

Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Geofísica

Daniel Shkromada de Oliveira

Interpretação de dados aerogeofísicos para  
exploração aurífera na área do Projeto Córrego  
do Sítio, NE do Quadrilátero Ferrífero

São Paulo

2014



Daniel Shkromada de Oliveira

Interpretação de dados aerogeofísicos para  
exploração aurífera na área do Projeto Córrego  
do Sítio, NE do Quadrilátero Ferrífero

Dissertação apresentada ao Departamento de Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências. **Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.**

Área de Concentração: Geofísica Aplicada  
Orientadora: Profa. Dra. Marta S. M. Mantovani

São Paulo

2014

## **AGRADECIMENTOS**

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marta Silvia Maria Mantovani por seu suporte e, principalmente, pelo incentivo à conclusão deste trabalho.

À AngloGold Ashanti pela autorização e incentivo à utilização dos dados apresentados neste trabalho.

À equipe de exploração de exploração da AngloGold Ashanti, que colaborou imensamente com discussões e críticas.

Aos amigos da Reconsult Geofísica que foram fundamentais para a consolidação do meu interesse na aplicação da geofísica na indústria mineral.

À minha família que sempre me apoiou e pressionou quando necessário.

A todos os amigos que fiz durante o percurso e aqueles de alguma forma envolvidos que tornaram este trabalho mais proveitoso do que estressante. Mostraram-me que a geofísica é mais do que uma carreira, é uma aventura.

## RESUMO

A região do Projeto Córrego do Sítio, localizada na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, é conhecida por seu potencial aurífero, porém sua evolução geológica não é totalmente compreendida e ainda restam áreas pouco exploradas que carecem de estudos de detalhe adicionais. Neste trabalho dados magnéticos, gamaespectrométricos e eletromagnéticos aéreos foram analisados para contribuir para o entendimento geológico da área de interesse, caracterizar os depósitos auríferos conhecidos e definir alvos com base na assinatura geofísica estabelecida. A metodologia usada consistiu na interpretação dos dados em escala regional, seguida da interpretação em detalhe para desenvolvimento de um modelo exploratório, em seguida aplicado de forma a gerar alvos prospectivos em regiões pouco exploradas.

Depósitos do tipo São Bento estão associados a anomalias EM, a áreas de desmagnetização e a zonas de enriquecimento potássico, localizadas ao longo de zonas de cisalhamento NNE-SSW. Depósitos do tipo Córrego do Sítio são caracterizados pela ausência de anomalias magnéticas e EM e boa correlação com anomalias gamaespectrométricos. Falhas transcorrentes posteriores à formação dos depósitos exercem forte controle sobre as anomalias e indicam que houve retrabalhamento estrutural significativo na área. Modelagem tridimensional de dados magnéticos e EM indica que deslocamentos horizontais e verticais significativos entre blocos e rotação dos mergulhos dos condutores e marcadores magnéticos da área estão associados a falhas transcorrentes. Um modelo de frentes de empurrão foi considerado adequado para explicar as estruturas e movimentos relativos inferidos, já que a compressão diferencial requerida pode ter sido responsável pela geração das falhas transcorrentes, movimento dos blocos estruturais e geometria complexa de estruturas específicas.

Uma lista de alvos prospectivos foi criada com base nos modelos exploratórios concebidos. Foram considerados, principalmente, alvos do tipo São Bento, devido à boa resposta a métodos geofísicos, mas também foram identificados alvos do tipo Córrego do Sítio.

Palavras-chave: Geofísica de exploração, Quadrilátero Ferrífero, ouro orogênico, modelamento tridimensional

## **ABSTRACT**

The Córrego do Sítio area, located in the northeastern portion of the Iron Quadrangle, is known for its potential to host gold deposits. However, its geological evolution is not fully understood and some areas still remain poorly explored and require further detailed studies. In this case, airborne magnetic, gamma-spectrometric and electromagnetic data were analysed in order to contribute to the geological knowledge of the area, characterize the known gold deposits and identify targets based on the established geophysical signature. The methodology employed is based on regional scale interpretation of the data, followed by local scale interpretation to develop an exploration model, which was then used to generate prospective targets in poorly explored areas.

São Bento-type deposits are associated to EM anomalies, demagnetization areas and potassium enrichment zones, located along NNE-SSW striking shear zones. Córrego do Sítio-type deposits are characterized by the absence of magnetic and EM anomalies and good correlation with gamma-spectrometric anomalies. Transcurrent faults, younger than the deposits, exert strong structural control over the anomalies and indicate that the area was submitted to significant structural reworking. Tridimensional modelling of magnetic and EM data indicates that significant lateral and vertical displacement between blocks and rotation of the dip of conductors and magnetic markers are associated to transcurrent faults. A thrust front model was considered suitable to explain the inferred structures and relative movement, since the required differential compression could be related to the generation of transcurrent faults, offset of structural blocks and the complex geometry of specific structures.

A list of prospective targets was created, based on the conceived exploration models. São Bento-type targets were considered, mostly, due to its good geophysical response, but Córrego do Sítio-type targets were also identified.

**Keywords:** Exploration geophysics, Iron Quadrangle, orogenic gold, tridimensional modelling

## ÍNDICE

<b>1. Introdução</b> .....	1
1.1. Área de interesse e geologia regional.....	4
1.2. Geologia local .....	7
1.3. Evolução estrutural.....	11
1.4. Mineralização na região do Projeto Córrego do Sítio .....	13
<b>2. Metodologia</b> .....	18
2.1. Magnetometria .....	21
2.1.1. <i>Processamento de dados aeromagnéticos</i> .....	24
2.1.2. <i>Inversão de dados magnéticos</i> .....	25
2.2. Gamaespectrometria .....	28
2.2.1. <i>Processamento de dados aerogamaespectrométricos</i> .....	30
2.3. Eletromagnético no domínio do tempo (TDEM) .....	32
2.3.1. <i>Modelagem direta de dados eletromagnéticos</i> .....	36
2.4. Dados aerogeofísicos analisados.....	38
2.4.1. <i>Aerolevanteamento SPECTREM (2002)</i> .....	38
2.4.2. <i>Aerolevanteamento HeliMAG (2013)</i> .....	39
<b>3. Interpretação dos dados aerogeofísicos</b> .....	41
3.1. Projeto Córrego do Sítio .....	41
3.1.1. <i>Caracterização geofísica</i> .....	41
3.1.2. <i>Interpretação estrutural</i> .....	53
3.1.3. <i>Interpretação qualitativa</i> .....	63
3.2. Bloco Central .....	65

3.2.1. <i>Objetivos</i> .....	65
3.2.2. <i>Interpretação dos dados geofísicos</i> .....	65
3.3. Bloco SW .....	83
3.3.1. <i>Objetivos</i> .....	83
3.3.2. <i>Interpretação dos dados geofísicos</i> .....	83
3.4. Bloco NE.....	94
3.4.1. <i>Objetivos</i> .....	94
3.4.2. <i>Interpretação dos dados geofísicos</i> .....	95
3.5. Alvo A.....	107
3.5.1. <i>Objetivos</i> .....	107
3.5.2. <i>Geologia</i> .....	108
3.5.3. <i>Interpretação dos dados geofísicos</i> .....	110
<b>4. Discussão dos resultados e conclusões</b> .....	<b>125</b>
<b>5. Referências</b> .....	<b>130</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Localização do Quadrilátero Ferrífero (QF) e da área de interesse, além das principais operações da AngloGold Ashanti no QF e limites municipais, sobre geologia regional. ....	4
Figura 2: Geologia simplificada do QF (modificado de Noce & Alkmin, 2006).....	5
Figura 3: Geologia simplificada do Supergrupo Rio das Velhas (modificado de Baltazar & Zucchetti, 2007).....	6
Figura 4: Coluna estratigráfica do QF (modificado de Alkmim & Marshak, 1998). ....	7
Figura 5: Geologia regional da região do Projeto Córrego do Sítio.....	8
Figura 6: Blocos estruturais e alvo A sobre geologia regional na área do Projeto Córrego do Sítio.....	10
Figura 7: Figura 1 de Groves et al. (2000). Diagrama esquemático mostrando o contexto e natureza de depósitos orogênicos.. ....	14
Figura 8: Lineamentos estruturais principais interpretados da região do Projeto Córrego do Sítio sobre geologia regional. ....	15
Figura 9: Exemplo de mineralização no lineamento Córrego do Sítio. Furo de sondagem mostrando um veio de quartzo-carbonato com mineralização de Au-As-Sb. Modificado de (AngloGold Ashanti, 2013). ....	16
Figura 10: Sequência de alteração hidrotermal de porções menos alteradas da BIF São Bento proposta por Martins Pereira et al. (2007). ....	17
Figura 11: Áreas de interesse, alinhamentos estruturais mineralizados e minas e ocorrências sobre geologia local. ....	18
Figura 12: Fluxograma da metodologia aplicada. ....	20
Figura 13: Mecanismo de criação de uma anomalia magnética (modificado de Musset & Kahn, 2000). ....	22
Figura 14: Típico espectro medido a uma altura de 100 m e picos característicos dos radioisótopos de K, Th e U e seus radioisótopos filhos. Fonte: Minty et al. (1997). ....	29

Figura 15: Princípio de indução eletromagnético aplicado em um levantamento EM. (modificado de Dentith & Mudge, 2014). .....	33
Figura 16: Pulso de corrente transmitido à bobina transmissora (acima) e sinal medido na bobina receptora (abaixo) no caso do sistema EMP, da Newmont (modificado de Nabighian & Macnae, 1991). .....	34
Figura 17: Sistema VTEM (Geotech) para aquisição de dados AEM.....	35
Figura 18: Exemplo de modelagem com placas de Maxwell.....	37
Figura 19: Geometria de aquisição do sistema SPECTREM (SPECTREM Air, 2002). .....	38
Figura 20: Helicótero utilizado durante a aquisição de dados no aerolevanteamento HeliMAG.....	40
Figura 21: Comparação entre os dados magnéticos (amplitude do sinal analítico) dos aerolevanteamentos SPECTREM (esquerda) e HeliMAG (direita).....	41
Figura 22: Comparação entre geologia regional da área do Projeto Córrego do Sítio e dados de contagem total do aerolevanteamento HeliMAG.....	42
Figura 23: Comparação entre a geologia regional do Projeto Córrego do Sítio e mapa ternário de radioelementos proveniente do aerolevanteamento HeliMAG. ....	43
Figura 24: Comparação entre o modelo digital de terreno e mapa ternário gamaespectrométrico na área de interesse.....	44
Figura 25: Comparação entre a geologia regional e dados de concentração de potássio do aerolevanteamento HeliMAG.....	44
Figura 26: Comparação entre geologia regional e dados de razão Th/K do aerolevanteamento HeliMAG.....	45
Figura 27: Comparação entre a condutividade aparente calculada a partir do canal 2, componente Z, do aerolevanteamento SPECTREM e geologia regional. ....	46
Figura 28: Comparação da condutividade aparente calculada a partir do canal 7, componente Z do aerolevanteamento SPECTREM e geologia regional. ....	47
Figura 29: Geologia regional (à esquerda) e anomalias identificadas e ranqueamento concluído por SPECTREM Air (2002) sobre dados de condutividade aparente <i>late-time</i> (canal 7).. .....	48

Figura 30: Lineamentos estruturais sobre dados aerogeofísicos. À esquerda, dados de razão Th/K. À direita, dados de condutividade aparente <i>late-time</i> (canal 7). .....	49
Figura 31: Comparação entre a geologia regional e dados magnéticos reduzidos ao pólo. ....	49
Figura 32: Geologia regional, derivada vertical dos dados magnéticos reduzidos ao pólo e identificação das BIF mencionadas no texto. ....	50
Figura 33: Respostas geofísicas esperadas dos litotipos dominantes na área.....	52
Figura 34: Lineamentos magnéticos identificados sobre amplitude do sinal analítico e comparação com geologia regional. ....	53
Figura 35: Roseta mostrando as direções dos lineamentos interpretados .....	54
Figura 36: Efeitos das falhas transcorrentes interpretadas a partir de lineamentos magnéticos sobre a anomalia magnética da BIF 4, na região central da área de interesse. ....	55
Figura 37: Efeitos das falhas transcorrentes interpretadas a partir de lineamentos magnéticos sobre a anomalia magnética da BIF 1, na região do bloco NE. ....	56
Figura 38: Geologia regional e estruturas interpretadas.....	57
Figura 39: Falhas transcorrentes interpretadas sobre topografia na região do bloco NE. ....	57
Figura 40: Relação entre lineamentos NNE-SSW, dados aerogeofísicos e lineamentos estruturais .....	58
Figura 41: Padrão complexo da anomalia magnética da BIF 4 e consequências das estruturas interpretadas .....	59
Figura 42: Corpos modelados para a anomalia da BIF 4, estruturas interpretadas e falhas transcorrentes modeladas.....	60
Figura 43: Relação entre corpos tabulares modelados e isosuperfície de susceptibilidade magnética obtida a partir do modelo de inversão .....	60
Figura 44: Modelo construído a partir da modelagem direta da anomalia magnética da BIF magnética na área do alvo A .....	61

Figura 45: Modelo de frentes de empurrão proposto por Sales (1998) para explicar a geometria do pacote de metavulcanossedimentares (camada azul e verde) que hospeda os depósitos de Lamego e Cuiabá, na porção oeste do QF.....	62
Figura 46: Mapas litogeofísicos obtidos a partir dos dados magnéticos e gamaespectrométricos. ....	64
Figura 47: Mapa de interpretação qualitativa criado a partir dos mapas litogeofísicos. ....	64
Figura 48: Comparação dos dados aerogeofísicos e geologia regional na área do bloco central. ....	66
Figura 49: Amplitude do sinal analítico sobre a área do bloco central e localização dos principais depósitos da área. ....	67
Figura 50: CDI sobre os depósitos São Bento e Shaft, corpos de minério São Bento e Shaft e antigos desenvolvimentos da mina São Bento .....	68
Figura 51: Comparação entre dados de razão Th/K e lineamentos estruturais mineralizados na região do bloco central .....	71
Figura 52: Amplitude do sinal analítico e interpretação dos lineamentos magnéticos identificados na região do bloco central. ....	72
Figura 53: Condutividade aparente e lineamentos magnéticos interpretados na região do bloco central. ....	73
Figura 54: Modelo digital de terreno e estruturas interpretadas na região do bloco central. ....	74
Figura 55: Comparação entre as falhas transcorrentes interpretadas, os corpos de minério em profundidade da mina São Bento e dados aerogeofísicos .....	74
Figura 56: Relação entre dados magnéticos e EM, estruturas interpretadas e lineamentos estruturas mineralizados na região do bloco central.....	75
Figura 57: Correlação entre posição dos corpos de minério, condutores e isosuperfície do modelo invertido na região do bloco central .....	77
Figura 58: Correlação entre zonas desmagnetizadas e condutores nas CDI na região do bloco central .....	78
Figura 59: Correlação entre o modelo de inversão magnético, anomalias nas CDI, falhas modeladas e topografia na região do bloco central .....	79

Figura 60: Modelagem dos dados EM sobre o alvo São Bento e sua extensão NE interpretada e relação com falhas modeladas .....	81
Figura 61: Modelo esquemático representando os efeitos das estruturas NWW-SEE observadas no bloco central.....	82
Figura 62: Comparação dos dados aerogeofísicos e geologia regional na área do bloco SW.....	83
Figura 63: Dados de amplitude do sinal analítico sobre a região do bloco SW, lineamentos mineralizados e cavas Rosalino, Cachorro Bravo e Carvoaria Velha.....	84
Figura 64: Dados de amplitude do sinal analítico, cavas e estruturas interpretadas na região do bloco SW.....	86
Figura 65: Topografia, cavas e estruturas interpretadas na região do bloco SW.....	87
Figura 66: Dados de razão Th/K, cavas e lineamentos mineralizados na região do bloco SW.....	87
Figura 67: Dados de condutividade aparente <i>late-time</i> (canal 7), cavas, lineamentos estruturais e projeção dos corpos de minério associados ao lineamento Córrego do Sítio na região do bloco SW.....	88
Figura 68: Condutividade aparente <i>late-time</i> (canal 7) sobre amplitude do sinal analítico, cavas, lineamentos estruturais e projeção dos corpos de minério associados ao lineamento Córrego do Sítio na região do bloco SW.....	89
Figura 69: Dados de condutividade aparente <i>late-channel</i> (canal 7) sobre razão Th/K, cavas, lineamentos estruturais e projeção dos corpos de minério associados ao lineamento Córrego do Sítio na região do bloco SW.....	89
Figura 70: Razão Th/K, lineamentos mineralizados, zonas de cisalhamento interpretadas, cavas e localização das anomalias EM na região do bloco SW.....	90
Figura 71: Dados de condutividade aparente <i>late-time</i> (canal 7) sobre amplitude do sinal analítico, zonas de cisalhamento interpretadas e cavas na área do alvo L.....	90
Figura 72: Placa de Maxwell usada para modelar a anomalia do alvo L, corpos de minério do lineamento Córrego do Sítio e CDI que cruza a anomalia EM.....	91
Figura 73: Placa de Maxwell usada para modelar a anomalia do alvo L, corpos de minério do lineamento Córrego do Sítio e furos de sondagem .....	93

Figura 74: Placas modeladas para as anomalias dos alvos L e João Burro, corpos de minério do lineamento Córrego do Sítio e depósito João Burro e furos de sondagem na área do alvo João Burro sob dados de condutividade aparente plotados sobre a topografia.....	94
Figura 75: Comparação entre geologia regional e dados aerogeofísicos para a área do bloco NE.....	95
Figura 76: Comparação entre geologia regional, lineamentos mineralizados e amplitude do sinal analítico na área do bloco NE .....	96
Figura 77: Comparação entre amplitude do sinal analítico e condutividade aparente <i>late-channel</i> (canal 7) na área do bloco NE.....	97
Figura 78: Comparação entre dados de razão Th/K e modelo digital de terreno na região do bloco NE.....	98
Figura 79: Dados de condutividade aparente <i>late-channel</i> (canal 7) sobre razão Th/K e amplitude do sinal analítico, lineamentos mineralizados, zona de cisalhamento interpretada e ranqueamento de anomalias EM na região do bloco NE.....	99
Figura 80: Falhas transcorrentes e zonas de cisalhamento sobre condutividade aparente <i>late-channel</i> (canal 7) e amplitude do sinal analítico na região do bloco NE. ....	100
Figura 81: Estruturas interpretadas sobre o modelo digital de terreno na região do bloco NE.....	101
Figura 82: Dados magnéticos reduzidos ao pólo, zonas de cisalhamento interpretadas e lineamentos mineralizados na região do bloco NE. ....	102
Figura 83: Corpos tabulares usados para modelar a porção NE da anomalia magnética da BIF 5 sob dados de condutividade aparente <i>late-time</i> (canal 7) e amplitude do sinal analítico sobre a topografia.....	103
Figura 84: Comparação entre corpos tabulares modelados, modelo obtido através de inversão MVI dos dados magnéticos, dados EM e zona de cisalhamento .....	104
Figura 85: Comparação entre CDI sobre os alvos A1 e MP, isosuperfície do modelo magnético invertido e zona de cisalhamento interpretada.....	105
Figura 86: Comparação entre CDI sobre o alvo MP, zona de cisalhamento interpretada e placa de Maxwell usada para modelar a anomalia MP.....	106

Figura 87: Seção interpretativa a partir dos resultados da interpretação dos dados magnéticos.....	106
Figura 88: Geologia local e cavas na região do alvo A.....	108
Figura 89: Alinhamento Brumal, localização da Mina do Pilar e cavas sobre geologia regional.....	109
Figura 90: Comparação entre geologia local e dados aerogeofísicos na região do alvo A.....	110
Figura 91: Mapeamento local sobre dados de redução ao pólo na região do alvo A... ..	111
Figura 92: Geologia regional, dados de condutividade aparente <i>late-time</i> (canal 7) e ranqueamento de anomalias EM.....	112
Figura 93: Placas de Maxwell usadas na modelagem das anomalias associadas ao alinhamento Brumal sob dados de condutividade aparente <i>late-channel</i> (canal 7) sobre a topografia.....	113
Figura 94: Comparação entre os dados de razão Th/K e topografia na região do alvo A.....	114
Figura 95: Comparação entre dados de amplitude do sinal analítico e condutividade aparente <i>late-time</i> (canal 7) na região do alvo A.....	114
Figura 96: Comparação entre dados de razão Th/K e condutividade aparente <i>late-channel</i> (canal 7) na região do alvo A.....	115
Figura 97: Dados de condutividade aparente <i>late-channel</i> (canal 7) sobre amplitude do sinal analítico, zonas de cisalhamento interpretadas e ranqueamento de anomalias EM na região do alvo A.....	116
Figura 98: Descrição e logs de susceptibilidade magnética, condutividade elétrica e concentração de ouro do furo de sondagem F12 e visualização em 3D mostrando o furo modulado por condutividade e sua relação com os corpos de minério modelados.....	117
Figura 99: Falhas transcorrentes, zonas de cisalhamento e lineamentos magnéticos sobre dados de amplitude do sinal analítico na região do alvo A.....	118
Figura 100: Falhas transcorrentes, zonas de cisalhamento e lineamentos magnéticos sobre dados de condutividade aparente <i>late-channel</i> (canal 7) na região do alvo A....	119
Figura 101: Comparação entre as respostas geofísicas dos alvos A e São Bento.....	120

Figura 102: Resposta geofísica da Mina do Pilar .....	121
Figura 103: Comparação entre os alinhamentos Brumal e Córrego do Sítio e zonas de cisalhamento no alvo A e blocos SW, central e NE. ....	121
Figura 104: Seção esquemática do modelo de frentes de empurrão proposto para o pacote de BIF e sua relação com os EM.....	124

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Medidas de susceptibilidade magnética de amostras de testemunhos de sondagem da mina São Bento (Cant, 2010). .....	69
Tabela 2: Dados petrofísicos obtidos a partir de amostras da mina Hill 50, Western Australia (Modificado de Vella, 1995).....	70
Tabela 3: Alvos recomendados, seus respectivos contextos geofísicos e geológicos e prioridades estabelecidas. ....	129

## 1. INTRODUÇÃO

A região do Quadrilátero Ferrífero (QF) foi a maior produtora de ouro no Brasil desde o início do século XVIII até o final da década de 70, quando teve início a corrida do ouro na região de Serra Pelada. Representa uma província aurífera de classe mundial, com produção histórica que supera 1000 toneladas de ouro, totalizando mais de 40% da produção total brasileira (Lobato et al., 2001).

O uso da geofísica na busca por depósitos minerais é reconhecido internacionalmente e têm se tornado cada vez mais rotineiro em programas de exploração de pequenas e grandes empresas no mercado da mineração. O Projeto Rio das Velhas, um conjunto de aerolevantamentos executados sobre regiões prospectivas do QF com financiamento público e privado no início da década de 90, se destaca como um exemplo de incentivo ao uso da geofísica para exploração mineral.

Tendo em vista o contexto preocupante em que se encontra o mercado de exploração mineral atualmente, que sofreu com quedas significativas nos preços das *commodities*, novas metodologias que permitam maior retorno do capital investido através da aplicação inteligente de recursos em campanhas de exploração são procuradas com grande interesse.

A indústria aurífera representa um bom exemplo. Devido à recente, e ainda em curso, crise do ouro, grandes mineradoras foram fortemente afetadas pela queda nos preços e precisaram tomar medidas drásticas em resposta (Venkatakrishnan, 2014). A reação natural das grandes mineradoras a oscilações do mercado é retração e foco das atividades em áreas com operações consolidadas, abandonando oportunidades de investimento em longo prazo.

A exploração na indústria mineral é focada em resultados em longo prazo e oferece risco de não retornar o capital investido nas campanhas. Então, programas de exploração foram fortemente afetados pelas crises e soluções de melhor custo-benefício são procuradas, mais adequadas aos limitados orçamentos atuais.

A área de interesse neste trabalho, denominada Projeto Córrego do Sítio, é caracterizada pela presença de duas minas operadas pela AngloGold Ashanti: Córrego do Sítio e a recentemente adquirida São Bento. As atividades de exploração da empresa

tiveram foco no aumento das reservas de ambas as minas nas proximidades dos complexos em operação.

As minas do Complexo Córrego do Sítio são conhecidas por seu desempenho irregular e já enfrentaram ameaças de fechamento. A mina São Bento, hoje conhecida como Córrego do Sítio II, é operada desde o século 19 e teve sua operação paralisada e retomada em diversas ocasiões. Recentemente, em 2010, foi adquirida pela AngloGold Ashanti numa transação multimilionária.

Portanto, um considerável investimento foi feito numa área historicamente problemática e foi seguido por uma queda brusca no preço do ouro, ameaçando novamente as operações da empresa nesta área. Então, uma reavaliação do potencial da região e formas de reduzir os custos das operações são necessárias para assegurar o futuro das operações da AngloGold Ashanti na região.

A geofísica se insere neste contexto como uma ferramenta que, em conjunto com outras disciplinas, como geoquímica, geologia estrutural e outras, é capaz de tornar programas de exploração mais eficientes, a partir do planejamento eficiente de programas de sondagem, por exemplo.

A geofísica é tida como fonte de informações que auxiliam no processo de tomada de decisão na exploração mineral, principalmente na locação eficiente de furos de sondagem. Levantamentos geofísicos frequentemente apresentam bom custo-benefício em comparação às demais metodologias aplicadas historicamente, principalmente em locais onde o mapeamento geológico é afetado pela falta de afloramentos de rocha fresca e em casos de depósitos cegos.

O QF hospeda diversos tipos diferentes de depósitos auríferos, que variam desde os conhecidos depósitos do tipo orogênico, os mais importantes da região, até depósitos do tipo paleoplacer e do tipo Jacutinga. Além disso, são conhecidas diversas variantes do espectro de depósitos orogênicos, cuja diferença principal se dá na rocha encaixante.

São conhecidas mineralizações do tipo orogênico em formações ferríferas (Cuiabá, São Bento), em vulcanoclásticas carbonosas alteradas, conhecidos como lapa seca (Morro Velho; Vial et al., 2007), em metassedimentares carbonosas (Córrego do Sítio), em vulcânicas máficas (Jura Vieira) e vulcânicas ultramáficas (Pari, Santana) (Lobato et al., 2001b).

Diferenças em características geológicas entre eles podem resultar em diferenças fundamentais nas propriedades físicas do minério e, conseqüentemente, em sua resposta geofísica. Mesmo assim, é notavelmente pequena a quantidade de trabalhos publicados centrados na caracterização geofísica de depósitos auríferos e sua aplicação na exploração mineral no QF, que se encontra recoberto por diversos levantamentos geofísicos aéreos e terrestres, frutos de iniciativas públicas e privadas. Portanto, a caracterização geofísica e análise quantitativa dos principais tipos de depósitos auríferos na área e das zonas de alteração associadas se faz necessária para possibilitar o uso eficiente de dados geofísicos para exploração mineral no QF.

Este trabalho visa a integração e interpretação de dados aerogeofísicos para contribuir para o entendimento da geologia da área de interesse e para o desenvolvimento de um modelo exploratório para os depósitos auríferos lá encontrados, buscando consolidar a estratégia de exploração nas áreas de posse da AngloGold Ashanti. Espera-se, também, adicionar valor às operações no local através da identificação de alvos prospectivos.

O Quadrilátero Ferrífero possui evolução estrutural complexa e ainda não totalmente compreendida (Martins Pereira et al., 2007). Em escala local, ainda não se tem um modelo definitivo capaz de explicar e prever as conseqüências de estruturas observadas nas minas. Isto afeta diretamente o entendimento geológico da região e o modelamento de corpos de minério, resultando em corpos de minério esparsos e de pouca continuidade que prejudicam o desempenho da lavra e beneficiamento do minério.

Dentre os trabalhos de exploração geofísica por depósitos auríferos no QF, podem ser citados Silva (2005) e Guimarães (2011), ambos com foco na geração de alvos para programas de exploração.

Silva (2005), num trabalho de escala regional, usou os dados aerogeofísicos do Projeto Rio das Velhas para desenvolver análises de prospectividade sobre a área do *greenstone belt* Rio das Velhas, a partir de um modelo exploratório que considerava as respostas magnética, gamaespectrométrica e eletromagnética de depósitos de ouro orogênicos no Quadrilátero Ferrífero. Definiu diversas zonas prospectivas e observou uma boa correlação com os depósitos conhecidos, atribuindo confiança ao modelo de prospectividade usado.

Guimarães (2011), num trabalho de escala local, integrou dados magnéticos, eletromagnéticos e de polarização induzida através de inversões 2D e 3D e determinou zonas prospectivas com base nas relações entre os modelos obtidos. Neste caso, foram consideradas variações no modelo exploratório por depósitos orogênicos, como a falta de resposta eletromagnética no caso de depósitos em sulfetos disseminados, ou ricos em pirita, e a consequente predominância de efeitos de polarização induzida.

### 1.1. ÁREA DE INTERESSE E GEOLOGIA REGIONAL

A área de interesse, denominada Projeto Córrego do Sítio, se encontra na porção NE do Quadrilátero Ferrífero, no município de Santa Bárbara, distante cerca de 50 km de Belo Horizonte (Figura 1).

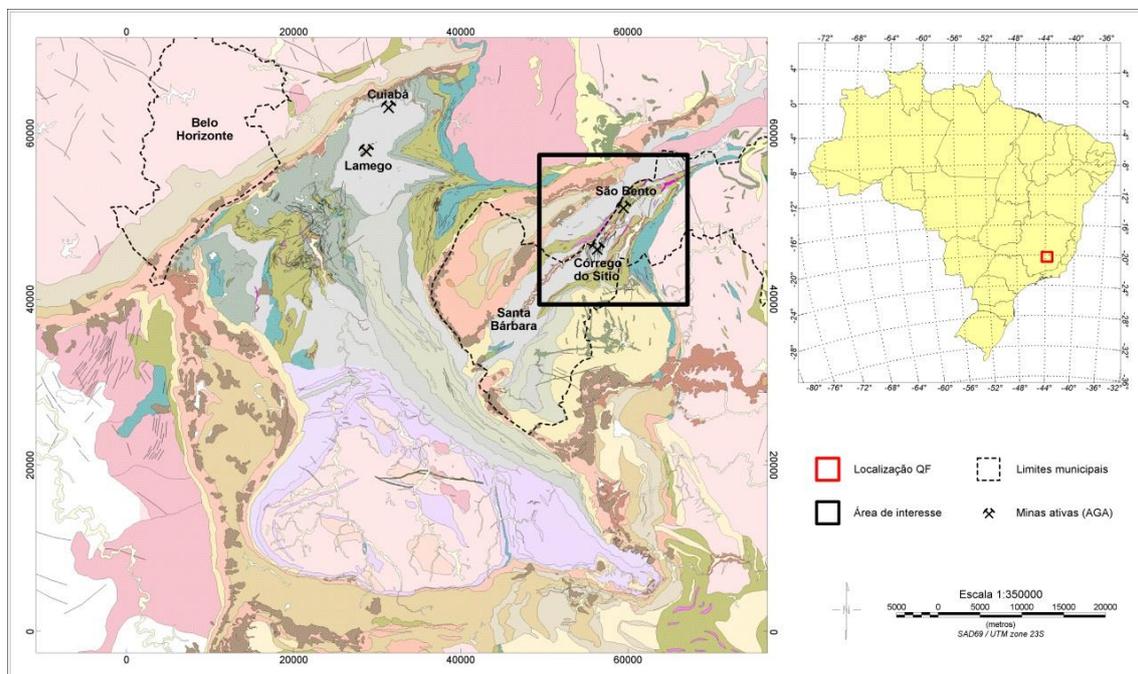


Figura 1: Localização do Quadrilátero Ferrífero (QF) e da área de interesse, além das principais operações da AngloGold Ashanti no QF e limites municipais, sobre geologia regional.

O Quadrilátero Ferrífero é um terreno arqueano granito-greenstone coberto por sequências sedimentares e vulcanossedimentares proterozóicas, localizado na porção sul do Cráton São Francisco. Embora denominado devido à geometria de seus depósitos de ferro, que lhe conferem a forma quadrangular, foi a mais importante região produtora de ouro desde o século XVIII até a década de 70 e representa uma província aurífera de classe mundial com centenas de ocorrências individuais, depósitos pequenos (exemplos: Raposos, Engenho D'Água, Juca Vieira.) e depósitos de classe mundial (Morro Velho e Cuiabá) (Lobato et al. 2001a).

O Quadrilátero Ferrífero é composto por quatro domínios estruturais principais: o embasamento cristalino Arqueano, o Supergrupo Rio das Velhas, o Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi (Alkmin & Marshak, 1998; Figura 2).

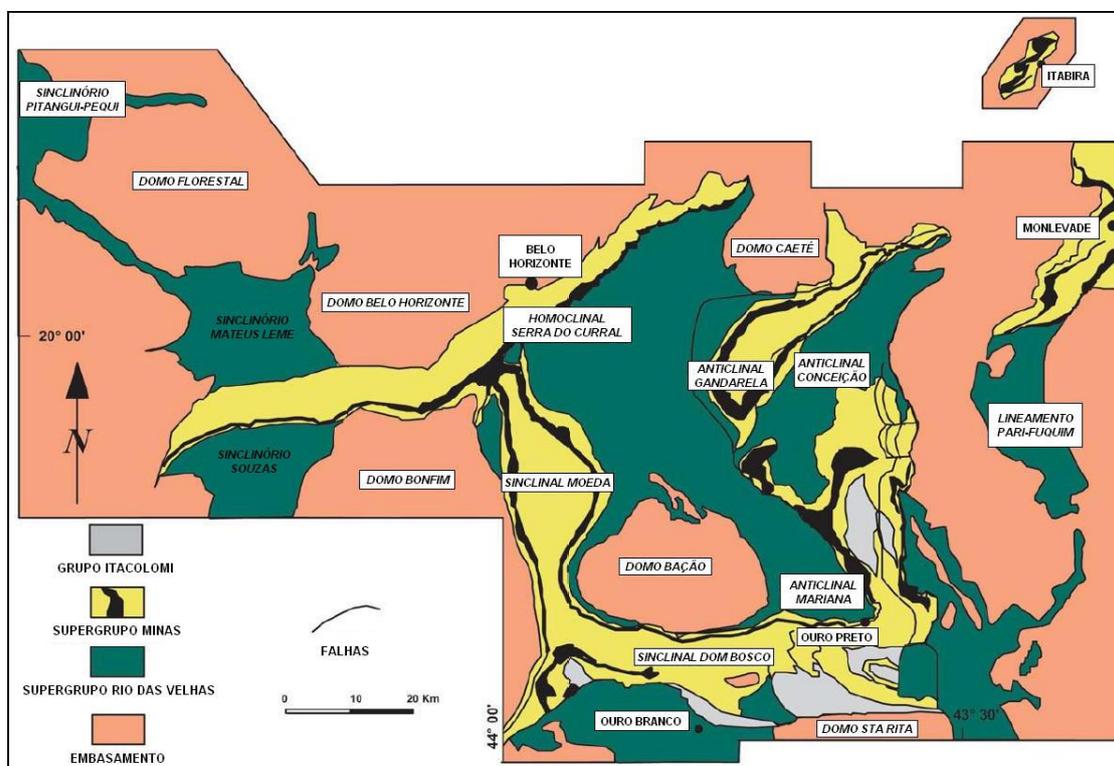


Figura 2: Geologia simplificada do QF (modificado de Noce & Alkmin, 2006).

O embasamento granito-gnáissico é predominantemente composto por gnaiesses de composição tonalito-trondhjemitó-granodiorito (TTG; domos Bação, Belo Horizonte, Caeté e Santa Bárbara) formados durante os intervalos de 3380 Ma a 2900 Ma (Baltazar e Zucchetti, 2007).

O Supergrupo Rio das Velhas, Neoarqueano, é interpretado como uma sequência greenstone belt e é o principal domínio em termos de mineralização aurífera (Lobato et al., 2001a). É composto pelos grupos Nova Lima, basal, composto por rochas vulcânicas e metassedimentares químicas e clásticas, e Maquiné, basicamente composto por quartzitos, conglomerados e filitos, separados por uma discordância angular. Vulcanismo basáltico no Grupo Nova Lima é datado em  $2927 \pm 140$  Ma (Lobato et al., 2001c).

