualizada na figura 6.10.

Com o mapa regional criado, realizou-se a subtração entre o CMA e grid regional, tendo como resultado o grid residual exibido na figura 6.11. No domínio III, região que demonstrou ser de maior interesse (Figura 6.2), ocorre uma anomalia magnética no mapa

regional, com um comportamento sinuoso mais ao sul, que pode ser evidenciado até em fontes mais rasas no mapa residual.



**Figura 6.10** - Aplicação do filtro passa baixa, para criação do grid regional.

Além disso, foi concluído que os lineamentos magnéticos, encontrados nos domínios I e IV são, predominantemente, gerados por fontes rasas, pois são bem delimitados no mapa residual e o mesmo não pode ser interpretado no regional. Já no domínio II, existe uma grande quantidade de anomalias em ambos os mapas, o que mostra que, possivelmente, existe uma continuidade das fontes até menores profundidades, ou que, de alguma forma, o material magnético migrou de maiores profundidades até regiões perto da superfície, possivelmente por atividades tectônicas. No mapa residual, é possível visualizar no domínio IV o mesmo comportamento encontrado no domínio II, em sua região mais à norte, onde apresentou uma grande quantidade de anomalias dipolares, próximo aos lineamentos já descritos.

De forma geral, o dado exhibe resposta de fontes não tão profundas, com profundidades não superior a 1 Km, e sua separação pode ter outras interpretações, mas foi possível

interpretar a tendência NW-SE nos lineamentos magnéticos e a região de dobramento, na porção sul da área de estudo.

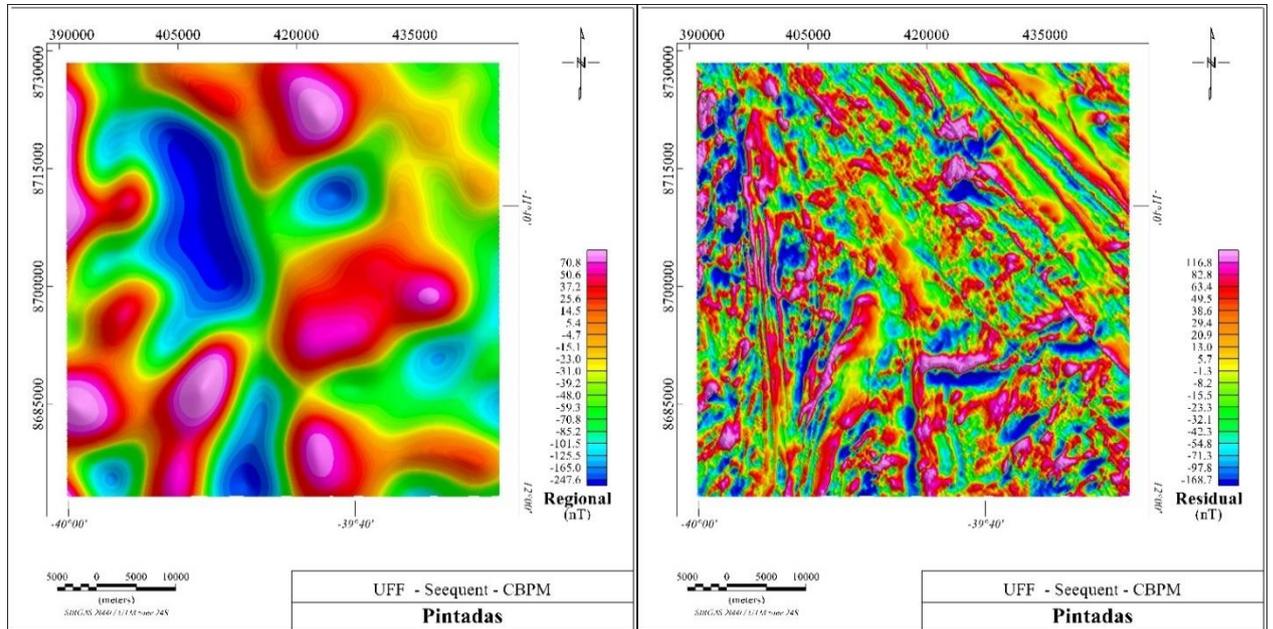


Figura 6.11 - Produtos regional e residual, à esquerda e direita, respectivamente.

## 6.2 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGAMAESPECTOMÉTRICOS

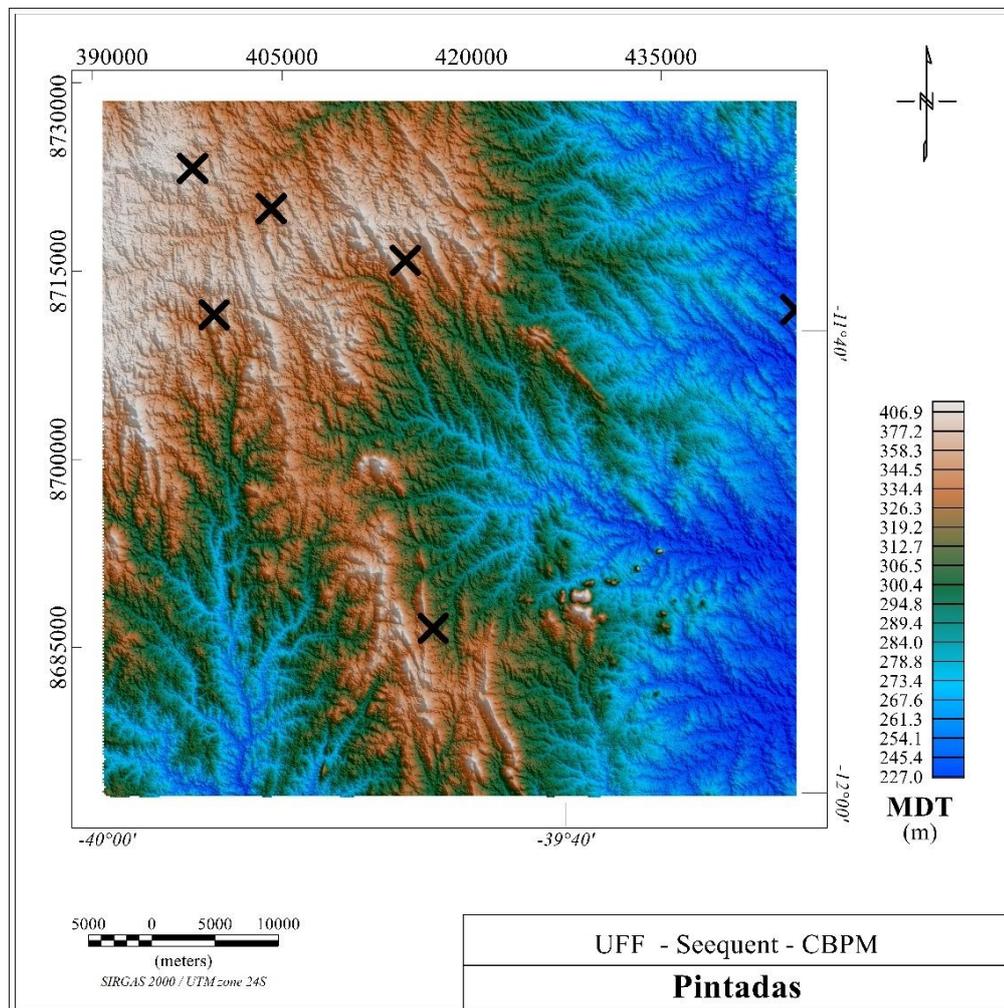
Serão discutidos nesta sessão todos os produtos gerados pelo processamento dos dados aerogamaespectrais. Como já descrito, o levantamento gamaespectrométrico aéreo tem pequena penetração de leitura, correspondendo, na maior parte dos casos, apenas à rocha exposta em superfície ou a poucos centímetros abaixo. Sendo assim, o estudo deste método, foi empregado junto aos mapas topográfico e geológico da região.

Foram gerados mapas para cada canal de elemento estudado, K, Th e U. Para, em seguida, analisar o mapa ternário e as razões que trouxeram relevância para a pesquisa. Além disso, serão mostrados alguns fatores que contribuíram para a não utilização de determinados produtos ou que dificultaram a interpretação final.

### 6.2.1 Modelo Digital de Terreno (MDT)

A partir da visualização do modelo digital de terreno (figura 6.12), foi possível correlacionar as ocorrências de grafita a altos topográficos. Na figura 6.12, foram plotadas

todas as ocorrências mapeadas na região e com exceção da que se encontra no extremo leste da área mapeada, todas estão localizadas em regiões de maiores altitudes. O que deve ser consequência de sua associação com litologia resistente aos processos erosivos. Algo que deve ser levado em conta para a análise de alvos exploratórios.



**Figura 6.12** - Mapa do modelo digital de terreno plotado com as ocorrências de grafita da região.

Já para a interpretação conjunta com os dados radiométricos, é importante ressaltar que o tório, por ser um elemento menos móvel, tende a estar correlacionado aos maciços expostos em superfície, enquanto o potássio e urânio, mais móveis, estão relacionados aos vales e aos leitos de rios e drenagens (BELÉM, 2006).

### **6.2.2 Potássio**

O primeiro mapa temático de gamaespectrometria obtido foi o mapa da concentração de Potássio anômalo percentual ( $^{40}\text{K}$ ) (figura 6.13), onde as anomalias com maiores concentrações foram apresentadas nas cores vermelha e rosa, enquanto as de concentrações menores estão em tons azulados. Ao compará-lo ao modelo digital do terreno, não é possível perceber uma grande correlação. Mesmo o potássio sendo um elemento consideravelmente móvel, ele não apresenta um padrão de concentração junto aos vales e leitos dos rios da região.

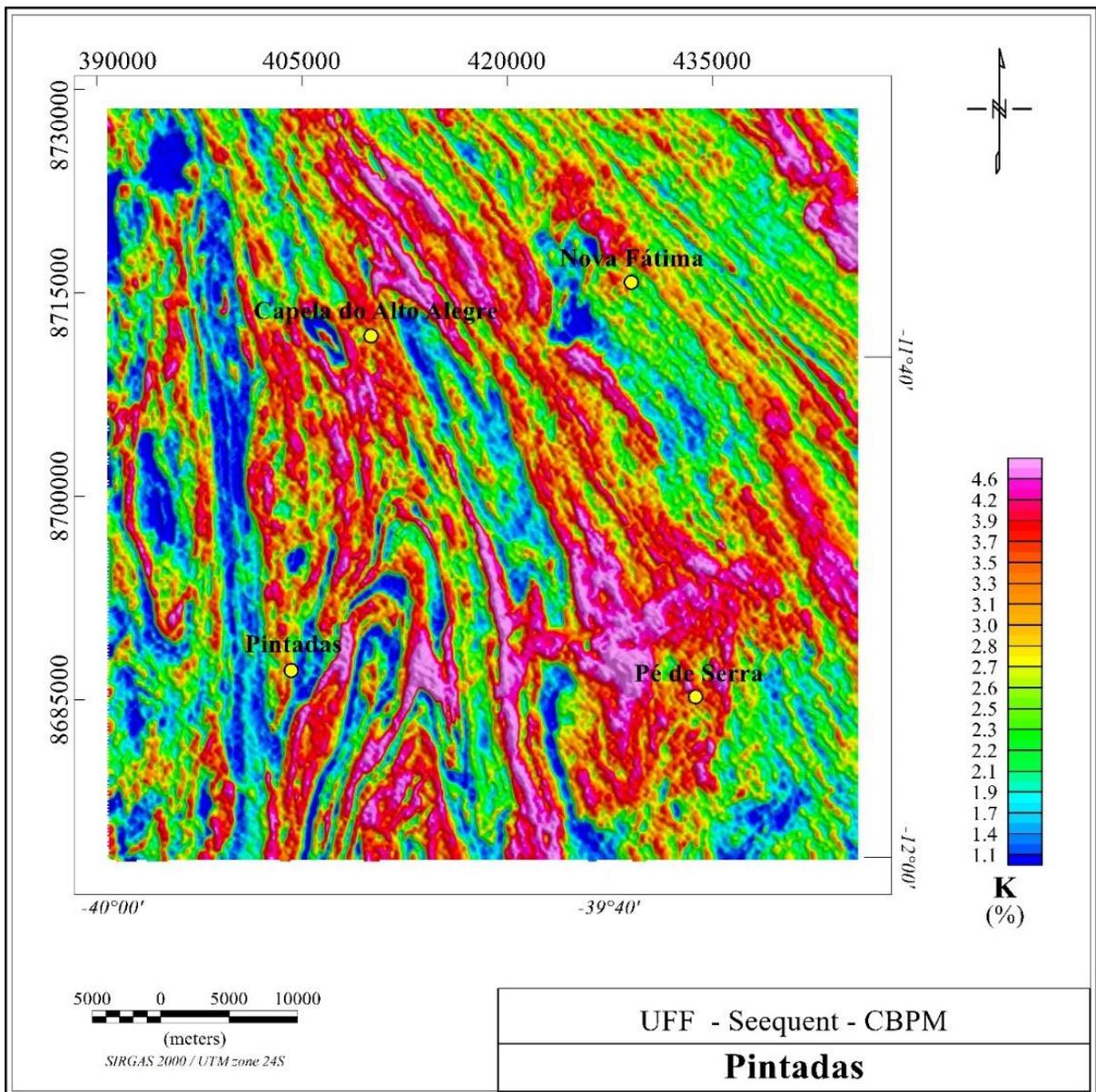
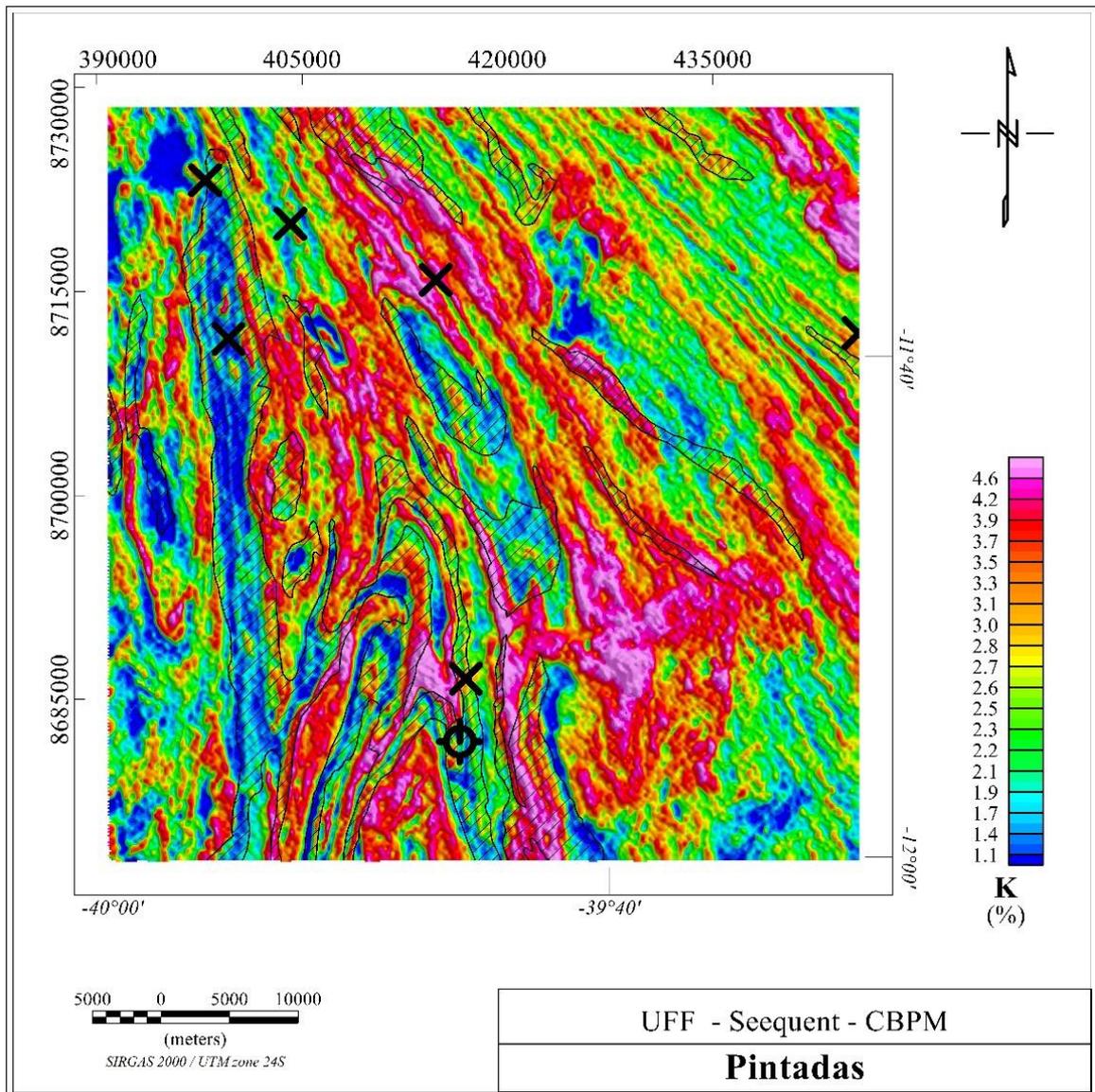