O Grupo Nova Lima hospeda a grande maioria dos depósitos auríferos do Quadrilátero Ferrífero e é dividido em uma unidade toleítica-komatiítica basal com sedimentares químicas associadas, uma unidade intermediária vulcanoclástica com

vulcanismo félsico associado e uma unidade clástica superior (Baltazar & Zucchetti, 2007). A Figura 3 mostra a extensão do Supergrupo Rio das Velhas colorida de acordo com sua associação.

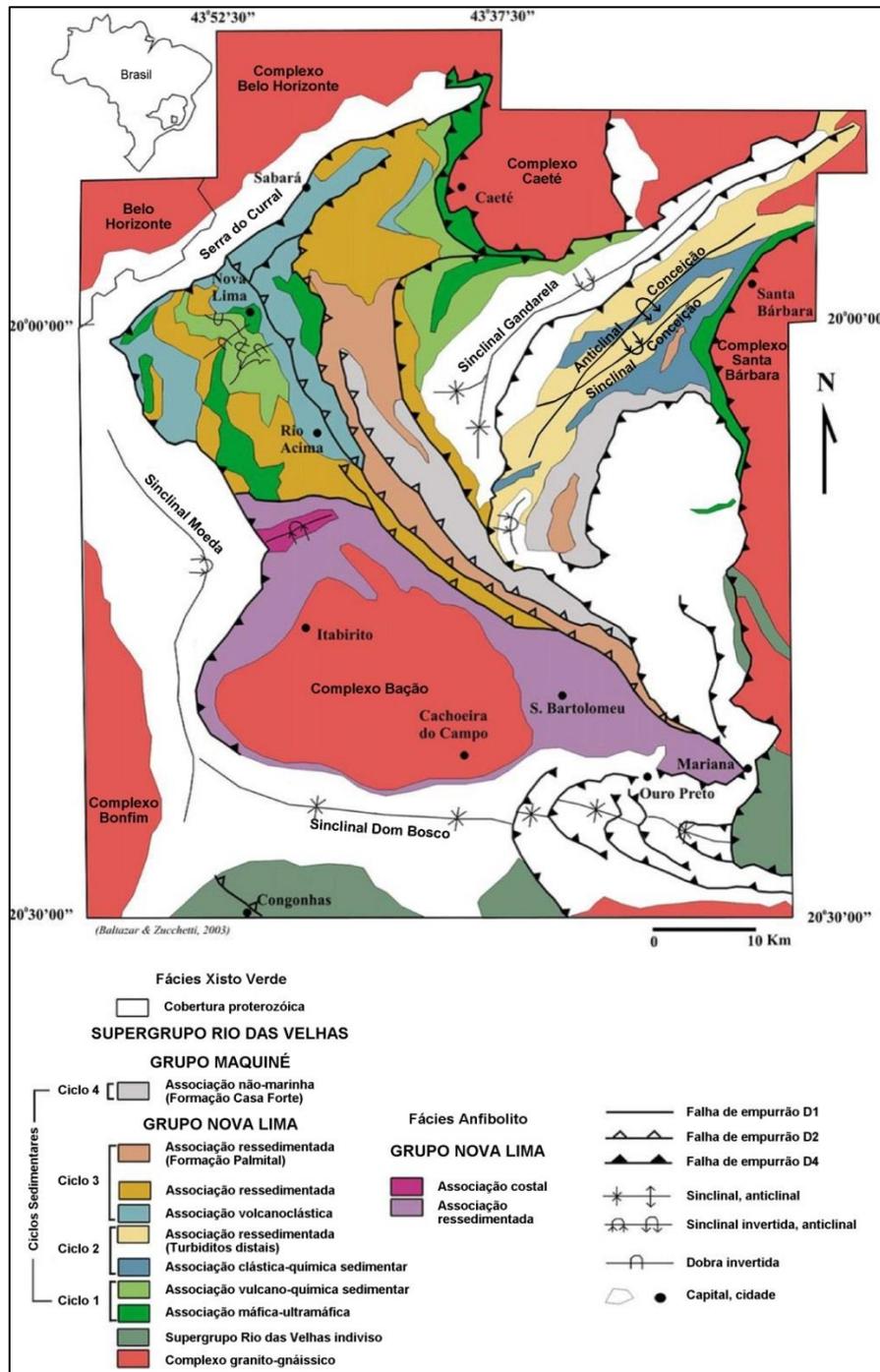


Figura 3: Geologia simplificada do Supergrupo Rio das Velhas (modificado de Baltazar & Zucchetti, 2007).

O Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi compõem as sequências supracrustais Proterozóicas que recobrem o terreno granito-greenstone Arqueano. O Supergrupo Minas é o pacote metassedimentar cujas dobras formam a geometria característica do

Quadrilátero Ferrífero. É composto por conglomerados e arenitos na base, seguidos por BIF tipo Lago Superior (Formação Cauê) e, então, uma sequência carbonática (Formação Gandarela). Estes, por sua vez, são recobertos por horizontes formados em ambiente deltaicos (Grupo Piracicaba) e os turbiditos, conglomerados, diamictitos e vulcanoclásticas do Grupo Sabará. O grupo Itacolomi é composto basicamente por arenitos e conglomerados com clastos de BIF e aflora em pequenas extensões na porção SE do Quadrilátero Ferrífero (Marshak & Alkmin, 1998).

A Figura 4 mostra a coluna estratigráfica para o Quadrilátero Ferrífero.

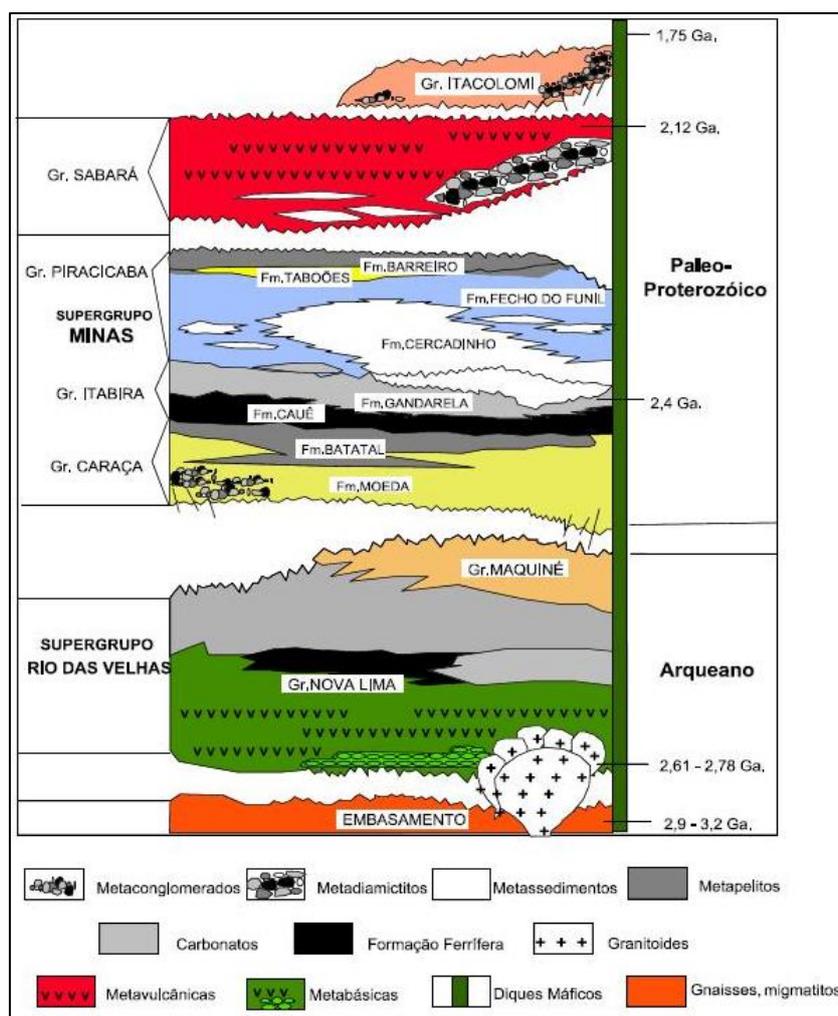


Figura 4: Coluna estratigráfica do QF (modificado de Alkmim & Marshak, 1998).

## 1.2. GEOLOGIA LOCAL

A geologia da área de interesse é dominada por unidades do Grupo Nova Lima, especificamente pelas unidades Quebra Ossos, Santa Quitéria e Córrego do Sítio, cortadas por um enxame de diques máficos de idade incerta (Porto, 2008) (Figura 5).

O complexo granito-gnáissico Santa Bárbara e os quartzitos, conglomerados e filitos do Supergrupo Minas são encontrados nas porções S e NW da área, respectivamente. A feição circular ao sul é um grande alto topográfico conhecido por Serra do Caraça, constituído basicamente por quartzitos. Ao NW são observados os itabiritos da Formação Cauê.

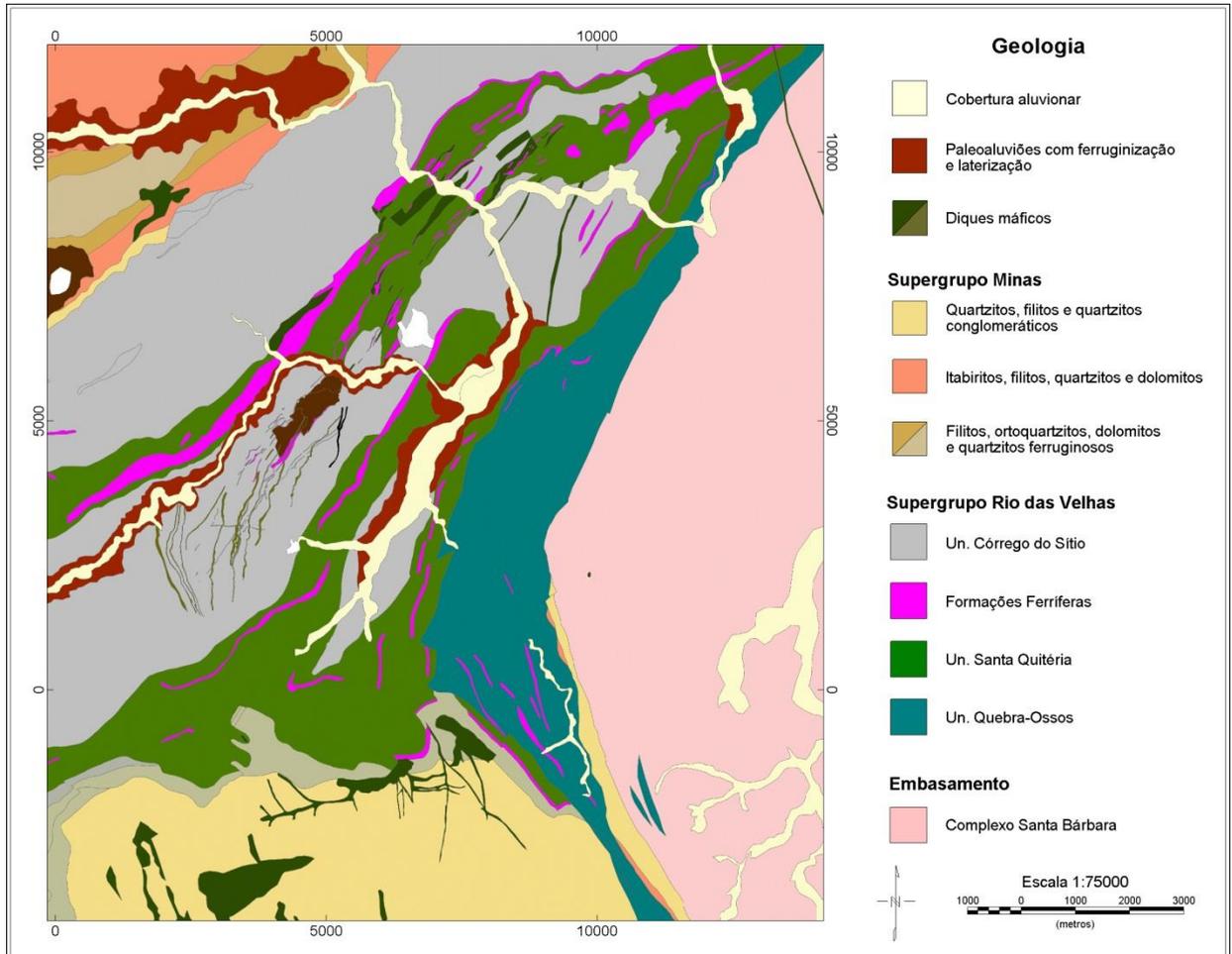


Figura 5: Geologia regional da região do Projeto Córrego do Sítio.

A unidade Quebra Ossos é observada na porção oeste da área de interesse. É constituída basicamente por rochas metaltramáficas, komatiíticas maciças e talco xistos, com BIF subordinadas.

A unidade Santa Quitéria é constituída basicamente por clorita-sericita xistos, xistos carbonosos e BIF. Encontra-se em contato tectônico invertido com as demais unidades. Ocasionalmente apresenta contato gradacional com a unidade Córrego do Sítio. Inclui a BIF São Bento, que hospeda o depósito de mesmo nome (AngloGold Ashanti, 2013).

A unidade Córrego do Sítio sucede na sequência e é caracterizada por metapelitos, metapsamitos e BIF subordinadas, com ocorrência frequente de horizontes carbonosos. É dividida em unidades Superior, Intermediária e Inferior. A unidade Superior é caracterizada pela ocorrência de uma sequência de rochas metassedimentares clásticas com metapsamitos predominantes e metapelito carbonosos subordinados. A unidade Intermediária é composta predominantemente por metapelitos carbonosos e metagrauvaca subordinada e é a mais importante em termos de mineralização. A unidade Inferior é caracterizada por intercalações de metagrauvacas e metapelito carbonosos com lentes de BIF (AngloGold Ashanti, 2013).

As BIF apresentam espessuras médias que variam entre 70 e 120 metros, chegando a atingir 200 metros em alguns locais. É observada grande variação faciológica e composicional vertical e lateral, que permite a identificação de diversos litotipos principais: Itabirito pelítico, itabirito quartzoso, itabirito goethítico, metachert ferruginoso e xisto ferruginoso (Roberto Moreno, 2013, pers. comm.).

Os diques máficos são classificados em quatro famílias diferentes: DB1, DB2, DB3 e DB4. Os diques DB1 apresentam largura variável de 10 a 50 metros e são representados por clorita xistos e metagabros. Ocorrem principalmente na região central e SW. Os diques DB2 e DB3 apresentam espessura de 3 a 10 metros. Alterados, apresentam quartzo, carbonato e clorita como constituintes principais. Os diques DB4 apresentam espessura de cerca de 60 metros, ocorrem na região NE da área e são considerados os mais preservados e recentes dos diques máficos. Apesar da textura lepidoblástica, são observados neles cristais de anfibólio de granulação grossa (Porto, 2008).

A porção leste do Quadrilátero Ferrífero é caracterizada por inversão estratigráfica com cavalgamento do complexo Santa Bárbara sobre o Supergrupo Rio das Velhas devido a esforços tectônicos de direção leste para oeste durante a Orogenia Brasileira, num regime compressional de vergência para oeste (AngloGold Ashanti, 2013).

A área principal do Projeto Córrego do Sítio é historicamente interpretada como composta por três blocos estruturais (Figura 6).

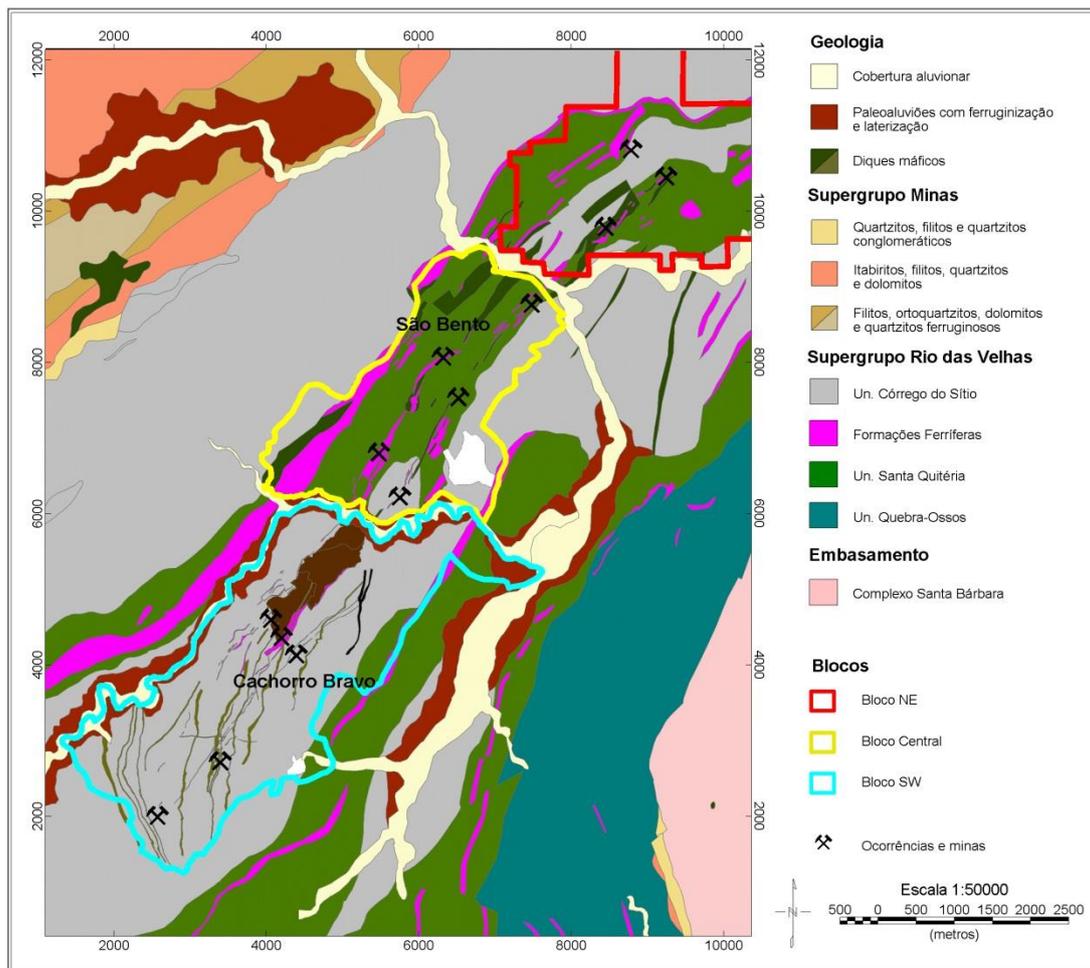


Figura 6: Blocos estruturais e alvo A sobre geologia regional na área do Projeto Córrego do Sítio.

O bloco SW é caracterizado por domínio da unidade Córrego do Sítio, com menor número de ocorrências de BIF e maior número de diques. Compreende o depósito Cachorro Bravo, o mais importante em comparação aos demais de mesmo tipo.

O bloco central exibe predomínio da unidade Santa Quitéria e ocorrências mais significativas de BIF. Compreende o depósito São Bento, o mais importante da área de interesse. O bloco NE é caracterizado por ambas as unidades, lentes de BIF e ocorrência de diques espessos.

Em termos de conhecimento geológico, os blocos SW e central apresentam número consideravelmente maior de furos de sondagem, devido à presença das duas minas, cujos arredores são alvos constantes de exploração visando o aumento das reservas. O bloco NE, que não apresenta depósitos significativos, em comparação aos demais, apresenta poucas sondagens e ainda encontra-se em fase de exploração preliminar.

### 1.3. EVOLUÇÃO ESTRUTURAL

A história deformacional do Quadrilátero Ferrífero é longa, complexa e ainda alvo de controvérsias e incertezas em escala regional e local. De forma geral, o embasamento Arqueano ocorre na região na forma de domos (Bação, Belo Horizonte, Caeté; Figura 2), cercados pelos Supergrupos Minas e Rio das Velhas na forma de grandes estruturas de primeira ordem (sinclinais Moeda, Dom Bosco e homoclinal Serra do Curral). O padrão do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero define uma estrutura de *dome-and-keel* (Alkmin & Marshak, 1998).

Outros dois conjuntos de estruturas pós-Minas completam o cenário regional do Quadrilátero Ferrífero. O primeiro consiste em dobras de direção NE de escala regional (Sinclinal Gandarela e Anticlinal Conceição). O outro conjunto está associado a falhas de empurrão com vergência para oeste e estruturas associadas, como dobras de vergência para norte (Alkmin & Marshak, 1998).

O greenstone belt Rio das Velhas é desmembrado tectonicamente e fortemente deformado (Noce et al. 2007). Baltazar & Zucchetti (2007) dividiram o Quadrilátero Ferrífero em quatro domínios estruturais de acordo com a direção de suas estruturas regionais e interpretaram que três eventos deformacionais foram responsáveis pela formação de quatro gerações de estruturas no greenstone belt.

A primeira e segunda gerações foram atribuídas a um evento compressional Arqueano, pré-Minas, a terceira geração foi atribuída a um evento Paleoproterozóico extensional e a quarta a um evento Neoproterozóico compressional.

Segundo os autores, as estruturas D1 incluem falhas de empurrão de direção leste e mergulho para norte e dobras abertas de vergência para o sul e caimento ENE. Indicam um evento compressional N-S, de idade superior a 2749 Ma (afetou apenas o Grupo Nova Lima), que formou um sistema de dobramentos-e-cavalgamentos.

A segunda geração D2 consiste de falhas de empurrão de direção NW e dobras reclinadas cerradas a isoclinais de direção NW com vergência para SW que indicam uma compressão de vergência SW que afetou ambos os grupos Nova Lima e Maquiné. Diversos depósitos de Au na região oeste do Quadrilátero estão associados a zonas de cisalhamento D2.

Ribeiro-Rodrigues (1998) atribui os eventos Arqueanos à Orogenia Rio das Velhas, caracterizada por tectônica compressiva, dominada por deformação *strike-slip*. Entretanto, reconhece a dificuldade na interpretação do evento, dada a natureza pervasiva dos eventos subsequentes.

Baltazar & Zucchetti (2007) não atribuem as estruturas D3, que correspondem aos domos e sinclinais regionais, a um sistema *dome-and-keel*, como proposto por Marshak & Alkmin (1998) e propõem um modelo de ascensão do embasamento granito-gnáissico e deformação associada num contexto extensional.

As estruturas D4 são falhas de empurrão e dobras de vergência para oeste, num sistema de dobramentos-e-cavalgamentos, interpretadas como sendo resultado da Orogenia Brasileira (600-500 Ma). Houve reativação de estruturas antigas e obliteração de estruturas das orogenias Rio das Velhas e Transamazônica (Ribeiro-Rodrigues, 1998).

Alkmin & Marshak (1998) sugerem que dois eventos tectônicos principais afetaram o QF. O primeiro, um evento compressional de vergência para NW seria responsável pela criação de estruturas de dobramento-e-cavalgamento e as grandes sinclinais e anticlinais de direção SW-NE, como a Anticlinal Conceição. Este evento é atribuído à Orogenia Transamazônica, cuja fase de colapso contribuiu para o desenvolvimento da estrutura de *dome-and-keel* atual, que os autores utilizam para explicar as feições D1 e D2 de Baltazar & Zucchetti (2007). O segundo evento tectônico é atribuído à Orogenia Brasileira, que sobrepôs os eventos anteriores e reativou estruturas antigas.

Ribeiro-Rodrigues (1998) divide a Orogenia Transamazônica em duas etapas. A primeira seria uma fase extensional, que resultou no soerguimento de blocos granito-gnáissicos Arqueanos. A segunda seria uma fase compressiva representada por empurrões de direção SEE-NWW.

Martins Pereira et al. (2007) sugerem que as zonas de cisalhamento mineralizadas foram formadas por eventos compressivos e transpressivos Arqueanos, associados à Orogenia Rio das Velhas. Segundo os autores, a ascensão do fluido hidrotermal se deu durante o relaxamento das zonas de cisalhamento, que foi seguido de um evento compressional que gerou estruturas paralelas à Orogenia Transamazônica.

Outras evoluções também foram propostas por equipes de exploração de empresas com interesse na área. Foram observados caimentos e variações de direção ao longo da direção NE dos corpos mineralizados na região do Projeto Córrego do Sítio, que poderiam indicar que o padrão complexo das dobras do Anticlinal Conceição, que hospeda os depósitos, pode ter sido o resultado da interferência entre as dobras SW-NE transamazônicas de Alkmin & Marshak (1998) e um evento compressivo SW-NE pré-Brasileiro. Este evento não é previsto por nenhum dos demais trabalhos citados.

Portanto, dada a complexidade da evolução do QF, não há um modelo estrutural definitivo para a área de interesse, que requer um estudo abrangente de dados estruturais. Os efeitos das estruturas sobre horizontes de interesse e suas consequências na exploração aurífera são significativos, porém não são adequadamente considerados, tornando um trabalho que as analise necessário.

#### 1.4. MINERALIZAÇÃO NA REGIÃO DO PROJETO CÓRREGO DO SÍTIO

As mineralizações auríferas na região do Projeto Córrego do Sítio são interpretadas como do tipo orogênico, seguindo a classificação proposta originalmente por Groves et al. (1998).

Segundo este modelo, os depósitos orogênicos foram formados durante processos de deformação compressional a transpressional em orógenos colisionais ou acrescionários, em profundidades que variam entre 15-20 km (hipozonal) e 2-3 km (epizonal). Possuem associação consistente com terrenos metamórficos deformados, que variam de *greenstone belts* Arqueanos a faixas metamórficas Fanerozóicas (Groves et al., 2000).

Fluidos de baixa salinidade, ricos em CO<sub>2</sub> e formados em profundidade, migraram através de grandes estruturas crustais e formaram os depósitos a partir da interação com horizontes reativos em condições físico-químicas adequadas (Goldfarb et al., 2001). Rochas ricas em ferro e carbono, como formações ferríferas e metassedimentos carbonosos, comuns na área de interesse, são consideradas exemplos de horizontes reativos.

Não há consenso quanto à origem do fluido mineralizante em sistemas orogênicos. Segundo Groves et al. (2000), dados geoquímicos e isotópicos indicam uma origem profunda, porém não permitem determinar se é decorrente de desidratação

metamórfica, tem origem magmática, ou origem mantélica. No QF, a origem dos fluidos é interpretada como sendo metamórfica (Lobato et al., 2001A; Martins Pereira et al., 2007).

As estruturas compressivas ou transpressionais de larga escala e estruturas em escala regional são consideradas por muitos o mais importante controle sobre localização de depósitos orogênicos (Groves et al, 2000; Goldfarb et al., 2001), dada a variação das demais características dos depósitos em escala mundial.

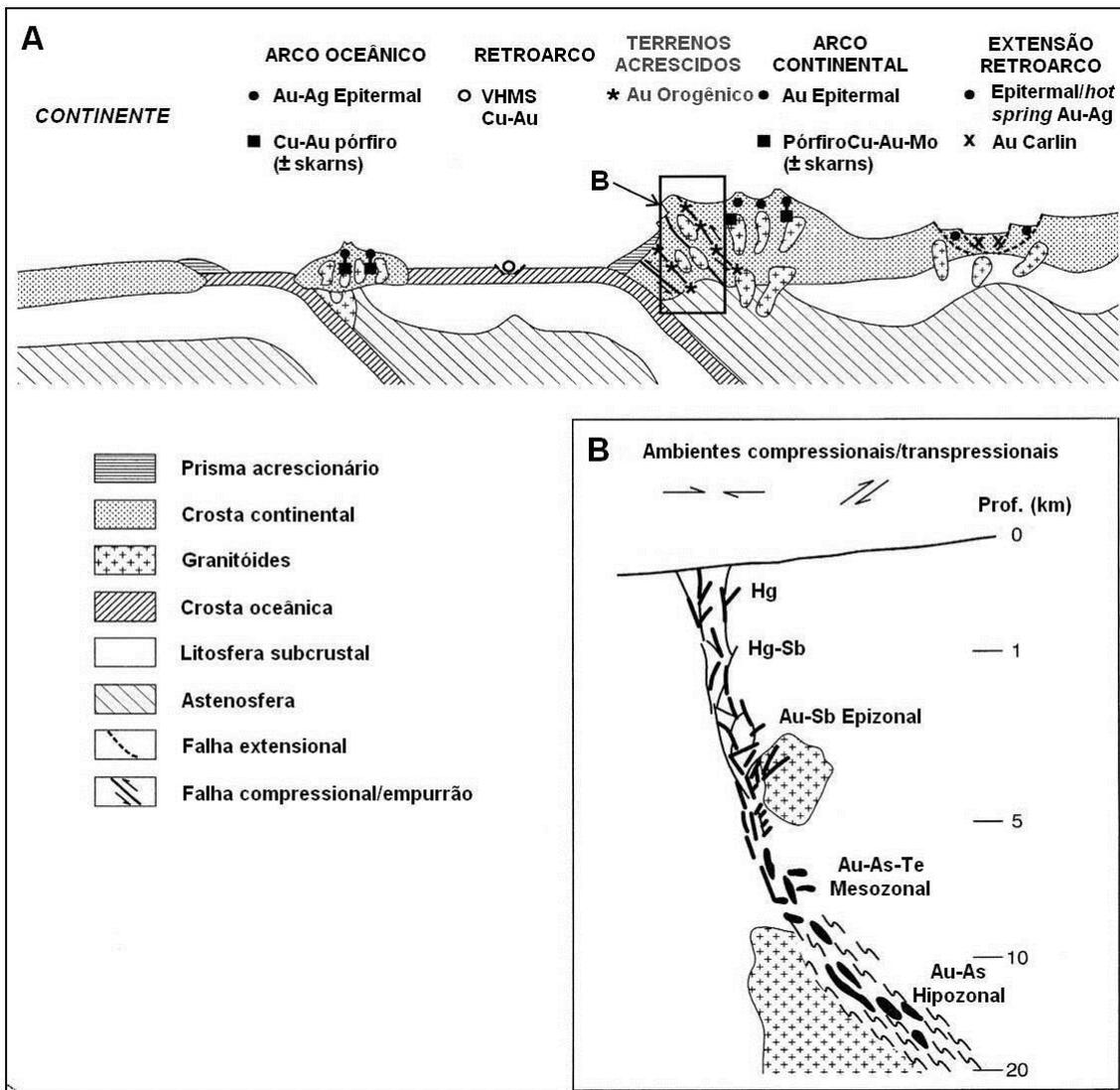


Figura 7: Figura 1 de Groves et al. (2000). Diagrama esquemático mostrando o contexto e natureza de depósitos orogênicos. (A) Ambiente tectônico de formação de diversos depósitos minerais. (B) Relação entre profundidade e associação geoquímica em depósitos orogênicos.

Depósitos orogênicos consistem normalmente de veios abundantes de quartzo ± carbonato e conteúdo variável de sulfetos (Goldfarb et al., 2001). A alteração hidrotermal associada à mineralização orogênica exibe zoneamento consistente entre o

espectro de depósitos, sendo suas espessuras variáveis de acordo com a natureza das rochas encaixantes e nível crustal de formação. Zonas de carbonatização incluem principalmente ankerita, dolomita ou calcita. Metassomatismo alcalino gera zonas de sericitização e formação de feldspato potássico. Sulfetação inclui principalmente pirita, pirrotita e arsenopirita, sendo que, em BIF, a sulfetação é extrema (Groves et al., 2000).

Os depósitos na área do Projeto Córrego do Sítio se alinham segundo três lineamentos estruturais paralelos principais: Córrego do Sítio, São Bento e Cristina (Figura 8). Os lineamentos foram interpretados a partir de evidências de campo e semelhanças entre depósitos alinhados entre si, que sugerem que foram formados ao longo das mesmas estruturas, sob condições físico-químicas semelhantes, dando origem a mineralizações similares.

Estes lineamentos se estendem ao longo de toda a área, com direção aproximadamente SW-NE e representam zonas de cisalhamento associadas aos empurrões responsáveis pelas estruturas D2 de Baltazar & Zucchetti (2007).

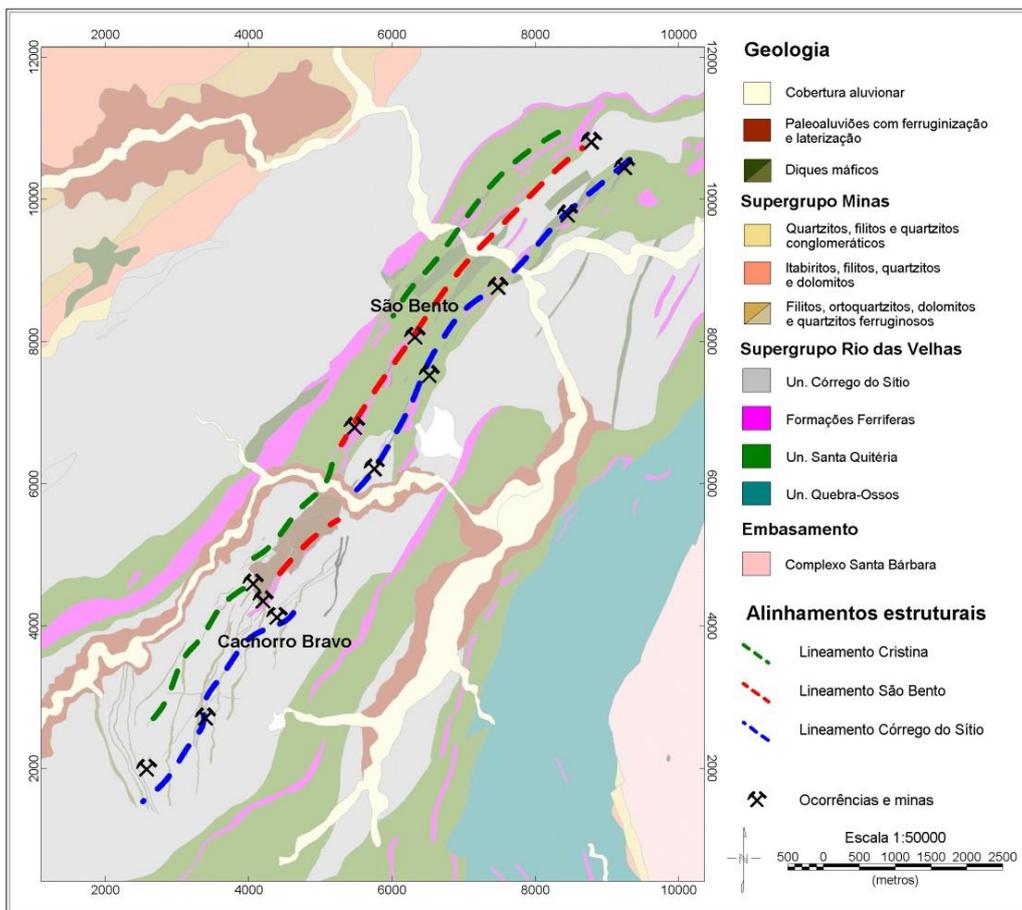


Figura 8: Lineamentos estruturais principais interpretados da região do Projeto Córrego do Sítio sobre geologia regional.

Depósitos associados ao lineamento Córrego do Sítio, denominados tipo Córrego do Sítio, são encontrados ao longo de toda a área, sendo Cachorro Bravo o mais importante. São hospedados em zonas de cisalhamento em metapelitos carbonosos da unidade Córrego do Sítio. A mineralização está associada a lentes de alteração sericítica e veios de quartzo com sulfetação disseminada fina, de direção 20°-40° e mergulho de 60° a 70° para SE, inseridas em halos de alteração carbonática (AngloGold Ashanti, 2013).