Figura 6.13 - Mapa de percentual de potássio.

As maiores partes das anomalias positivas seguem uma tendência NW–SE, o que pode ser relacionando ao contexto geológico-tectônico da região. Além disso, a região apresenta diversas intrusões graníticas, tanto sin como pós tectônicas, que vão em sua maioria, apresentar altos valores de potássio. Na região mais ao sul, as anomalias apresentam uma tendência mais circular o que pode ser relacionado à região de dobramento que existe na área. A mesma, pode ser visualizada através do mapa geológico no complexo Tanque Novo – Ipirá (Figura 6.14).

O Domínio I apresento o que tectonicamente o que poderia ser o núcleo da zona de cisalhamento com todas as unidades litológicas orientadas NW-SE ao longo do eixo máximo de estiramento ( $\lambda$  1). O domínio II, região de borda da zona de cisalhamento onde se observam dobras regionais de flancos estrados, mas ainda preservando regiões de charneira. Na parte sudeste, há uma anomalia pronunciada WSW-ESE que corta as dobras rompidas e que aparece em outros mapas gerados. O alto teor de potássio possivelmente é relacionado com a granitogênese orogênica mais intensa nesse domínio em relação ao domínio I. Já o Domínio III visualiza-se predominância de dobramentos com geometrias que sugerem feições de redobramento. As anomalias de potássio sugerem granitogênese em regiões de charneiras de dobras, assim como ao longo de flancos, próximos às charneiras. As ocorrências de grafita indicam que as áreas de baixo potássio estão associadas a granulitos para derivados da Formação Tanque Novo-Ipirá. Podendo assim ter interferido na geometria da deformação, visto que este domínio a sul está orientado N-S e progressivamente rotacionou para NW-SE junto aos domínios I e II de estiramento. Para o Domínio IV, foi caracterizado como um domínio de cisalhamento, porém com estiramento N-S configurado por anomalias de baixo potássio que ocorrem em maior intensidade em relação aos outros domínios. Nesta parte da área estão presentes os granulitos máficos-ultramáficos da Suíte São José do Jacuípe e que são derivados de basaltos e Peridotitos da crosta toleítica e do manto litosférico continental. Estes granulitos máficos-ultramáficos estão orientados em conjunto com os paraderivados do Complexo Tanque Novo-Ipirá e os charnockitos do Complexo Caraíba.

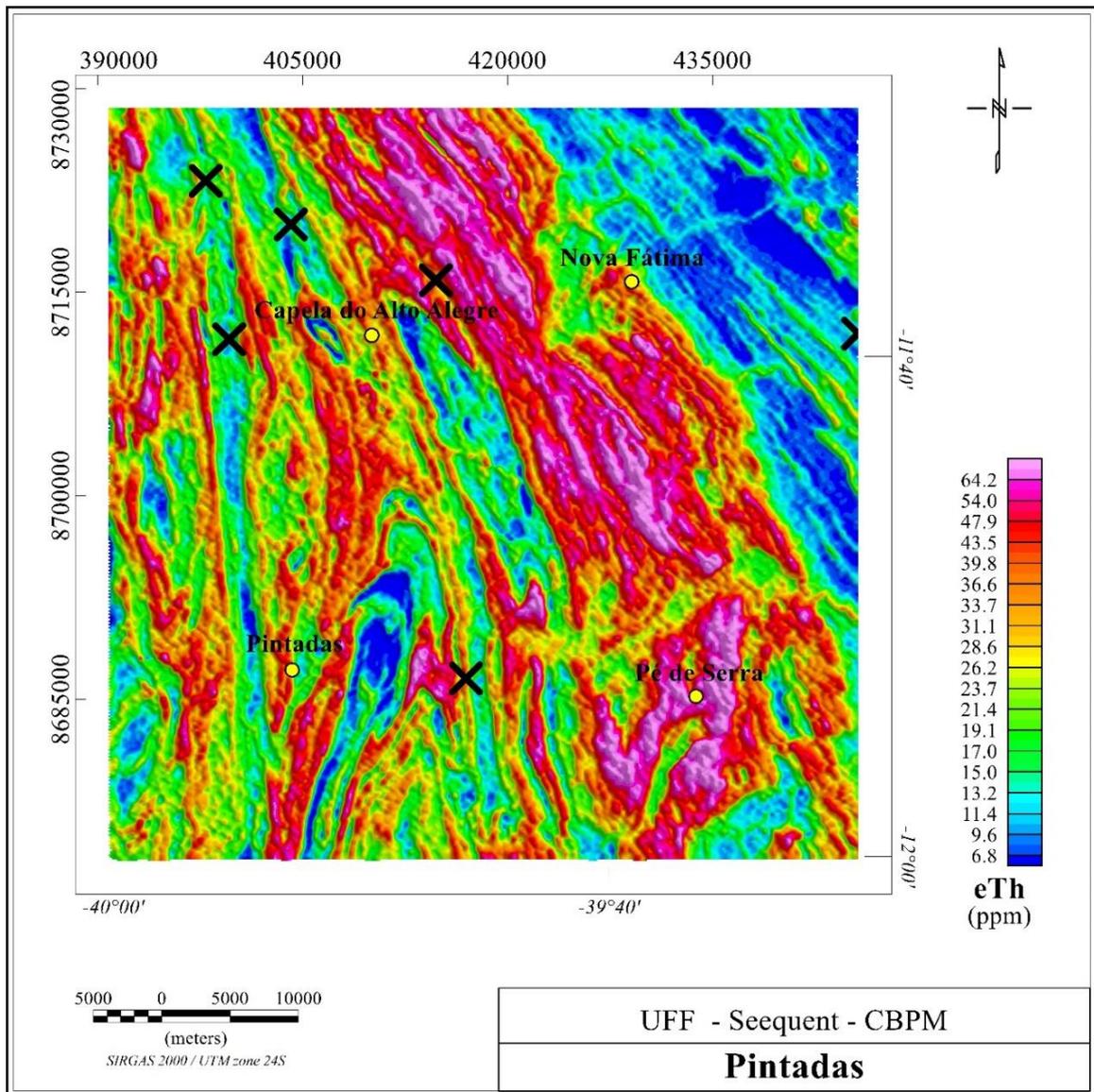
Na região do Domínio III foi adquirido o levantamento elétrico e realizado furo de sondagem e, como pode ser visto na figura 6.14, o furo está localizado em uma região de anomalia de baixo percentual de potássio. Em sua maioria, as ocorrências de grafita estão relacionadas ao complexo Tanque Novo – Ipirá e estas regiões foram caracterizadas por baixas concentrações de potássio.



**Figura 6.14** – Mapa de percentual de potássio, plotado com as ocorrências de grafita, furo de sondagem e complexo Tanque Novo – Ipirá (área hachurada).

### **6.2.3 Tório**

A partir do mapa gerado do canal de tório (figura 6.15), mais uma vez não foi possível realizar uma boa correlação entre os altos topográficos e valores anômalos de tório. Como visto no mapa de potássio, existe uma tendência NW-SE para as anomalias de concentração do radioelemento, o que pode ser explicado pelos diversos granitoides presentes na região que apresentam esta mesma tendência.



**Figura 6.15** - Mapa de concentração de tório.

Na área mais ao sul, as anomalias de tório apresentam o mesmo comportamento de dobra interpretado no canal de potássio. Quando plotadas as ocorrências de grafita, é possível visualizar que, em sua maioria, estão em regiões com baixos valores de tório ou perto a bordas de anomalias positivas.

A região nordeste do mapa apresenta um grande baixo na concentração do radioelemento, o que pode ser correlacionado a uma região com menos intrusões graníticas e com predominância de rochas do complexo Caraíba. Vale ressaltar que o mapa geológico utilizado para a pesquisa tem escala de 1:1.000.000, o que não permite uma correlação em

detalhe com os mapas geofísicos, sendo utilizado apenas para um entendimento regional do contexto geológico/tectônico da região.

### 6.2.4 Urânio

Na figura 6.16 é possível visualizar o mapa de concentrações de urânio. Entre os três canais estudados, o canal de urânio foi o que apresentou maior interferência por ruído. O que pode ter sido gerado na etapa de aquisição ou de pré-processamento.

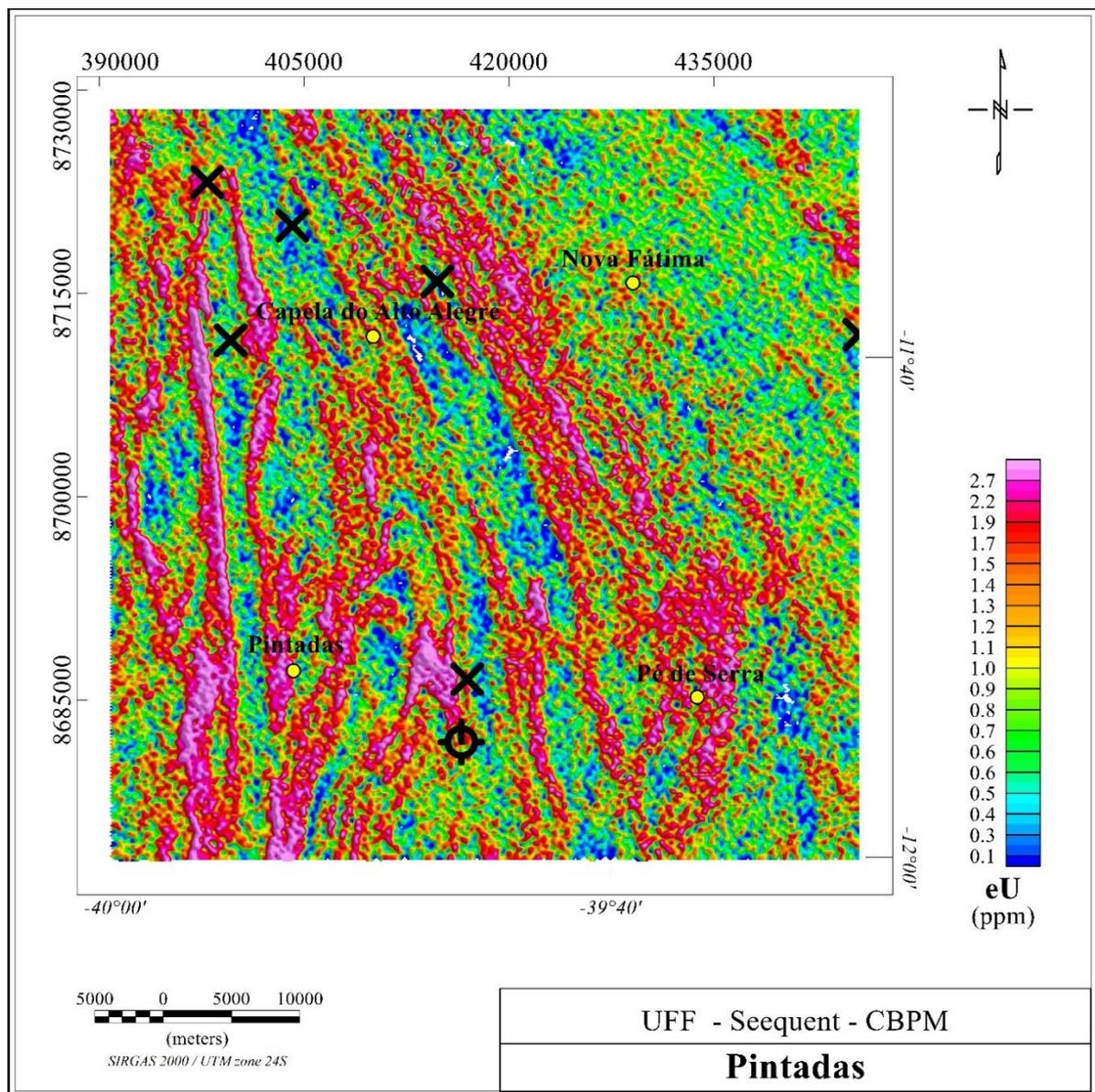


Figura 6.16 – Mapa de percentual de urânio, plotado junto às ocorrências de grafita e furo de sondagem.

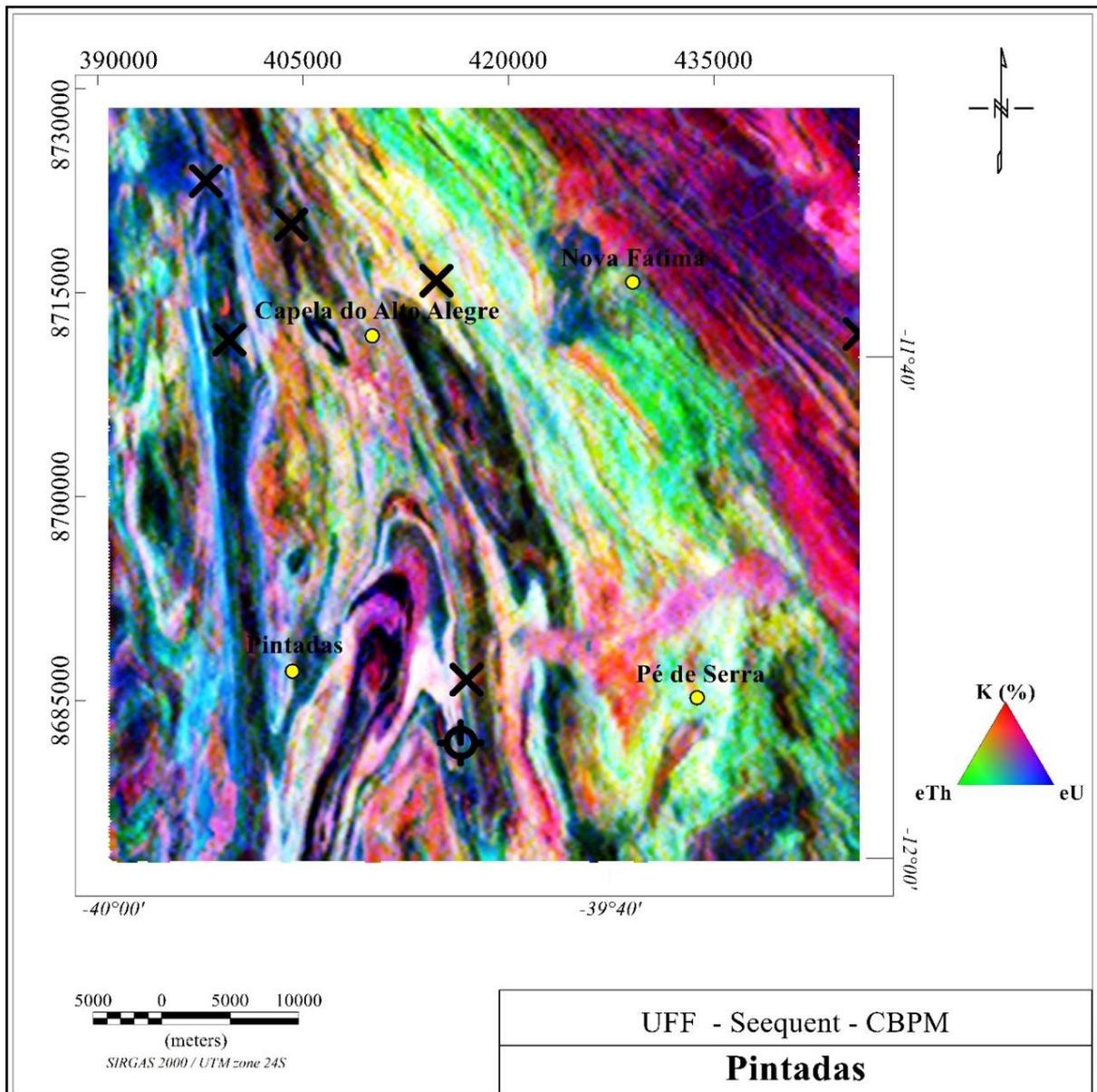
Em função de o urânio ser o elemento mais móvel entre os três, apresenta menores concentrações entre os canais estudados, o que também ajuda na interferência por valores errôneos. Os altos valores de concentração de urânio respeitam uma tendência N-S/NW-SE.

Mais ao sul, como visto nos demais mapas, existe um comportamento mapeado como uma dobra tectônica do Domínio III. Nesta mesma área, existe uma anomalia positiva nos três canais estudados, onde é bordejada por uma ocorrência de grafita e o estudo de detalhe realizado pela CBPM. O que pode caracterizar um bom alvo exploratório para um estudo com maior resolução.

### **6.2.5 Mapa Ternário**

Um mapa ternário é composto pelos por diferentes dados de uma mesma região, onde a cada um dos canais será atribuído uma determinada cor. Nesta pesquisa, foi utilizada a distribuição de cores RGB, onde vermelha foi atribuída para o potássio, a verde para o tório e a azul para o urânio.

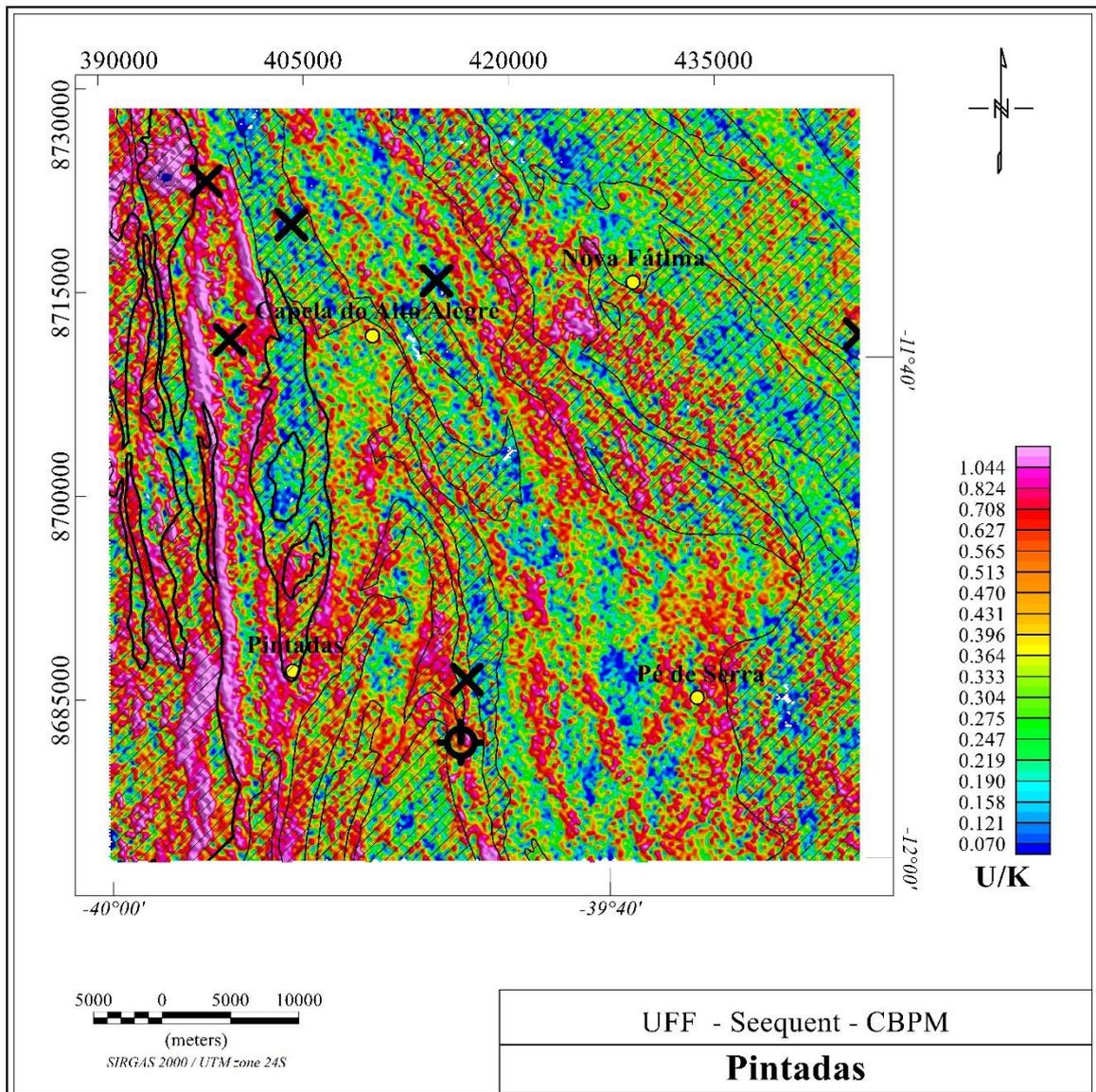
Através da análise do mapa ternário (figura 6.17) foi capaz de corroborar as conclusões que tinham sido inferidas para cada canal separadamente. A região mais a nordeste teve predominância de um tom mais avermelhado, o significa alto teor de potássio, o que está relacionando com a unidade Caraíba, que pode apresentar ortognaisses cálcio-alcalinos com de alto K. Já na região centro-leste a cor predominante é a verde, relacionada ao tório, que pode ser correlacionando aos granitoides que interrompem a continuidade do complexo Caraíba. Já a região oeste, que apresenta tanto o complexo caraíba como intercalações da Suíte São Jose do Jacuípe e Complexo Tanque Novo – Ipirá, pode explicar a predominância de tons azulados, relacionados à alta concentração de urânio. Essa presença de urânio pode ser atribuída à uma matéria orgânica de origem marinha, o que explicaria a predominância deste elemento. As cores podem sofrer superposição, isso explica os tons mais escuros e outros tendendo ao branco. Regiões com baixos teores dos três elementos vão ser caracterizadas por cores mais escuras, enquanto o oposto, será caracterizado por tons mais claros. Como descrito no mapa de urânio, na região mais ao sul do Domínio III, existe uma anomalia dos três elementos, região onde pode ser interessante realizar um estudo de maior resolução. No presente trabalho, na parte sul desta anomalia foi realizado uma pesquisa de detalhe e semidetalhe que ainda será descrita neste capítulo.



**Figura 6.17** - Mapa ternário da região de Pintadas, plotado com as ocorrências de grafita e furo de sondagem.

### **6.2.6 Razões U/K, U/Th e Th/K**

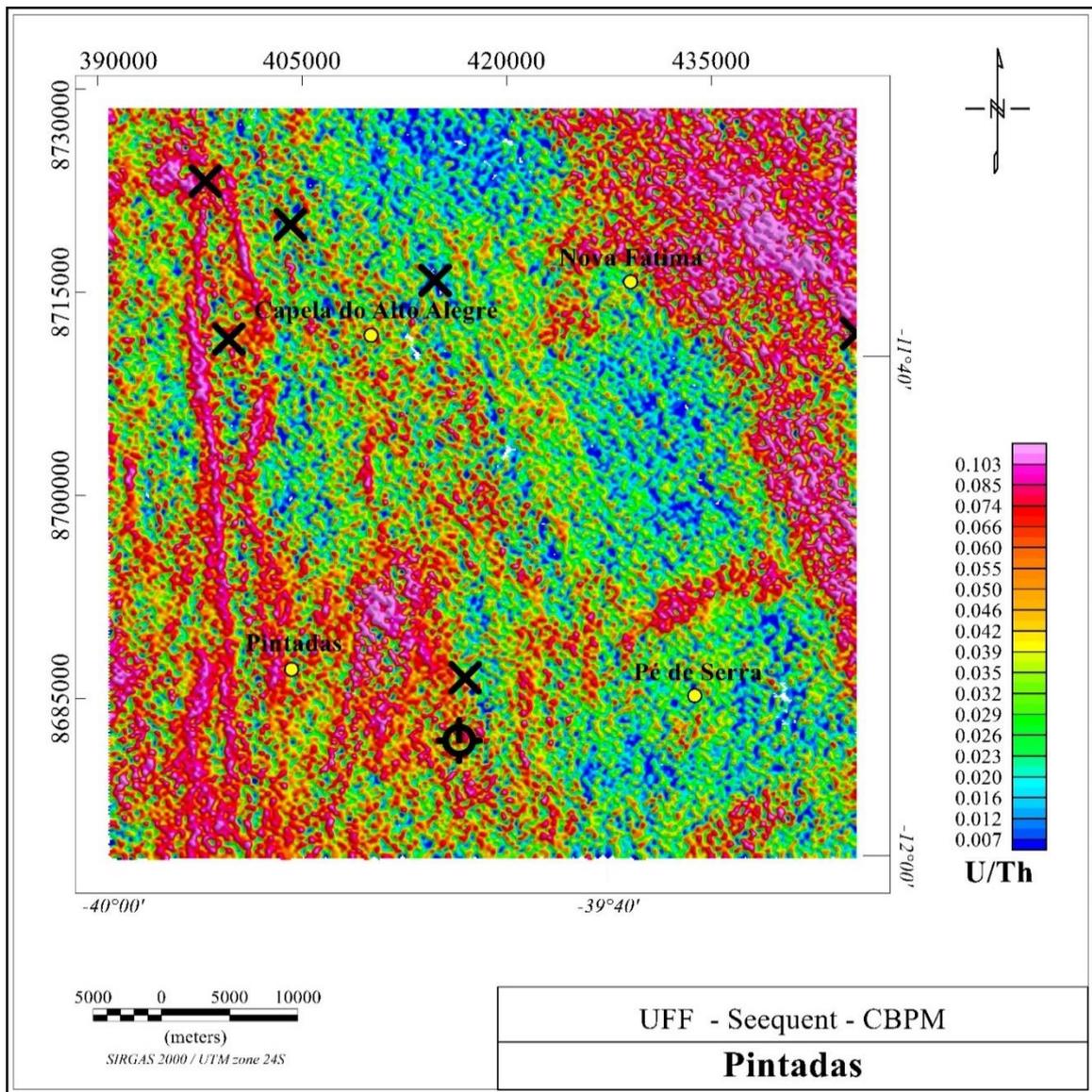
Foram utilizados mapas de razão entre elementos na procura de encontrar tendências que poderiam ser correlacionadas com as ocorrências de grafita já mapeadas, gerando assim, mapas de razão entre urânio e potássio (U/K), urânio e tório (U/Th) e tório e potássio (Th/K), como pode ser visualizado nas figuras 6.18, 6.19 e 6.20, respectivamente.



**Figura 6.18** - Mapa de razão U/K, plotado com as ocorrências de grafita, o Complexo Caraíba (área hachurada) e a localização do furo de sondagem. Fonte: Autor.