O teor de sulfetos é inferior a 3%, sendo a arsenopirita a principal em zonas afastadas de diques. Corpos de minério próximos de diques tendem a ser mais ricos em pirrotita e pirita (Porto, 2008), sendo a concentração total de sulfetos sempre baixa. O ouro ocorre como inclusões em arsenopirita e berthierita ou ao redor dos cristais de arsenopirita (AngloGold Ashanti, 2013). A Figura 9 mostra como o minério em questão é pobre em sulfetos.



Figura 9: Exemplo de mineralização no lineamento Córrego do Sítio. Furo de sondagem mostrando um veio de quartzo-carbonato com mineralização de Au-As-Sb. Quartzo com massas de berthierita hospedados em xistos carbonosos dobrados. Silicificação, sericitização e sulfetação sutil na rocha hospedeira. Modificado de (AngloGold Ashanti, 2013).

O lineamento Cristina hospeda depósitos de menor importância e antigos garimpos. Difere das mineralizações no lineamento Córrego do Sítio em função da concentração superior de As, ausência de Sb e presença de lentes de BIF parcialmente mineralizadas (AngloGold Ashanti, 2013).

O lineamento São Bento está associado a depósitos em BIF. O ouro ocorre associado a sulfetação maciça, intimamente relacionada com veios de quartzo e

sericitização, envolvida por halos de alteração carbonática (AngloGold Ashanti, 2014). O depósito São Bento, o mais importante deste tipo, apresenta zonas mineralizadas descritas pela Figura 10.

Martins Pereira et al. (2007) interpretam as características do depósito em termos de um padrão zonal de alteração hidrotermal composto por: uma zona proximal contendo quartzo+ankerita+muscovita+sulfetos, uma zona intermediária contendo quartzo+muscovita±carbonatos±sulfetos±clorita±magnetita e uma zona distal contendo quartzo+clorita+muscovita+magnetita+carbonato±pirita.

As mudanças mais significativas se dão no zoneamento de carbonatos e na substituição da magnetita por sulfetos. Nas proximidades das zonas mineralizadas, a magnetita e siderita da BIF fácies carbonato original dão lugar a ankerita e/ou pirrotita, pirita e arsenopirita.

Os corpos de minério são *stratabound*, apresentam mergulho de cerca de 55°, e são deslocados e interrompidos ao longo de sua direção por cisalhamento (Martins Pereira et al., 2007).

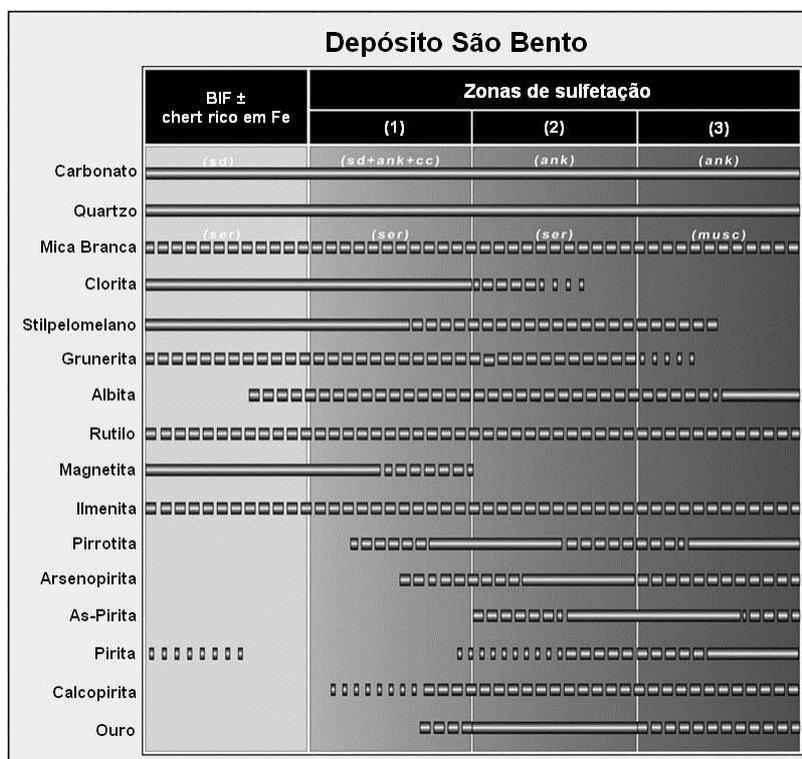


Figura 10: Sequência de alteração hidrotermal de porções menos alteradas da BIF São Bento proposta por Martins Pereira et al. (2007). Abreviações: ank = ankerita, cc = calcita, sd = siderita, musc = muscovita, ser = sericita. Linhas sólidas indicam que a fase é contínua. Linhas tracejadas indicam que a fase pode ou não estar presente.

Idades U-Pb SHRIMP em monazitas dos depósitos Morro Velho e Cuiabá, localizadas na porção oeste do QF, obtidas por Lobato et al. (2007) situam o período de mineralização em  $2672 \pm 14$  Ma, durante as etapas finais de evolução do *greenstone belt*, após o pico metamórfico e antes da deposição do Supergrupo Minas e dos efeitos da suposta Orogenia Transamazônica. Datações inequívocas de depósitos na área de interesse ainda não foram efetuadas.

## 2. METODOLOGIA

Este trabalho visa a interpretação de dados magnéticos e gamaespectrométricos aéreos recém-adquiridos e sua integração com dados EM aéreos históricos, visando alcançar os objetivos discutidos. A interpretação dos dados foi dividida em duas etapas principais: análise regional da área do Projeto Córrego do Sítio e análise em detalhe de cada bloco principal da área e da área do alvo A (Figura 11).

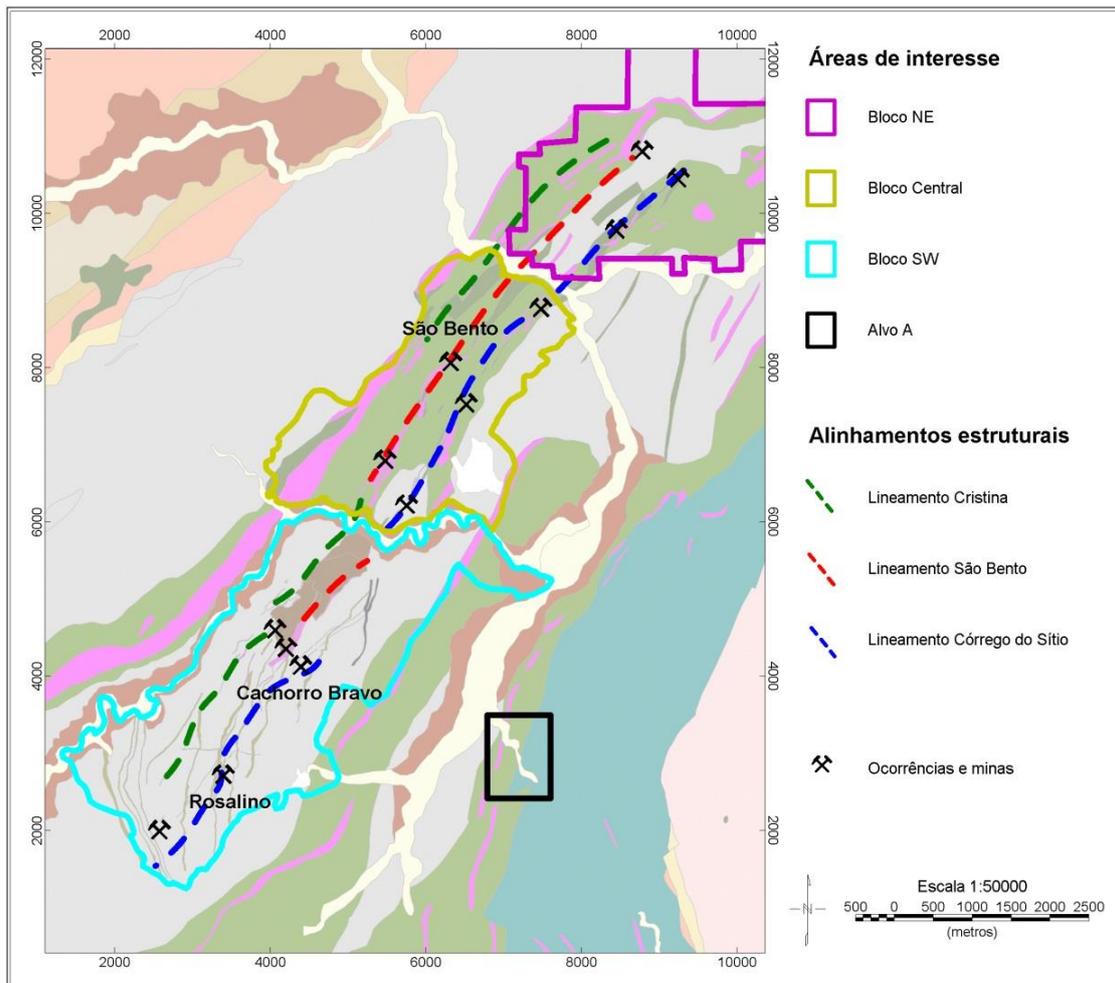


Figura 11: Áreas de interesse, alinhamentos estruturais mineralizados e minas e ocorrências sobre geologia local.

Durante a primeira etapa, a área de interesse foi investigada de forma abrangente, em escala regional, com foco na interpretação qualitativa dos dados em duas dimensões. Na segunda etapa, os blocos foram avaliados, em escala local, com foco em interpretação quantitativa, através de modelagem e inversão dos dados magnéticos e EM.

A Figura 12 mostra o fluxograma de interpretação obedecido. O banco de dados considerado é composto por dados EM do aerolevante SPECTREM, dados magnéticos e gamaespectrométricos do aerolevante HeliMAG e dados geológicos, que incluem furos de sondagem, modelos de minério e mapeamento geológico.

Durante a etapa de interpretação regional, foi feita a caracterização geofísica das unidades dominantes na área de interesse e identificação e análise de lineamentos magnéticos. Também foram feitas análises quantitativas de feições de interesse para o entendimento da geometria de estruturas de interesse.

Consolidada a interpretação regional, o foco do trabalho foi alterado para a interpretação em detalhe dos blocos estruturais. O bloco central contém o depósito São Bento que, além de ser o mais importante da área, apresenta resposta geofísica significativa. Por isso, foi o primeiro bloco a ser analisado e foi usado como referência para os demais. Esta etapa visou caracterizar a assinatura geofísica dos depósitos conhecidos em escala local e avaliar quantitativamente as feições de interesse encontradas para definir suas importâncias como critério de exploração.

O bloco SW é dominado por mineralizações diferentes daquelas no bloco central. Após a análise do bloco central, buscou-se então caracterizar o estilo de mineralização dominante e avaliar a possibilidade da presença de mineralizações do tipo São Bento neste bloco, usando as interpretações feitas no bloco central como referência.

Seguindo a caracterização dos depósitos e do contexto estrutural nos demais blocos, foi feita uma análise dos dados no bloco NE, buscando correlações para definir alvos prospectivos e para consolidar o modelo exploratório construído.

As observações feitas nos três blocos foram então utilizadas para analisar a região do alvo A, considerada uma das mais prospectivas na área de interesse. Assim

como no bloco NE, é uma região pouco conhecida e correlações com as assinaturas dos depósitos nos alinhamentos estruturais principais foram procuradas.

Simultaneamente à interpretação dos blocos e alvo A, foi feita a análise dos lineamentos magnéticos mapeados e sua correlação com os dados geofísicos em detalhe. Nesta etapa, as consequências das estruturas foram avaliadas através do uso de modelos de inversão magnéticos, modelagem de dados EM, seções de condutividade e sua integração.

Seguindo a conclusão das interpretações nas regiões de interesse, buscou-se consolidar as observações e interpretações na forma de um modelo conceitual, que considerasse as características observadas de forma a contribuir na formulação de estratégias de exploração por depósitos análogos.

Finalmente, os alvos identificados foram agrupados em uma lista e prioridades foram atribuídas de acordo com a confiança na interpretação dos respectivos contextos geológicos e geofísicos.

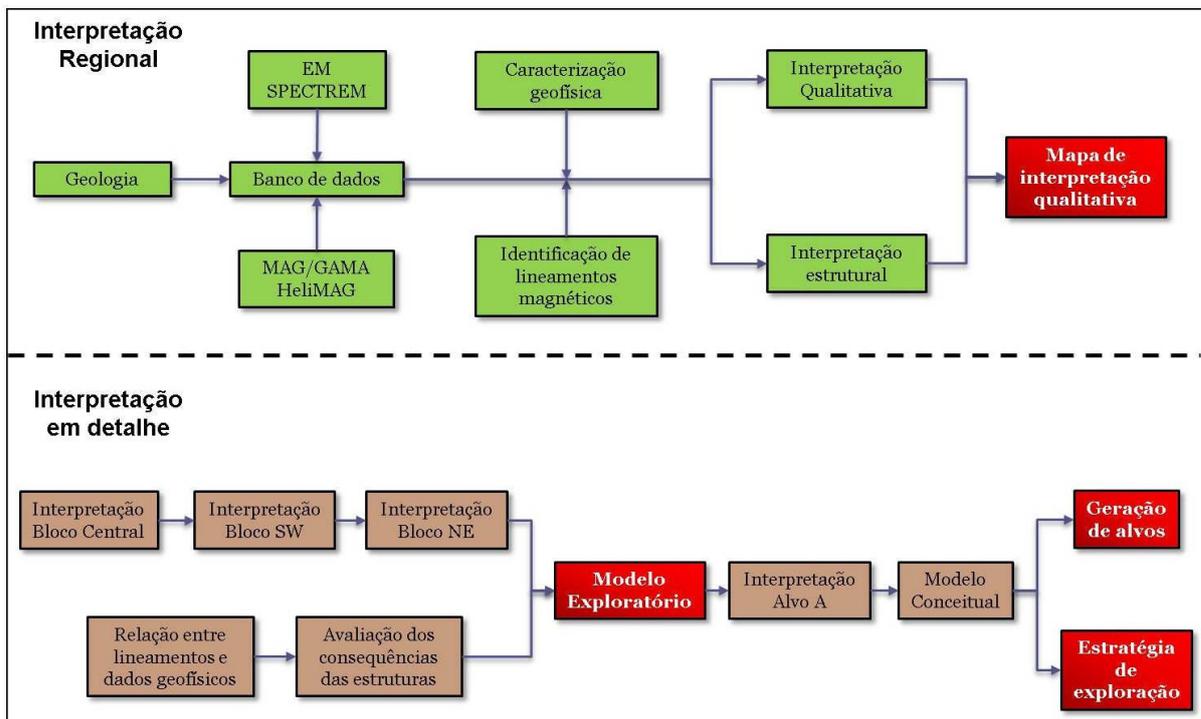


Figura 12: Fluxograma da metodologia aplicada. As etapas em verde correspondem à primeira etapa, as em marrom à segunda etapa e as em vermelho a objetivos diretos do trabalho.

A seguir, serão apresentados breves resumos dos métodos geofísicos aplicados, incluindo descrição de seu uso na exploração mineral, exemplos de aplicação e motivo

da escolha do método, tendo em vista a natureza dos depósitos na área de interesse. Para descrições mais abrangentes e detalhadas, são recomendados títulos como Telford et al. (1990), Nabighian & Macnae (1991), Blakely (1996) e Dentith & Mudge (2014), dentre outros na literatura geofísica.

## 2.1. MAGNETOMETRIA

A magnetometria é um método geofísico que explora as consequências da interação entre o campo geomagnético e as rochas na crosta terrestre. A resposta das rochas à influência do campo magnético terrestre é previsível e depende de suas propriedades físicas, o que permite analisar a geologia de uma área de interesse por meio da interpretação de dados magnéticos.

No caso de campos magnéticos de baixa amplitude, como o geomagnético, a interação de materiais com um campo magnético externo produz uma magnetização induzida  $M_i$  que é proporcional em magnitude e paralela à direção do campo magnético  $H$  (Blakely, 1996), chamado de indutor:

$$M_i = \chi.H \dots\dots\dots(1)$$

Na equação 1, a constante  $\chi$  é chamada de susceptibilidade magnética e é uma medida do quão suscetível é um material à magnetização. É uma propriedade física que pode ser considerada diretamente proporcional à quantidade de minerais magnéticos presentes nas rochas.

Rochas que desenvolvem magnetização significativa geram campos magnéticos secundários que alteram localmente o campo geomagnético, formando as chamadas anomalias magnéticas, como mostra a Figura 13.

Levantamentos magnetométricos são efetuados com o objetivo de analisar a geologia de uma área através da identificação e estudo de anomalias no campo magnético terrestre em áreas de interesse. A forma, amplitude, direção e polaridade destas anomalias são função dos parâmetros físicos e geométricos da fonte da anomalia, o que permite sua análise através da interpretação de dados magnéticos.

O mapeamento da variação na concentração de minerais magnéticos no subsolo é importante para a compreensão da geologia de uma determinada área. Esta

concentração em uma rocha é principalmente controlada por sua origem, composição e eventos geológicos a que foi exposta, o que permite ao intérprete associar respostas magnéticas a tipos específicos de rocha e inferir sua evolução geológica.

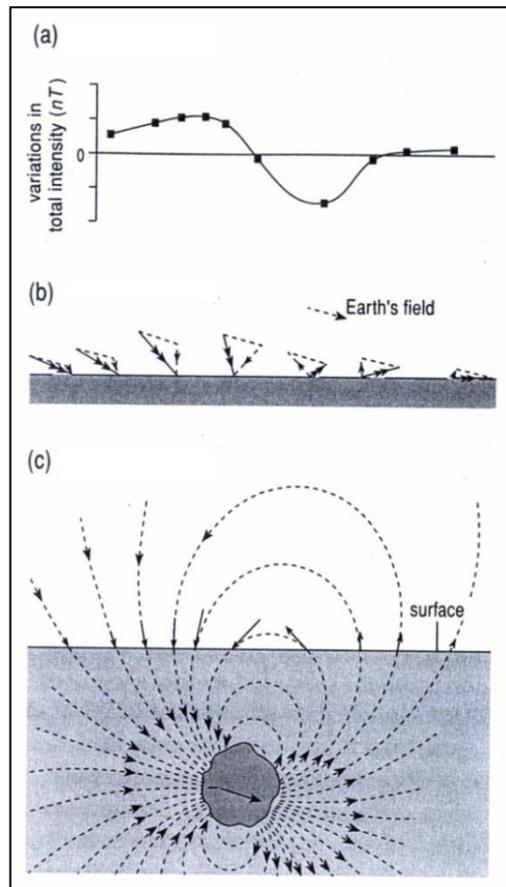


Figura 13: Mecanismo de criação de uma anomalia magnética (modificado de Musset & Kahn, 2000). Uma estrutura em subsuperfície é magnetizada pelo campo terrestre e gera um campo magnético (c), o campo magnético induzido altera o campo magnético local (b) e gera uma anomalia nos valores de campo magnético total medidos (a).

Como o método responde apenas às características magnéticas das rochas e não é limitado pelas mesmas restrições dos dados geológicos, que requerem afloramentos representativos ou furos de sondagem, é uma ferramenta frequentemente utilizada durante programas de mapeamento geológico regional. Aerolevantamentos magnéticos são formas rápidas e de excelente custo-benefício de contribuir à investigação de uma área onde o mapeamento convencional se mostra ineficaz, como em áreas de cobertura significativa ou muito intemperizadas.

A aplicação da magnetometria na busca por depósitos minerais é muito difundida na literatura geofísica e teve início na metade do século XIX, quando foi aplicada na exploração por depósitos ferríferos magnéticos. O primeiro uso

documentado do método foi feito por Thálen (1879) (Telford et al., 1990). Naquela época, o método era basicamente usado na busca por depósitos altamente magnéticos, com equipamentos de precisão muito inferior aos atuais e metodologias de exploração primitivas, que se resumiam a testar anomalias intensas.

A evolução da tecnologia e de metodologias de interpretação de dados fez com que o método passasse a ser uma ferramenta capaz de contribuir com diversos tipos de informação, além do simples mapeamento de anomalias.

Processos secundários, como metamorfismo, intemperismo e alteração hidrotermal, por exemplo, modificam a concentração original de minerais magnéticos de uma rocha e geram alterações sutis, porém mapeáveis nos dados magnéticos.

Estudos detalhados dos dados e das propriedades magnéticas das rochas permitem a identificação destas alterações, que podem contribuir para o entendimento da evolução estrutural e mineralização, além de diversos outros processos, aos quais uma determinada área foi submetida.

Alguns exemplos de estudos com este foco são os trabalhos de Hagemann et al. (2007), Hoschke (2011), Harris et al. (2005) e Austin & Foss (2012). O primeiro descreve o uso de magnetometria para identificação de enriquecimento hipogênico de formações ferríferas associado à oxidação da magnetita para hematita. A variação da razão hematita/magnetita gera zonas de desmagnetização na formação ferrífera originalmente magnética. Portanto, é possível utilizar a magnetometria não só para a identificação do horizonte favorável a mineralização, mas também para o mapeamento de zonas enriquecidas.

O segundo é um exemplo da construção de uma estratégia de exploração baseada na previsão da resposta geofísica de sistemas mineralizantes. O autor criou modelos exploratórios para depósitos do tipo Cu pórfiro e Au epitermal a partir da análise de suas respectivas zonas de alteração e respostas magnéticas esperadas. Foram analisadas também variações comuns nas características dos depósitos e suas consequências nos dados magnéticos. As observações foram compiladas em um modelo exploratório a ser utilizado na busca por estes tipos de depósitos.

O terceiro é um exemplo da aplicação deste tipo de modelo exploratório no caso de um depósito Au-Ag epitermal. A alteração argílica associada ao processo

mineralizador pôde ser identificada como uma anomalia magnética negativa ao redor do depósito.

O quarto visou descrever a assinatura geofísica de depósitos IOCG (*iron-oxide copper gold*) australianos. Mostra que a resposta magnética destes depósitos é complexa e pode variar muito devido a diferenças em seus processos de formação. Interpretações podem, então, ser seriamente afetadas se dados geológicos não forem considerados adequadamente.

No caso de depósitos de ouro orogênicos em BIF, a mineralização é acompanhada da substituição de minerais magnéticos (magnetita) por sulfetos e outros produtos de alteração. Então, a magnetometria pode contribuir não só com a identificação e modelagem de rochas hospedeiras (BIF) e análise estrutural a partir de lineamentos magnéticos, mas também com a identificação de zonas favoráveis à presença de mineralização em horizontes adequados.

Neste trabalho, a interpretação dos dados será feita de forma qualitativa, usando filtros para simplificar a resposta das rochas, como redução ao pólo, amplitude do sinal analítico, e para enfatizar altas frequências, como derivadas espaciais, ângulo de *tilt* (Miller e Singh, 1994), e de forma quantitativa, por meio de modelamento direto e inversões tridimensionais.

### 2.1.1. PROCESSAMENTO DE DADOS AEROMAGNÉTICOS

O principal objetivo do processamento de dados magnéticos é a remoção da variação temporal do campo magnético terrestre para isolar a resposta devida às rochas. A sequência de processamento aplicada nos dados foi a seguinte:

- a. *Correção de paralaxe*: O erro de paralaxe corresponde à defasagem entre os instantes de medida do magnetômetro e o sistema de posicionamento GPS. O erro de paralaxe é determinado a partir de uma linha voada em sentidos opostos sobre uma mesma feição magnética anômala. A correção a ser aplicada corresponde ao valor deslocado no tempo que torna as feições coincidentes em ambas as linhas.
- b. *Remoção da variação magnética diurna*: Causada pela interação entre vento solar e o campo geomagnético, de frequência da ordem de horas. Geralmente é

de comportamento suave e aproximadamente linear. A correção é feita com o uso de um magnetômetro base fixo, posicionado em um local livre de interferência, cujas medidas em intervalos regulares durante o levantamento são removidas dos dados.

- c. *Nivelamento dos perfis*: Tem o objetivo de corrigir os erros residuais da correção da variação diurna. Tais erros ocorrem por supercompensação ou subcompensação desta variação e se mostram como diferenças sistemáticas entre as médias de linhas adjacentes. O ajuste das linhas de vôo é feito com base na média das diferenças (ou diferenças de 1ª ordem) com as linhas de controle. Assume-se que tais diferenças estão distribuídas de forma aleatória, de forma que uma tendência de, no máximo, 1ª ordem define o desnível entre as linhas de vôo e controle.
- d. *Micronivelamento dos perfis*: Processo puramente matemático, tem o objetivo de eliminar erros sutis que restaram da aplicação do nivelamento, além de variações temporais de curto comprimento de onda que o nivelamento não é capaz de corrigir. São usados um filtro Butterworth passa-baixa com comprimento de onda central proporcional ao espaçamento das linhas e um filtro cosseno direcional de direção igual ao azimute das linhas de vôo para isolar os erros de longo comprimento de onda e alinhados na direção das linhas e removê-los dos dados.
- e. *Remoção do IGRF*: Para isolar a resposta das rochas crustais, deve-se remover a componente devida ao campo geomagnético. O valor a ser removido de cada medida é calculado com o uso de modelos globais do campo geomagnético, como o Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF).

### 2.1.2. INVERSÃO DE DADOS MAGNÉTICOS

A inversão dos dados magnéticos neste trabalho foi feita utilizando o algoritmo de inversão do software MAG3D, desenvolvido pela UBC-Geophysical Inversion Facility, University of British Columbia, e a plataforma de inversão de dados potenciais VOXI, do software Oasis Montaj.

De forma geral, o problema inverso em geofísica tem como solução um modelo que, sujeito às mesmas condições encontradas durante a aquisição dos dados, produz uma resposta que é suficientemente próxima aos dados observados, dado um nível de erro. Uma solução para o problema inverso linear é um modelo  $m$  que satisfaz a seguinte equação (Williams, 2006):

$$Gm = d^{obs} \dots\dots\dots(2)$$

Na equação (2),  $G$  é o operador direto, que descreve a física do problema, e  $d^{obs}$  é o dado medido.

Ambos os programas discretizam o espaço em um modelo tridimensional composto por células cúbicas de tamanho pré-determinado. A cada célula é dado um valor de suscetibilidade magnética e a resposta do modelo em uma determinada superfície (topografia) ou linha (linha de aquisição) é calculada.

Os valores de propriedade física são atualizados a cada interação do algoritmo, de forma a ajustar a resposta do modelo aos dados observados. Assim que o erro de ajuste atingir um limite mínimo especificado pelo usuário, o modelo obtido é considerado válido e o processo é finalizado.

Para quantificar o grau de ajuste do modelo aos dados observados é utilizada a chamada função objetivo. Esta é composta por duas funções que descrevem o erro de ajuste de formas diferentes. Então, o problema se torna um problema de minimização da seguinte equação:

$$\phi = \phi_d + \beta\phi_m \dots\dots\dots(3)$$

Na equação 3,  $\phi$  é a função objetivo a ser minimizada pelo programa. Esta é composta pela função que descreve o erro no ajuste dos dados ( $\phi_d$ ) e pela função do modelo ( $\phi_m$ ), que quantifica a diferença entre o modelo invertido e vínculos estabelecidos pelo usuário.  $\beta$  é um parâmetro de balanceamento que define a importância relativa dada a cada uma das funções.

O algoritmo MAG3D e a inversão tradicional da VOXI assumem que a magnetização das fontes consideradas é puramente induzida e a direção de magnetização é um dos parâmetros iniciais a serem fornecidos. O resultado final,

portanto, é um modelo de distribuição de susceptibilidade magnética que satisfaz as condições estipuladas.

O problema da interpretação de anomalias magnéticas de fontes com magnetização não induzida tem atraído cada vez mais a atenção dos pesquisadores da comunidade científica, que buscam metodologias de inversão que sejam capazes de tratar dados de fontes de magnetização não induzida. Trabalhos de Paine et al. (2001), Shearer (2005) e Li et al. (2010) podem ser citados como exemplos.

Recentemente, Ellis et al. (2012) propôs uma nova metodologia baseada na inversão pelo vetor de magnetização, e não pela susceptibilidade magnética. O campo magnético  $B$  em um ponto  $r_j$  resultante de um volume  $V$  contendo magnetização  $M(V)$  é dado pela equação 4:

$$\vec{B}(r_j) = \nabla \int_V \vec{M}(r) \cdot \nabla \left( \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_j|} \right) dr^3 \dots\dots\dots(4)$$

O fundamento do processo é que a escolha de uma determinada direção de magnetização pode ser considerada um vínculo durante a inversão, que impede o algoritmo de buscar soluções que exigem direções diferentes da escolhida, que pode ser incorreta. Então, seria mais adequado assumir que a direção do campo indutor é conhecida, mas a direção de magnetização é variável. Por isso, a escolha do vetor de magnetização, e não da susceptibilidade magnética, como parâmetro a ser invertido, seria natural (Ellis et al., 2012).

A metodologia de inversão pelo vetor de magnetização (MVI) implementada na VOXI segue, essencialmente, os mesmos princípios do algoritmo de inversão de susceptibilidade MAG3D, com as devidas alterações no problema direto.

Alguns autores buscaram formas de calcular a direção de magnetização correta da fonte (Fedi et al., 1994; Dannemiller & Li, 2006), para então utilizar no processo de inversão. Entretanto, sabe-se que, em casos de magnetização remanescente significativa, a direção de magnetização será variável e o uso de um único valor compromete o processo de inversão.

A área de interesse deste trabalho apresenta anomalias de natureza reversa e normal, indicando a presença de fontes com magnetização induzida e não induzida, próximas umas das outras. Em casos onde a inversão de susceptibilidade foi considerada inadequada, inversões MVI foram aplicadas.

## 2.2. GAMESPECTROMETRIA

O decaimento radioativo é o processo natural e espontâneo pelo qual núcleos de um isótopo radioativo instável com excesso de energia se desintegram e formam núcleos de isótopos mais estáveis, processo acompanhado da emissão de energia na forma de partículas ou energia (IAEA, 2003). A razão de decaimento e o tipo de radiação são funções das características de cada radioisótopo e sua relação constitui a base dos métodos radiométricos.

Um átomo radioativo emite energia na forma de três tipos diferentes de radiação: alfa, beta e gama. As radiações alfa e beta consistem de partículas carregadas e com massa de baixa penetração na matéria. A emissão de partículas alfa e beta deixa o núcleo num estado excitado e a energia em excesso é emitida na forma de radiação gama.

A radiação gama, ao contrário das demais, consiste de fótons ou *quanta* de energia, sem carga e massa, por isso são capazes de atravessar distâncias maiores na matéria. Os raios gama podem atravessar até 30 centímetros de rocha e várias centenas de metros de ar, o que os torna a melhor alternativa para levantamentos radiométricos (Minty, 1997).

A gamaespectrometria é um método geofísico cujo objetivo é estimar as concentrações de potássio, tório e urânio nas rochas a partir da medida da radiação gama natural emitida por seus radioisótopos e radioisótopos filhos que ocorrem naturalmente na crosta terrestre. A partir destes dados, do conhecimento do comportamento geoquímico destes elementos e de sua relação com as rochas, é possível relacionar suas concentrações à geologia de uma área de interesse e a processos secundários que lá ocorreram.

Os fótons nos raios gama possuem energias discretas e características do isótopo fonte, distribuídas em um intervalo de energia bem definido. Por isso, a medida da energia dos fótons dos raios gama a partir da aquisição de espectros de energia, como o

representado na Figura 14, permite o cálculo do conteúdo de potássio, tório e urânio da fonte da radiação. Este é o fundamento da gamaespectrometria (Minty, 1997).

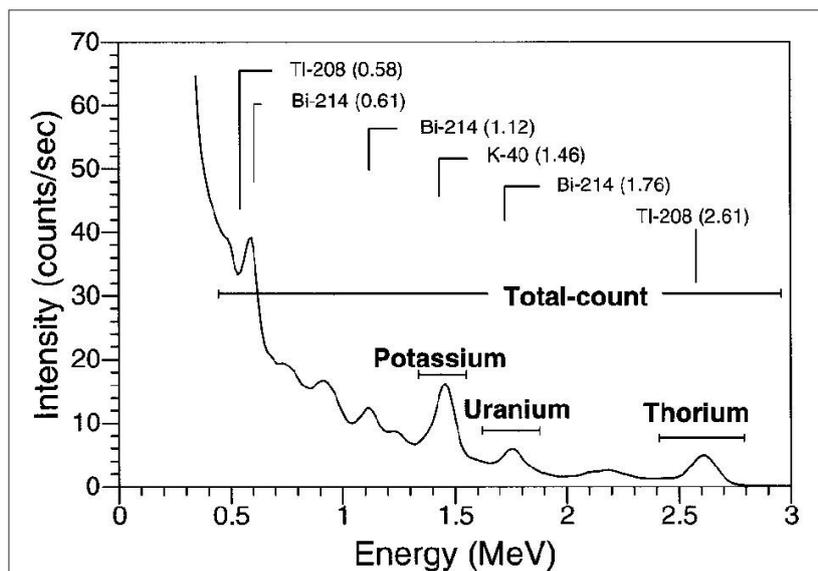


Figura 14: Típico espectro medido a uma altura de 100 m e picos característicos dos radioisótopos de K, Th e U e seus radioisótopos filhos. Fonte: Minty et al. (1997).

O método pode ser tanto aplicado em levantamentos terrestres quanto em aerolevantamentos, já que a radiação gama possui boa penetração no ar, mas as informações sempre serão relativas aos primeiros decímetros da crosta.

A aplicação da gamaespectrometria em aerolevantamentos geofísicos se tornou rotineira com o avanço de técnicas de processamento e aquisição. Sua aplicação em mapeamento geológico e identificação de estruturas favoráveis à presença de mineralização tem grande importância na exploração mineral acelerando consideravelmente o processo de reconhecimento regional e prospecção mineral.

A resposta gamaespectrométrica das rochas é diretamente relacionada à sua composição, mas outros fatores também podem influenciar nas medidas como intemperismo, metamorfismo e alteração. Esta relação permite aplicações tanto no mapeamento geológico de áreas de difícil acesso quanto na identificação de processos relacionados a mineralização.

Ramos Filho et al. (2005) e Hoshcke (2011) são exemplos de trabalhos voltados para a investigação da resposta esperada de depósitos minerais específicos. O primeiro mostra uma aplicação na exploração por depósitos associados à sequência

vulcanossedimentar Mara Rosa, no Arco Magmático de Goiás. Já o segundo estabeleceu a assinatura gamaespectrométrica de depósitos do tipo Cu pórfiro e epitermais.

Ambos notam a importância da detecção direta dos depósitos, via anomalias potássicas e de razão Th/K, e da interpretação de estruturas favoráveis a estes tipos de mineralização (magmatismo granítico de composição específica ou alteração argílica em grande escala).

A interpretação dos dados gamaespectrométricos é usualmente feita através dos dados de concentração dos elementos, dados de contagem total (espectro completo) e de combinações destes, na forma de razões e mapas ternários, visando enfatizar certas características dos dados.

Depósitos de ouro orogênicos em BIF são frequentemente associados a zonas de sericitização, que podem originar zonas de enriquecimento potássico. Neste trabalho, os dados serão inicialmente interpretados de forma qualitativa para contribuir para o mapeamento geológico e definir horizontes de interesse. Em seguida, os dados serão analisados visando a identificação de anomalias gamaespectrométricas possivelmente associadas a enriquecimento potássico. Razões de elementos, principalmente a razão Th/K, e comparação com a topografia serão efetuados visando distinguir respostas relacionadas a processos de pouca importância à exploração mineral e indícios de mineralização.

### 2.2.1. *PROCESSAMENTO DE DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS*

O processamento de dados gamaespectrométricos envolve a aplicação de diversas rotinas de processamento para corrigir os espectros medidos e convertê-los em medidas de concentração de K, Th e U. Neste item são sumarizadas as principais correções aplicadas aos dados gamaespectrométricos.

- a. *Correção de tempo morto*: O processamento de cada pulso que atinge o detector exige um pequeno intervalo de tempo. Neste intervalo de poucos microsegundos, chamado de tempo morto, qualquer pulso que atinge o detector não é medido, causando um decréscimo na contagem total. O erro pode ser estimado e corrigido extrapolando a contagem que seria feita durante o tempo morto utilizando a razão de contagens obtida no intervalo ativo dos detectores.

- b. *Correção da altura de vôo*: Variações na altura de vôo são frequentes em áreas de topografia acidentada, por isso os dados aerogamaespectrométricos devem ser referidos à altura de vôo efetiva da aeronave durante o aerolevanteamento. Isto requer uma correção para compensar a atenuação dos raios gama com a distância da fonte. O cálculo da altura efetiva de vôo é feito corrigindo a altitude obtida pelo altímetro de radar nas aeronaves levando em conta dados de temperatura e pressão (Minty et al., 1997).
- c. *Remoção do background cósmico e da aeronave*: O chamado *background* da aeronave é o efeito causado pela aeronave nas medidas e é uma constante. Já o chamado *background cósmico* é o efeito causado pela interação da radiação cósmica com átomos e moléculas da atmosfera superior, que produz radiação secundária. Ambos são corrigidos a partir da calibração do sistema sobre um ambiente livre de fontes radioativas onde a medida é devida apenas aos *backgrounds* da aeronave e cósmico (Minty et al, 1997).
- d. *Correção do radônio atmosférico*: O principal emissor de radiação gama na série do urânio é o  $^{214}\text{Bi}$ , que ocorre após o  $^{222}\text{Rn}$  na série do  $^{238}\text{U}$ . Isto torna o radônio presente na atmosfera uma fonte de ruído importante, cuja influência chega a 50% das contagens na janela do urânio. O procedimento de correção mais utilizado em aerolevanteamentos é o uso dos chamados detectores *upward-looking*. Tais detectores têm sensibilidade direcional e são posicionados de forma distinguir a influência do radônio da radiação natural das rochas nos dados. É feita a correlação entre as medidas de U e Th da superfície com as medidas de U no detector *upward-looking* para estimar os chamados coeficientes *skyshine*, que são utilizados na correção (IAEA, 2003).
- e. *Correção de Stripping ou Efeito Compton*: As janelas de contagens de K, U e Th são afetadas por raios gama que não são originadas pelo respectivo radioelemento ou produtos de seu decaimento. Tal efeito está relacionado com o chamado espalhamento Compton, que causa a perda de parte da energia do fóton e seu “espalhamento” a um determinado ângulo com relação ao ângulo de incidência. A consequência no espectro de energia é a medida de fótons originários de certos elementos em janelas de outros elementos. A correção é

feita a partir da calibração do sistema sobre fontes de radiação controlada para a estimativa dos coeficientes de *stripping* (IAEA, 2003).

- f. *Redução para concentração de elementos*: Os dados gamaespectrométricos brutos representam contagens por unidade de tempo (cps). Esta correção visa calcular a concentração dos elementos a partir das contagens. A correção é geralmente feita dividindo os canais de K, Th e U pelos chamados coeficientes de sensibilidade, que dependem de fatores geométricos, tipo de fonte e atenuação com a altura. Estes são calculados a partir da comparação entre medidas do sistema aéreo e um sistema terrestre feitas sobre a mesma fonte.

### 2.3. ELETROMAGNÉTICO NO DOMÍNIO DO TEMPO (TDEM)

Os métodos eletromagnéticos (EM) compreendem uma grande quantidade de técnicas que envolvem a medida e análise dos efeitos de uma fonte eletromagnética natural ou artificial sobre as rochas do subsolo.

Aplicações destes métodos são observadas em diversas áreas de conhecimento, em várias escalas de trabalho. Exemplos são avaliações de sítios arqueológicos usando radar de penetração terrestre (GPR), sondagens TDEM terrestres visando a profundidade do nível freático, levantamentos EM no domínio da frequência (FDEM) terrestres para mapeamento de contaminantes, aerolevantamentos TDEM para identificação de depósitos minerais condutivos e levantamentos magnetotelúricos (MT) para estudos de escala crustal.

Os princípios em que são baseados os métodos eletromagnéticos variam desde a propagação de ondas EM e interação com contrastes de propriedades elétricas (GPR), indução eletromagnética a partir de fontes artificiais (EM indutivo) até a relação entre campos EM naturais e a distribuição de resistividade no subsolo (MT).

O princípio de indução eletromagnética na geofísica é regido pelas leis de Maxwell e está representado na Figura 15. Uma corrente elétrica é gerada em uma bobina na superfície, que representa a fonte usada. A variação da corrente elétrica induz um campo magnético primário. A variação do campo primário, por sua vez, induz as chamadas *eddy currents* em condutores no subsolo, de acordo com a Lei de Ampère. As correntes induzidas também variam com o tempo e criam um campo magnético secundário. Este campo secundário induz uma FEM na bobina receptora, também

localizada na superfície, que é o sinal medido. A partir desta FEM é calculada a variação temporal do campo magnético secundário.

O decaimento do campo secundário calculado depende diretamente da distribuição de condutividade no subsolo, relação que constitui o fundamento dos métodos EM indutivos e permite a interpretação dos dados coletados em termos de geologia.

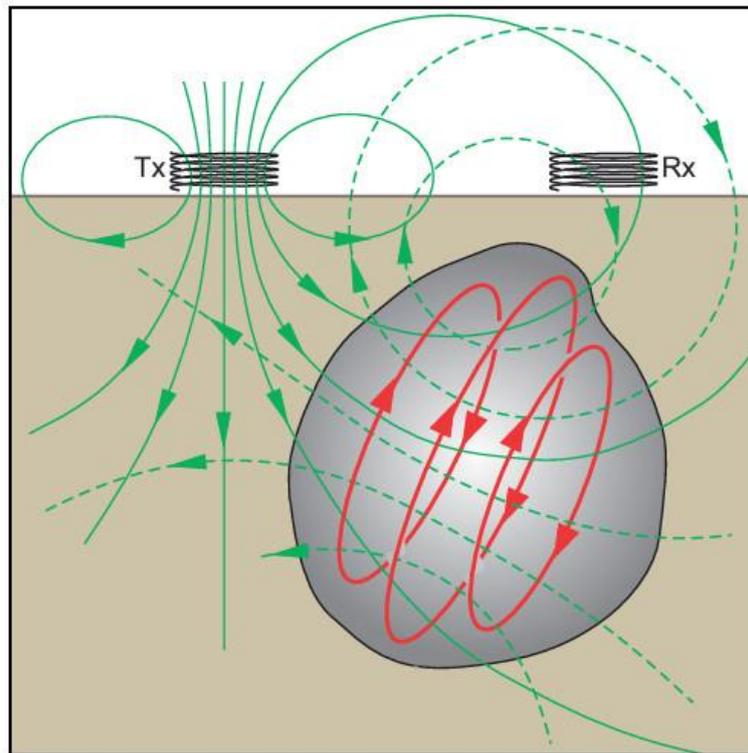


Figura 15: Princípio de indução eletromagnética aplicado em um levantamento EM. Um campo magnético primário variável (linha verde sólida) é gerado por uma bobina transmissora (Tx). Este campo induz correntes *Eddy* (linhas vermelhas) em um condutor no subsolo (corpo cinza). A variação destas correntes gera um campo magnético secundário (linhas verdes tracejadas), cujo efeito é medido em uma bobina receptora (Rx) (modificado de Dentith & Mudge, 2014).

Os métodos EM indutivos são divididos em duas classes, de acordo com a natureza do sinal transmitido: eletromagnético no domínio da frequência (FDEM) e no domínio do tempo (TDEM).

No primeiro, é usada corrente alternada na bobina transmissora e o sinal medido é a sobreposição dos efeitos do campo primário e secundário. O campo secundário é o que carrega toda a informação relacionada à geologia e é ordens de grandeza menor do que o primário.

No caso do TDEM, a bobina transmissora é alimentada por pulsos de corrente direta (Figura 16). O campo magnético primário é gerado através da interrupção brusca dessa corrente, ao final de um dos pulsos, e o mesmo processo de indução ocorre, com a diferença fundamental de que a medida na bobina receptora é feita com a corrente elétrica desligada, fazendo com que apenas o campo magnético secundário seja considerado.

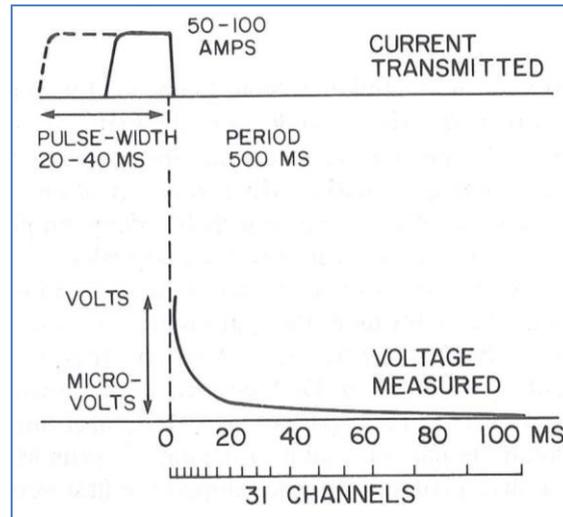


Figura 16: Pulso de corrente transmitido à bobina transmissora (acima) e sinal medido na bobina receptora (abaixo) no caso do sistema EMP, da Newmont (modificado de Nabighian & Macnae, 1991).

Produtos de interpretação usuais são as condutividades aparentes calculadas para canais individuais, constantes de tempo e seções de condutividade em profundidade (CDI – *Conductivity Depth Image*).

As condutividades aparentes são calculadas ajustando os dados medidos assumindo geometria de semi-espaco. As constantes de tempo ( $\tau$ ) são medidas da rapidez do decaimento do campo secundário usando todos ou algum intervalo de canais escolhidos e são diretamente proporcionais à condutividade do alvo. As CDI são seções 2D que combinam o resultado de inversões 1D de cada uma das medidas ao longo das linhas de vôo.

Assim como no caso dos dados magnéticos, o uso de dados EM para prospecção mineral é muito difundido, principalmente por sua capacidade de identificar diretamente depósitos minerais condutivos. Witherly & Allard (2010) mostram como o uso da metodologia, em conjunto com pesquisa e desenvolvimento em busca de tecnologias

mais eficazes, trouxeram grandes benefícios à indústria de exploração por metais-base no Canadá.

Alguns exemplos de estudos de caso bem-sucedidos no uso de dados EM para prospecção são Yang & Oldenburg (2012), que mostram o uso de inversão 3D de dados AEM sobre um depósito Cu pórfiro e interpretação em termos de zonas de alteração, e Cheng et al. (2006), que integraram dados EM, magnéticos e gravimétricos e observaram que zonas condutivas dentro de zonas mineralizadas estão associadas a horizontes ricos em pirrotita inseridos em pacotes ricos em pirita, sendo que a estes picos de condutividade estão associados os maiores teores de cobre.

Aerolevantamentos EM vêm ganhando cada vez mais espaço em programas de exploração mineral. Em sistemas aéreos, as bobinas transmissora e receptora são içadas por aeronaves e dados são adquiridos continuamente ao longo de linhas de vôo. A Figura 17 mostra o exemplo do sistema VTEM, da Geotech Airborne Geophysical Services.

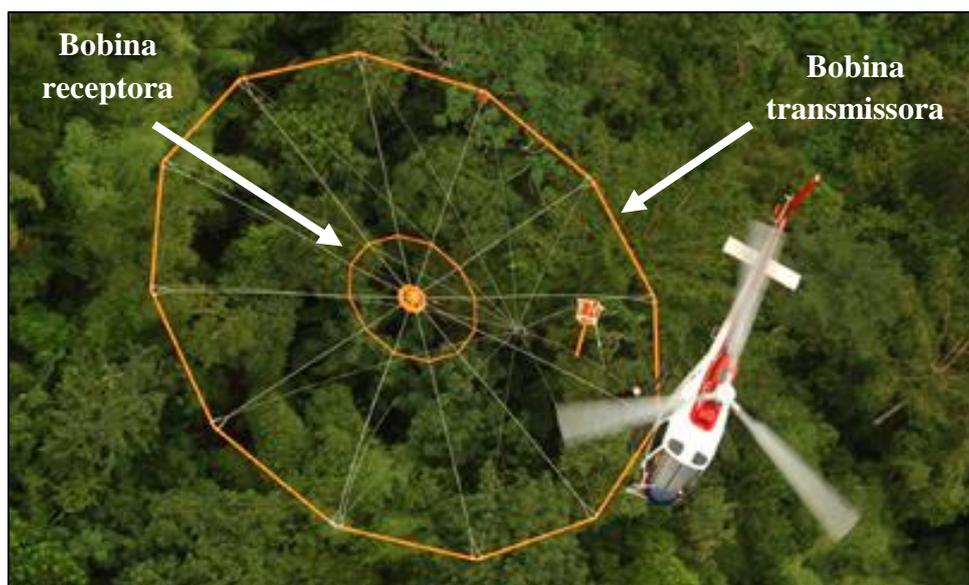


Figura 17: Sistema VTEM (Geotech) para aquisição de dados AEM. As bobinas transmissora e receptora, concêntricas e içadas pelo helicóptero, estão indicadas.

O processamento de dados EM aéreos (AEM) é, em grande parte, realizado em tempo real durante o levantamento e consiste, basicamente, em remover efeitos associados à resposta da aeronave e de suas manobras e ruído associado a esféricos. Além disso, filtros passa-baixa, além do inerente ao sistema de medida, são usados para remover outros efeitos não geológicos.

Os depósitos do tipo orogênico são frequentemente condutivos, dada a relação entre os corpos de minério e zonas de sulfetação, muitas vezes maciça ou com bandamento pirrotítico bem definido, principalmente quando hospedados em formações ferríferas. A aplicação de métodos EM na prospecção deste tipo de depósito se baseia na identificação de anomalias consideradas prospectivas e na análise quantitativa dos condutores associados, por meio de modelagem e inversão em uma, duas ou três dimensões.

### 2.3.1. MODELAGEM DIRETA DE DADOS ELETROMAGNÉTICOS

A interpretação quantitativa dos dados eletromagnéticos neste trabalho foi feita com o uso do software Maxwell, que permite modelagem direta em 3D destes dados a partir de sua plataforma de modelagem com placas retangulares finas (*thin plate modelling*).

Neste caso, é feito ajuste dos dados usando placas de espessura desprezível, conhecidas como placas de Maxwell, para aproximar condutores cuja largura é muito pequena em relação ao comprimento. Diversos depósitos minerais têm como característica uma extensão vertical muito maior do que a espessura, incluindo os depósitos de interesse neste trabalho, o que torna a aproximação válida em muitos casos.

A resposta de cada placa modelada é calculada para cada estação de medida executada durante o levantamento de dados, sujeita às mesmas condições e configurações utilizadas, como topografia, altura de vôo e especificações do sistema de aquisição.

Os dados de cada estação são interpolados e os canais de interesse são plotados simultaneamente. Então, o ajuste dos dados é feito linha-a-linha de forma interativa, sendo possível considerar várias linhas simultaneamente. A geometria das placas é controlada usando parâmetros como posição em 3D, extensão lateral e em profundidade, mergulho e direção do mergulho. A propriedade física que define a resposta dos modelos é a condutância.

A Figura 18 mostra um exemplo de cálculo da resposta de duas placas de Maxwell sob o efeito de um campo magnético. As placas foram usadas para aproximar a geometria de corpos de minério de um depósito previamente conhecido para

determinar a resposta esperada para esta situação e avaliar a aplicabilidade de um levantamento EM terrestre para alvos semelhantes.

As correntes Eddy nas placas são simuladas usando os chamados *ribbons*, circuitos fechados de largura variável, cujo centro coincide com o centro da placa, e com resistência elétrica que varia linearmente com o comprimento total do circuito e inversamente com a condutância da placa. O fluxo de corrente elétrica é restrito a estes circuitos, que são isolados entre si, mas efeitos de indutância mútua são considerados (EMIT, 2014).

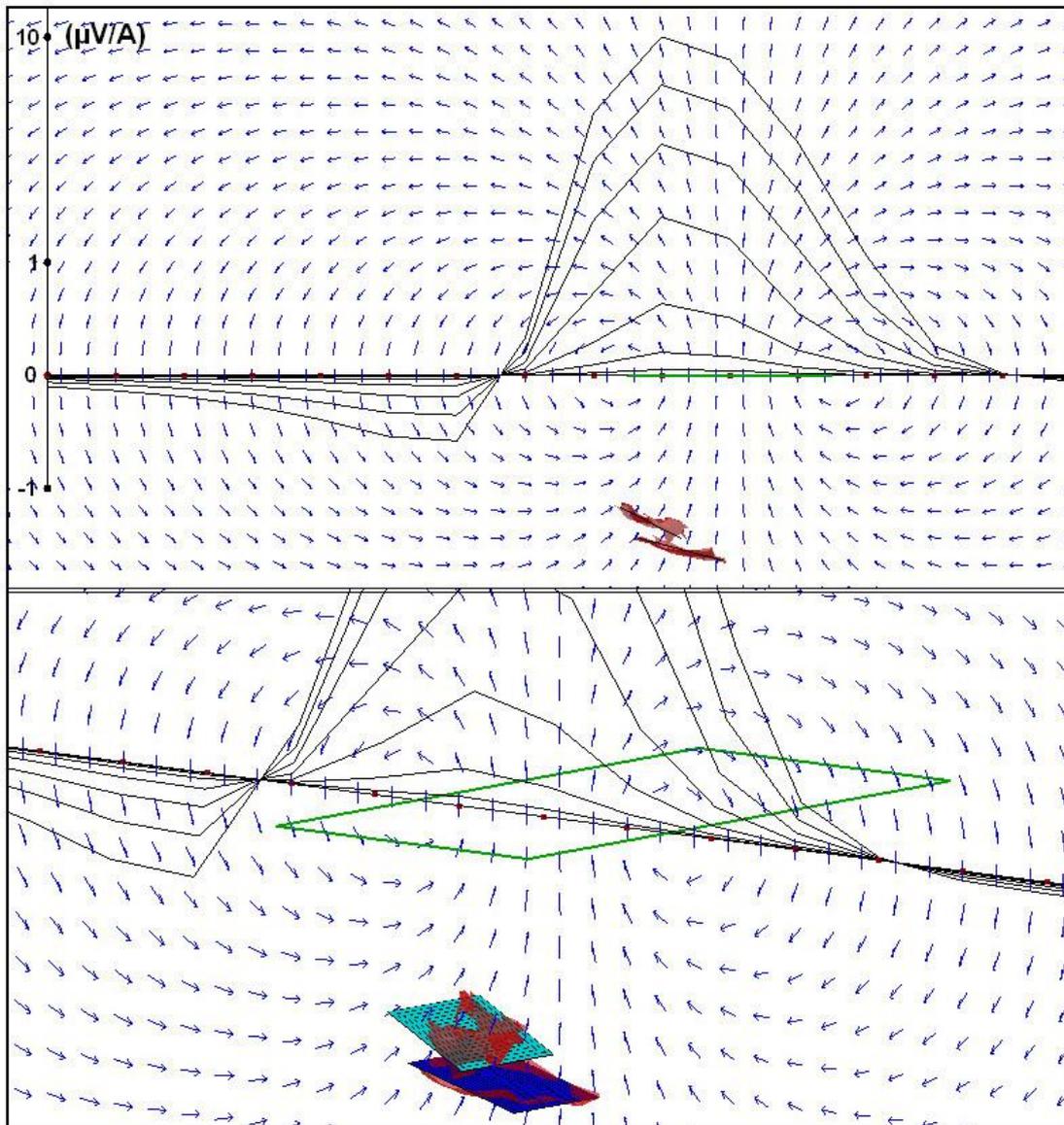


Figura 18: Exemplo de modelagem com placas de Maxwell. Corpos de minério (superfícies vermelhas) são aproximados por placas de Maxwell (retângulos coloridos). As setas representam o campo primário gerado por uma corrente elétrica de 1 A na bobina transmissora (retângulo verde) ao longo de uma linha de aquisição. O dado medido em seis dos canais EM na bobina receptora para cada uma das estações (pontos vermelhos) foi interpolado e é representado pelas linhas em preto.

## 2.4. DADOS AEROGEOFÍSICOS ANALISADOS

Foram utilizados os dados provenientes dos aerolevantamentos descritos a seguir. A pedido da AngloGold Ashanti, que detém os dados que foram utilizados neste trabalho, a área de cobertura dos aerolevantamentos foi alterada de forma a compreender apenas a área de interesse e o polígono original foi omitido, por questões estratégicas. Além disso, os pontos medidos foram referidos a uma base estabelecida pela própria AngloGold Ashanti, para fins de proteção de patrimônio.

### 2.4.1. AEROLEVANTAMENTO SPECTREM (2002)

O aerolevante SPECTREM foi realizado pela AngloGold Ashanti em 2002 sobre a área do projeto Córrego do Sítio e da mina São Bento. Seu intuito foi definir a resposta eletromagnética dos depósitos já conhecidos e fornecer alvos para detalhamento para a equipe de exploração.

SPECTREM é um sistema de aquisição de dados eletromagnéticos no domínio do tempo de asa-fixada. Dados EM são adquiridos usando uma bobina transmissora posicionada ao redor da aeronave e uma bobina receptora içada a uma altura e distância aproximadamente fixa da aeronave, como mostra a Figura 19. Dados magnéticos e gamaespectrométricos são coletados simultaneamente com o uso de um sistema de aquisição gamaespectrométrico posicionado dentro da aeronave e um sensor magnético içado de maneira similar à bobina receptora.

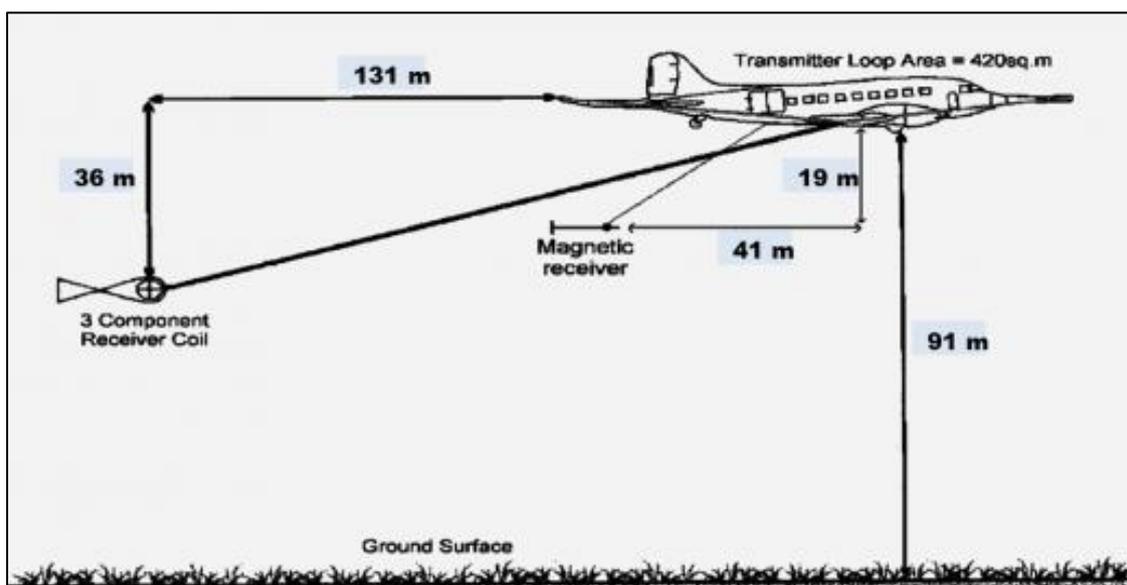


Figura 19: Geometria de aquisição do sistema SPECTREM (SPECTREM Air, 2002).

Neste caso, dados magnéticos, gamaespectrométricos e eletromagnéticos no domínio do tempo foram adquiridos em linhas espaçadas de 200 metros, a uma altura nominal de vôo de 90 metros. A direção das linhas de vôo escolhida foi de 303°, de modo a coletar dados numa direção aproximadamente perpendicular à direção da geologia e, ao mesmo tempo, não muito distante do norte magnético (338°).

Como a topografia da área de interesse é acidentada, marcada por altos topográficos bem definidos, fortes inclinações e drenagens encaixadas, a aeronave não foi capaz de manter a altura de vôo nominal e variações de mais de 150% foram observadas (>250 metros). Tais variações afetam principalmente a amplitude e forma das anomalias observadas e podem levar a interpretações equivocadas.

Devido à altura de vôo e ao espaçamento de linhas escolhido, os dados magnéticos e gamaespectrométricos tiveram sua aplicabilidade reduzida, devido à falta de resolução dos produtos finais. Os dados magnéticos são completamente dominados pelas BIF magnéticas e não permitem interpretações de outras feições. Já os dados gamaespectrométricos permitem apenas o mapeamento das unidades dominantes. Somente os dados EM deste levantamento foram utilizados neste trabalho.

Mesmo com os problemas apontados, o levantamento foi considerado bem sucedido para os objetivos propostos e a escala de trabalho da época. Os dados coletados foram usados extensivamente e diversos alvos foram gerados a partir de seus resultados.

#### 2.4.2. AEROLEVANTAMENTO HELIMAG (2013)

Devido aos problemas observados nos dados do aerolevante SPECTREM, havia a necessidade de aquisição de novos dados magnéticos e gamaespectrométricos de alta-resolução para viabilizar interpretações de detalhe.

Então, um levantamento foi executado pela Fugro Airborne Surveys em Maio de 2013. Para atenuar os efeitos da topografia sobre os dados, foi utilizado um helicóptero AS-350BA Esquilo (Figura 20). O sistema magnético foi acoplado ao esqui direito da aeronave (*stinger*) e o sistema gamaespectrométrico foi montado dentro da aeronave.



Figura 20: Helicóptero utilizado durante a aquisição de dados no aerolevante HeliMAG.

Foi usado um magnetômetro de vapor de césio Scintrex CS-3 e frequência de amostragem de 10 Hz. As medidas foram processadas e integradas aos demais dados através do sistema de aquisição FASDAS, de propriedade da Fugro Airborne Surveys. No caso dos dados gamaespectrométricos, foi usado o gamaespectrômetro RS-500, da Radiation Solutions, de 256 canais, cuja frequência de amostragem foi de 1 Hz. A altura de vôo foi monitorada com o uso de altímetros de radar e a navegação foi feita através de um receptor GPS TRIMBLE AgGPS-132.

Os dados foram adquiridos em linhas de vôo e controle espaçadas de 50 e 500 metros, respectivamente, a uma altura média de vôo de 50 metros. A direção das linhas foi paralela ao norte magnético,  $340^{\circ}$ .

O processamento seguiu as etapas descritas anteriormente. Como o aerolevante cobriu uma área limitada (1334 km de distância linear) e houve chuvas durante a aquisição, o processamento dos dados gamaespectrométricos foi prejudicado. A concentração de urânio foi prejudicada. Os demais dados se mostram adequados.

O ganho em resolução com a aquisição dos dados HeliMAG, quando comparados aos antigos dados do aerolevante SPECTREM, foi significativo, como pode ser observado na Figura 21. Os dados mostram que as BIF magnéticas são

facilmente mapeáveis, porém o ganho em informação nas altas frequências é significativo, que aumenta consideravelmente a resolução dos dados.

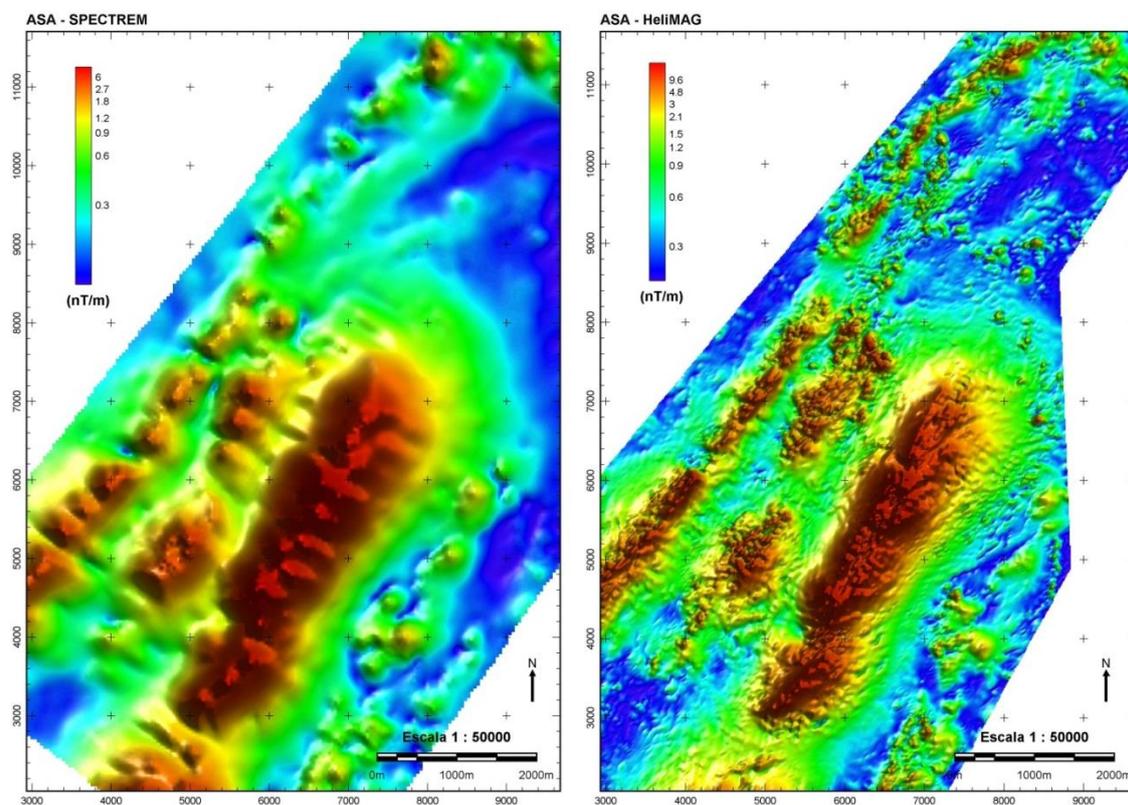


Figura 21: Comparação entre os dados magnéticos (amplitude do sinal analítico) dos aerolevantamentos SPECTREM (esquerda) e HeliMAG (direita).

### 3. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS

Esta seção foi dividida em interpretação dos dados da área do Projeto Córrego do Sítio em escala regional, que inclui caracterização geofísica das unidades principais e análise estrutural, e interpretação em escala local dos blocos SW, central e NE, que engloba caracterização geofísica dos depósitos auríferos, definição dos respectivos modelos exploratórios, identificação de controles estruturais e aplicações para exploração.

#### 3.1. PROJETO CÓRREGO DO SÍTIO

##### 3.1.1. CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA

O mapa de contagem total na Figura 22 mostra que as unidades dominantes na área de interesse exibem contraste gamaespectrométrico significativo. A unidade Quebra Ossos é associada a uma zona de baixas contagens no limite leste da área. A

unidade Santa Quitéria é associada principalmente a contagens moderadas, mas exibe variação significativa. A unidade Córrego do Sítio apresenta as maiores contagens.

As unidades de BIF de maior extensão superficial podem ser identificadas como anomalias gamaespectrométricas negativas e lineares. As drenagens que atravessam a área são representadas por anomalias semelhantes, porém mais estreitas e de direção perpendicular à direção geral da geologia. Coberturas lateríticas também estão relacionadas a zonas de baixas contagens. Os diques máficos deveriam estar associados a zonas de baixas contagens, porém não são espessos o suficiente para serem mapeados.

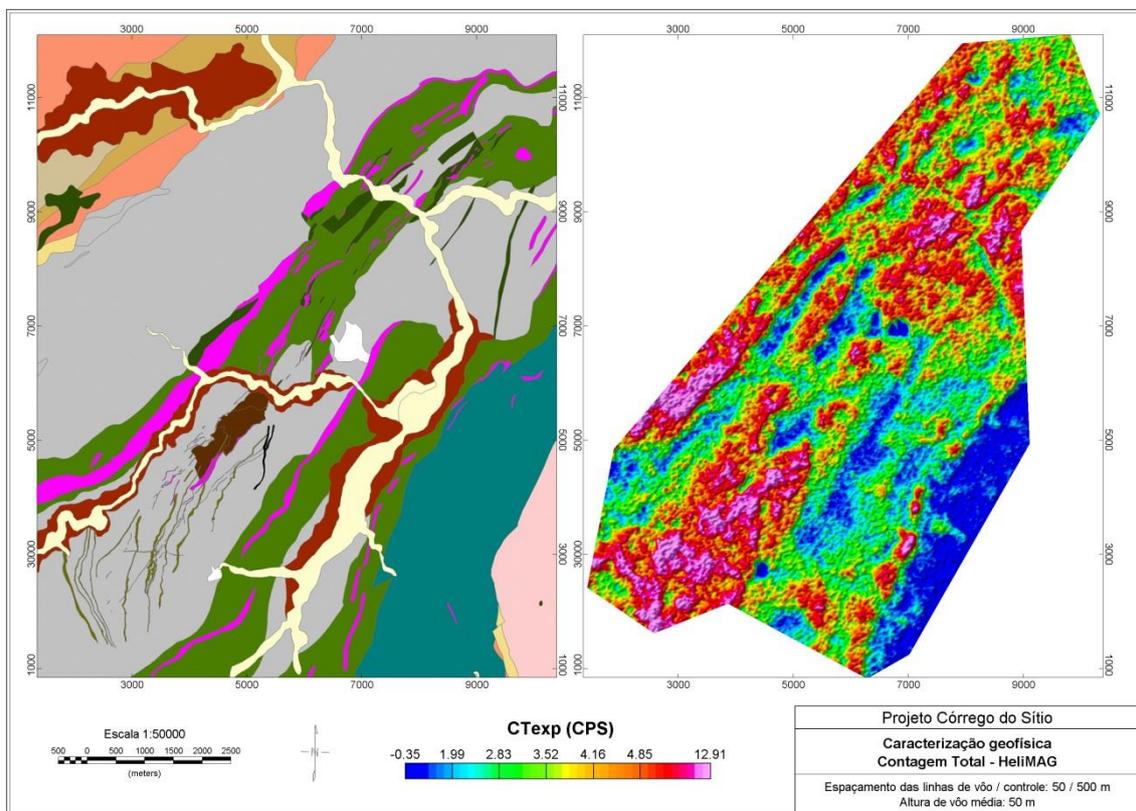


Figura 22: Comparação entre geologia regional da área do Projeto Córrego do Sítio e dados de contagem total do aerolevanteamento HeliMAG.

O mapa ternário de radioelementos na Figura 23 mostra também uma diferença característica na concentração relativa dos radioelementos. A unidade Córrego do Sítio apresenta conteúdo maior de potássio, comparada às demais unidades. Já a resposta da unidade Santa Quitéria é dominada por seu conteúdo de tório. A laterização parece ter sido acompanhada de empobrecimento maior em potássio, comparado aos demais elementos.

Efeitos topográficos ocorrem em diversas regiões do Projeto Córrego do Sítio. Como pode ser observado no mapa ternário da Figura 24, o contato entre zonas de assinatura distintas é abrupto na região S-SW e se torna gradual e pouco perceptível na região NE. Nesta área, drenagens atravessam a área do alvo e promovem a deposição de material erodido em um baixo topográfico.