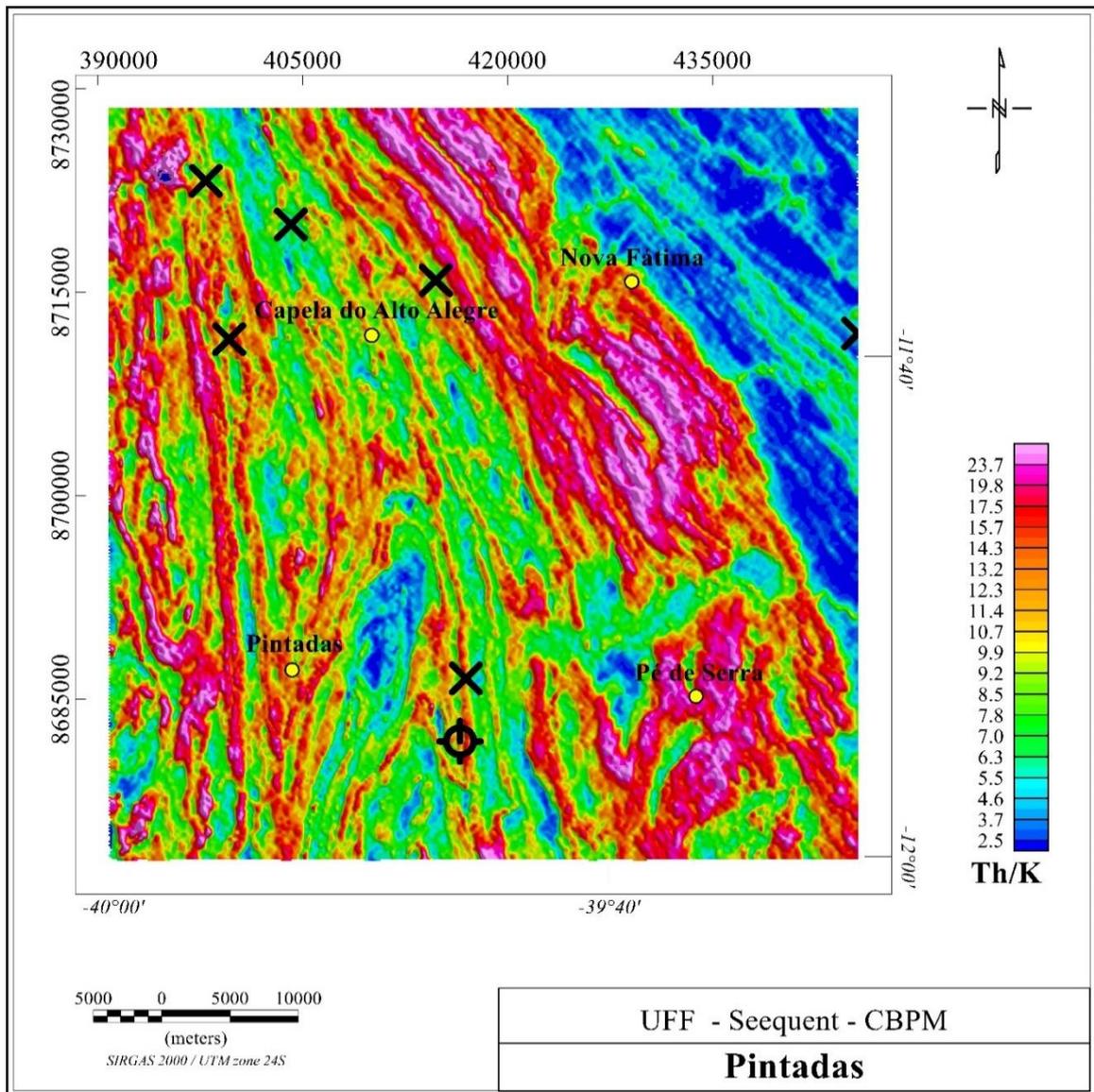
Os mapas com a presença de urânio, como foi descrito anteriormente, apresentam ruído acentuado, tornando a interpretação difícil e ambígua. Como proposto por Susin (2019), o estudo da concentração de tório e urânio para a prospecção de grafita pode ser determinante para o entendimento da matéria orgânica que deu origem a aquele depósito. Mas por apresentar grande nível de valores espúrios, o mapa de U/Th, não foi utilizado. Já no mapa de razão Th/K é possível fazer um estudo de correlação com a litologia da região. O Complexo Caraíba apresenta grandes concentrações de potássio o que gera um valor baixo na razão Th/K. Já os granitoides que intercalam essa unidade, apresentam altos valores de

tório. A Suíte São José do Jacuípe que é composta por uma associação de rochas máficas-ultramáficas, de caráter plutônico, também apresenta altos valores de tório.



**Figura 6.19** – Mapa de razão U/Th, plotado com as ocorrências de grafita e furo de sondagem.

O complexo Tanque Novo – Ipirá, onde se encontram as formações grafíticas de interesse neste estudo, apresentaram consideráveis valores de tório no mapa de razão de U/Th o que pode ser utilizado, segundo KLAJA & DUDEK (2016), para determinar o tipo de ambiente de sedimentação, quando comparado às concentrações de urânio. Esta relação mostra que elevados valores da razão são típicos de ambiente marinho, enquanto o contrário, de ambientes continentais.



**Figura 6.20** - Mapa de razão Th/K, plotado com as ocorrências de grafita e furo de sondagem.

### 6.3 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DO LEVANTAMENTO ELÉTRICO

Nesta seção serão apresentados os resultados gerados a partir dos dados de eletrorresistividade e polarização induzida. Um total de 8 seções foram reproduzidas no presente trabalho, 4 de resistividade aparente e 4 de cargabilidade aparente, duas seções para cada linha adquirida. Essas linhas, serão denominadas pela sua posição com referência ao eixo Y, sendo assim, de sul para norte, L8681900, L8682100, L8682300, L8682500. As linhas adquiridas podem ser visualizadas na figura 6.21.

Junto ao mapa de localização já apresentado na metodologia, foi plotado o mapa geológico de detalhe, também cedido pela CBPM (figura 6.21). Este mapa, a partir do mapeamento geológico de detalhe (1:5000) ao longo que foi de extrema importância para a correlação entre as seções geofísicas e o furo de sondagem.

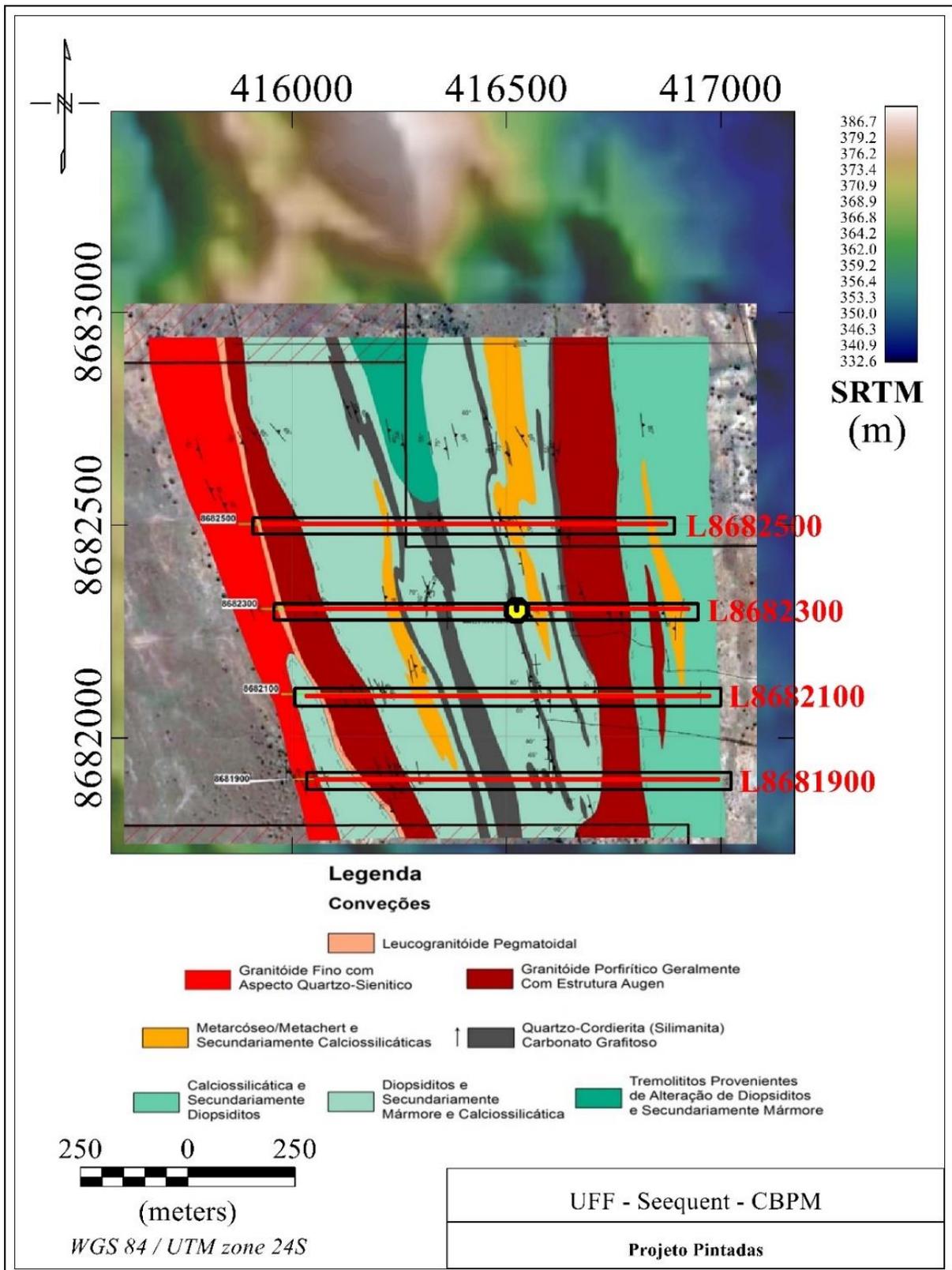
Para a interpretação das seções geoeletricas, o VOXI foi escolhido para a inversão dos dados geofísicos, onde, inicialmente, foram invertidos os dados de voltagem para serem geradas as seções de resistividade/condutividade e, depois, usando a seção de condutividade como vínculo, para gerar as seções de cargabilidade aparente.

Vale ressaltar que na região foram mapeados carbonatos grafitosos, unidade litoestratigráfica alvo para o mapeamento em subsuperfície. Como já descrito, a grafita é um mineral condutivo, sendo assim esperado baixos valores de resistividade. Além disso, granitoides tendem a apresentar características de altos valores de resistividade, o que ajuda na delimitação entre as duas zonas.

Para mitigar a ocorrência de ruídos e corpos sem correlação com a geologia do local, optou-se por inverter uma seção de cada vez, em um modelo pseudo 2D. Onde a linha foi invertida com a menor largura possível para evitar criação de estruturas com continuidade lateral, que não teriam a possibilidade de ser amarradas com algum outro dado em subsuperfície. Com relação à profundidade de imageamento, respeitando  $AB/3$ , profundidades até 50 metros são confiáveis para interpretação, todas as seções foram cortadas até 70 metros, por conta da diferença topográfica entre regiões da mesma linha e possibilitar uma margem para interpretação em profundidades perto dos 50 metros.

### **6.3.1 Interpretação das Seções de Eletorresistividade**

Inicialmente, os resultados da inversão foram exportados para um banco de dados e comparados com os valores de entrada do modelo, para ser possível inferir o quão ajustado o modelo calculado estava em relação ao observado. Na figura 6.22, pode ser visto o gráfico dos perfis dos valores de resistividade observada e calculada, voltagem observada e calculada e o erro obtido. A inversão demonstrou valores condizentes com os observados e uma faixa satisfatória para o erro, não ultrapassando os 5%, como haviam sido pré-definidos na metodologia.



**Figura 6.21** - Mapa de localização das linhas do levantamento elétrico com o mapa geológico de detalhe (CBPM), furo de sondagem e polígonos das áreas onde foram feitas as inversões geofísicas.

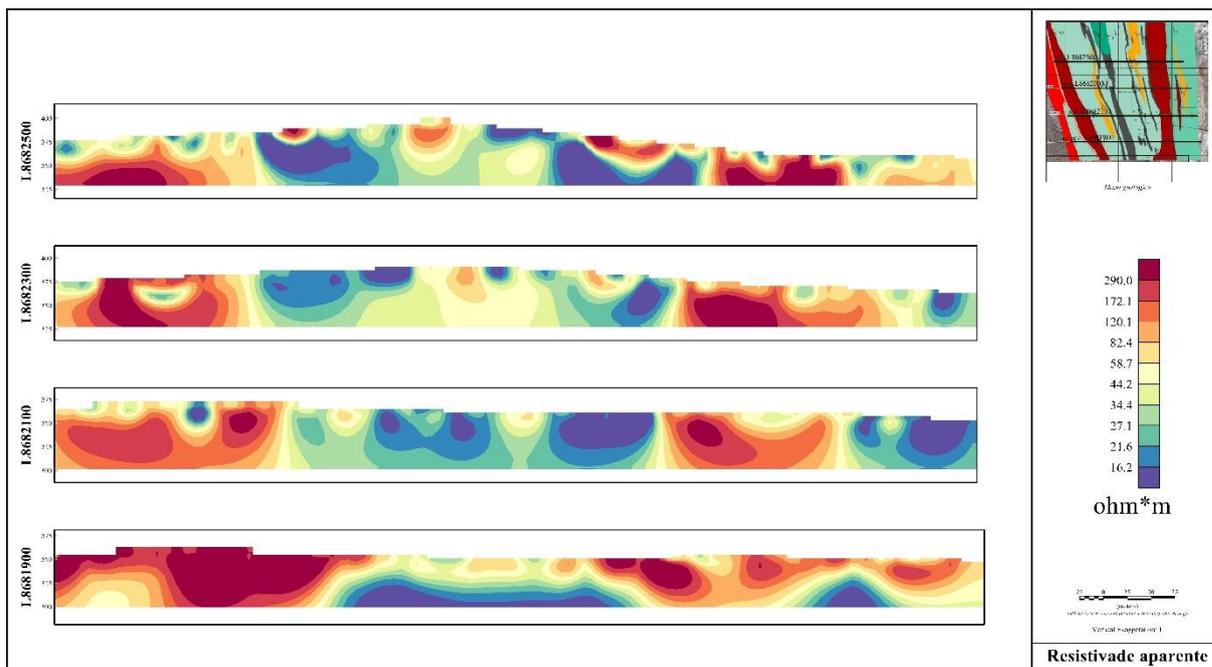
Foram geradas as 4 seções de resistividade, como pode ser visto na figura 6.23. Todas as linhas foram plotadas em um mesmo mapa, utilizando da mesma escala de cor e distribuição de valores. As cores mais avermelhadas foram atribuídas para valores elevados de resistividade e as cores mais azuladas para os menores valores. Como a condutividade elétrica é o inverso da resistividade, baixos valores de resistividade significam regiões condutivas.



Figura 6.22 - Perfis de ajuste do modelo de resistividade para a linha L8682300.