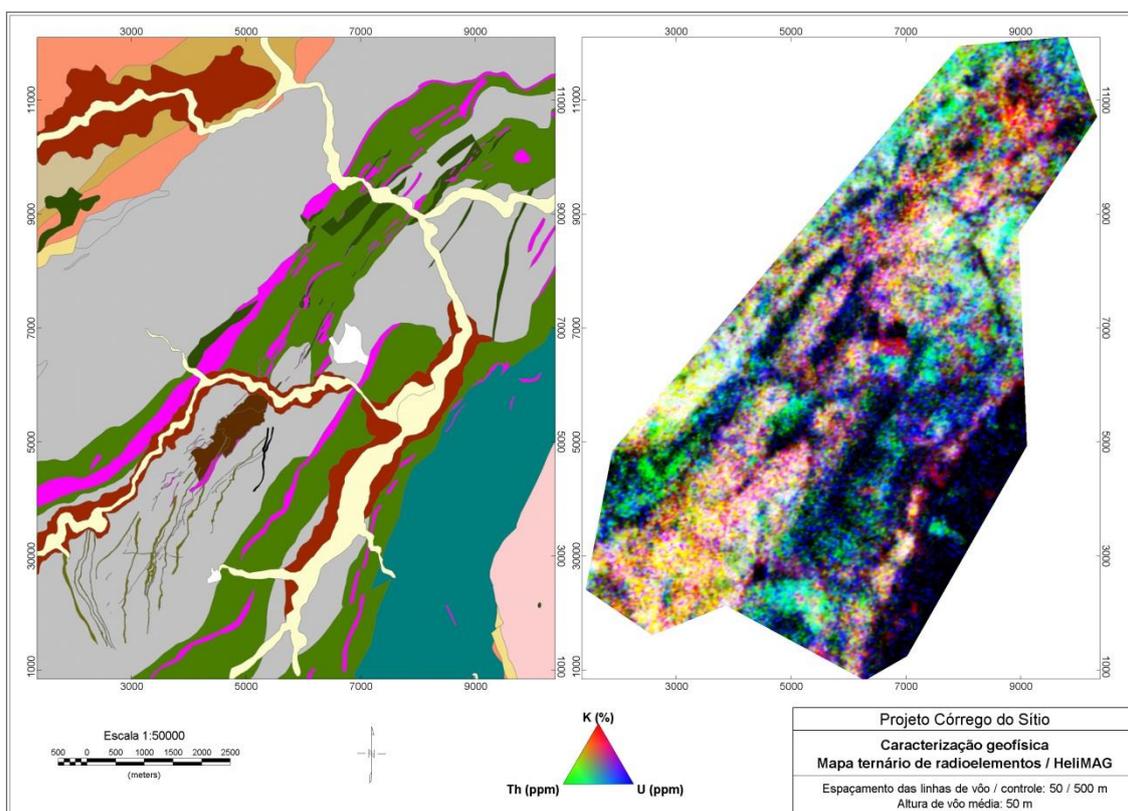


Figura 23: Comparação entre a geologia regional do Projeto Córrego do Sítio e mapa ternário de radioelementos proveniente do aerolevante HeliMAG.

A acumulação de sedimentos gera zonas de alta contagem no mapa ternário, que mascaram o contato entre as unidades esperado nesta região. Além disso, é observado maior nível de intemperismo na porção NE da área, que também afeta a resposta natural das rochas, especialmente a concentração de potássio.

O mapa de concentração de potássio na Figura 25 é dominado pela resposta dos metassedimentos da unidade Córrego do Sítio, porém zonas de alta concentração ocorrem dentro de seus limites e podem representar anomalias. A razão Th/K, pelo fato da concentração de tório ser relativamente inalterada por processos de hidrotermalismo, comparada à concentração de potássio, é mais sensível a processos de alteração. Por isso, preferiu-se usar estes dados ao invés da concentração de potássio.

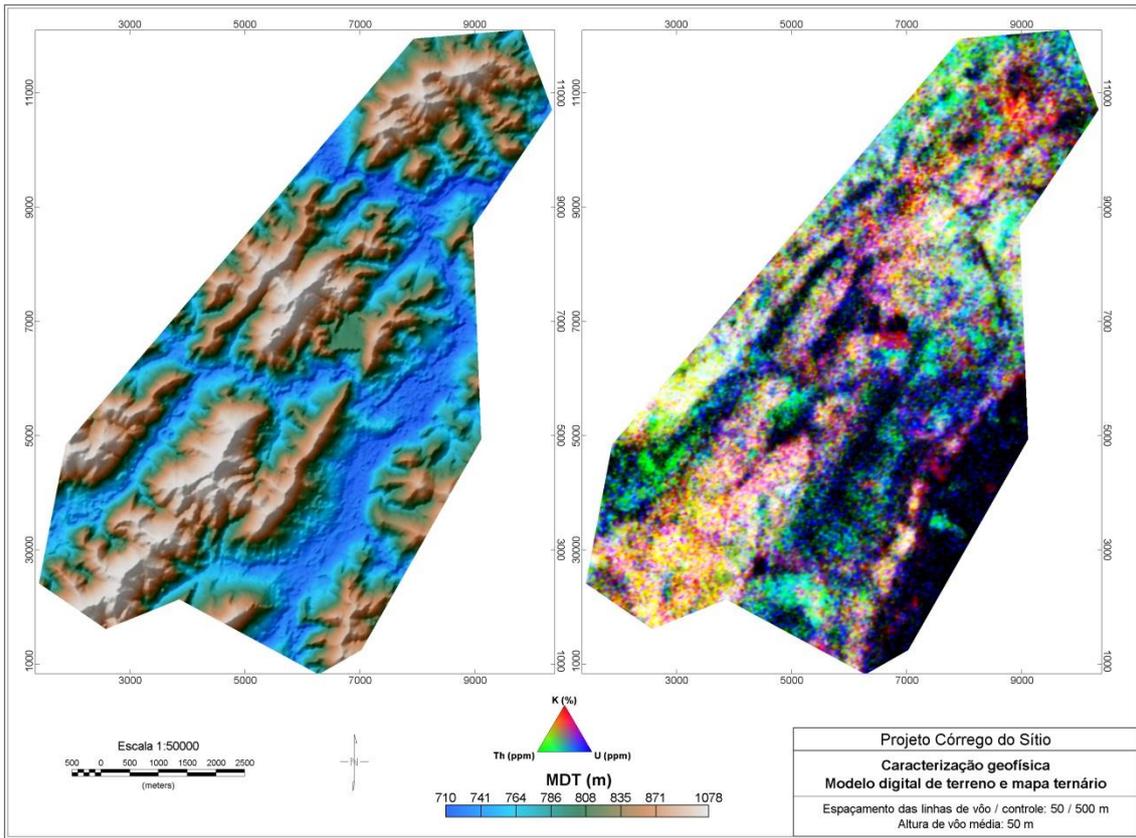


Figura 24: Comparação entre o modelo digital de terreno e mapa ternário gamaespectrométrico na área de interesse.

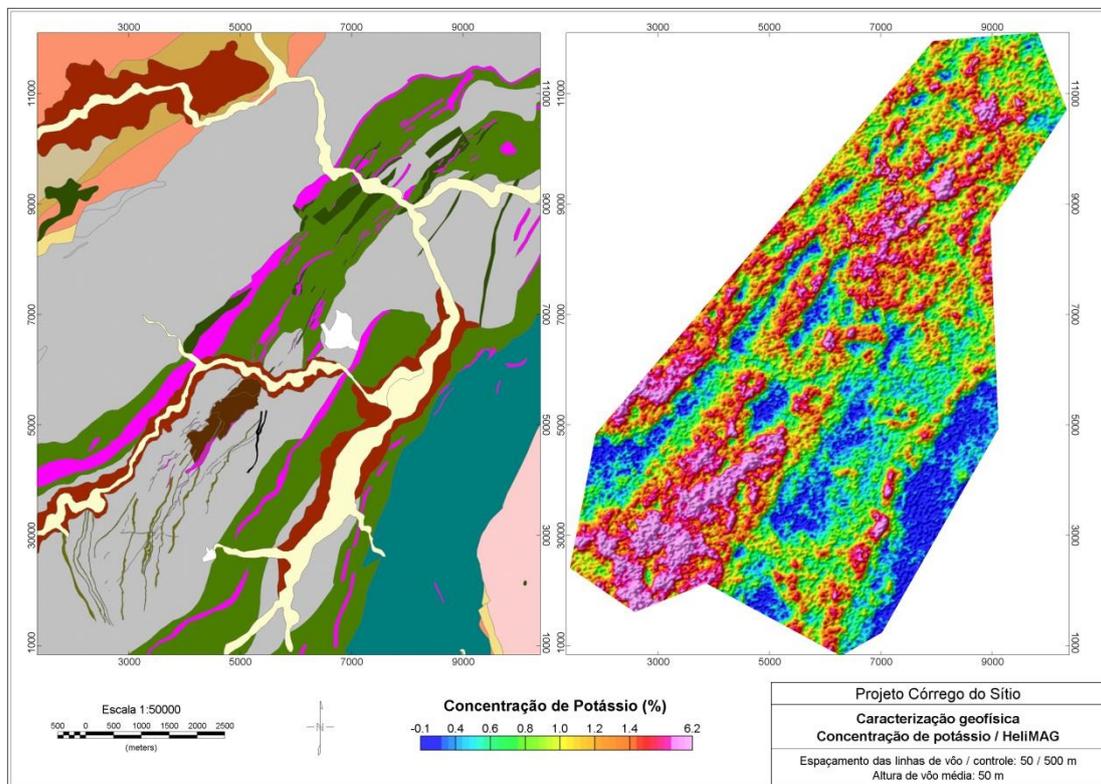


Figura 25: Comparação entre a geologia regional e dados de concentração de potássio do aerolevante HelimAG.

Os dados de razão Th/K mostram anomalias negativas (baixo tório, alto potássio) lineares que seguem a direção geral da geologia (cores quentes na Figura 26). São zonas anômalas que não estão diretamente associadas a litologias específicas e parecem atravessar os contatos entre as unidades Córrego do Sítio e Santa Quitéria. As ocorrências e minas parecem se alinhar com as zonas mais enriquecidas, especialmente os depósitos do tipo Córrego do Sítio, como Cachorro Bravo, por exemplo.

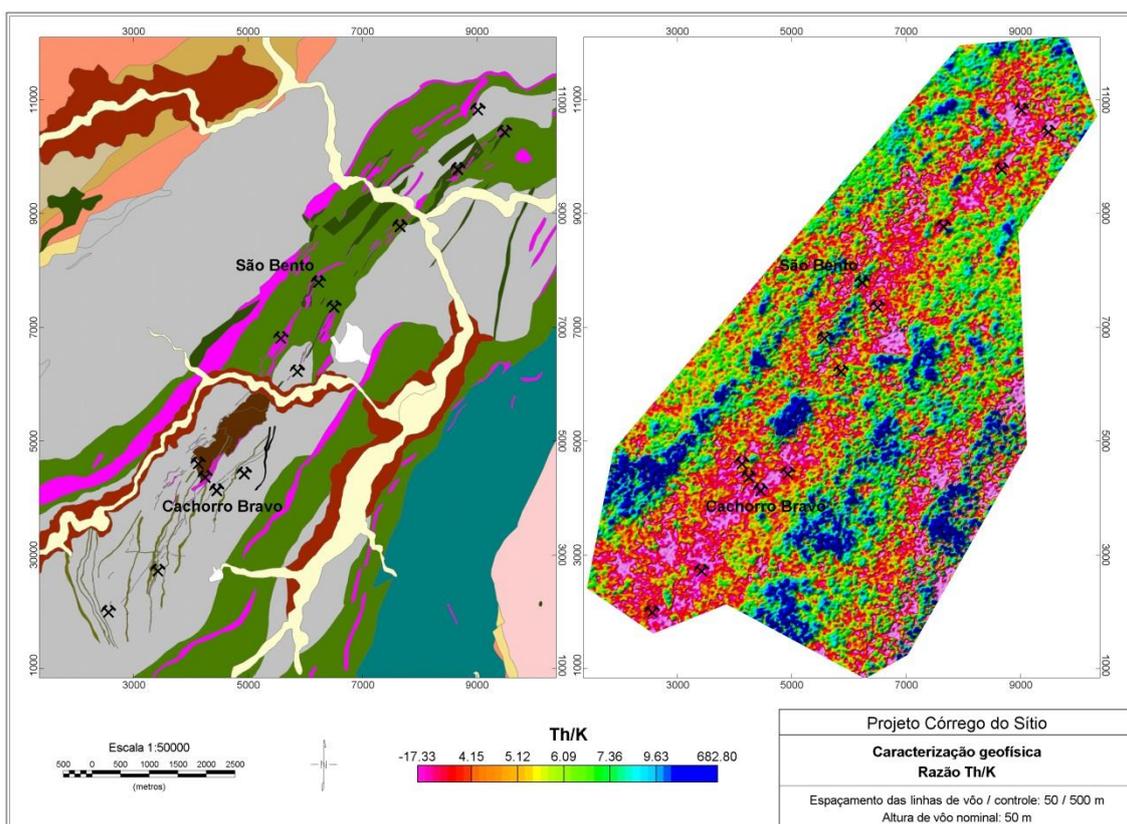


Figura 26: Comparação entre geologia regional e dados de razão Th/K do aerolevante HeliMAG.

Nota-se, na porção central da área (São Bento, por exemplo), que as anomalias estão situadas dentro de limites da unidade Santa Quitéria e associadas a BIF, normalmente caracterizadas por seu baixo teor de potássio. Outros exemplos são observados no bloco Santa Quitéria, que apresenta anomalias de formato inconsistente com a direção geral da geologia. Estas discrepâncias sugerem que as anomalias são associadas a processos epigenéticos e podem indicar a presença de zonas de alteração hidrotermal.

Nenhuma das unidades mapeadas apresenta resposta eletromagnética natural significativa. As unidades carbonosas encontradas principalmente na unidade Córrego

do Sítio não apresentam contraste suficiente que permita sua discriminação das demais unidades.

A porção norte da unidade Quebra-Ossos apresenta resposta EM nos *early-channels*, como mostra a Figura 27, possivelmente devida à serpentinização das ultramáficas presentes. As coberturas aluvionares e lateritas não apresentam resposta identificável.

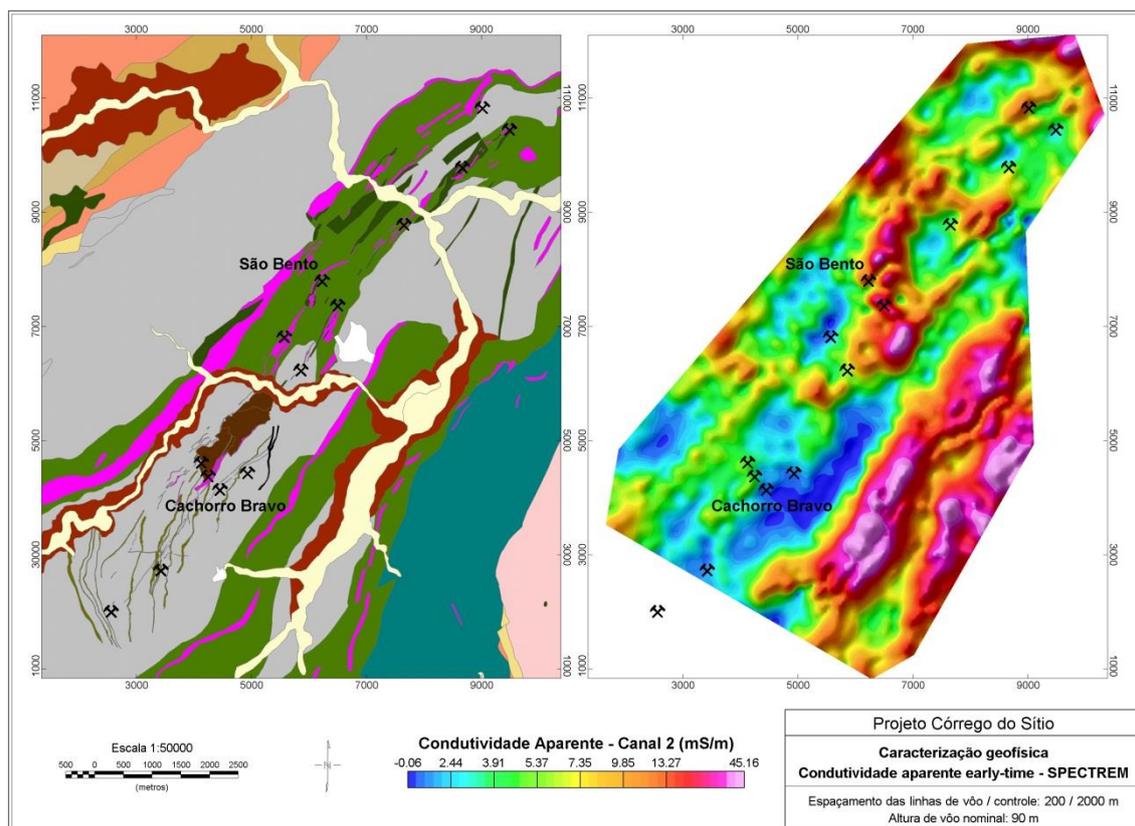


Figura 27: Comparação entre a condutividade aparente calculada a partir do canal 2, componente Z, do aerolevantamento SPECTREM e geologia regional.

Diversas anomalias lineares, de baixa amplitude, mas dominantes nos *early-channels* (anomalia a leste de Cachorro Bravo na Figura 27), e simétricas são atribuídas à presença de linhas de alta tensão, que atravessam a área. É possível identificar seus efeitos nos *late-channels* (Figura 28), mas são de amplitude significativamente reduzida.

Anomalias de maior amplitude, assimétricas e de direção consistente com a direção geral da geologia e lineamentos estruturais mineralizados dominam os *late-channels* (Figura 28). São atribuídas a mineralização condutiva, principalmente do tipo São Bento, tendo em vista que os litotipos dominantes na área não são condutivos.

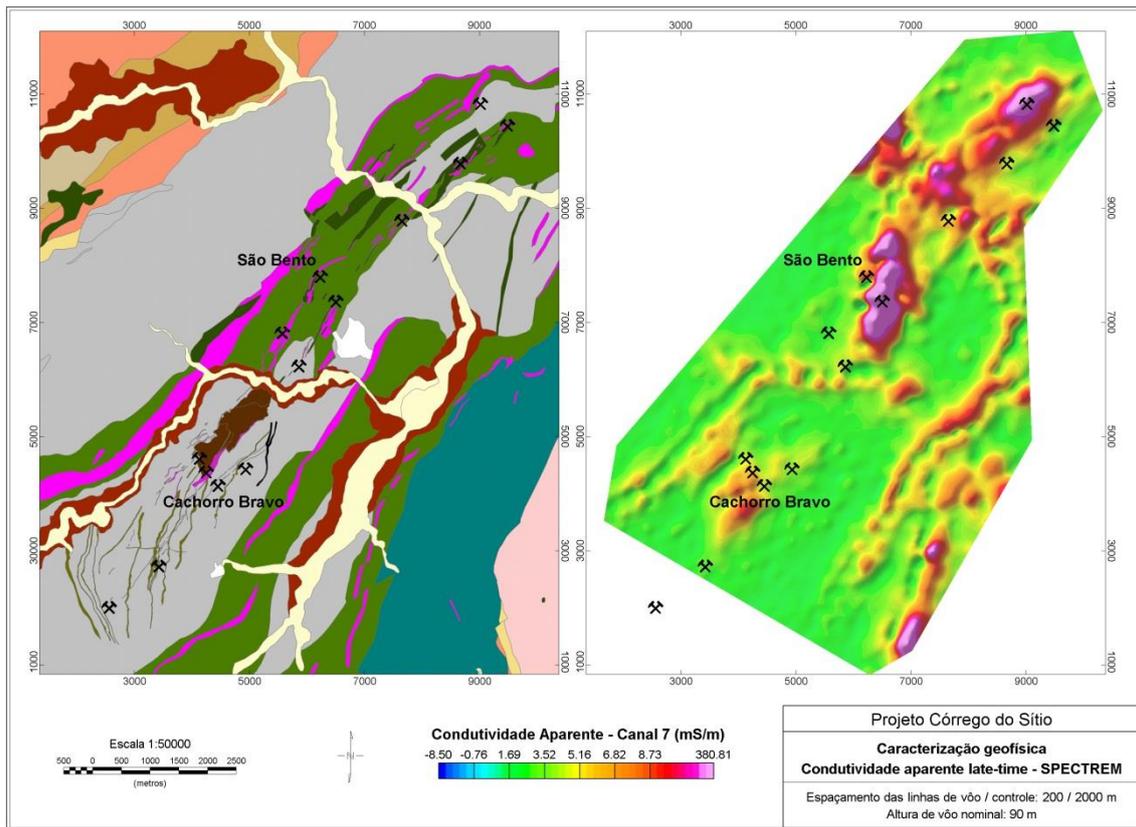


Figura 28: Comparação da condutividade aparente calculada a partir do canal 7, componente Z do aerolevantamento SPECTREM e geologia regional.

Foi concluído um trabalho de identificação e classificação de anomalias EM após a aquisição dos dados SPECTREM (SPECTREM Air, 2002). A Figura 29 mostra o resultado na forma de símbolos que marcam a localização da anomalia em planta e representam a posição da porção mais rasa dos condutores associados. Círculos amarelos denotam anomalias de pouca importância e alinhamentos compostos apenas por este tipo de anomalia são atribuídos a linhas de tensão.

A Figura 29 mostra, também, que anomalias de importância relativa maior formam um alinhamento, aproximadamente paralelo aos lineamentos estruturais mineralizados, denominado alinhamento CdS. Este se estende desde o limite sul do bloco SW, onde é observada uma anomalia EM de amplitude moderada, até o bloco NE, que exibe anomalia intensa no limite da área de interesse. Também são observadas anomalias de boa classificação na porção SE da área de interesse, próximas ao alvo A.

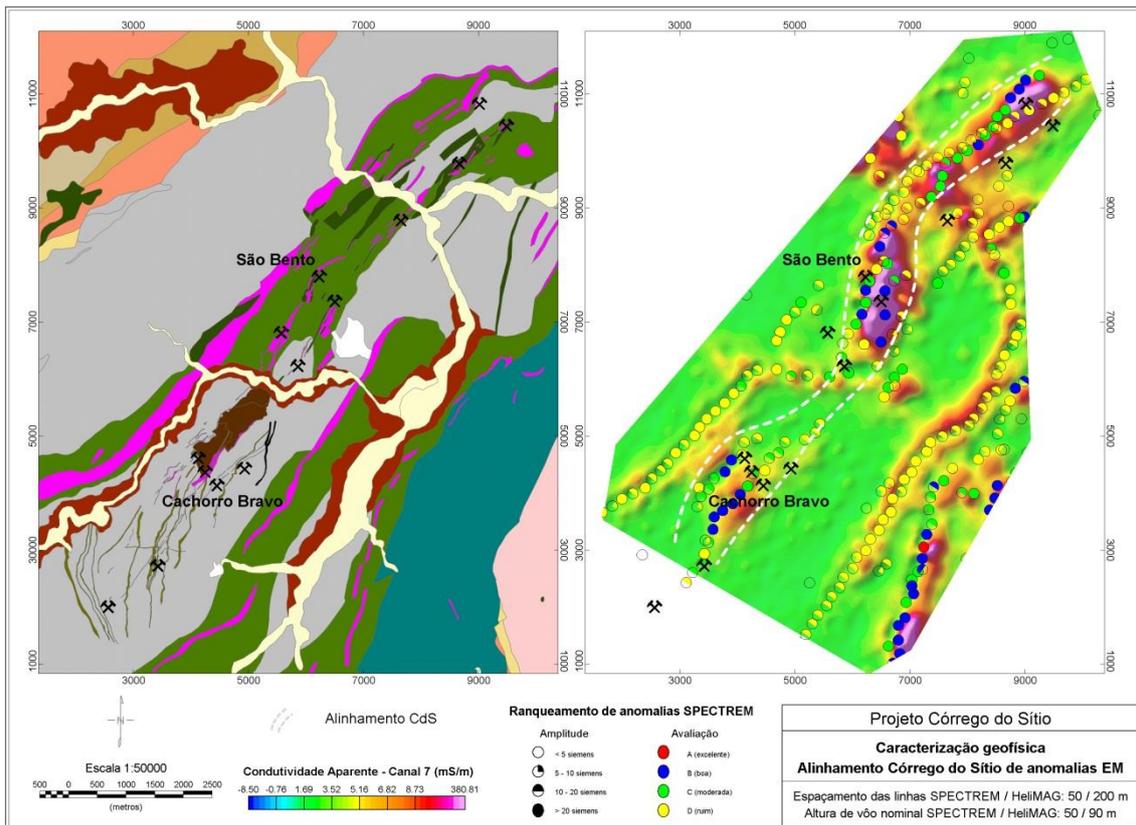


Figura 29: Geologia regional (à esquerda) e anomalias identificadas e ranqueamento concluído por SPECTREM Air (2002) sobre dados de condutividade aparente *late-time* (canal 7). O denominado alinhamento CdS está representado na figura pelas linhas tracejadas brancas.

O alinhamento CdS possui boa correlação com a direção geral das anomalias gamaespectrométricas identificadas anteriormente e indica que os condutores estão associados às supostas zonas de alteração potássicas mapeadas (Figura 30). Entretanto, há discrepâncias entre a direção do alinhamento CdS e dos lineamentos estruturais, como, por exemplo, a deflexão para leste observada na região sul do bloco central, ao sul do depósito São Bento.

Os dados magnéticos são dominados pelos efeitos das BIF da região. Estas estão associadas a anomalias lineares e intensas que se estendem por quilômetros (Figura 31).

As ultramáficas da unidade Quebra Ossos, que apresentam resposta de alta frequência e baixa amplitude, e os diques máficos que cortam a área, associados a anomalias de amplitude moderada a baixa, lineares e de pequena extensão, são os outros litotipos que apresentam resposta característica. As unidades Santa Quitéria e Córrego do Sítio não apresentam resposta significativa.

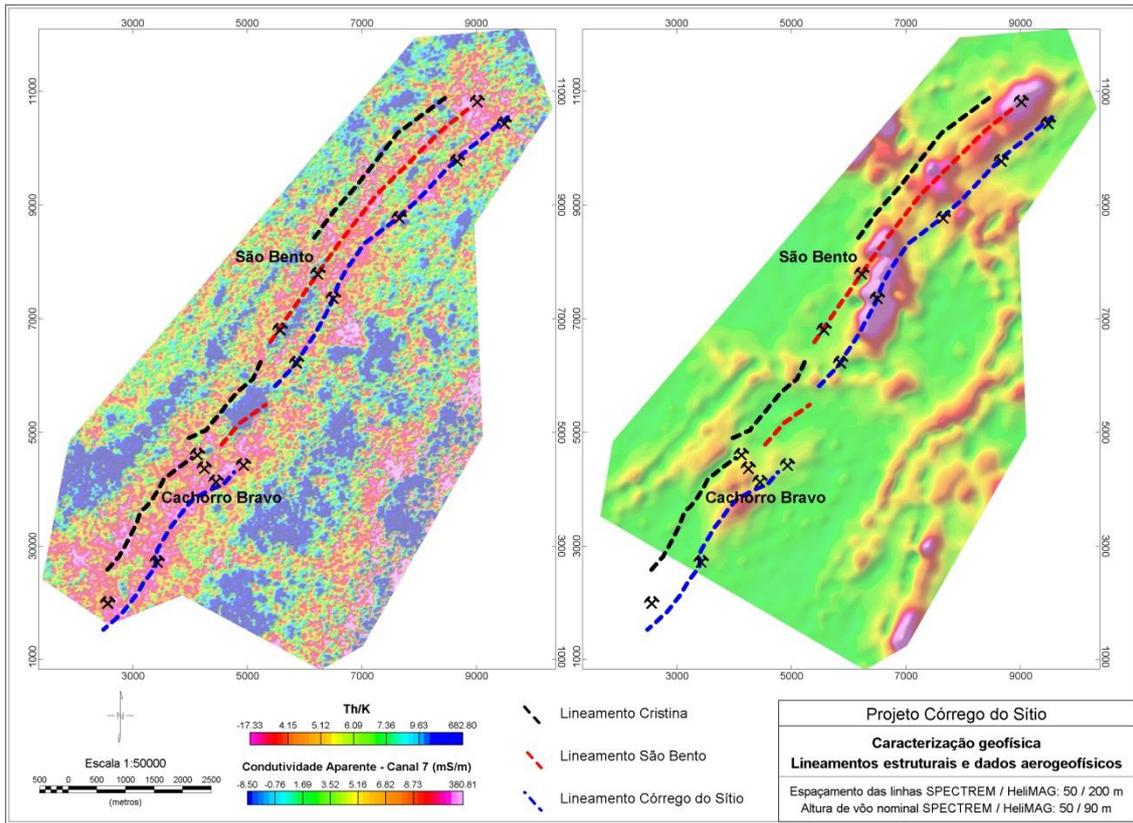


Figura 30: Lineamentos estruturais sobre dados aerogeofísicos. À esquerda, dados de razão Th/K. À direita, dados de condutividade aparente *late-time* (canal 7).

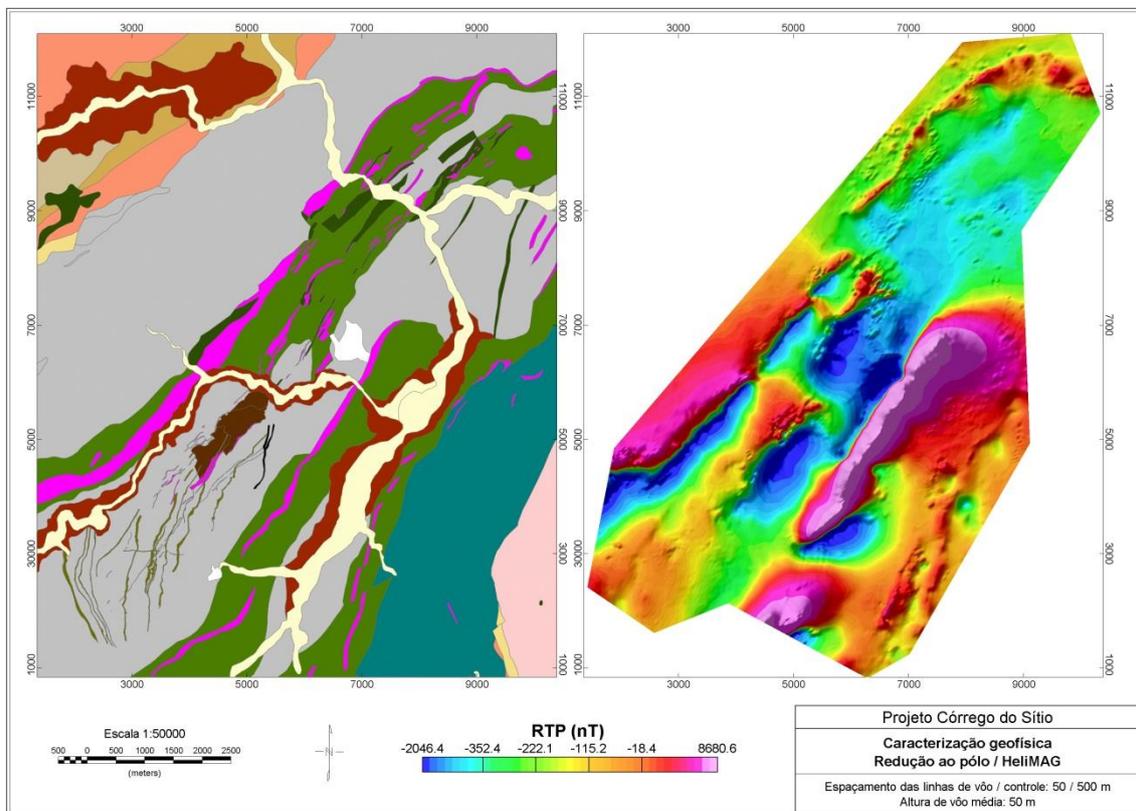


Figura 31: Comparação entre a geologia regional e dados magnéticos reduzidos ao pólo.

A Figura 32 mostra que BIF na área de interesse apresentam comportamento magnético complexo e variável. São observadas anomalias normais e reversas, de alta, moderada e baixa amplitude, que apresentam variações em suas características ao longo da direção dos horizontes, além de diversos indícios de deformação.

As BIF 1, 4 e 7 apresentam anomalias simétricas na Figura 32, sendo associadas a magnetização induzida. As BIF 3, 5 e 7 são associadas a anomalias reversas, indicando domínio de magnetização remanente. Já as BIF 2 não estão associadas a anomalias significativas, comparadas às demais. Variações de duas ordens de grandeza são observadas entre as anomalias das BIF 4 e BIF 2. Mudanças na forma da anomalia da BIF 4 e quebras na anomalia da BIF 5 ao longo de suas direções podem ser notadas.

A maioria das BIF presentes faz parte do mesmo pacote dobrado da unidade Santa Quitéria, então apresentam idades semelhantes, foram depositadas em condições magnéticas semelhantes e foram sujeitas à mesma evolução tectônica. Portanto, assumindo que não houve reversão geomagnética durante a deposição do pacote, as diferenças nas características magnéticas das BIF são provavelmente devidas a diferenças composicionais entre elas.

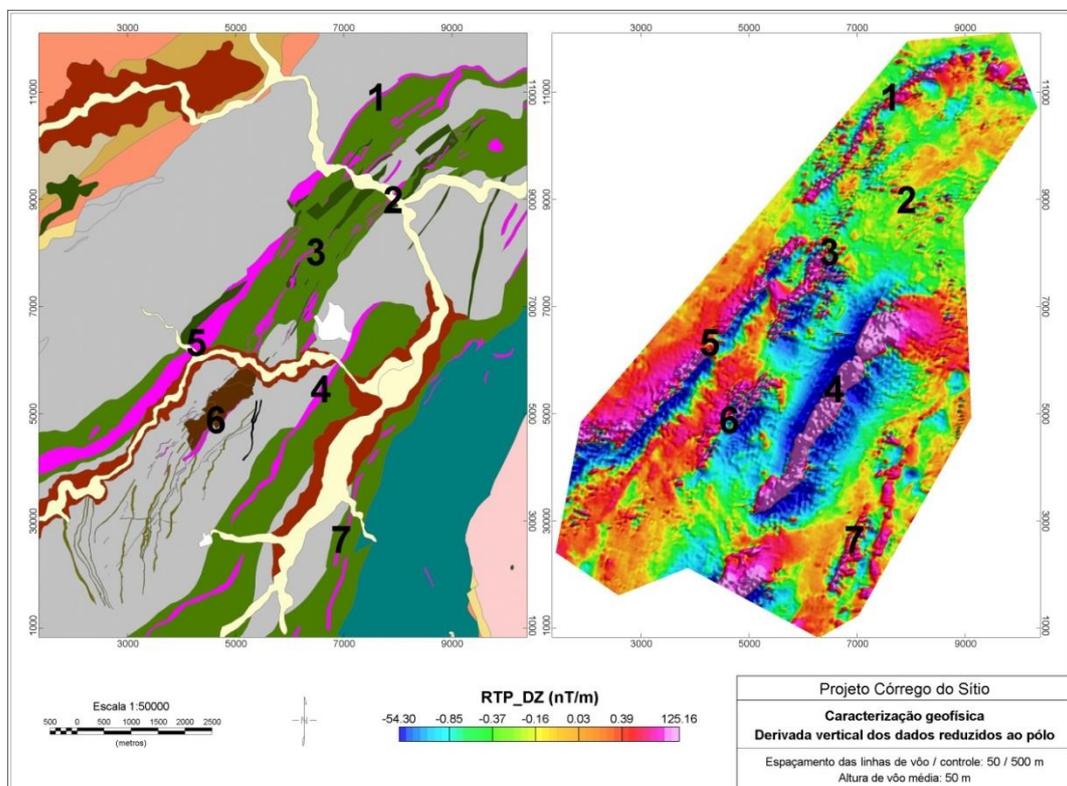


Figura 32: Geologia regional, derivada vertical dos dados magnéticos reduzidos ao pólo e identificação das BIF mencionadas no texto.

Efeitos relacionados a auto desmagnetização e anisotropia foram considerados irrelevantes neste caso. A mudança na direção do vetor de magnetização devido a estes fatores é ligada à geometria da estrutura, principalmente o mergulho, e as BIF apresentam geometrias similares em escala regional.

Eventos posteriores à formação das BIF, como metamorfismo e alterações hidrotermais, podem ter contribuído para as diferenças observadas. Eventos metamórficos (Brasiliano, por exemplo) podem ter aquecido os minerais magnéticos a temperaturas superiores às suas temperaturas de Curie, possibilitando a assimilação de remanência. Entretanto, tais efeitos têm impacto regional e ocorrem num curto intervalo de tempo. Deveriam, então, afetar as BIF de maneira relativamente uniforme.