Os resultados foram analisados a partir da linha mais ao norte em direção ao sul. Inicialmente, a seção L8682500, apresentou em suas extremidades, picos de resistividade ultrapassando valores de 290 ohm.m. Já na região central foram observadas regiões resistivas próxima a superfície e diminuição na resistividade com o aumento da profundidade. Foram interpretados pelo menos dois corpos condutivos em subsuperfície, onde os valores de resistividade chegaram a valores menores que 30ohm.m.

Na seção L8682300, observou-se comportamento semelhante à seção anterior, onde os corpos condutivos se tornaram cada vez menos resistivos com o aumento da profundidade. No extremo leste da seção foi encontrado um baixo de resistividade que não tinha sido visualizado na seção anterior.



**Figura 6.23** - Mapa com as seções empilhadas de resistividade aparente.

Analisando a terceira seção, os corpos condutivos na região central voltam a ser contínuos. Algo também observado em outras seções é que alguns corpos são contínuos em subsuperfície, mas em superfície aparecem fracionados por outras anomalias, mais resistivas. Na região extremo leste, o corpo condutivo mapeado na linha L8682300, apresentou maiores valores de condutividade além de se estender por uma maior área.

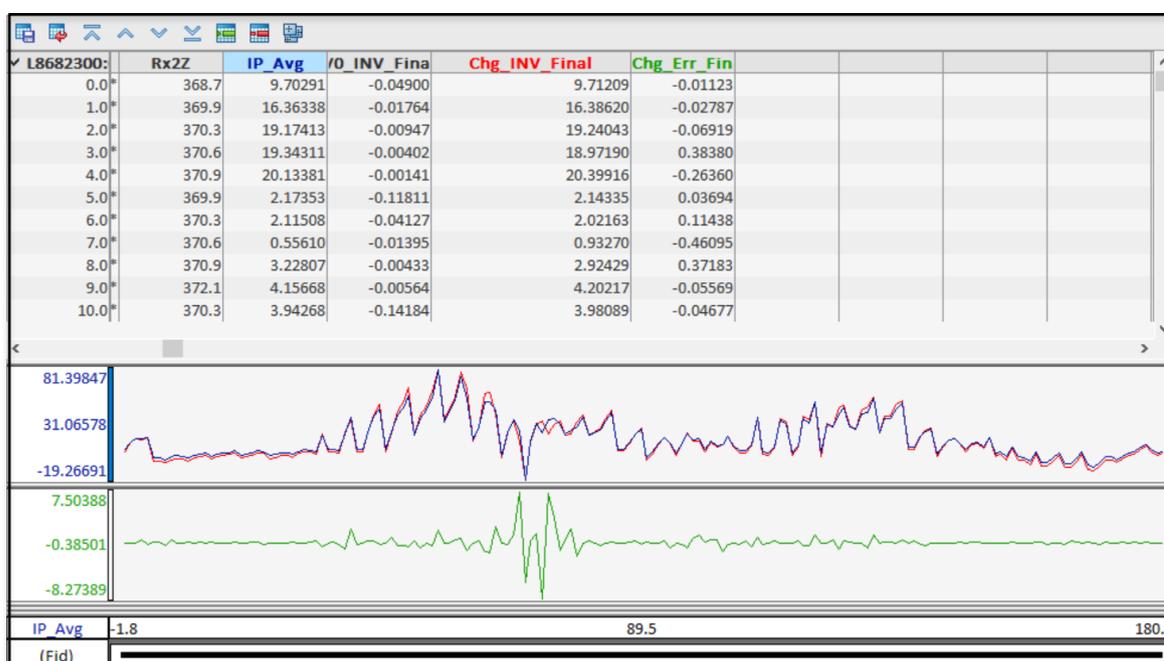
Por último, a seção L8681900 apresentou regiões com altos resistivos ultrapassando valores de 1000 ohm.m. As anomalias resistivas ganharam extensão e não foram mapeados baixos valores de resistividade em superfície. Os menores valores de resistividade foram encontrados em maiores profundidades do que nas linhas anteriores. O que pode demonstrar um mergulho dos corpos condutivos.

### **6.3.2 Interpretação das Seções de Polarização Induzida**

A aplicação do método IP é análoga à do método de eletrorresistividade, sendo indicado em casos de minerais disseminados. Por conta de a região apresentar corpos contínuos, o método de eletrorresistividade já demonstrou grande efetividade no mapeamento geofísico para entender o comportamento geológico das ocorrências. Além disso, como já descrito, regiões com baixos valores de resistividade tendem a apresentar altos valores de

cargabilidade. Como ocorrido na inversão das seções de resistividade, as de cargabilidade demonstraram um bom ajuste, como pode ser visto na figura 6.24, apresentando um erro médio de menos 5%.

Para a interpretação das linhas de cargabilidade aparente, foi adotada a mesma metodologia de empilhamento para uma melhor visualização da possível continuidade na direção N-S das anomalias (figura 6.25), utilizando a mesma escala de cor e distribuição de valores para todas as seções, sendo os baixos valores de cargabilidade representados em tons azulados e os altos em tons avermelhados.



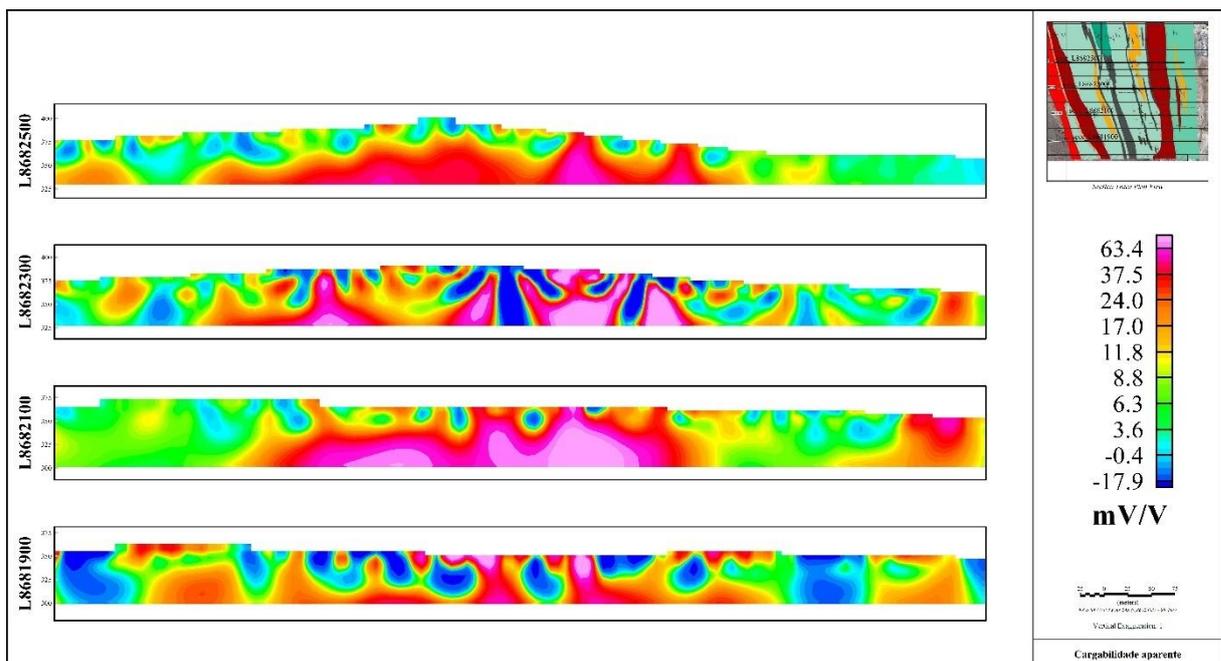
**Figura 6.24** - Perfis de ajuste do modelo de resistividade para a linha L8682300.

Foi possível correlacionar a maior parte das anomalias condutivas com as de alto valor de cargabilidade. O que mais se alterou foi a direção de mergulho de cada anomalia. Como já evidenciado pela resistividade, a região apresenta anomalias de cargabilidade alta em todas as regiões centrais de cada seção, sendo que nas áreas adjacentes existe um grande contraste de propriedade elétrica, podendo significar uma mudança de geologia local.

As seções L8682300 e L8682100, apresentaram os maiores valores de cargabilidade, o que pode tanto demonstrar uma maior acumulação de um corpo condutivo como também que a matriz condutiva pode estar disseminada. Nestas mesmas linhas, no extremo leste,

existe um segundo padrão de anomalias positivas, o que pode indicar que existe uma continuidade lateral em intercalações de corpos condutivos e resistivos.

Através da interpretação das seções de cargabilidade aparente foi constatado o mesmo padrão observado nas seções de resistividade, mas na seção L8681900, a técnica de IP parece ter delimitado uma continuidade das anomalias mais profundas, em subsuperfície. Algo que não foi encontrado com o primeiro método.



**Figura 6.25** - Mapa com as seções empilhadas de cargabilidade aparente.

#### 6.4 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GEOQUÍMICOS DO FURO DE SONDAGEM

Junto aos dados cedidos pela CBPM, foi enviada uma minuta geológica com a interpretação dos dados do furo de sondagem. Foram interpretados dois corpos grafitosos que foram perfurados pela sondagem, o primeiro da superfície até a profundidade de 25 metros e o segundo com início a 45 metros chegando até a profundidade de 84 metros, limite da perfuração. Como pode ser visto na figura 6.26, foi constatado que a faixa mais superficial tem menor percentual de carbono que a segunda, o que torna o corpo mais profundo com maior interesse econômico.

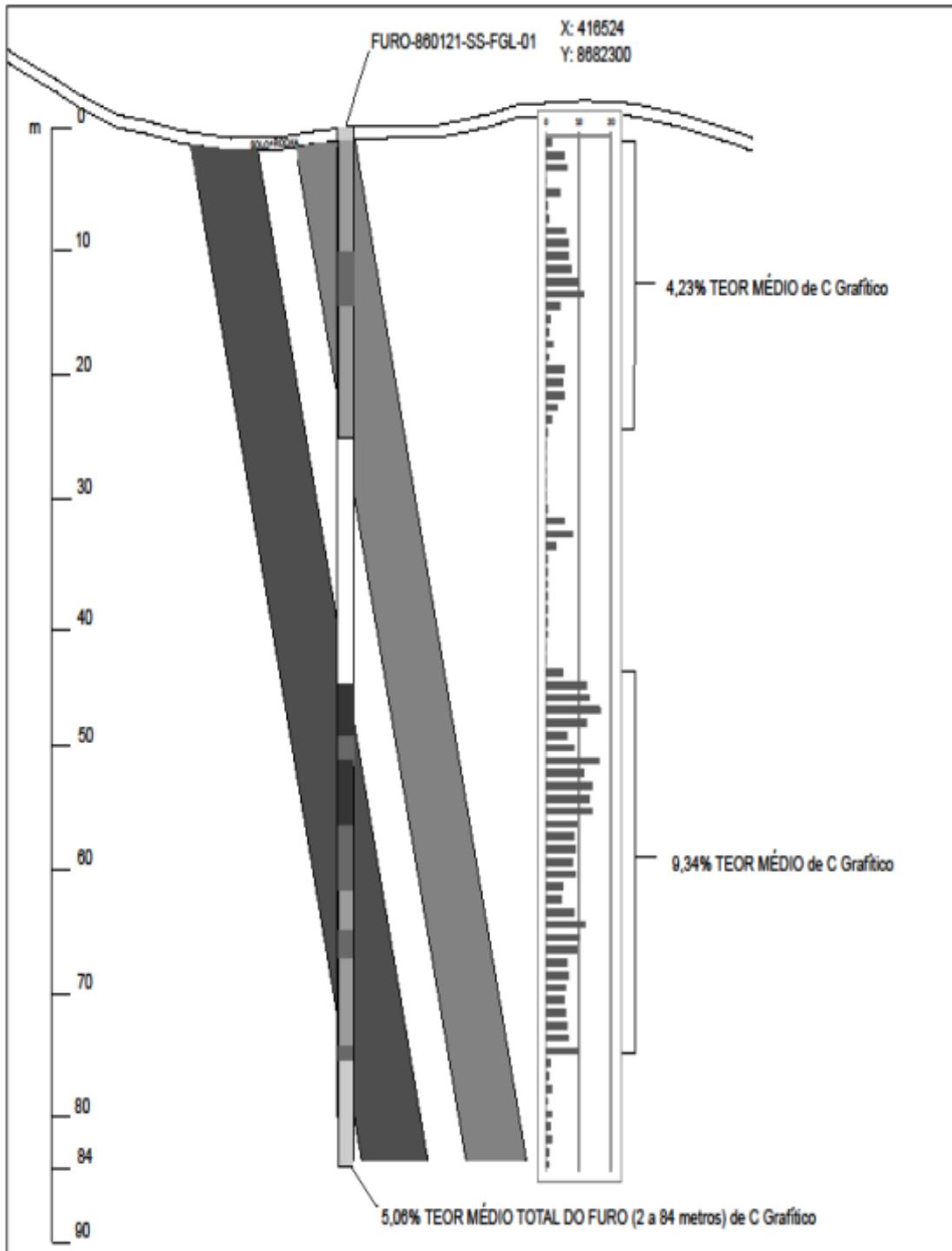
Além da interpretação do perfil de teor de carbono foram geradas razões entre elementos para ser possível identificar padrões que pudessem ser relacionados à origem da matéria orgânica original que veio a ser transformada nos corpos grafitosos da região. Foram criadas as razões de Mg/Ti, Fe/Ca e Ti/Ca, Mg/Ca, Fe/Ti, Fe/Ca e Fe/S, pois são indicadores conhecidos e utilizados na identificação da origem da matéria orgânica (DIAS, 2018). Devido ao fato de ferro e titânio serem elementos litófilos provenientes de regiões continentais através de descargas fluviais, e o cálcio e magnésio representarem elementos associados à sedimentação carbonática marinha, as razões entre eles pode ajudar a inferir a origem da matéria orgânica original da área. Além disto, a quantidade de elementos metálicos pode ser correlacionada com a interpretação dos dados elétricos, visto que a resistividade é menor.

Vale ressaltar que a região já sofreu muitos eventos geológicos, da diagênese ao metamorfismo de alto grau, fazendo com que a correlação entre estes perfis e a inferência sobre a gênese da matéria orgânica, baseada nessas razões elementares, deva ser realizada com parcimônia. Para um melhor entendimento, um estudo gamaespectrométrico de detalhe ao longo do testemunho amostrado pelo furo, trariam uma maior confiança para a interpretação.

No corpo 2, mais profundo, as razões de Ti/Ca e Fe/Ca (figura 6.27) se mostraram maiores que no corpo 1, mais raso, podendo sugerir que os sedimentos originais que geraram o corpo 2 podem estar relacionadas a um período mais úmido, no qual prevaleceram intensas descargas fluviais, trazendo material orgânico continental, podendo ter alguma influência na qualidade do depósito de grafita.

Além disso, a maior quantidade de materiais metálicos no corpo 2 pode ser visualizada no método elétrico como uma faixa mais condutiva, algo que será abordado na próxima seção. Convém lembrar que esses depósitos foram formados no Eon Arqueano, portanto anteriores à formação de plantas vasculares.

Foram criadas mais razões entre elementos buscando o aprofundamento no entendimento das condições originais de deposição, como pode ser visto na figura 6.28. A figura mostra a interpretação feita pela CBPM junto aos Perfis das razões Mg/Ti, Mg/Ca, Fe/Ti, Fe/Ca e Fe/S, ajudando assim na interpretação conjunta.

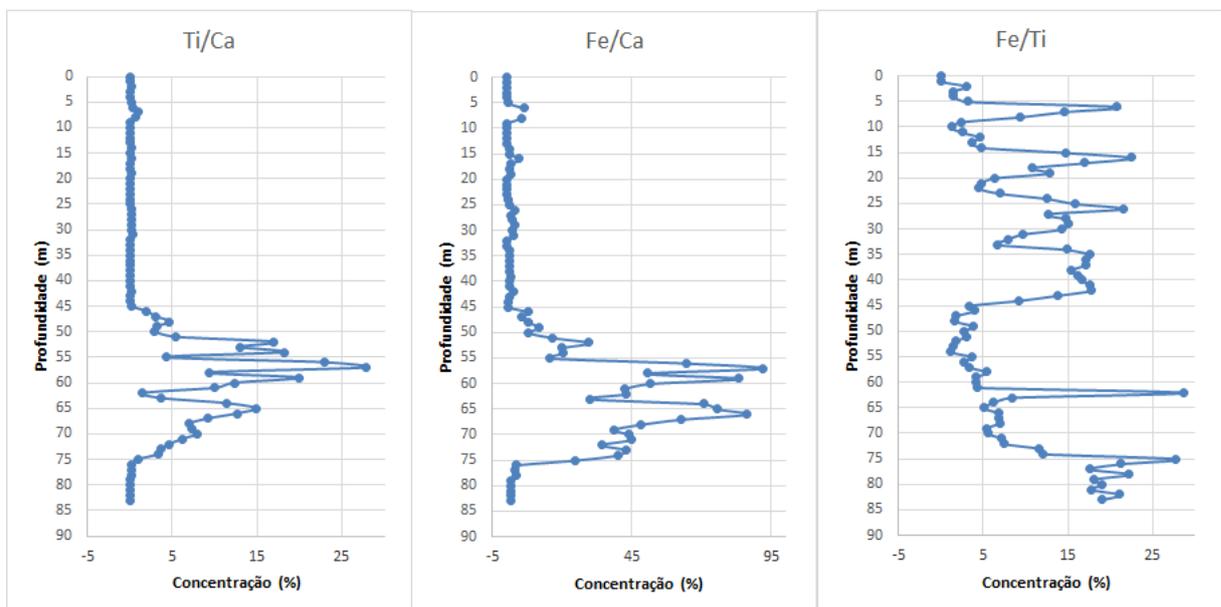


**Figura 6.26** - Perfil Geológico do Furo 860121-SS-FGL-0001 com teores pontuais e médios de carbono medidos nas duas faixas mineralizadas. Notar que o intervalo mais profundo possui maiores teores de carbono que o intervalo mais raso. Fonte: CBPM.

O corpo 1 pode ser interpretado como matéria orgânica depositada em ambiente com diluição através de aportes fluviais episódicos, anóxico a sub-óxico, com baixa taxa de

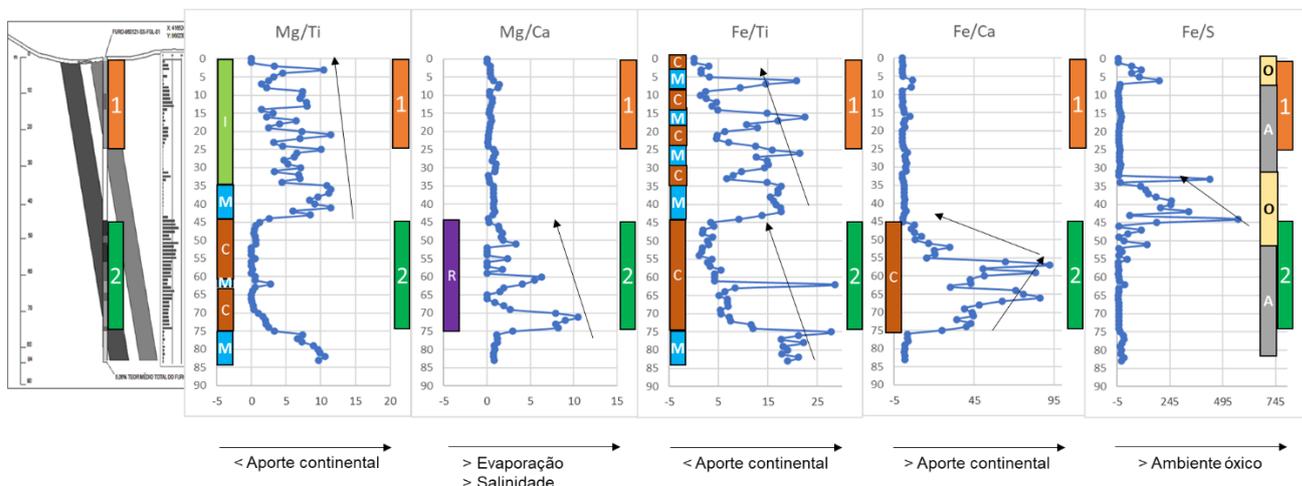
evaporação e menor salinidade. Assim podemos inferir que seja uma matéria orgânica de origem continental, depositada em períodos com forte aporte fluvial episódico. O aporte continental parece diminuir para o topo, indicando ou aumento de aridez para o topo ou um aumento do nível relativo do mar. Apesar de ainda não existirem vegetais superiores à época da deposição dos sedimentos que originaram os depósitos grafitosos da área de estudo, a matéria orgânica continental tende a ser mais estruturada, causando maior dificuldade para ser transformada, preservando suas características originais, sendo menos uniforme e mais heterogênea.

Já o corpo 2 foi interpretado como um material orgânico original depositado em ambiente restrito, anóxico a sub-óxico, com alta taxa de evaporação, maior salinidade e baixo influxo fluvial. O que leva a crer que seja uma matéria orgânica do tipo I (algas e bactérias). As condições de restrição parecem diminuir para o topo do corpo 2, indicando uma maior circulação e diluição, resultado de um aumento de contribuição fluvial. A matéria orgânica do tipo I é menos estruturada e facilmente transformada e consumida por bactérias. Tende a gerar material carbonoso mais uniforme e mais homogêneo.



**Figura 6.27** - Perfis das razões Ti/Ca, Fe/Ca e Fe/Ti.

Como já citado, cuidados devem ser tomados em função de sucessivos eventos metamórficos que podem ter descaracterizado completamente as assinaturas geoquímicas originais. O fato é que os dois corpos são diferentes do ponto de vista geoquímico e, provavelmente, deposicionais.



**Figura 6.28** - Perfis das razões Mg/Ti, Mg/Ca, Fe/Ti, Fe/Ca e Fe/S, respectivamente. Notar que o corpo 2 possui maiores valores de Ti e Fe, relativos ao Ca, enquanto o corpo 1 possui uma menor concentração de Ti em relação ao Mg. Também é possível observar um baixo teor de enxofre (S) nos dois corpos, podendo indicar que eles estão oxidados.

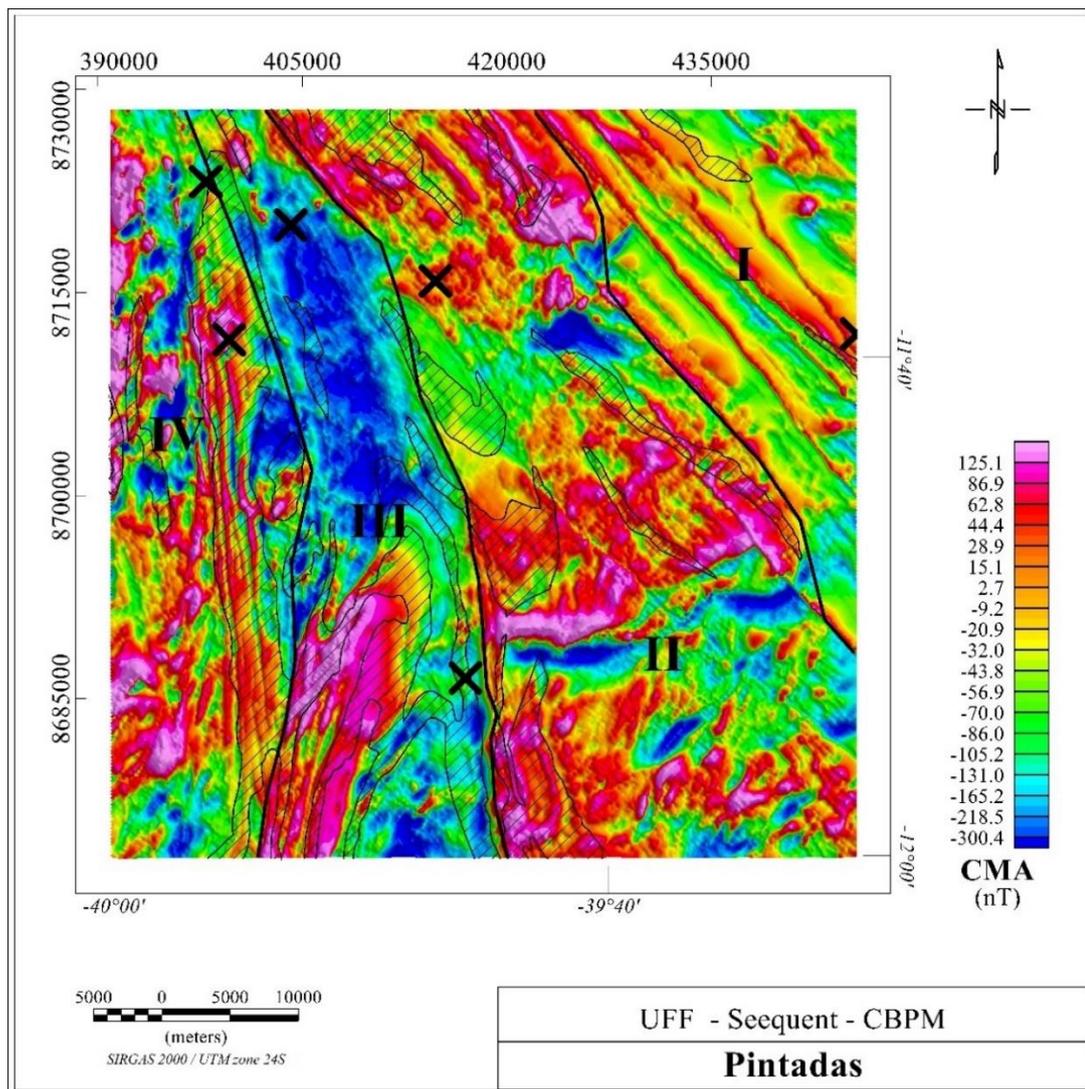
## 6.5 INTEGRAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS

Nesta seção é feita a integração dos diversos métodos geofísicos utilizados no estudo, com as informações geológicas e geoquímicas disponíveis. A pesquisa foi desenvolvida em três escalas de estudo. A primeira, um estudo regional, utilizando a aeromagnetometria e aerogamaespectrometria em conjunto com o mapa geológico de 1:1000000, produzida pela CPRM em associação com a CBPM. A segunda etapa, de escala em semi-detalle, foi desenvolvida através da interpretação dos dados do levantamento geoeletrico, também cedidos para CBPM, caracterizados por levantamentos de eletroresistividade e de polarização induzida (IP), além de um mapeamento geológico realizado nas picadas abertas para o levantamento na escala 1:5000. Por fim, já em escala de detalle, foram interpretados dados geoquímicos e geológicos de um furo de sondagem realizado na mesma área.

Partindo da escala regional é necessário ressaltar que a grafita não apresenta características magnéticas, levando ao entendimento de que sua prospecção através do uso da magnetometria tem que levar em conta o contraste com suas rochas encaixantes metamórficas da fácies granulito, fator determinante para a formação da grafita. Segundo Flores (2014), o processo de grafitização acontece quando a matéria orgânica, já em processo de alteração, é submetida a condições de temperatura e pressão associadas ao

metamorfismo regional, o que pode ser provocado por processos de esforços tectônicos, causando muitas vezes dobramentos. Caso esse dobramento ocorra em regiões ricas em matéria orgânica, a região pode se tornar um futuro depósito de grafita, graças às condições de pressão e temperatura envolvidas na estruturação das rochas.

Através da análise do dado aeromagnetométrico foi possível identificar, no domínio magnético III (Figura 6.29), um domínio de dobramentos que ocorre no Complexo Tanque Novo – Ipirá.



**Figura 6.29** - Mapa do CMA, junto com os domínios magnéticos interpretados, ocorrências de grafita (X) e Unidade litoestratigráfica do complexo Tanque Novo – Ipirá (área hachurada).