Direen et al. (2008) atribui a presença de magnetização remanente num depósito orogênico na Austrália a zonas de pirrotita magnética. A sulfetação maciça encontrada em depósitos do tipo São Bento poderia ter sido responsável pela alteração na direção e magnetização, mas a BIF 5, não-mineralizada, apresenta a mesma reversão apresentada pelas BIF 3 e 6, mineralizadas.

Conclui-se, então, que as BIF foram afetadas pelos mesmos processos responsáveis pela componente remanente, em condições similares, mas assimilaram os efeitos de forma diferente.

Uma possível explicação é a variação na razão hematita/magnetita devido às diferenças nas fácies das BIF e intemperismo posterior. Como a hematita é uma portadora de remanência muito mais eficiente do que a magnetita (Reeves, 2005), as BIF ricas em hematita podem ter assimilado e preservado a componente remanente mais facilmente do que as BIF ricas em magnetita. Desta forma, as BIF foram afetadas por eventos capazes de afetar as características magnéticas de seus minerais, como o Brasiliano, por exemplo, porém aquelas ricas em hematita, seja por sua composição original ou por oxidação da magnetita, foram as que, possivelmente, tiveram a direção de sua magnetização afetada.

Estas interpretações são suportadas pela caracterização das BIF a partir de furos de sondagem. As BIF 3 e 6 são dominadas por itabiritos goetíticos em superfície, enquanto as BIF 4 e 5 estão associadas a itabiritos pelíticos e xistos ferruginosos.

Os itabiritos goetítitos apresentam conteúdo de hematita muito superior e, conseqüentemente, anomalia de menor amplitude (aproximadamente 2000 nT) e estão associados a anomalias reversas. Já os itabiritos pelíticos, ricos em magnetita, são responsáveis pelas anomalias mais intensas na área do projeto (superiores a 8000nT – BIF 4), de polaridade normal. Já os xistos ferruginosos da porção NE da área de interesse (BIF 1 e 2) são naturalmente pobres em magnetita e hematita e apresentam anomalias muito menos expressivas.

Estas conclusões não são baseadas em dados paleomagnéticos, então o motivo da reversão de algumas anomalias permanece incerto. É necessária uma análise paleomagnética detalhada para determinar a origem da magnetização remanente e suas aplicações para exploração.

A presença de componente remanente significativa complica a interpretação dos dados magnéticos. Porém, o uso de filtros e metodologias de inversão dos dados de pouca dependência na direção de magnetização total se provou eficiente, como será apresentado nas seções seguintes.

A Figura 33 resume as observações feitas e mostra a resposta geofísica esperada para os litotipos dominantes na área. Esta foi usada como referência durante a interpretação qualitativa dos dados.

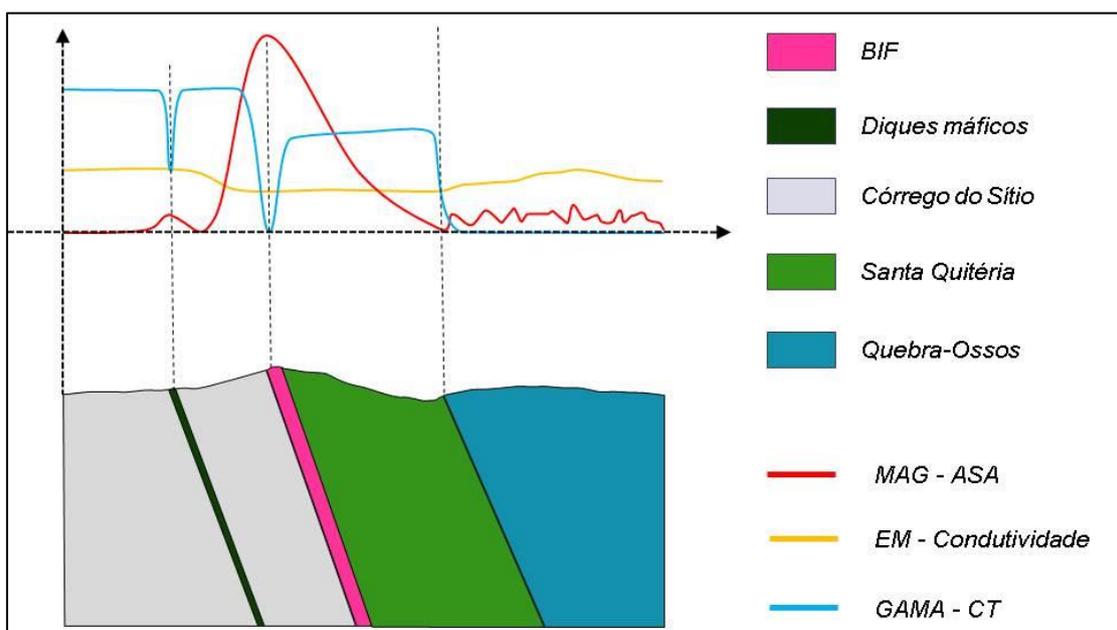


Figura 33: Respostas geofísicas esperadas dos litotipos dominantes na área. As siglas ASA e CT se referem à amplitude do sinal analítico e a contagem total, respectivamente.

### 3.1.2. INTERPRETAÇÃO ESTRUTURAL

Um mapa de lineamentos magnéticos foi produzido para avaliar o arcabouço estrutural da área a partir da interpretação integrada de produtos que enfatizam o conteúdo de alta frequência dos dados (Figura 34). Neste caso, foram utilizados: derivadas verticais, amplitude do sinal analítico de ordem 0 e 1 (Hsu et al., 1996), gradiente horizontal total, ângulo de tilt e gradiente horizontal total do ângulo de tilt (Miller & Singh, 1994).

Foram classificadas como lineamentos magnéticos, descontinuidades sistemáticas de marcadores magnéticos de extensão considerável (>1 km) e correlação em dois ou mais produtos de interpretação. Estes podem estar relacionados a falhas, zonas de cisalhamento ou zonas de fratura, que deslocam ou destroem minerais magnéticos, alterando a resposta magnética da rocha original.

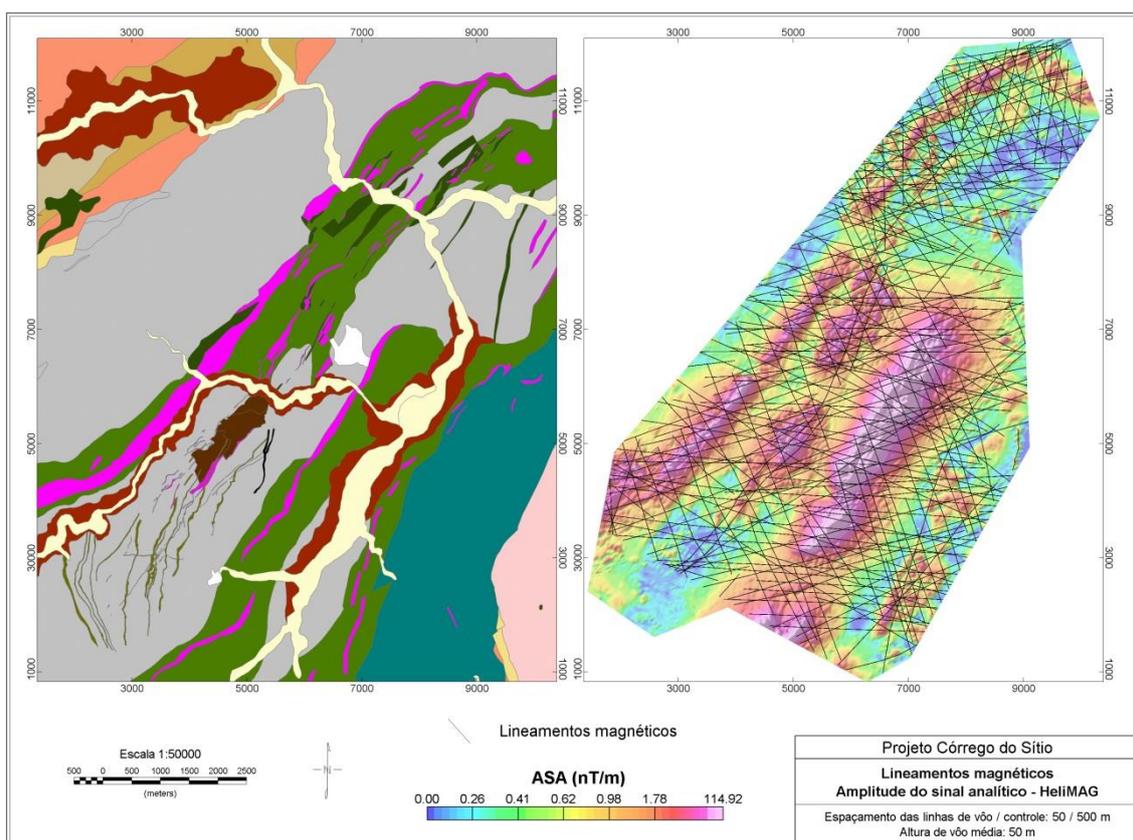


Figura 34: Lineamentos magnéticos identificados sobre amplitude do sinal analítico e comparação com geologia regional.

A Figura 35 mostra a roseta com o agrupamento dos lineamentos segundo sua direção média. São quatro as direções preferenciais na roseta: SWW-NEE, SEE-NWW, NNW-SEE e NNE-SSW, sendo a última a de menor expressão.

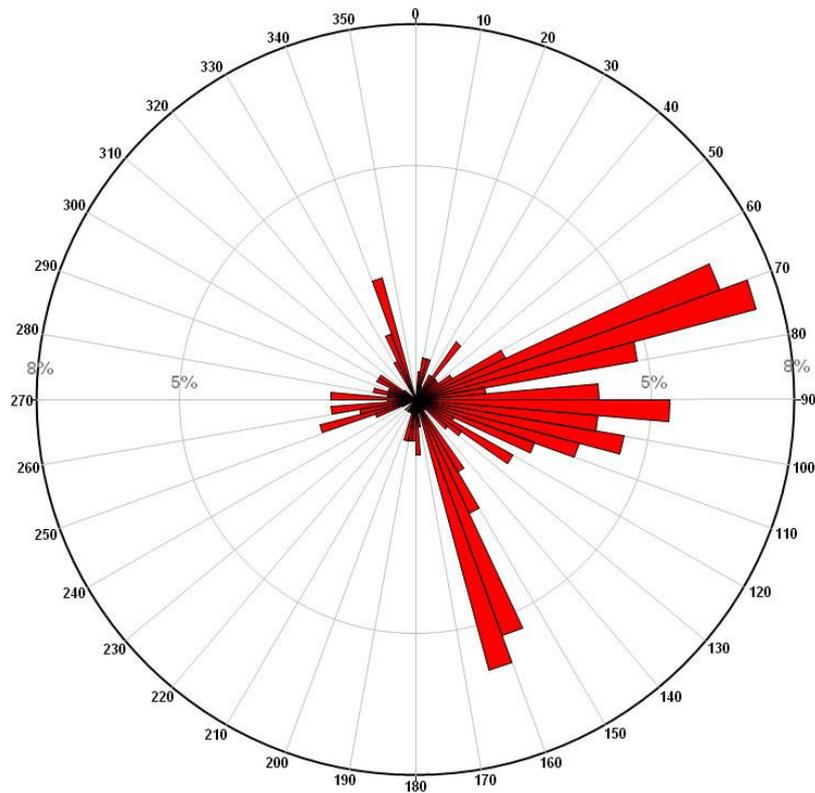


Figura 35: Roseta mostrando as direções dos lineamentos interpretados. Foram usados intervalos de 5° e os resultados estão dispostos em forma de porcentagem da quantidade total de lineamentos.

Os lineamentos associados de direção NNE-SSW apresentam formas curvas, resposta sutil e são deformados pelos demais lineamentos, o que sugere que são associados a eventos mais antigos e que são resultado de deformação dúctil em grande escala. Além disso, tem direção compatível com os lineamentos mineralizados, associados a estruturas D2 de Baltazar & Zucchetti (2007). São então interpretados como zonas de cisalhamento resultantes da Orogenia Rio das Velhas.

Os demais lineamentos são bem definidos, apresentam formato retilíneo e boa continuidade ao longo da direção, que indica que são associados a eventos recentes e rúpteis em grande escala (Figura 36). Entretanto, os lineamentos NWW-SEE e SWW-NEE cortam e interrompem os lineamentos NNW-SSE, sugerindo que os primeiros são mais recentes.

Os lineamentos de direção aproximadamente NWW-SEE, paralela à direção de esforço principal do Brasiliano, estão associados a deslocamentos consideráveis, ao longo de sua direção, de marcadores magnéticos. São interpretados como falhas transcorrentes predominantemente dextrais geradas pela componente principal da Orogenia Brasileira (E-W).

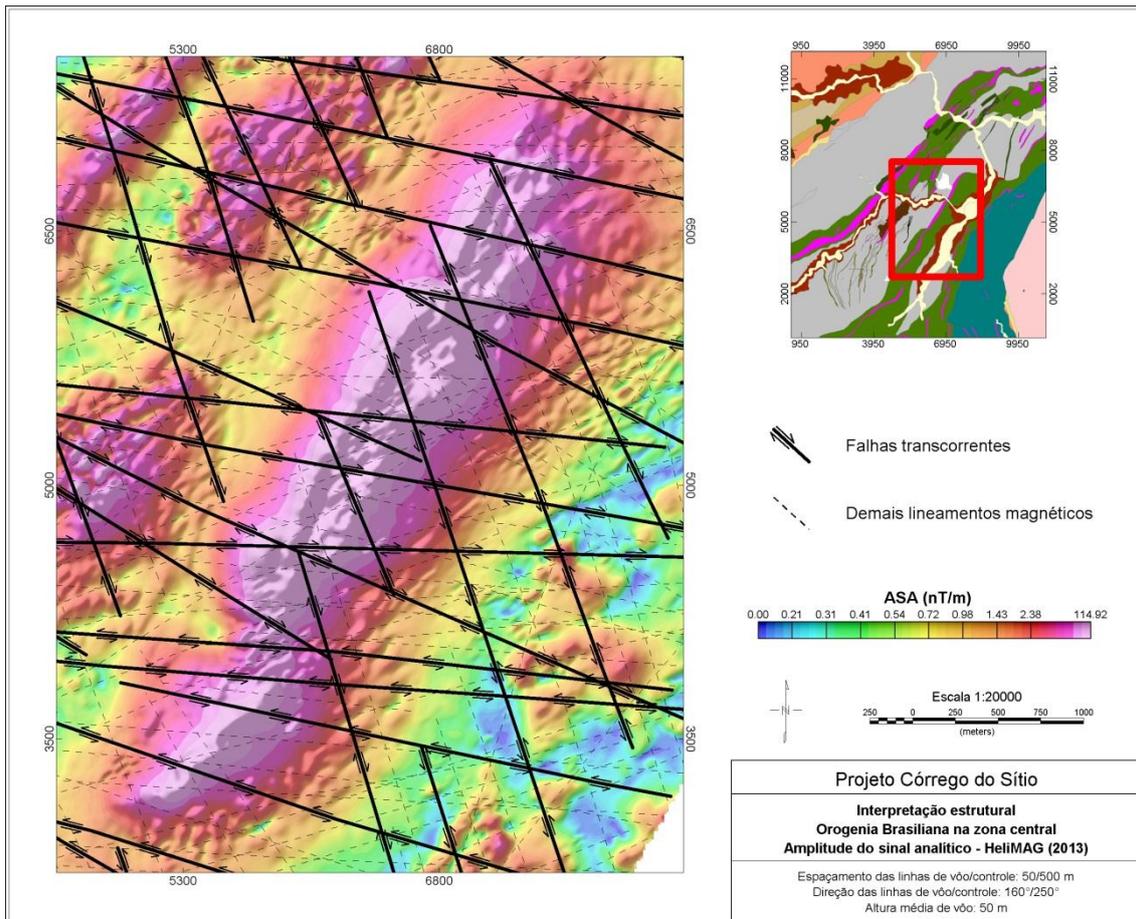


Figura 36: Efeitos das falhas transcorrentes interpretadas a partir de lineamentos magnéticos sobre a anomalia magnética da BIF 4, na região central da área de interesse. Nota-se que as falhas NWW-SEE têm efeito predominante.

Os lineamentos de direção SWW-NEE são associados a anomalias sutis e deslocamento menos expressivo, que indica que são associadas a possíveis zonas de fratura resultado da tectônica *strike-slip* dextral consequente. Também é interpretado como consequência da compressão Brasileira principal o espalhamento das direções de E para SEE.

Os lineamentos NNW-SSE também são representados por lineamentos retilíneos e de grande extensão. Devido ao deslocamento considerável de marcadores magnéticos, à sua direção, consistente com a compressão transamazônica, e à interação entre estas e as estruturas brasileiras, são interpretados como estruturas transamazônicas reativadas durante a Orogenia Brasileira. A ausência de estruturas secundárias, associadas a transpressão, como é observado no caso das estruturas NWW-SEE, também suporta a interpretação.

Nota-se uma mudança na importância relativa de ambas as direções de falhas transcorrentes brasileira e transamazônica ao longo da direção da geologia. Aquelas de direção NWW-SEE tendem a perder importância em relação às de direção NNW-SSE e a apresentam azimute maior em direção ao bloco NE (Figura 37) em relação às estruturas de mesma origem nos demais blocos.

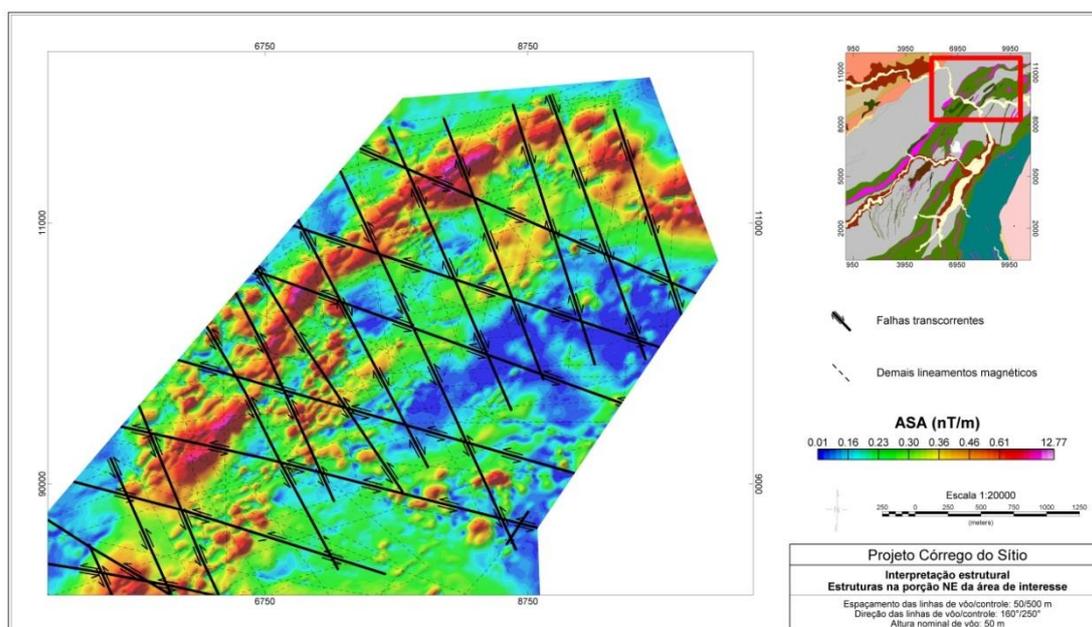


Figura 37: Efeitos das falhas transcorrentes interpretadas a partir de lineamentos magnéticos sobre a anomalia magnética da BIF 1, na região do bloco NE.

Estas diferenças podem estar ligadas a efeitos de uma possível compressão diferencial durante o Brasiliano, mais intensa na região do bloco SW e mais suave em direção ao NE.

Este efeito é possivelmente associado à geometria do complexo Santa Bárbara, ao leste, e seu contato com a sequência metavulcanossedimentar, que pode ter intensificado os esforços na porção SW e formado as estruturas de azimute maior no bloco NE. A Figura 38 mostra que a direção das falhas interpretadas muda de SW para NE, aproximadamente acompanhando o formato do Complexo Santa Bárbara. O mesmo ocorre com a própria sequência metavulcanossedimentar.

O espalhamento dos lineamentos na direção NWW-SEE também pode estar ligado a efeitos paleotopográficos durante a compressão Brasiliana. Altos estruturais localizados na área de interesse podem ter sido responsáveis por componentes de compressão oblíquas ao Brasiliano e variações locais da deformação a que foi submetida a sequência metavulcanossedimentar e os depósitos associados.

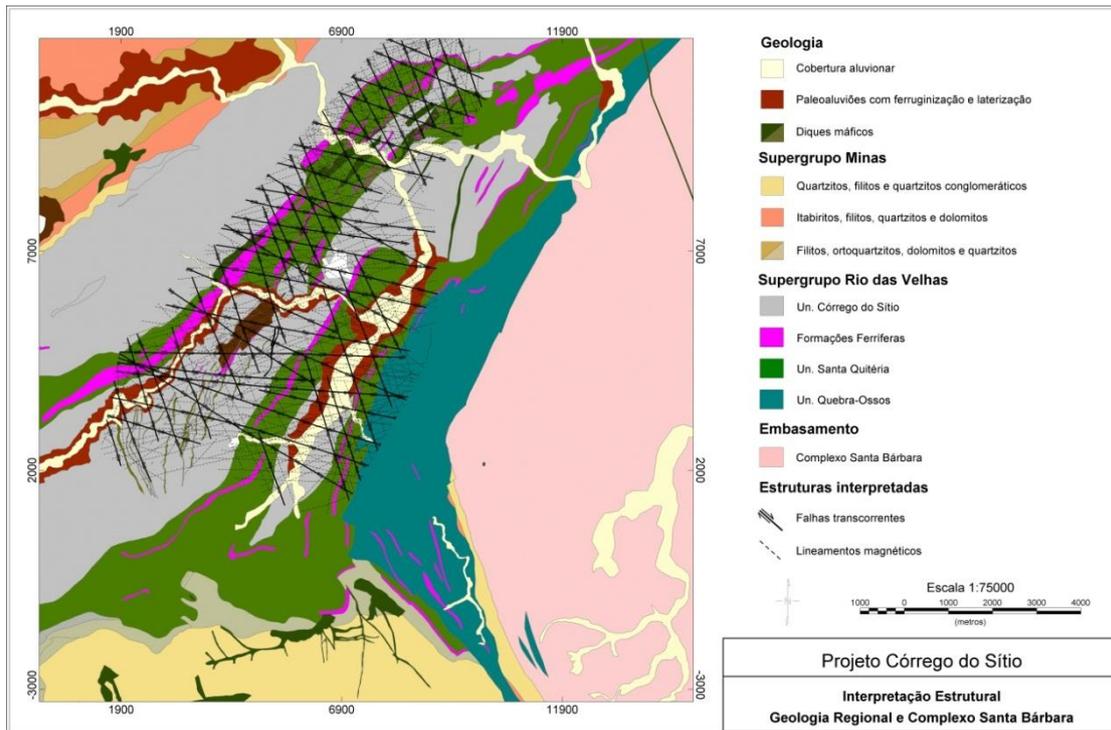


Figura 38: Geologia regional e estruturas interpretadas.

Os lineamentos NNW-SSE apresentam direção consistente com as linhas de vôo, o que poderia significar que esta direção representa, na verdade, erros de nivelamento entre as linhas. Entretanto, como a Figura 39 mostra, tais lineamentos têm efeito claro sobre a topografia, confirmando a existência das estruturas. De qualquer forma, é possível que artefatos tenham sido interpretados como estruturas geológicas e é necessária avaliação em campo das interpretações para confirmação.

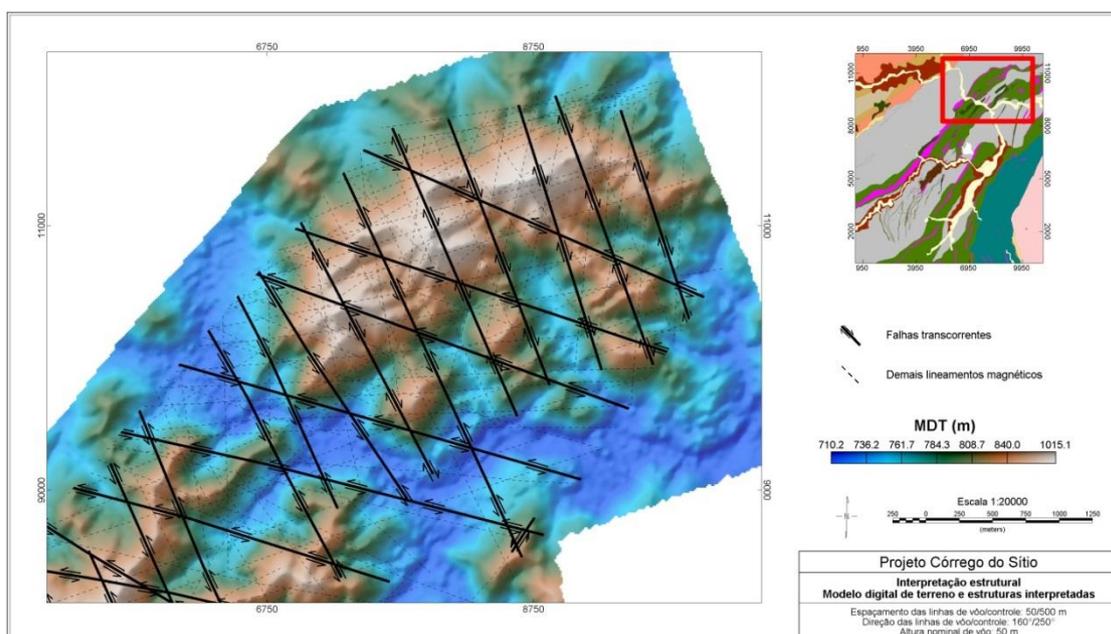


Figura 39: Falhas transcorrentes interpretadas sobre topografia na região do bloco NE.

Dois lineamentos NNE-SSW se destacam por sua continuidade e relação com os dados aerogeofísicos e lineamentos estruturais (Figura 40). São associados a zonas de enriquecimento potássico e exercem forte controle sobre o alinhamento de anomalias EM identificado. Sua forma é controlada pelas estruturas brasileiras, na região da mina São Bento, por exemplo, e têm a mesma direção dos lineamentos mineralizados. Estes lineamentos são então interpretados como a possível expressão superficial das zonas de cisalhamento que hospedam os depósitos na área de interesse.

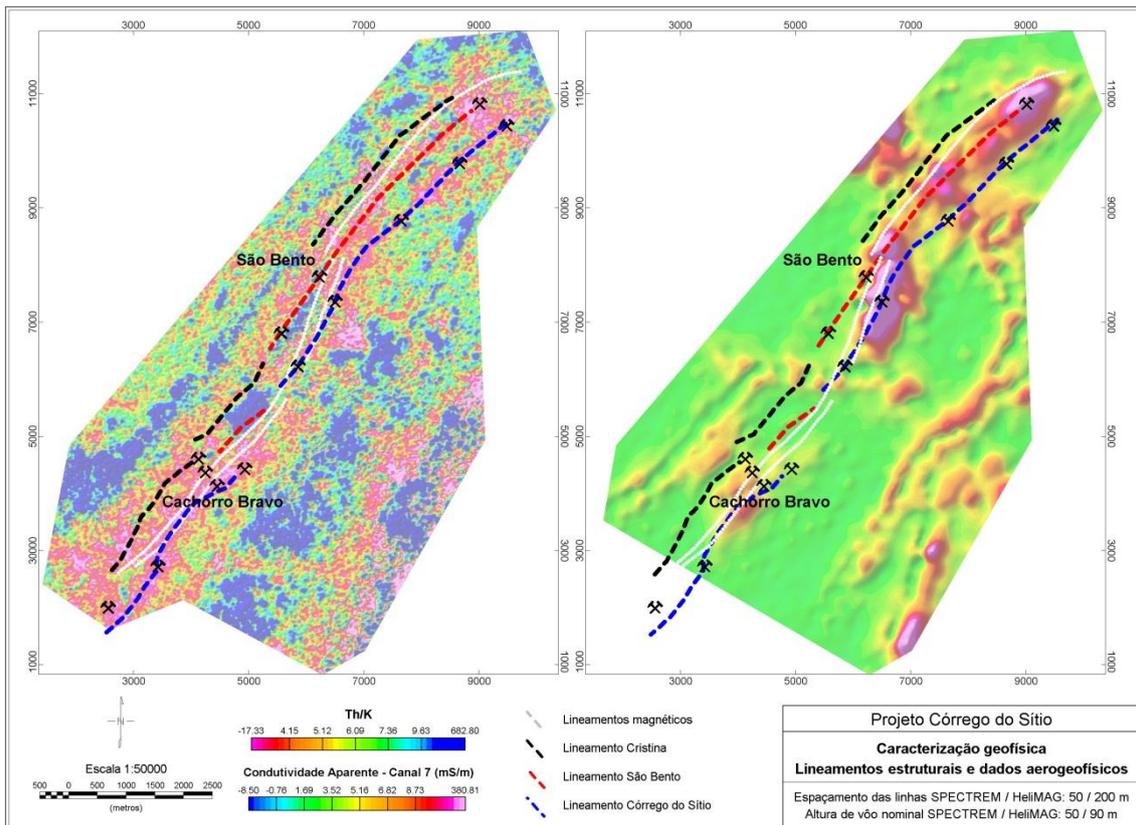


Figura 40: Relação entre lineamentos NNE-SSW (linhas brancas), dados aerogeofísicos e lineamentos estruturais (linhas coloridas). À esquerda, dados de razão Th/K. À direita, dados de condutividade aparente *late-channel* (canal 7).

Visando entender a consequência das estruturas interpretadas sobre as fontes magnéticas, foi feita modelagem tridimensional com corpos tabulares e inversão da anomalia magnética da BIF 4.

A Figura 41 mostra que a fonte associada à anomalia magnética é atravessada por diversas falhas transcorrentes e apresenta um padrão de anomalia complexo. Em sua porção norte, é caracterizada por um pólo negativo intenso a NW, seguido de positivo central e negativo menos intenso a SE, indicando fonte magnética de mergulho para SE,

assumindo magnetização induzida. Em sua porção central, o pólo negativo a NW perde intensidade e a anomalia se torna simétrica, sugerindo mergulho vertical. Em sua porção sul, a polaridade se inverte e a anomalia indica mergulho para NW.

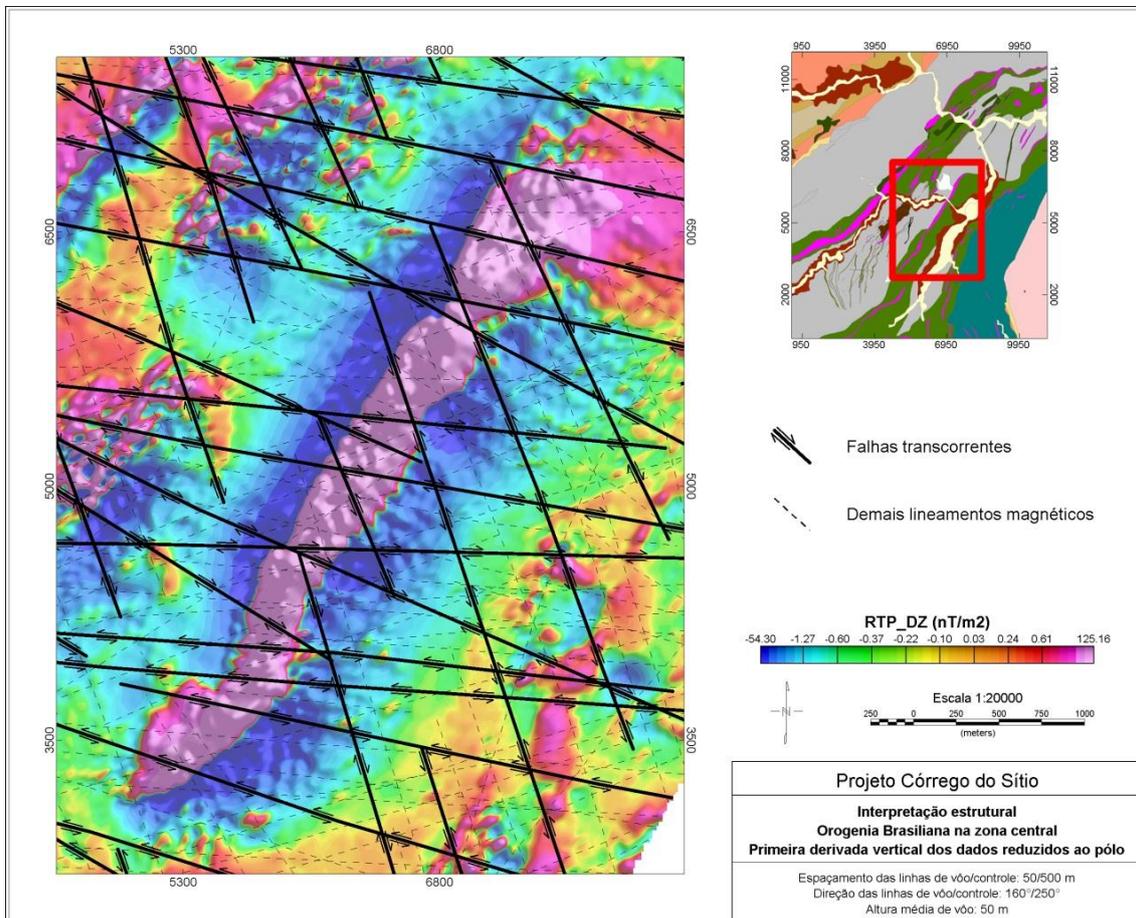


Figura 41: Padrão complexo da anomalia magnética da BIF 4 e consequências das estruturas interpretadas (linhas pretas). Dados de primeira derivada vertical dos dados reduzidos ao pólo.

Foram usados quatro corpos tabulares, de geometria em superfície consistente com a interpretação dos limites da fonte magnética, para ajustar as zonas de geometria similar. Para verificar a validade da modelagem direta, foi efetuada a inversão tridimensional dos dados magnéticos.

A Figura 42 mostra que os corpos modelados indicam rotação anti-horária do mergulho para NW na porção sul da estrutura e confirmam a interpretação qualitativa. Estas mudanças estão associadas à posição das falhas transcorrentes interpretadas, que também marcam as mudanças nas características da anomalia magnética. A partir de sua extensão em superfície, foram modeladas as falhas de mergulho subvertical observadas na figura, cuja forma concorda com o movimento interpretado. O mesmo padrão foi observado no modelo obtido através da inversão dos dados (Figura 43).

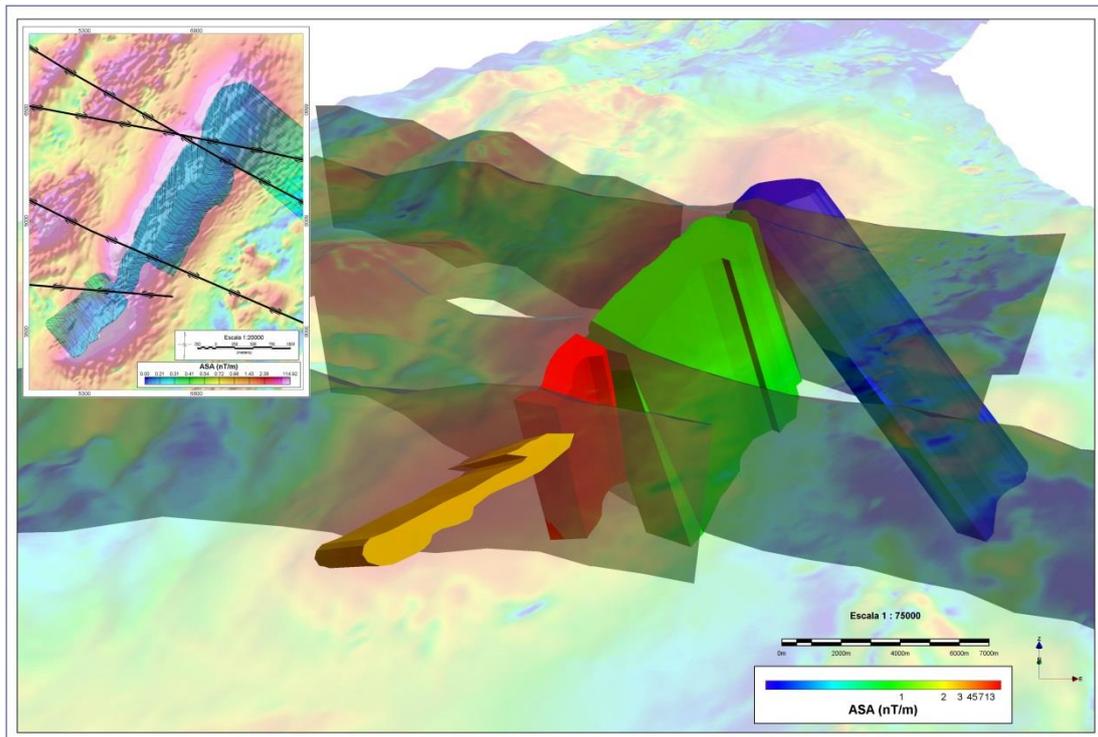


Figura 42: Corpos modelados para a anomalia da BIF 4 (prismas coloridos), estruturas interpretadas e falhas transcorrentes (superfícies pretas). No mapa em planta, as linhas pretas representam as falhas interpretadas e os polígonos azuis representam a projeção em planta dos corpos modelados. Em ambos os mapas está representado o mapa de amplitude do sinal analítico. Vista para norte.

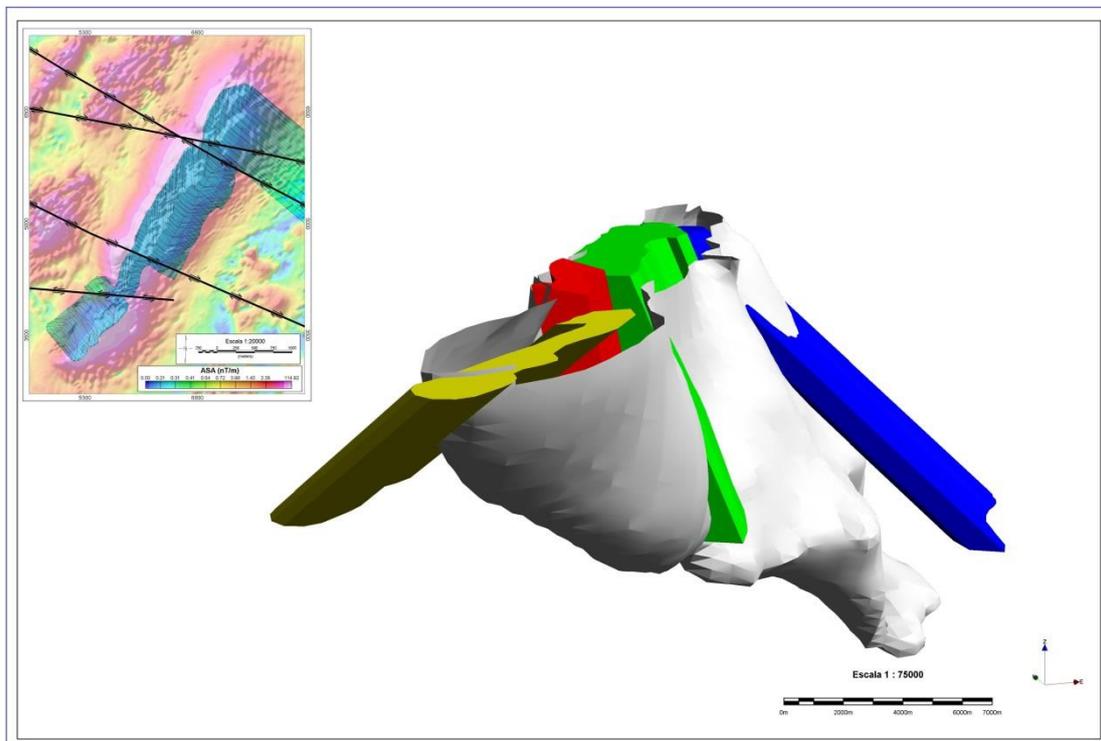


Figura 43: Relação entre corpos tabulares modelados (prismas coloridos) e isosuperfície de susceptibilidade magnética (superfície branca, valor de 0,2 SI) obtida a partir do modelo de inversão. No mapa na parte superior esquerda, as linhas pretas representam as falhas interpretadas e os polígonos azuis representam a projeção em planta dos corpos modelados. Vista para NNE.

O mesmo comportamento é observado na região do alvo A (Figura 44). A superfície na figura representa o modelo obtido após o modelamento direto de todas as linhas que apresentavam anomalia magnética bem definida associada ao mapeamento de uma BIF magnética em escala local. Corpos tabulares foram usados de forma semelhante à aplicada para a BIF 4. Duas falhas transcorrentes de mergulho subvertical interpretadas exercem controle semelhante sobre o corpo modelado, provocando a alteração do mergulho da porção SW através do basculamento do corpo para NW.

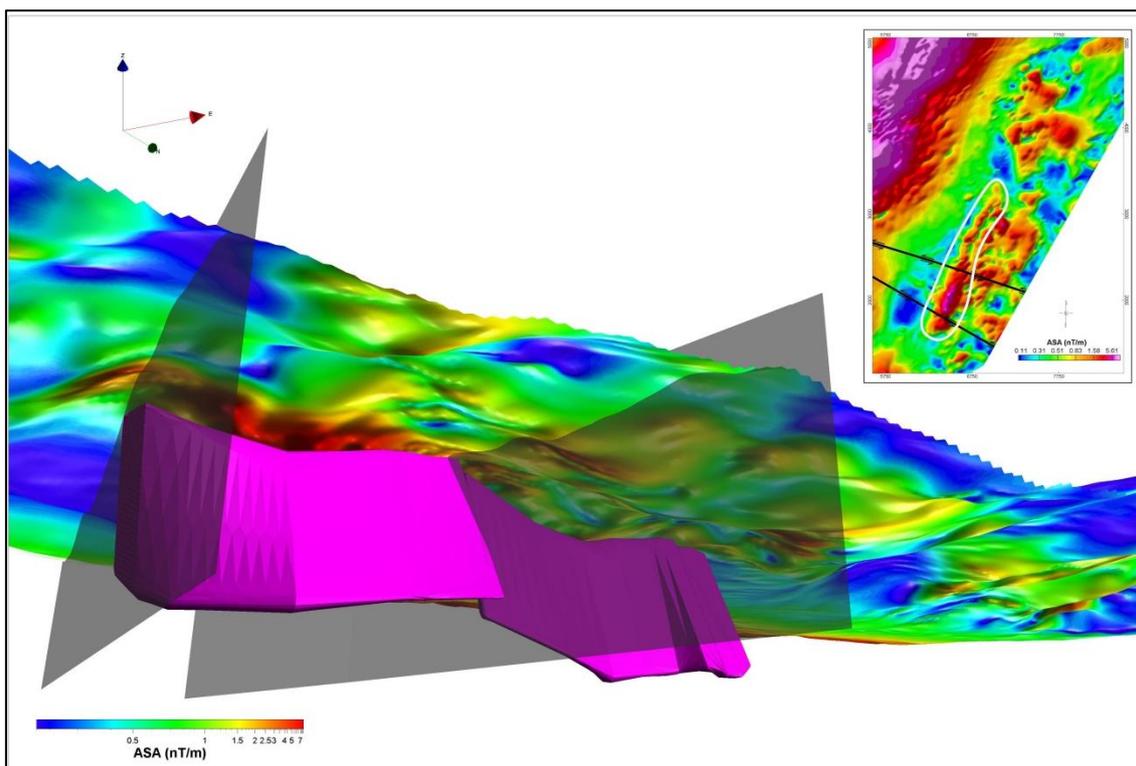


Figura 44: Modelo (prisma rosa) construído a partir da modelagem direta da anomalia magnética indicada pelo polígono branco no mapa de detalhe sob os dados de amplitude do sinal analítico plotados sobre a topografia. Os lineamentos usados para modelagem das falhas estão representados como linhas pretas no mapa. Azimute e inclinação da visão: 330°/20°.

A Figura 32 mostra que comportamento semelhante pode ser esperado para a porção SW da BIF 5 (canto inferior esquerdo), visto que ocorre um deslocamento transcorrente da anomalia magnética, associado também a uma estrutura brasileira. A cobertura do aerolevantamento não foi suficiente para garantir confiança à modelagem desta anomalia.

As mudanças de geometria estão associadas à direção principal de compressão da Orogenia Brasileira e sugerem que houve variação da intensidade da deformação ao longo do plano das dobras do Anticlinal Conceição. Os modelos obtidos e sua relação

com as falhas delineadas sugerem que a compressão foi máxima na porção SW da área analisada, onde o mergulho das fontes magnéticas se torna subvertical. Na porção NE, os mergulhos são mais suaves e indicam compressão mais branda.

É necessário apontar que o modelamento direto das anomalias escolhidas é sensível principalmente a alterações da geometria e propriedade física das fontes em sua porção mais próxima da superfície, porém, pouco sensível a alterações em profundidade. Portanto, as extensões em profundidade dos prismas utilizados são pouco confiáveis e podem não representar fielmente a geometria das fontes magnéticas.

Salles (1998) sugeriu um modelo de frentes de empurrão para explicar as supostas dobras em bainha que hospedam os depósitos de Lamego e Cuiabá na porção oeste do QF. Este modelo assume compressão diferencial em escala regional ao longo de superfícies de descolamento brasileiras para explicar os altos estruturais que hospedariam os depósitos mencionados.

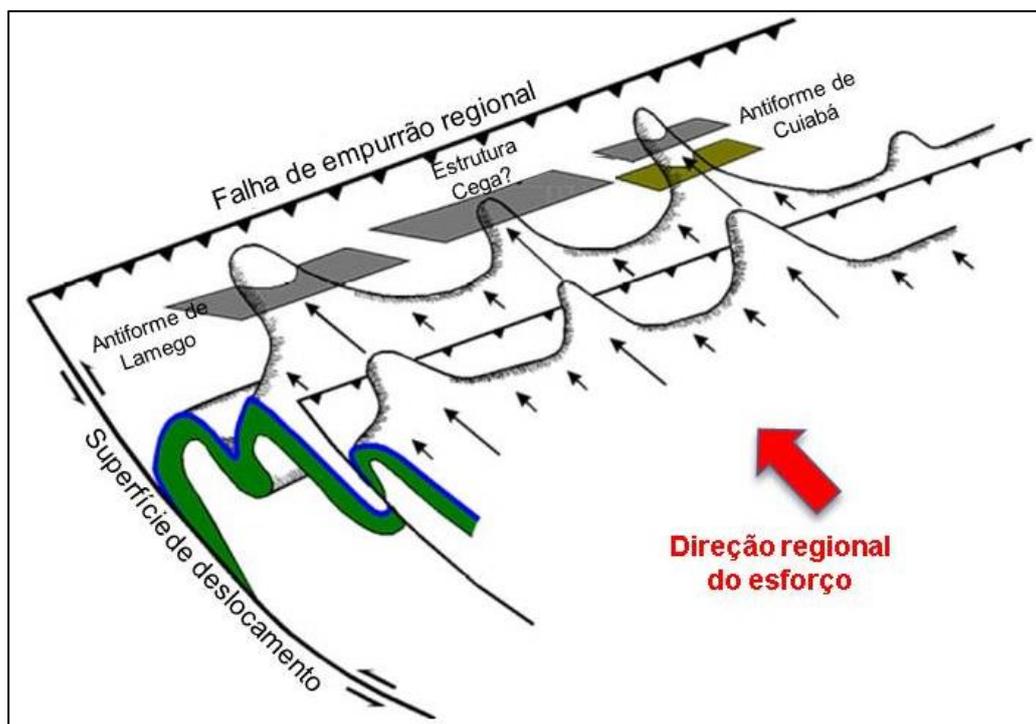


Figura 45: Modelo de frentes de empurrão proposto por Sales (1998) para explicar a geometria do pacote de metavulcanossedimentares (camada azul e verde) que hospeda os depósitos de Lamego e Cuiabá, na porção oeste do QF. Os planos pretos representam os níveis atuais de erosão, evidenciando a possibilidade de mineralização cega em frentes ocultas.

A geometria dos modelos magnéticos e sua associação com as falhas transcorrentes subverticais são consequências de compressão diferencial e um modelo

de frentes de empurrão, similar ao proposto para a região oeste do QF, poderia estar associado às conclusões desta análise. Neste caso, variações na intensidade da compressão Brasileira ao longo da sequência metavulcanossedimentar teriam como consequência não só a geometria complexa das fontes magnéticas e o padrão de falhas observado, mas também a formação de frentes de empurrão.

Indícios destas frentes podem ser observados no modelo digital de terreno da Figura 24, que apresenta altos estruturais paralelos e de geometria semelhante àquela observada no modelo da Figura 46. A resistência de pacotes de BIF a intemperismo fez com que as frentes fossem expostas e formassem altos topográficos magnéticos, de forma semelhante àquela observada em Lamego e Cuiabá.

Estas estruturas são altamente favoráveis à presença de mineralização e a verificação deste modelo pode beneficiar programas de exploração com campanhas melhor planejadas. Outro aspecto importante é que este modelo indica que estruturas cegas, como aquela da Figura 45 podem estar presentes na área, aumentando o potencial da região.

### 3.1.3. INTERPRETAÇÃO QUALITATIVA

A caracterização das litologias e interpretação estrutural foram usadas para produzir os mapas de interpretação qualitativa dos dados magnéticos e gamaespectrométricos da Figura 46. Em seguida, ambos os mapas foram interpretados em termos de geologia, o que resultou no mapa da Figura 47.

No caso do mapeamento de marcadores magnéticos, foram usadas as denominações marcadores magnéticos fracos e fortes, ao invés de BIF e diques, para evitar interpretações equivocadas de BIF pouco magnéticas. Os limites das fontes magnéticas foram traçados a partir de produtos de interpretação, como amplitude do sinal analítico e gradiente horizontal total.

Foram adicionadas ao mapa da Figura 47, zonas de baixos gamaespectrométricos para representar áreas que podem estar associadas a afloramentos de BIF. Desta forma, BIF de fácies não magnéticas, como os xistos ferruginosos da porção NE da área de interesse podem ser identificados com maior facilidade.

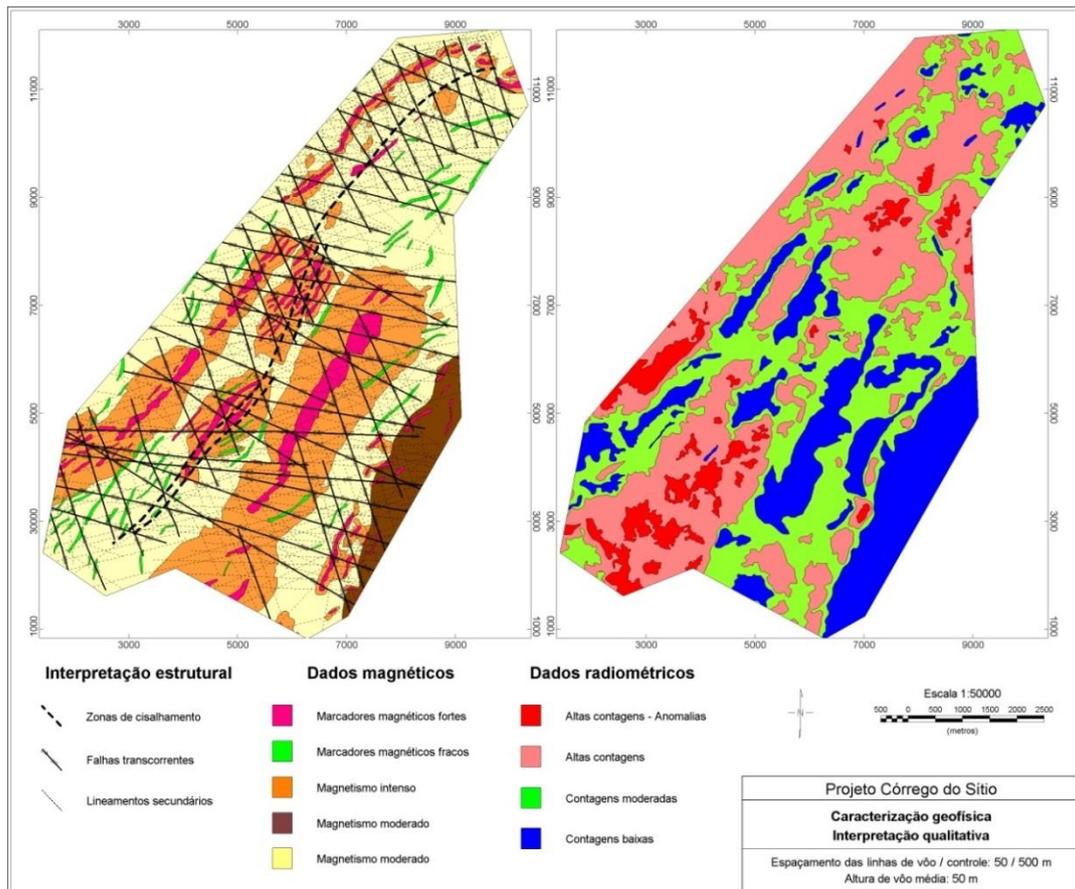


Figura 46: Mapas litogeofísicos obtidos a partir dos dados magnéticos e gamaespectrométricos.

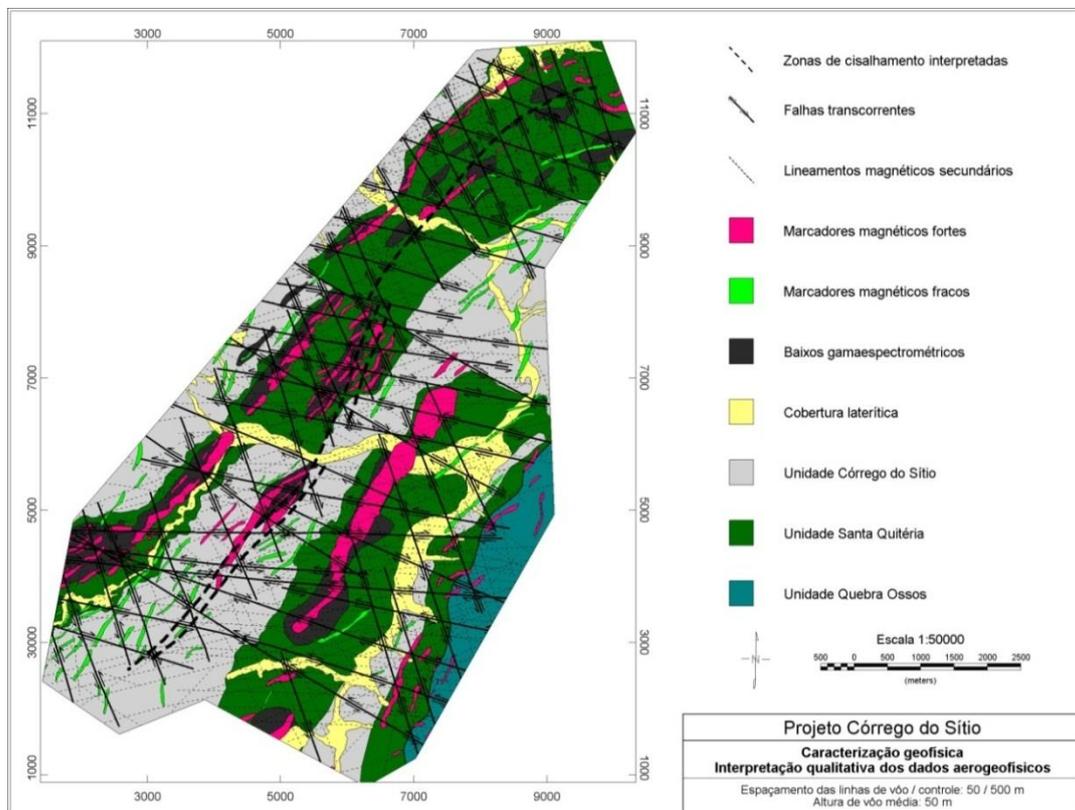


Figura 47: Mapa de interpretação qualitativa criado a partir dos mapas litogeofísicos.

Não foi grande o ganho em termos de mapeamento das unidades dominantes, devido ao contraste inexistente de condutividade e susceptibilidade magnética entre elas e a problemas de intemperismo e topografia nos dados gamaespectrométricos, como discutido anteriormente. Entretanto, nota-se o ganho em informação estrutural e na identificação de BIF não mapeadas.

O mapeamento dos diques máficos foi prejudicado devido à espessura dos alvos. Como será discutido na seção do bloco SW, as anomalias magnéticas identificadas se devem apenas aos diques mais magnéticos e espessos. Grande parte do enxame mapeado não pôde ser identificado.

## 3.2. BLOCO CENTRAL

### 3.2.1. OBJETIVOS

Os principais depósitos contidos na área de interesse são Sangue de Boi, Pinta Bem, Shaft, São Bento e Barra Feliz, todos hospedados em BIF, sendo que o depósito Sangue de Boi está associado a lentes finas na unidade Córrego do Sítio (Figura 48). Os esforços exploratórios nesta área têm se concentrado na busca por extensões laterais e em profundidade dos depósitos conhecidos, especialmente no caso da mina São Bento.

Os objetivos da interpretação dos dados aerogeofísicos neste bloco são caracterizar a resposta geofísica dos depósitos e zonas de alteração envolvidas na área e avaliar os controles estruturais sobre os depósitos para, então, estender as conclusões para as demais áreas visando contribuir para seu entendimento geológico e assim gerar alvos prospectivos para trabalhos de detalhe.

### 3.2.2. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS

A Figura 48 mostra a área de interesse neste caso e seu contexto geofísico, além da localização dos depósitos no bloco, que será usada como referência na descrição dos resultados, a seguir.

Os quatro alinhamentos de BIF observados na Figura 48 (BIF ao oeste, São Bento-Pinta Bem, Barra Feliz-Shaft-Sangue de Boi e ao leste) dominam os dados magnéticos, cujas respostas variam consideravelmente. As BIF a oeste e a leste (5 e 4 na Figura 32) estão relacionadas a anomalias bem-definidas, enquanto as demais apresentam características inconsistentes.

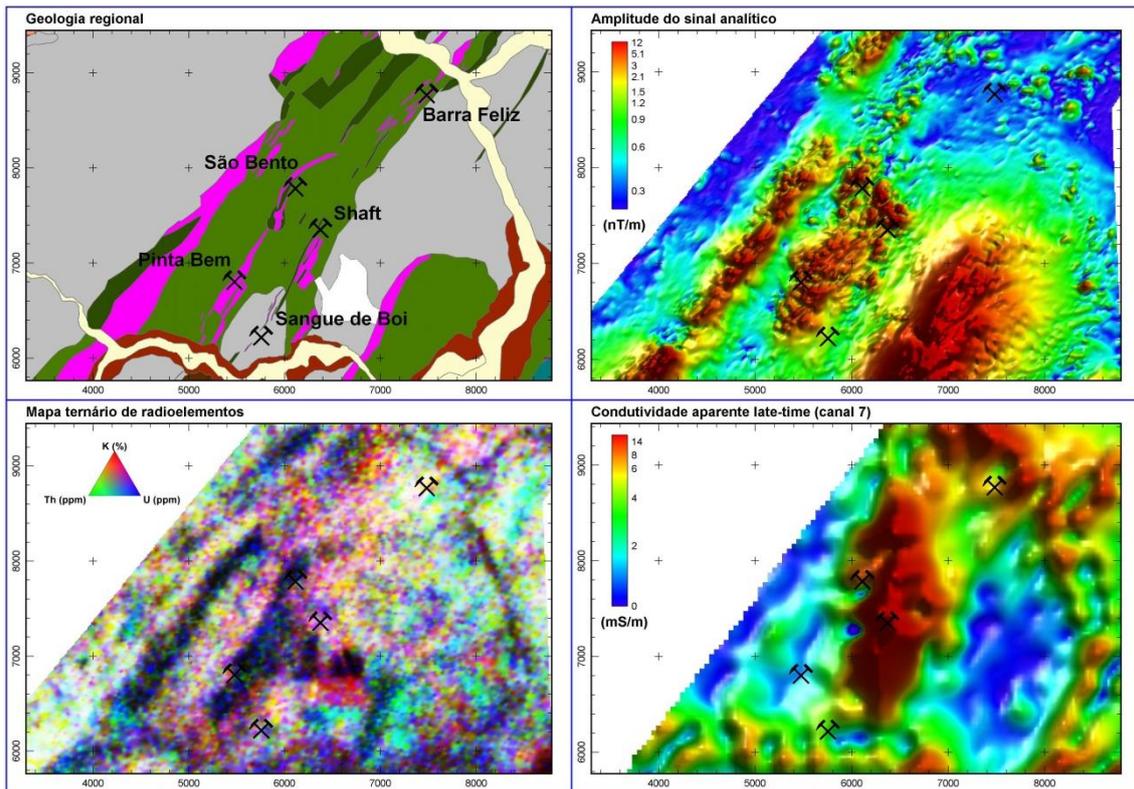


Figura 48: Comparação dos dados aerogeofísicos e geologia regional na área do bloco central. As principais minas e ocorrências estão representadas pelos símbolos pretos.

Como mostra a Figura 49, as BIF dos alvos Sangue de Boi e Barra Feliz não estão relacionadas a anomalias magnéticas. Já as BIF dos alvos São Bento e Shaft apresentam anomalias de intensidade moderada, comparadas às anomalias mais intensas das BIF na região do depósito Pinta Bem, formando uma zona de magnetismo mais suave no centro das BIF. As anomalias apresentam gradientes abruptos e descontinuidades bem marcadas como, por exemplo, o limite das anomalias magnéticas a NE, sugerindo controle estrutural significativo.

Os depósitos estão todos hospedados em BIF que apresentam anomalia magnética reversa, já as BIF a leste, que apresentam anomalia normal, não contém mineralização significativa. Entretanto, não é possível estabelecer uma relação direta entre magnetização remanescente e mineralização, já que as BIF a oeste, estéreis, também apresentam anomalia reversa.

O bloco central contém as anomalias EM mais intensas da área de interesse, associadas aos depósitos São Bento e Shaft. Na Figura 50, nota-se que as extensões em direção à superfície dos corpos de minério representados (galerias no caso do São

Bento) são relacionadas a dois condutores distintos que se sobrepõem na CDI que cruza os depósitos.

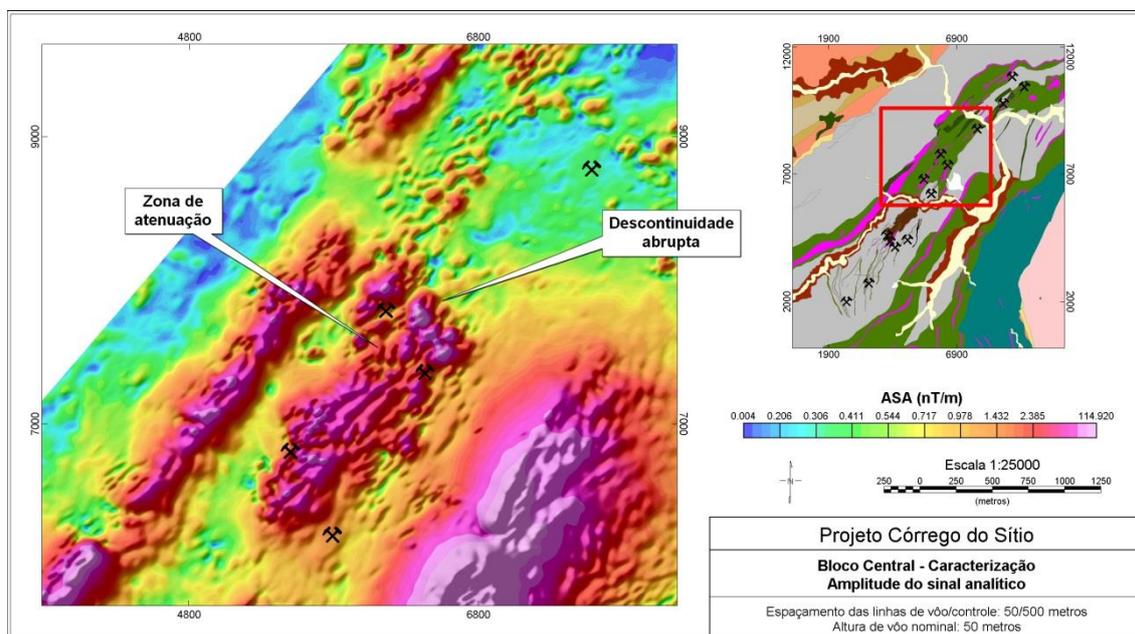


Figura 49: Amplitude do sinal analítico sobre a área do bloco central e localização dos principais depósitos da área.

As anomalias EM e magnéticas não são coincidentes e não são atribuídas à mesma fonte. As anomalias EM apresentam direção distintas e parecem cruzar as magnéticas em sua porção menos intensa (Figura 48). A diferença na direção das anomalias EM e geologia regional sugere que os condutores são resultado de processos epigenéticos. Já a correlação entre altos de condutividade aparente e porções de intensidade moderada das anomalias magnéticas é interpretada como produto do processo de alteração hidrotermal das BIF na área.

A hidrotermalização das BIF envolve substituição de óxidos de ferro magnéticos, principalmente magnetita, por sulfetos pouco magnéticos (pirita, arsenopirita e pirrotita) e outras paragêneses não magnéticas. Portanto, a alteração de BIF magnéticas diminui a susceptibilidade magnética média da rocha e atenua a anomalia magnética original, formando as zonas suaves previamente mencionadas.

Cant (2010) efetuou medidas petrofísicas em laboratório de amostras dos litotipos representativos da mina São Bento e chegou a conclusões semelhantes, embora a quantidade de amostras seja limitada (Tabela 1).

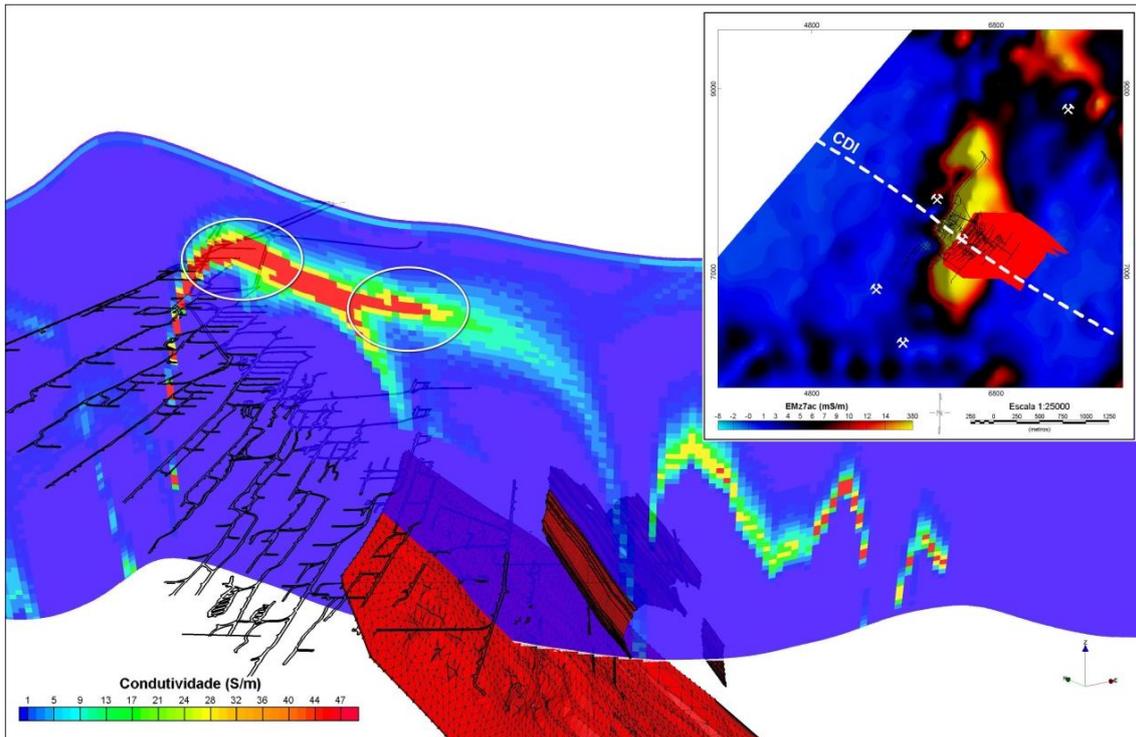


Figura 50: CDI obtida para a linha SPECTREM representada no mapa em planta, corpos de minério São Bento e Shaft (superfícies vermelhas) e antigos desenvolvimentos da mina São Bento (linhas pretas). Os condutores mencionados no texto foram identificados pelos círculos brancos na CDI. Os dados representados no mapa em planta são os mesmos da Figura 48. Também foram adicionadas as projeções dos corpos de minério (polígonos vermelhos) e os desenvolvimentos da mina (linhas pretas).

As amostras de BIF marcadas em cinza representam amostras de rocha inalteradas, já as marcadas em vermelho representam produtos de alteração. Nota-se que há uma diferença significativa nos valores dos dois grupos, sendo as BIF alteradas menos magnéticas.

Exceções ocorrem em amostras de BIF não alteradas, mas originalmente ricas em quartzo e pobres em magnetita (F0031) e em amostras alteradas, mas ricas em pirrotita e magnetita (F0123). Neste último caso, a alteração não consumiu totalmente a magnetita presente na BIF e a rocha manteve, em parte, seu magnetismo original.

A mesma correlação foi observada em amostras da mina de Hill 50, na Austrália (Tabela 2; Vella, 1995), cuja mineralização também é do tipo orogênica hospedada em BIF. Neste exemplo, medidas petrofísicas foram feitas em uma quantidade maior de amostras de BIF, que incluíam exemplos de rochas inalteradas, com alteração carbonática, com veios de quartzo, pirrotíticas e piríticas e comparadas com concentrações de magnetita e pirrotita.

Furo de sondagem	Prof. (m)	Descrição da amostra	Susc. Mag. (10 <sup>-3</sup> SI)
F0119	166.0	BIF magnetítica	413.00
F0121	86.0	BIF rica em magnetita-clorita-quartzo	610.00
	92.0	BIF rica em magnetita-clorita-quartzo, pouco piritizada	416.00
F0007	672.8	BIF rica em magnetita	710.50
F0031	252.4	BIF rica em quartzo, pobre em magnetita	1.90
F0007	557.4	Magnetita-clorita BIF hidrotermalizada (quartzo, pirita, pirrotita)	94.00
	596.5	Magnetita-clorita BIF hidrotermalizada (carbonato, quartzo, pirita)	318.00
	755.2	Clorita BIF fortemente hidrotermalizada (quartzo, pirrotita, arsenopirita)	10.20
F0121	106.0	Clorita-magnetita BIF fracamente hidrotermalizada (pirita)	1.88
F0123	199.8	Magnetita BIF brechada e hidrotermalizada (carbonato, quartzo, pirrotita)	417.00

Tabela 1: Medidas de susceptibilidade magnética de amostras de testemunhos de sondagem da mina São Bento (Cant, 2010).

As amostras em cinza na Tabela 2 representam BIF não alteradas com alto conteúdo de magnetita e baixo conteúdo de pirrotita, semelhantes às BIF que são encontradas nas BIF ao leste e oeste do mapa na Figura 48. As amostras em azul são aquelas de BIF com alto teor de magnetita e pirrotita, que sofreram alteração, mas com alto conteúdo de magnetita. Estes conjuntos contêm os maiores valores e mostram que o aumento da porcentagem de pirrotita, quando não associado à diminuição da concentração de magnetita, não altera significativamente os valores de susceptibilidade magnética (Vella, 1995).