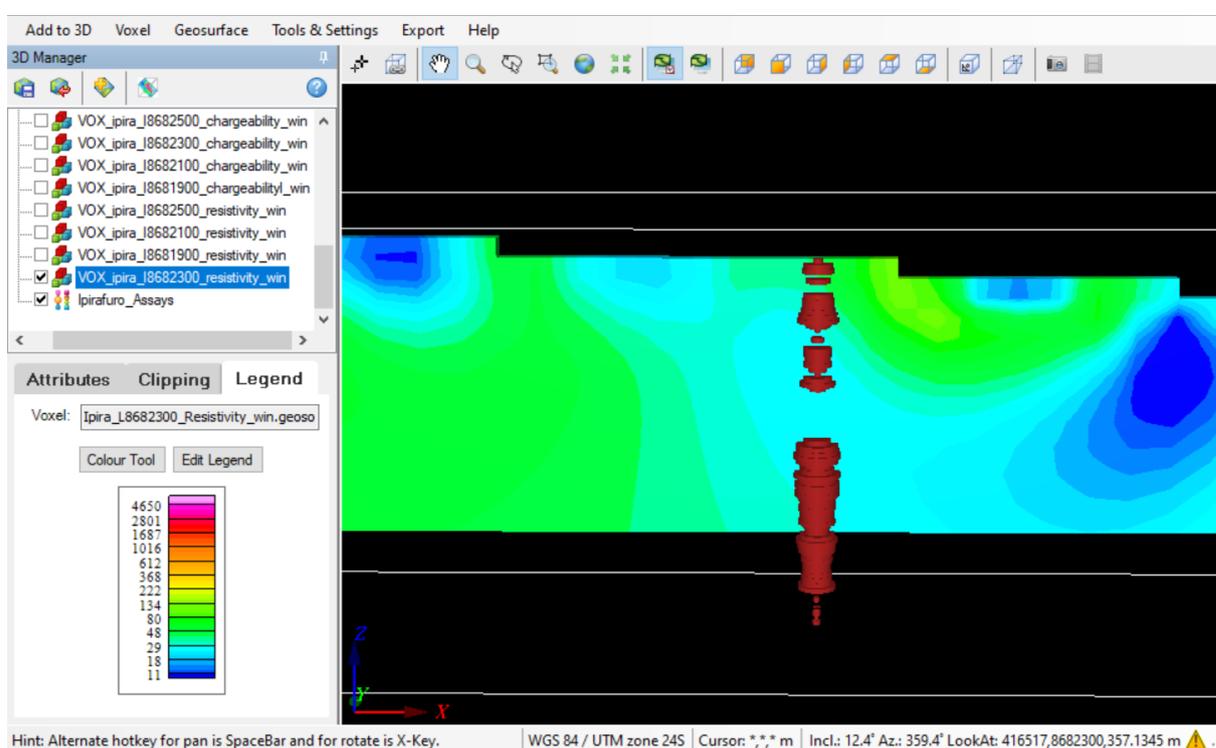
Nesta unidade já foram identificadas ocorrências de grafita, associadas à xistos carbonáticos (zona de cisalhamento) e rochas peraluminosas com cordierita, geralmente

pinitizadas, associadas a rochas calcissilicáticas, diposiditos e mármore, constituindo um domínio de rochas supracrustais (LEITE, 2002). Além disso, com o produto ASA, foi possível mapear áreas com pouco baixos valores de susceptibilidade, o que pode demonstrar regiões de bom potencial prospectivo. Este domínio de dobramentos foi identificado nos mapas gamaespectrométricos, nos quais os mapas de razão adicionaram uma informação litológica importante. Pelo que foi analisado, a região do domínio III, onde foram realizados os levantamentos geoeletricos de semi-detalhe, tem maiores concentrações de tório em relação ao urânio. Isto pode ser interpretado como relacionado aos fluidos hidrotermais provenientes das intrusões da região. Neste caso, o enriquecimento em tório estaria relacionado ao magmatismo intrusivo contemporâneo ao metamorfismo granulítico orogênico. Por outro lado, esse enriquecimento em tório pode estar relacionado aos sedimentos que deram origem aos depósitos de grafita, uma vez que a matéria orgânica disponível pode ter origem continental detríticas, relacionada com uma forte entrada de sedimentos continentais, trazidos por períodos úmidos e com intensa descarga fluvial. Estes fluxos continentais podem ter sido intercalados com momentos eustáticos, de subida ou descida relativa do nível do mar, como proposto por Susin (2019).

Infelizmente pelo dado gamaespectrométrico apresentar um alto nível de ruído, principalmente no canal de urânio, a metodologia aplicada utilizando as razões entre estes dois elementos não foi conclusiva. Um estudo gamaespectral de detalhe, fazendo medições no testemunho através de um equipamento portátil, poderia melhorar as inferências sobre a natureza da matéria orgânica que compõe os depósitos grafitosos perfurados. Já no estudo de escala em semidetalle, a correlação foi dada de forma direta com o dado geofísico.

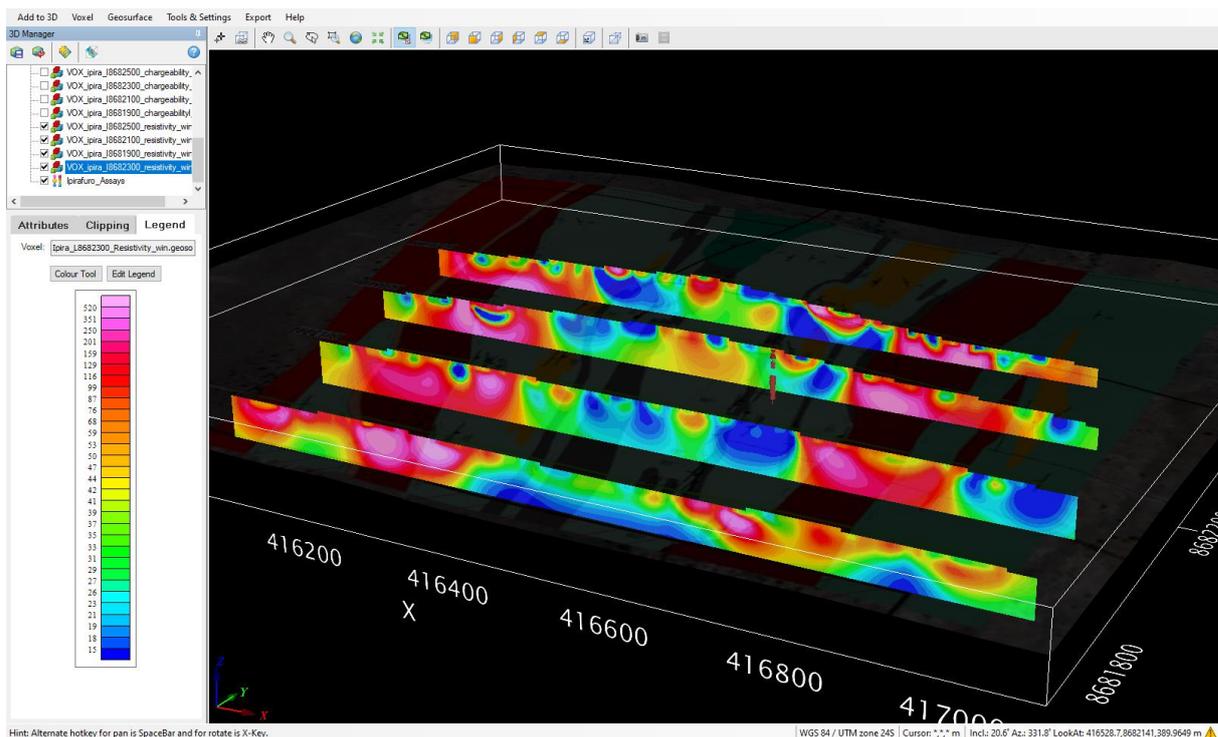
A grafita, por ter propriedades condutivas é muito bem demarcada através dos métodos elétricos, tanto quando comparado com o mapa geológico de superfície, quanto com o furo de sondagem em profundidade. Na figura 6.30 é possível visualizar a correlação do furo de sondagem com as amostras e com os teores de carbono, interpretada como corpos grafitosos com os dados de resistividade. Na imagem é nítido que a condutividade cresce com a profundidade, na área da sondagem. Os dois corpos grafitosos apresentam características condutivas, mas o segundo corpo apresenta maiores valores de condutividade, o que pode ser correlacionado com a análise dos perfis geoquímicos do mesmo furo. Nestes perfis, o corpo 2 apresenta maiores concentrações de elementos metálicos o que tende a se somar às características condutivas da grafita e proporcionar maiores valores nesta propriedade. Adicionalmente, os corpos em maiores profundidades, menos expostos aos processos de

intemperismo, mantem suas propriedades físicas intactas. O que foi possível perceber é que anomalia a direita do furo de sondagem tem valores mais baixos de resistividade e tende a ter maior continuidade em subsuperfície do que em superfície. Possivelmente este corpo apresenta um depósito mais puro do mineral do que os corpos interceptados pelos furos de sondagem. Quando analisadas todas as seções em conjunto com o mapa geológico criado pela CBPM, nota-se um sentido de mineralização NW-SE, como percebido no estudo regional, e que a grafita ocorre associada a carbonatos xistos e metapelitos aluminosos, cujos protólitos teriam uma provável origem sedimentar marinha plataformar, associada a folhelhos, margas e carbonatos.



**Figura 6.30** - Vista 2D com o furo de sondagem plotado sobre a seção de resistividade L8682300. As cores mais quentes indicam maiores resistividades, enquanto as mais frias indicam maior condutividade. Os teores de carbono são representados pela largura da forma geométrica em marrom, ao redor do furo, sendo mais largos os intervalos com maiores teores.

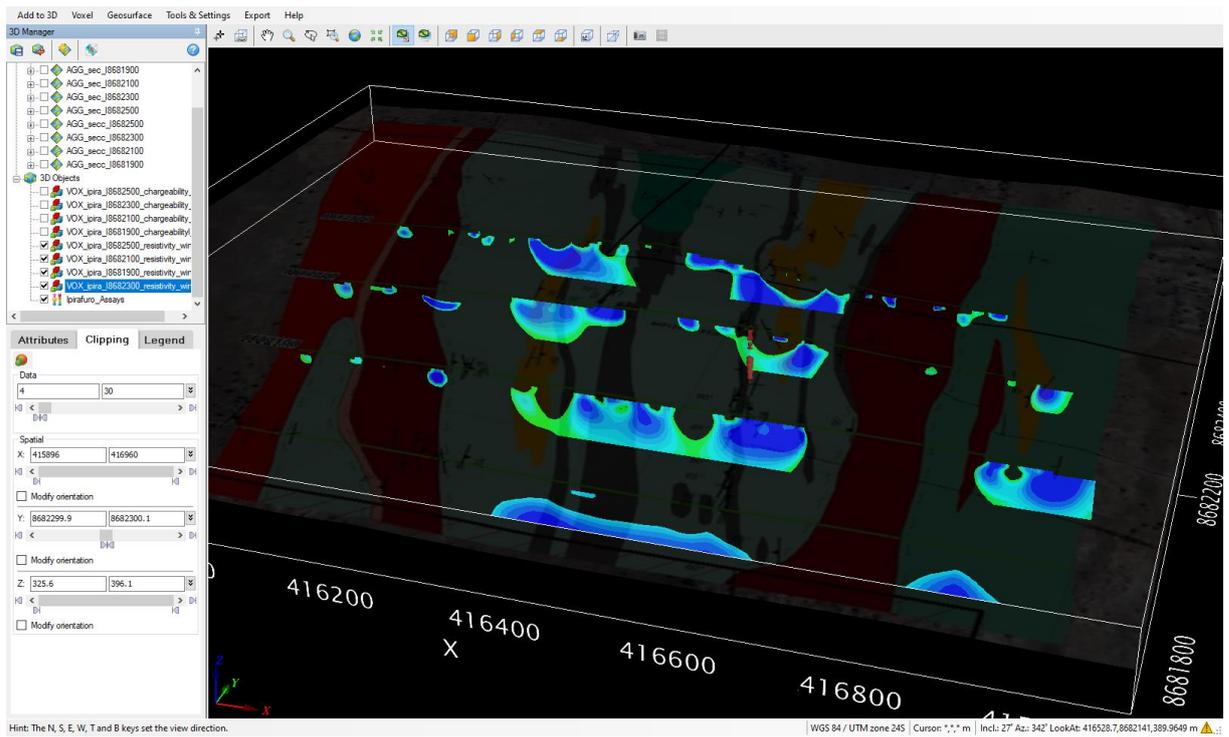
As seções elétricas inferem corpos que tendem a se conectar em subsuperfície, além de apresentarem maiores valores de condutividade e maior volume encontrado em direção ao sul da região, como pode ser visto na figura 6.31. Devido à região apresentar diversas intrusões graníticas, o método elétrico demarcou intercalações de corpos condutivos, interpretados como corpos de grafita e intrusões que tendem a ter caráter resistivo.



**Figura 6.31** - Vista 3D com todas as seções de resistividade junto ao mapa geológico, com uma transparência aplicada. As intrusões graníticas são mais resistivas (cores avermelhadas) e os depósitos de grafita mais condutivas (cores azuladas).

Com a análise conjunta dos dados foi possível correlacionar os corpos que foram mapeados em superfície com os baixos valores de resistividade. Estes corpos condutivos tendem a aumentar de comprimento e valor no sentido sul, mais uma vez sendo possível correlacionar com o mapa geológico cedido pela CBPM. Os granitoides também obtiveram boa correlação com os corpos resistivos, onde toda a região segue essa tendência NW-SE. A região onde foram adquiridas as linhas L8682100 e L8681900 apresentam um bom potencial exploratório, com a necessidade de uma nova campanha de perfuração para confirmação das anomalias mapeadas.

Na figura 6.32 foi realizada uma visualização para valores com baixas resistividades. Os corpos condutivos tendem a se tornar mais espessos com a profundidade e apresentar diferentes valores de condutividade a depender das suas características geoquímicas, como visualizado nos corpos perfurados pelo furo de sondagem.



**Figura 6.32** - Vista 3D com todas as seções de resistividade limitadas a valores até 30 ohm.m junto ao mapa geológico, com uma transparência aplicada. Fonte: Autor.

## 7. CONCLUSÕES

No contexto regional, foi concluído que regiões de baixos magnéticos, com altas concentrações de tório e urânio, com dobras associadas e altos topográficos, são bons indicadores para prospecção de grafita. A unidade litoestratigráfica Complexo Tanque Novo – Ipirá contém as ocorrências de grafita associadas a xistos carbonáticos e rochas peraluminosas com cordierita, geralmente, pinitizadas, associadas a rochas calcissilicáticas, diposiditos e mármore, caracterizando protólitos supracrustais marinhos.

Já no contexto de semi-detalle foi observado que o método de eletrorresistividade exibiu grande correlação com os dados geológicos e geoquímicos. Em adição, a grafita, de característica condutiva, ocorre associada a xistos carbonáticos e metapelitos aluminomagnesianos- titaníferos, que foram muito bem delimitados em superfície e demonstraram o potencial exploratório em subsuperfície.

Também foi visto no dado elétrico que os corpos condutivos apresentam tendência NW-SE, segundo direção da estruturação regional. Este método, entre os geofísicos, como esperado, foi o que apresentou os melhores resultados na pesquisa dos depósitos de grafita. Além da grafita apresentar caráter condutivo, o fato de a região sofrer intercalações de intrusões graníticas, que tendem a ter caráter resistivo, ajudou na delimitação entre as diferentes litologias.

Em escala de detalhe, razões de elementos químicos permitiram interpretar que o furo de sondagem perfurou dois corpos grafitosos de características geoquímicas distintas. Os perfis entre razões demonstraram que o corpo 2 apresenta maiores concentrações de minerais metálicos o que representa baixos valores de resistividade.

Os dados de geofísicos ajudam na interpretação geológica e tectônica da área, mas a depender de sua evolução geológica e de ruídos encontrados no dado essa interpretação tem que ter ressalvas. Foi demonstrado ainda que os métodos de eletrorresistividade e IP, para a prospecção de grafita apresentam grande assertividade e que para a área estudada, as seções de eletrorresistividade foram a que trouxeram maiores contribuições ao estudo.

Como futuros alvos para estudo, na escala de semidetalle, a região central mais a sul da área estudada apresenta as melhores características para prospecção de grafita, por

apresentar os maiores corpos condutivos e os maiores valores de condutividade. Essa região deve ser estudada em uma pesquisa com maior detalhamento através de uma nova aquisição de dados geofísicos, geológicos e geoquímicos.

## 8. RECOMENDAÇÕES

O estudo obteve sucesso na correlação entre os diversos métodos para a pesquisa da grafita. Aconselha-se o uso da metodologia em áreas adjacentes à região estudada, e caso possível, o uso de métodos que podem trazer maiores informações sobre estes depósitos como a gravimetria terrestre ou a perfilagem gamaespectrométrica e elétrica. No caso de encontrados novos alvos exploratórios, podem ser realizadas novas expedições de campo para aquisições geológicas e geoquímicas, para delimitação dos prováveis depósitos.

Para um estudo mais aprofundado sobre esse aspecto em detalhe e entendimento das características físicas da grafita e seus tipos de depósitos com vistas à síntese do grafeno são necessárias novas campanhas de perfuração com medição metro a metro, utilizando um gamaespectromômetro, por exemplo. Isso traria maiores informações sobre a gênese dos materiais presentes nos depósitos o que poderia ajudar na interpretação da matéria orgânica geradora dos depósitos de grafita.

Aconselha-se para a região mais ao sul do levantamento de semidetalhe a realização de novas campanhas de sondagem, com adição do estudo de perfilagem como já descrito. Sugere-se ainda um novo arranjo para o levantamento elétrico para ser possível inferir sobre os prováveis depósitos nas três dimensões.

## REFERÊNCIAS

ASTER, Richard C.; BORCHERS, Brian; THURBER, Clifford H. Parameter estimation and inverse problems. Elsevier, 2018.

BARBOSA, Johildo Salomão Figueirêdo; SABATÉ, Pierre. Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco craton, Bahia, Brazil: geodynamic features. *Precambrian Research*, v. 133, n. 1-2, p. 1-27, 2004.

BARBOSA, J. S. F. *et al.* Geologia da Bahia: pesquisa e atualização. Série publicações especiais, Salvador, CBPM, 559p, 2012.

BELÉM, Juliane. Caracterização mineralógica, física e termobarométrica de minérios de grafita da Província Gráfica Bahia-Minas. Belo Horizonte. Trabalho de Tese. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

BELÉM, Juliane. RECURSOS MINERAIS DE MINAS GERAIS - Grafita. 2018.

BILLINGS, Stephen; RICHARDS, Dave. Quality control of gridded aeromagnetic data. *Exploration Geophysics*, v. 31, n. 4, p. 611-616, 2001.

BLAKELY, Richard J. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge university press, 1996

BORTOLOZO, Cassiano Antonio. Inversão conjunta 1D de dados de SEV e TDEM: Aplicações em hidrogeologia. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BORTOLOZO, Cassiano Antonio. Inversão conjunta 1D e 2D de dados de Eletrorresistividade e TDEM aplicados em estudos de hidrogeologia na bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 35, n. 3, 2017.

BRAGA, Antonio Celso de Oliveira. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. 2006.

DALLA COSTA, M. M. *et al.* Anuário mineral estadual Minas Gerais. Anos base 2010 a 2014. 2017.

DALTRO, Rafael Ribeiro. PETROLOGIA DOS LEPTINITOS E LEUCOGRANITOS NO CINTURÃO SALVADOR-CURAÇA, REGIÃO DE PINTADAS-BAHIA. Monografia. Universidade Federal da Bahia. 2016.

DE JESUS, Karla Acemano; FREIRE, Estevão; GUIMARÃES, Maria José OC. Grafeno: aplicações e tendências tecnológicas. 2012.

DE MIRANDA, Tiago Siqueira; MARIANO, Gorki; DE BARROS CORREIA, Paulo. Modelo de alojamento do Plúton Cupira, Província Borborema (NE Brasil). *Geologia USP. Série Científica*, v. 16, n. 3, p. 89-103, 2016.

DENTITH, Michael; MUDGE, Stephen T. Geophysics for the mineral exploration geoscientist. Cambridge University Press, 2014.

DIAS, Gilberto Pereira. Avaliação das condições redox das águas intermediárias do Oceano Atlântico Sudoeste nos últimos 40 mil anos. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2018.

ERNESTO, Marcia; USSAMI, Naomi. Introdução à Geofísica. Departamento de Geofísica IAG/USP, 2002.

ELLIS, V. R. Avaliação da Aplicação de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. 1998. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente, IGCE). Rio Claro, SP Unesp p 264.

ELLIS, R. G. Validating the VOXI-DCIP algorithm, Geosoft Inc, 2018

FIGUEIREDO, MCH de. Geochemical evolution of eastern Bahia, Brazil: a probable Early Proterozoic subduction-related magmatic arc. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 2, n. 2, p. 131-145, 1989.

FLEISCHER, Ronald; DE OLIVEIRA, Saulo Augusto. DEPÓSITO DE GRAFITA DA FAZENDA TRAÍRAS (BA): UM EXEMPLO DE ROMBOCASMO DESENVOLVIDO EM UMA ZONA DE CISALHAMENTO. *Geonomos*, 1994.

FLORES, D. Carvão, petróleo, gás natural e grafite: casos felizes de acumulação, preservação e evolução térmica da matéria orgânica. Curso Foco "Geologia e Sustentabilidade". Porto, julho 2014., p. 25.

GALLAS, José Domingos Faraco; VERMA, Om Prakash. Resistividade e polarização induzida (IP): modelagem analógica. *Rev. Bras. Geof.*, São Paulo, v. 24, n. 1, p. 25-35, Mar. 2006.

GANDOLFO, Otávio Coaracy Brasil. Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GONÇALVES, Francisco Said; DE CARVALHO, James Huxley Q. Prospecção Geoeletrica Da Grafita. In: 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. 2001.

HAND G.P. Graphite: applications & developments. *Industrial Minerals*. 1996.

HANSEN, Per Christian; O'LEARY, Dianne Prost. The use of the L-curve in the regularization of discrete ill-posed problems. *SIAM journal on scientific computing*, v. 14, n. 6, p. 1487-1503, 1993.

HARBEN, Peter W.; BATES, Robert Latimer. *Industrial minerals: geology and world deposits*. Metal Bulletin, 1990.

ISLES, David J., and Leigh R. RANKIN. Geological interpretation of aeromagnetic data. Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists, 2013.

JACOBI, P. Grafita o mineral do futuro. Portal do Geólogo, 2014. Disponível em: <<http://www.geologo.com.br/MAINLINK2014.ASP?VAIPARA=Grafita%20o%20mineral%20do%20futuro>>. Acesso em:10 fevereiro. 2019.

KLAJA, Jolanta; DUDEK, Lidia. Geological interpretation of spectral gamma ray (SGR) logging in selected boreholes. *Nafta-Gaz*, v. 72, n. 1, p. 3-14, 2016.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. Geofísica de exploração. Oficina de Textos, 2009.

KOSIN, M.; GUIMARÃES, J. T.; ABRAM, M. B. Folha Aracaju-SW: SC. 24-Y. Salvador: CPRM, (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil), 1999.

KOSIN, Marília *et al.* Geologia do segmento norte do Orógeno Itabuna-Salvador-Curaca e guia de excursão. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n. 1, p. 15-26, 2003.

KUŽVART, M. Industrial Minerals and Rocks. *Developments in Economic Geology*, vol. 18. 1984.

LEITE, C.M.M., 2002. A Evolução Geodinâmica da Orogênese Paleoproterozoica nas regiões de Capim Grosso-Jacobina e Pintadas-Mundo Novo (Bahia-Brasil): Metamorfismo, Anatexia e Tectônica. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia.

LEVEQUE, Randall J. *et al.* Finite volume methods for hyperbolic problems. Cambridge university press, 2002.

LI, Yaoguo; OLDENBURG, Douglas W. 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, v. 61, n. 2, p. 394-408, 1996.

LOBATO, Emilio. Ministério de minas e energia–MME: secretaria de geologia, mineração e transformação mineral. 2009.

LOUREIRO, H. S. C. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Mundo Novo. Folha SC-24-YD-IV, 1991.

LOURENÇO, Juarez; MENEZES, Paulo TL; BARBOSA, Valeria CF. Connecting onshore-offshore Campos Basin structures: Interpretation of high-resolution airborne magnetic data. *Interpretation*, v. 2, n. 4, p. SJ35-SJ45, 2014.

LOWRIE, William. *Fundamentals of geophysics*. Cambridge university press, 2007.

MELO R. C. *et al.* Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Pintadas. Folha SC-24-Y-D-V. Escala 1:100.000. DNPM/CPRM/SUREG-SA. 173 p. 1991.

MELO, R. C.; LOUREIRO, H. S. C.; PEREIRA, L. H. M. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Serrinha. Folha SC, 1995.

MEDINA, Alex Soria; QUINTAS, Márcia Cristina LO. Método de Interpolação de Curvatura Mínima. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, p. 8-11, 2008.

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

NOVOSELOV, Kostya S. *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films. *science*, v. 306, n. 5696, p. 666-669, 2004.

OLIVEIRA, Elson Paiva; DE CARVALHO, Marcelo Juliano; MCNAUGHTON, Neal J. Evolução do segmento norte do orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá: cronologia da acreção de arcos, colisão continental e escape de terrenos. *Geologia USP. Série Científica*, v. 4, n. 1, p. 41-53, 2004.

OLIVEIRA, Jefferson Tavares Cruz. Avaliação integrada de dados geofísicos da transição Crustal (continente-oceano) da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

ORELLANA *et al.* Prospección geoelectrica en corriente continua. 1972.

PEIRÓ, Joaquim; SHERWIN, Spencer. Finite difference, finite element and finite volume methods for partial differential equations. In: *Handbook of materials modeling*. Springer, Dordrecht, 2005. p. 2415-2446.

REEVES, Colin. *Aeromagnetic surveys: principles, practice and interpretation*. Toronto, ON: Geosoft, 2005.

RIBEIRO, VANESSA BIONDO; MANTOVANI, MSM. Modelagem geofísica do complexo alcalino de Tapira–MG. MSc in Geophysics, Universidade de São Paulo, SP, 2011.

RIBEIRO, Vanessa Biondo; MANTOVANI, Marta SM; LOURO, Vinicius Hector Abud. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. *Terræ Didática*, v. 10, n. 1, p. 29-51, 2014.

ROSA, Maria Luiza Correa da Camara *et al.* Integração de métodos potenciais (gravimetria e magnetometria) na caracterização do embasamento da região sudoeste da Bacia de Pelotas, Sul do Brasil. *Rev. Bras. Geof.*, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 641-657, Dec. 2009 .

RUGENSKI, André *et al.* Resultados geofísicos integrados de um corpo com geometria 3D sem manifestação superficial. *Geologia USP. Série Científica*, v. 5, n. 1, p. 41-56, 2005.  
SAMPAIO, Antônio Rabelo. Gavião: folha SC. 24-YD-II. 1992.

SAMPAIO, João Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida; DUTRA, Achilles Junqueira Bourdot. *Grafita*. 2008.

SANTOS, Hans S.; CUNHA, Guilherme N.; CASTRO, Janson R. Avaliação Qualitativa das Técnicas de Interpolação de Mínima Curvatura, Krigagem e Bidirecional na Formação de Imagens. *Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana*, n. 4, p. 2-16, 2016.

SCARTON, Luciane. Desenvolvimento, simulação matemática e caracterização de dispositivos sensores piezoresistivos de grafite. 2017.

SILVESTER, Peter P.; FERRAR, Ronald L. *Finite Elements for Electrical Engineers*. Cambridge Press, 1966.

STARK, Peter A.; DE CARVALHO, João Pitombeira. *Introdução aos métodos numéricos*. Interciencia, 1979.

SILVA, L. C. *et al.* U–Pb SHRIMP ages in the Itabuna–Caraíba TTG high-grade complex: the first window beyond the Paleoproterozoic overprinting of the eastern Jequié craton, NE Brazil. *age (Ma)*, v. 10, n. 3303, p. 13, 1997.

SILVA, M. da G.; MARTIN, H.; ABRAM, M. B. Datação do corpo máfico-ultramáfico da Fazenda Mirabela (Ipiaú-BA) pelo método Sm-Nd: Implicações petrogenéticas e geotectônicas: Congress of Brazilian Geology 39. Salvador, SBG, v. 6, p. 217-220, 1996.

SILVA, Felipe Stefani et al. Estudo Magnetométrico terrestre em uma ocorrência de talco xisto. In: 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 15–18 August 2011. Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society, 2011. p. 598-603.

SILVA, R.W.S.; Sampaio, E.E.S.. Geofísica da Bahia: estudos geológicos e exploração mineral. 1. ed. Salvador: CBPM, 2017.

SOUZA, João Dalton de; MELO, Roberto Campelo de; KOSIN, Marília. Mapa geológico do Estado da Bahia. 2003.

SUN, Yiqing; WU, Qiong; SHI, Gaoquan. Graphene based new energy materials. Energy & Environmental Science, v. 4, n. 4, p. 1113-1132, 2011.

SUSIN, Victória Carolina Figueira. INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE DEPÓSITOS DE GRAFITA NA REGIÃO DE MACARANI, NO ESTADO DA BAHIA. Projeto Final em Geofísica. Universidade Federal Fluminense, 2019.

TEIXEIRA, Léo Rodrigues. O complexo Caraíba e a suíte São José do Jacuípe no cinturão Salvador-Curaçá (Bahia, Brasil): petrologia, geoquímica e potencial metalogenético. 1997. Tese de Doutorado.

TELFORD, William Murray *et al.* Applied geophysics. Cambridge university press, 1990.

THURSTON, Jeffrey B.; SMITH, Richard S. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI (TM) method. Geophysics, v. 62, n. 3, p. 807-813, 1997.

VERDUZCO, Bruno *et al.* New insights into magnetic derivatives for structural mapping. The leading edge, v. 23, n. 2, p. 116-119, 2004.

VIEIRA, J. E. D.; VILAR, Eudésio Oliveira. Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos. Revista eletrônica de materiais e processos, v. 11, n. 2, 2016.

ULISBOA. MÉTODOS ELÉTRICOS E ELETROMAGNÉTICOS, 2018. Disponível em: <<http://webpages.fc.ul.pt/~ecfont/wp-content/uploads/2016/12/M%C3%A9todos-electricos-e-eletromagneticos.pdf>>. Acesso em: 12 feb. 2019.

WINOGRAD, Shmuel. On computing the discrete Fourier transform. Mathematics of computation, v. 32, n. 141, p. 175-199, 1978.

ZACCHI, Érico Natal Pedro *et al.* As três anomalias elípticas da porção sul do Cráton São Francisco: novos alvos para a mineralização de grafita? Revista Brasileira de Geofísica, v. 25, n. 4, p. 421-431, 2007.