O conjunto vermelho, que representa as BIF alteradas com pouca magnetita, semelhantes ao minério da mina São Bento, apresenta contraste de susceptibilidade magnética considerável, mesmo com valores significativos de pirrotita. Já o grupo verde contém análogos da amostra do furo F0031 na Tabela 1, BIF inalteradas com pouca magnetita e pouco magnéticas.

Descrição geológica	Dens (g/cm <sup>3</sup> )	Sus Mag (x10 <sup>-3</sup> SI)	Cond EM (S/m)	Mtt (%)	Po (%)
BIF com camadas de xisto + Po + Mtt	3.45	1831.7	2.1	32	2
BIF, foliação paralela ao eixo do testemunho	3.01	855.5	5	20	2
BIF brechada + Vqz	3.21	880.7	3	22	1
BIF com vênula de Py + Mtt + Qz	3.66	821.7	2.7	18	1
BIF + Vqz, foliação paralela ao eixo do testemunho	3.42	416.1	15	11	4
BIF, foliação paralela ao eixo do testemunho	3.3	3616.7	6	55	2
BIF, foliação subparalela ao eixo do testemunho	3.31	844.4	19	20	4
BIF, foliação paralela ao eixo do testemunho	3.2	1017	2	26	1
BIF, foliação paralela ao eixo do testemunho	3.41	992.5	1	25	1
BIF, foliação paralela ao eixo do testemunho	2.94	909.9	2	23	1
BIF, foliação paralela ao eixo do testemunho	3.28	975.7	2	25	1
BIF	3.7	2513.3	-	45	-
BIF	3.5	201.1	0	5	-
BIF	3.4	75.4	0	2	-
BIF com camadas de Mtt + Po + Chert	3.38	782	450	18	15
BIF com camadas de Mtt	3.39	779.7	3	18	10
BIF com camadas de Mtt + Po + Chert	3.5	1569.9	820	30	20
BIF com camadas de Py + Qz	3.77	5.5	-	-	-
BIF com Po subordinada	3.2	251.3	11	6	3
BIF pirrotítica	3.34	124	1660	3	36
BIF pirrotítica	3.3	377	150	9	14
BIF piritizada	4.3	10.1	0	-	-
BIF piritizada	4.3	0.8	5	-	-
BIF com alteração carbonática	3	95.5	0	3	-

Tabela 2: Dados petrofísicos (densidade, susceptibilidade magnética e condutividade EM) e concentrações de magnetita (Mtt) e pirrotita (Po) obtidos a partir de amostras da mina Hill 50 (Modificado de Vella, 1995). Siglas: Py = pirita, Qz = quartzo e Vqz = veio de quartzo.

Os valores de condutividade elétrica são diretamente relacionados à concentração de pirrotita, o que indica que os dados EM são indicadores diretos de mineralização associada à sulfetação significativa.

Anomalias de razão Th/K lineares e paralelas aos lineamentos mineralizados são observadas na Figura 51. Localizam-se a NW dos lineamentos São Bento e Córrego do Sítio, são paralelas às anomalias magnéticas e não apresentam correlação direta com os dados EM, sugerindo que tanto mineralizações condutivas (São Bento) quanto não condutivas (Córrego do Sítio) são relacionadas a processos de enriquecimento em potássio.

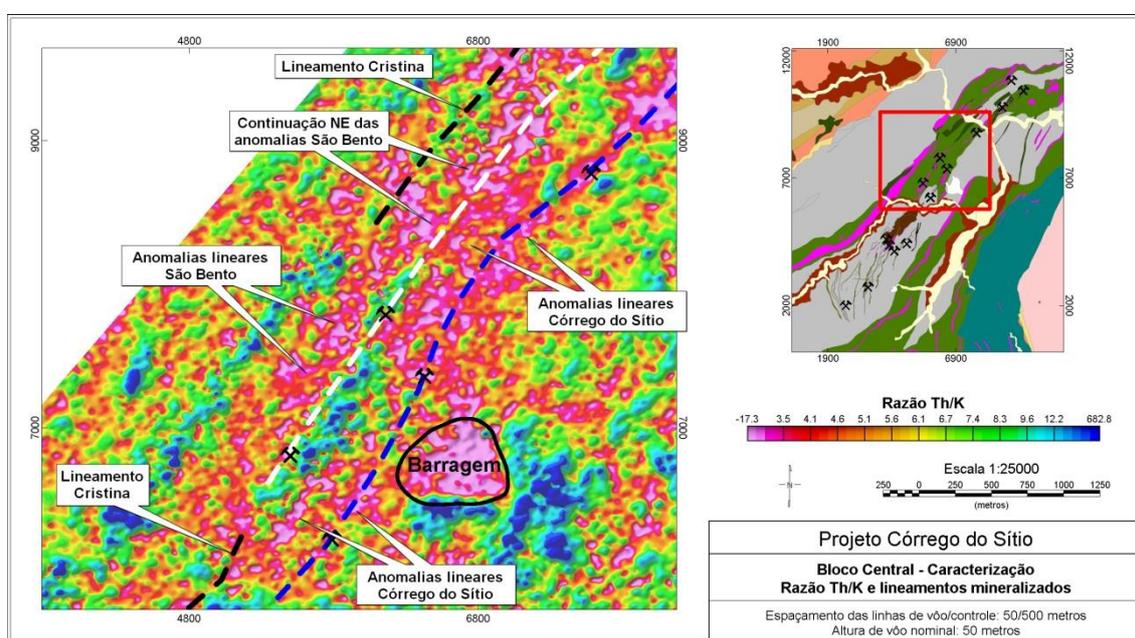


Figura 51: Comparação entre dados de razão Th/K e lineamentos estruturais mineralizados. Os lineamentos Córrego do Sítio, São Bento e Cristina estão representados pelas linhas tracejadas azul, branca e preta, respectivamente. A anomalia associada à barragem de rejeitos foi identificada pelo polígono preto.

As anomalias gamaespectrométricas associadas ao lineamento Córrego do Sítio apresentam ótima correlação com a forma do lineamento, especialmente na porção NE da área. Já as anomalias associadas ao lineamento São Bento são mais intensas na região NE e basicamente inexistentes na região do depósito Pinta Bem. Sugerindo que há variação no caso dos depósitos no lineamento São Bento e que os dados gamaespectrométricos são mais indicados para a exploração por depósitos do tipo Córrego do Sítio, já que a resposta aparenta ser mais consistente.

As anomalias de razão Th/K ao NE e SW do depósito Barra Feliz e ao NW do depósito Sangue de Boi indicam que as zonas de alterações associadas aos depósitos se estendem nestas direções e que, conseqüentemente, os depósitos podem ser maiores do que é conhecido. Entretanto, não é possível estabelecer uma relação direta entre anomalias gamaespectrométricas e presença ou ausência de depósitos minerais.

As Figura 52 e Figura 53 mostram os lineamentos magnéticos traçados sobre dados magnéticos e EM. Falhas transcorrentes de direções NNW-SSE e NWW-SEE estão relacionadas ao zoneamento nos dados magnéticos e causam deslocamentos consideráveis dos marcadores magnéticos.

O efeito das falhas NWW-SEE pode ser observado na porção central da área, onde limitam zonas de intensidade magnética levemente distintas, e em seu limite norte, onde há uma interrupção abrupta das anomalias. Já o efeito das falhas NNW-SSE pode ser visto na região do depósito Pinta Bem, onde interrompem a anomalia magnética da BIF correspondente.

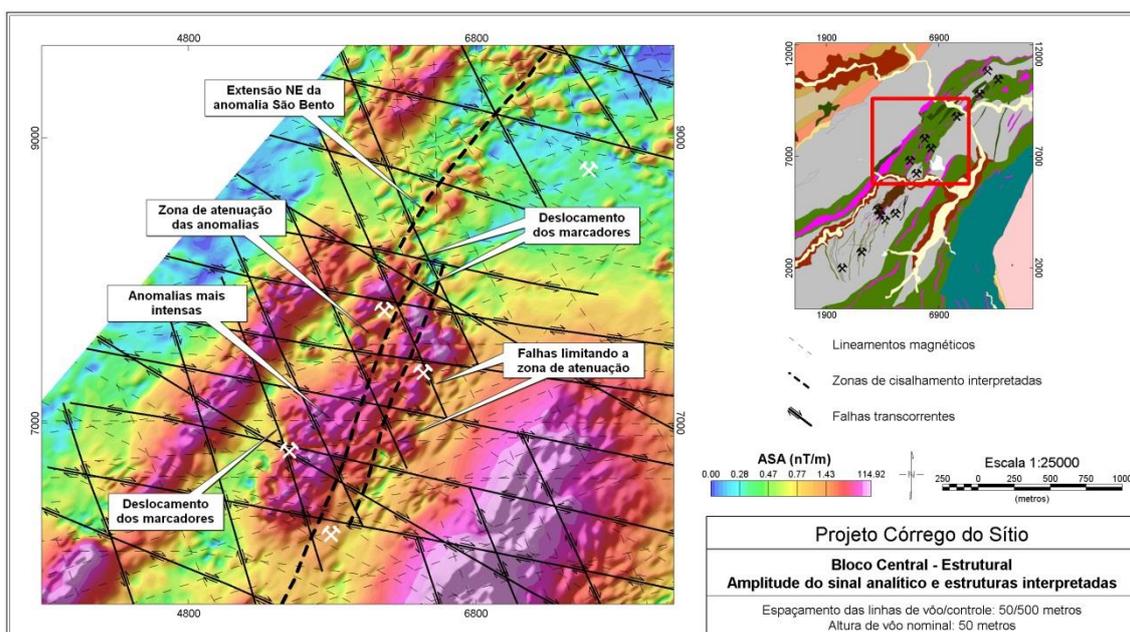


Figura 52: Amplitude do sinal analítico e interpretação dos lineamentos magnéticos identificados na região do bloco central.

No caso dos dados EM, as transcorrências NWW-SEE estão associadas a quebras e deslocamentos significativos das anomalias. O exemplo é a descontinuidade da anomalia em sua porção NE, onde uma das falhas traçadas parece deslocar parte da anomalia para o oeste. Já as transcorrências NNW-SSE não exercem controle tão intenso sobre as anomalias e parecem apenas limitar sua extensão.

As anomalias EM identificadas se situam à margem leste dos altos topográficos e anomalias magnéticas das BIF, o que indica que os condutores não são aflorantes, sugerindo que a porção mais superficial dos depósitos foi intemperizada e deixou de ser condutiva. Desta forma, é possível entender a disparidade na direção e localização das anomalias EM e anomalias magnéticas e gamaespectrométricos.

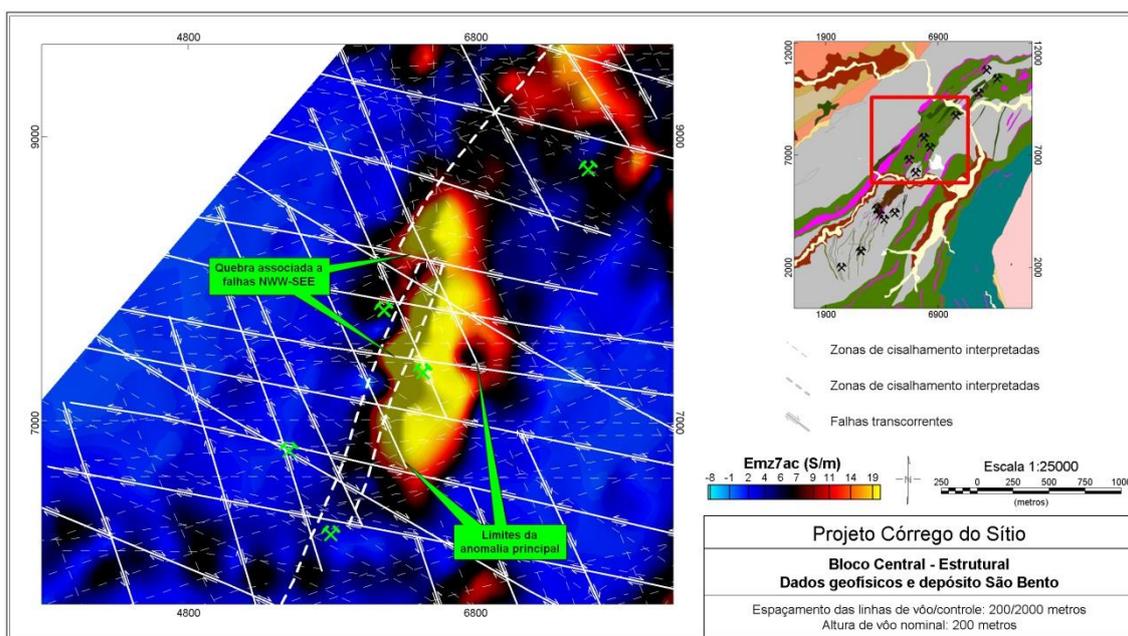


Figura 53: Condutividade aparente e lineamentos magnéticos interpretados na região do bloco central.

A Figura 54 mostra que os efeitos associados às estruturas interpretadas podem ser observados na topografia atual. Quatro altos topográficos lineares de direção NE são observados, cada um associado a um dos alinhamentos de BIF da área, sendo o alinhamento Shaft-Sangue de Boi o de menor expressão. São atravessados pelas falhas mapeadas e é possível notar o efeito das compressões em sua forma.

As zonas de cisalhamento interpretadas apresentam boa correlação com as anomalias geofísicas, aparentam controlar a forma das anomalias EM, atravessando as porções atenuadas das anomalias magnéticas das BIF e apresentam direção semelhante aos corpos mineralizados principais (Figura 55).

Depósitos do tipo orogênico geralmente são relacionados estruturas regionais que se estendem por quilômetros e controlam a percolação de fluidos. Zonas de maior concentração de ouro são formadas em armadilhas estruturais em horizontes favoráveis, ao longo destas estruturas.

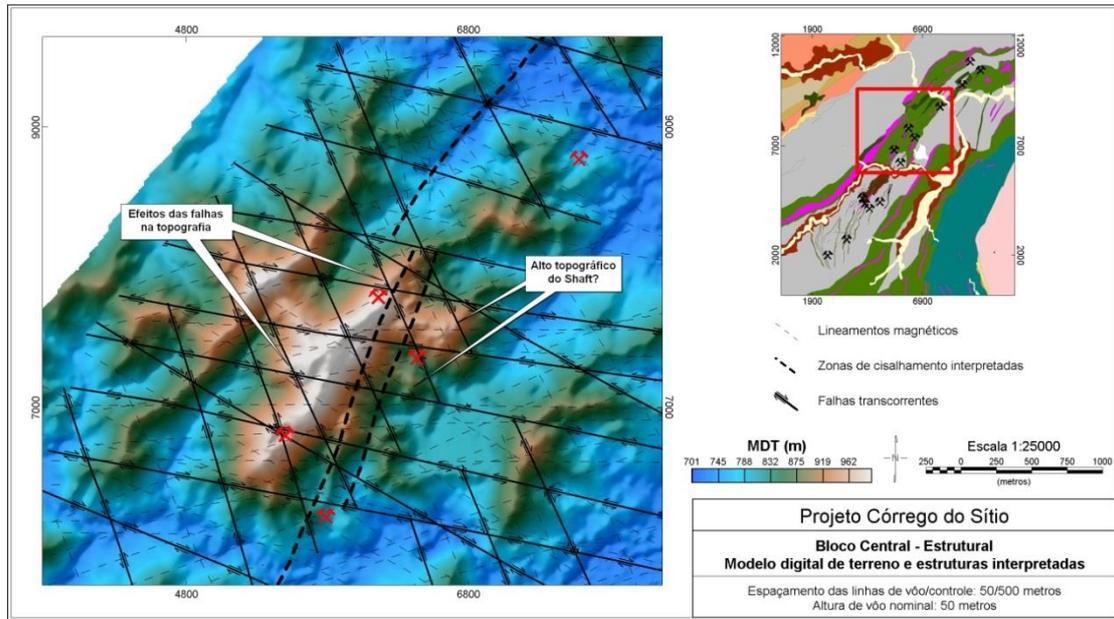


Figura 54: Modelo digital de terreno e estruturas interpretadas na região do bloco central.

As zonas de cisalhamento interpretadas, devido à sua correlação positiva com dados geofísicos e corpos de minério principais (Figura 55), podem representar tais estruturas regionais. A ausência destas estruturas na região das BIF 4 e 5 poderia explicar a ausência de mineralização significativa. Entretanto, os depósitos Barra Feliz e Pinta Bem não apresentam relação com este tipo de estrutura, indicando que ou estes lineamentos não são um fator condicionante para estas mineralizações, ou que não foi possível mapear todas as estruturas prospectivas.

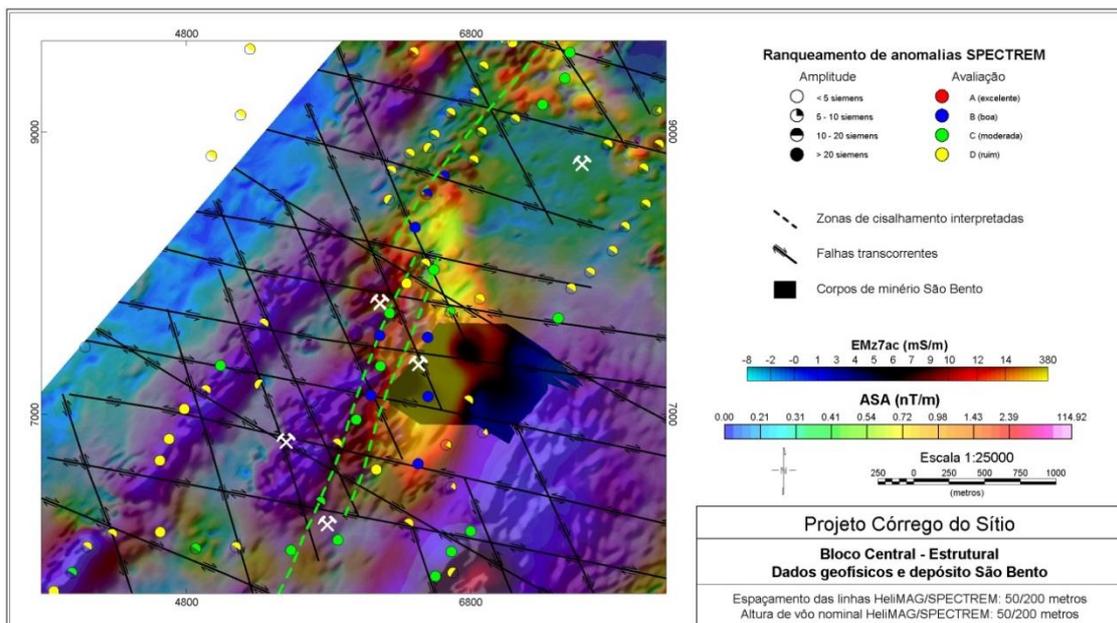


Figura 55: Comparação entre as falhas transcorrentes interpretadas, os corpos de minério em profundidade da mina São Bento e dados aerogeofísicos. Os círculos correspondem à localização das anomalias EM em planta.

Nos dados magnéticos, a porção mapeada da BIF São Bento está relacionada à anomalia magnética principal, porém nota-se que há uma anomalia magnética sutil ao NE, sendo o limite entre ambas uma falha transcorrente NWW-SEE (Figura 52).

A sobreposição dos dados EM e magnéticos e sua comparação com as estruturas traçadas e os corpos de minério (Figura 55) mostra que a anomalia magnética sutil ao NE está associada a porção deslocada da anomalia EM intensa de forma semelhante à observada na porção principal do depósito.

Esta correlação pode representar uma extensão para NE do depósito São Bento, possivelmente deslocada em direção a NW por uma estrutura brasileira. A variação na amplitude da anomalia magnética devido a uma estrutura NWW-SEE sugere que também há movimento vertical entre os terrenos a NE e SW da falha.

O lineamento São Bento, que associa os depósitos São Bento e Pinta Bem não segue a direção a direção da anomalia magnética inalterada da BIF São Bento até ser interrompida por outra transcorrência (Figura 56) e não aparenta boa correlação com os dados EM.

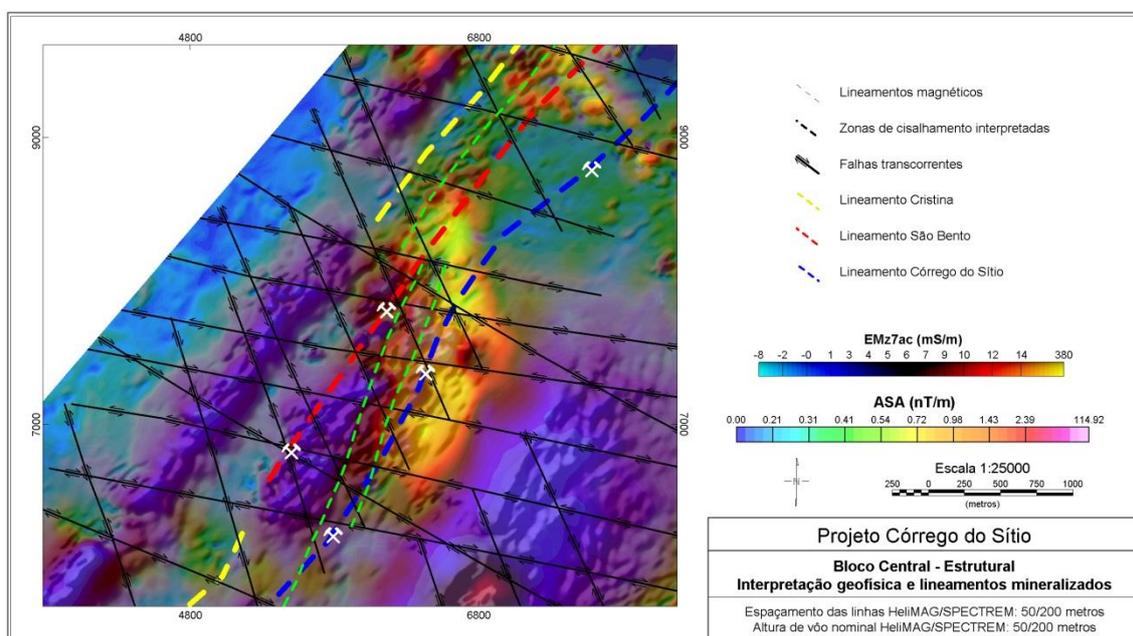


Figura 56: Relação entre dados magnéticos e EM, estruturas interpretadas e lineamentos estruturas mineralizados na região do bloco central.

O depósito Pinta Bem, na porção SW do lineamento São Bento, não apresenta anomalia EM, nem indícios de desmagnetização, que seriam esperados para mineralização do tipo São Bento. Porém, é um depósito menor do que São Bento e

Sangue de Boi, e a ausência de resposta EM pode ser decorrente de seu tamanho e do espaçamento das linhas de vôo.

Os depósitos Barra Feliz e Sangue de Boi não estão associados a anomalias magnéticas ou EM. A ausência de respostas EM e magnética, mas associação a enriquecimento de potássio caracteriza a resposta geofísica esperada para depósitos do lineamento Córrego do Sítio. Já o depósito Shaft está associado a uma anomalia EM e desmagnetização, indícios de mineralização tipo São Bento.

Portanto, assim como no caso das mineralizações Pinta Bem e São Bento, os lineamentos estruturais associam depósitos com respostas geofísicas diferentes, além de não apresentarem correlação consistente com os dados geofísicos, o que sugere que uma revisão da forma e localização dos lineamentos, ou dos parâmetros geológicos usados para o agrupamento dos depósitos, é necessária.

A mineralização do tipo São Bento é, então, caracterizada por zonas de desmagnetização associadas a anomalias EM e gamaespectrométricas ao longo de zonas de cisalhamento NNE-SSW, sujeitas a forte controle estrutural. As transcorrências brasileiras são as principais estruturas associadas às deformações e deslocaram os corpos horizontalmente e verticalmente. Entretanto, é necessária uma revisão da mineralização Pinta Bem para confirmar esta interpretação.

Inversões dos dados magnéticos foram usadas para avaliar a geometria das estruturas em subsuperfície. Visando evitar erros associados à inversão das anomalias reversas do bloco, foi usada a metodologia MVI e considerado apenas o modelo de amplitude do vetor de magnetização, para evitar suposições quanto à direção da magnetização dos corpos. Células de 25 metros foram usadas.

A comparação entre isosuperfícies de valores de susceptibilidade magnética do modelo MVI obtido, CDI e corpos de minério mostra que os depósitos São Bento e Shaft e as anomalias condutivas nas CDI estão localizados onde ocorre o maior estreitamento da isosuperfície (Figura 57), que representa a zona desmagnetizada. No caso da mineralização Pinta Bem, não há alteração que poderia ser associada à presença do depósito.

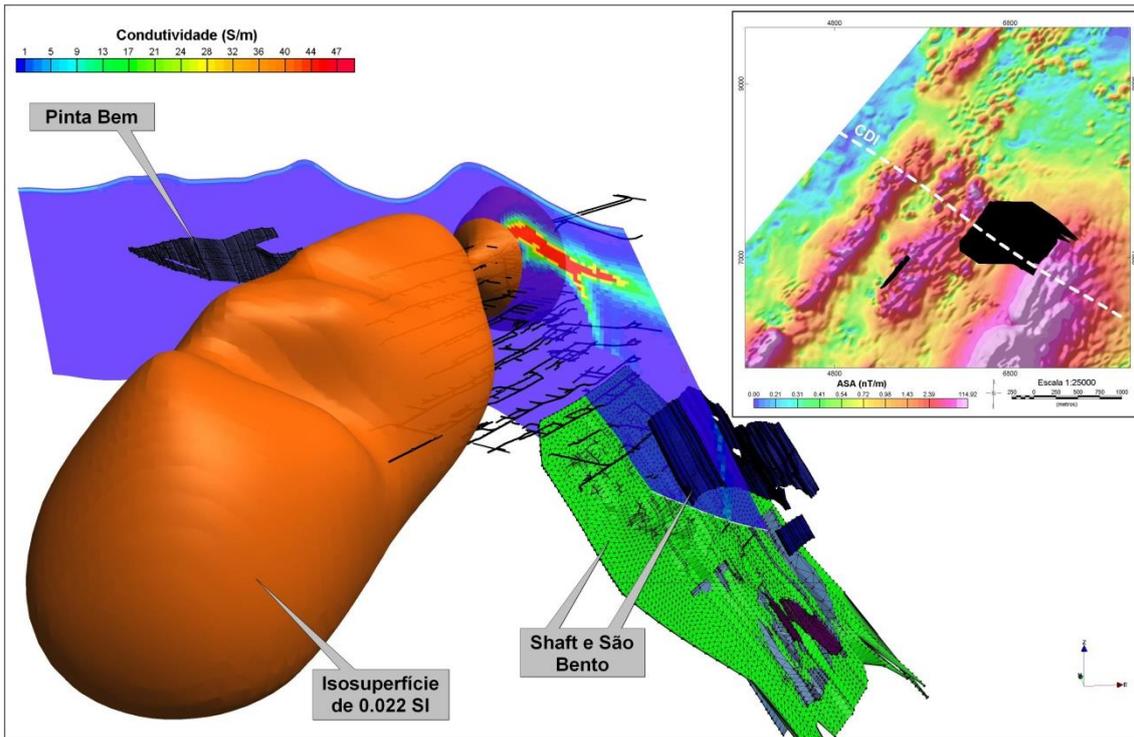


Figura 57: Correlação entre posição dos corpos de minério (superfícies verde e azul, apontadas na figura), condutores (cores quentes na CDI) e isosuperfície do modelo invertido (superfície laranja). Um mapa em planta foi adicionado para referência, que mostra a localização da seção observada (linha branca tracejada) e projeção em superfície do corpo São Bento (polígono preto). Vista para norte.

A Figura 58 mostra a relação entre lineamentos NWW-SEE, as zonas de cisalhamento interpretadas, anomalias EM e o modelo de susceptibilidade magnética obtido. Para possibilitar a comparação em planta das anomalias nas CDI e avaliar sua continuidade entre as linhas de vôo, foi feito um modelo 3D a partir das anomalias em cada seção. Estas foram identificadas em cada seção, seus limites foram traçados e, em seguida, interpolados. Não é uma representação da forma real dos condutores, porém são indicativos qualitativos de suas profundidades e condutividade, que dependem da posição e extensão das anomalias nas CDI.

Na Figura 58, a quebra na porção norte da anomalia EM principal é representada pela deflexão para NW das anomalias condutivas das CDI. O aprofundamento e deslocamento da suposta extensão NE da mineralização São Bento são representados pela interrupção da isosuperfície do modelo magnético. A região de desmagnetização é marcada pelo alargamento das anomalias nas CDI, que indica as zonas de maior condutividade. As zonas de cisalhamento interpretadas apresentam boa correlação com as anomalias EM.

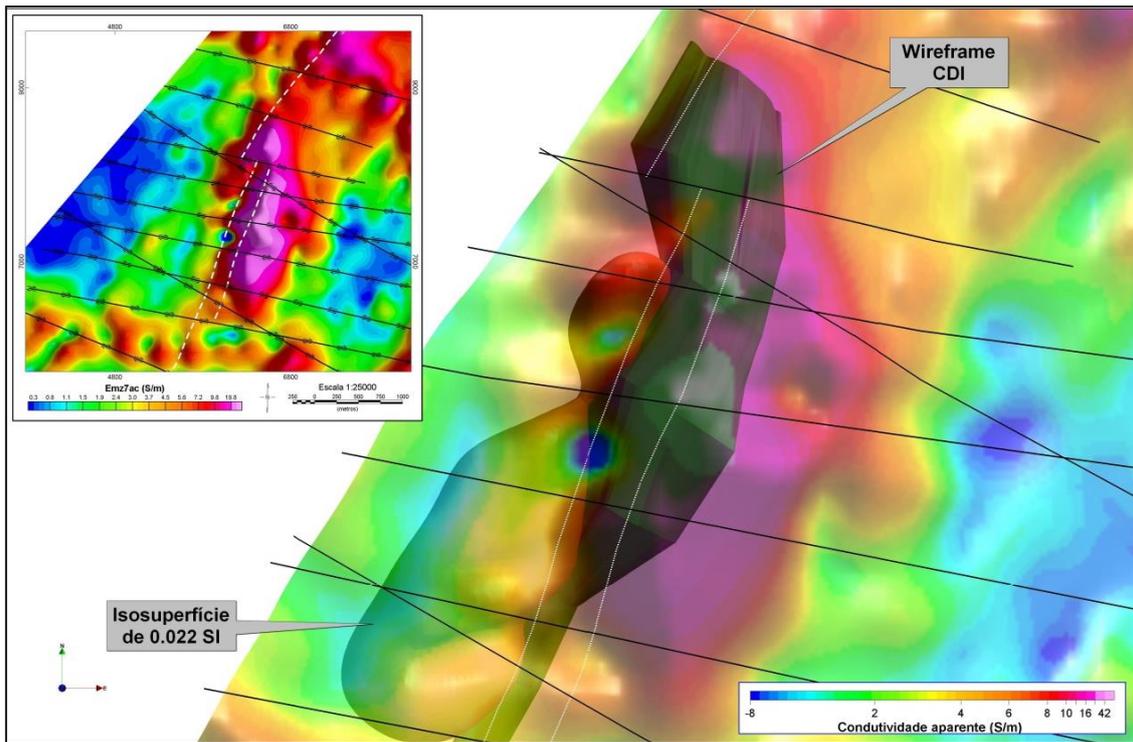


Figura 58: Correlação entre zonas desmagnetizadas e condutores nas CDI. A mesma isosuperfície do modelo anterior é representada pela superfície laranja e as anomalias nas CDI são representadas pela superfície verde, ambas sob dados de condutividade aparente transparentes, falhas transcorrentes (linhas pretas) e zonas de cisalhamento interpretadas (linhas brancas). Vista em planta.

Visando avaliar a extensão e efeitos das estruturas mapeadas através dos lineamentos magnéticos nos modelos de minério e invertidos, foi feita uma modelagem das falhas a partir de deslocamentos sistemáticos de zonas magnéticas nos modelos tridimensionais. Foi usada metodologia semelhante à usada na identificação de lineamentos magnética, porém em cortes em profundidade espaçados de 50 metros. Em seguida, os lineamentos foram interpolados para gerar as superfícies apresentadas.

As falhas modeladas apresentam mergulho subvertical, de direção variável. Esta interpretação é consistente com a modelagem das falhas efetuada na seção de interpretação estrutural e mostra que as falhas transcorrentes nesta região não apresentam mergulho considerável.

Indícios de uma frente de empurrão podem ser observados no modelo digital de terreno (Figura 54), associados a duas das falhas modeladas. A Figura 59 mostra que os altos topográficos atuais, relacionados aos horizontes de BIF, correspondem à porção central de uma frente de empurrão, limitada por duas falhas NWW-SEE. Nota-se que a zona mais condutiva da área ocorre na porção mais elevada do terreno, como mostra as anomalias nas CDI, que representa um alvo estrutural.

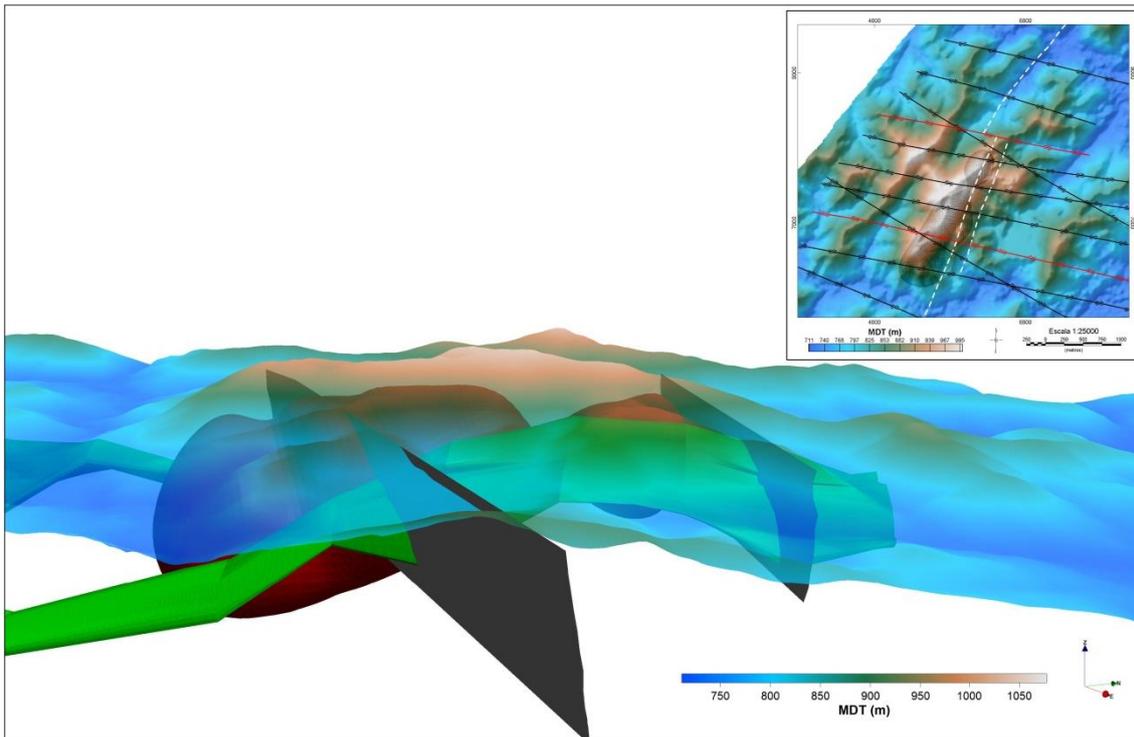


Figura 59: Correlação entre o modelo de inversão magnético, anomalias nas CDI, falhas modeladas e topografia, indicando uma possível geometria de frente de empurrão. As falhas estão representadas pelas superfícies branca e azul, as anomalias nas CDI pela superfície verde e o modelo magnético pela isosuperfície vermelha, todas sob o modelo digital de terreno transparente. O mapa em planta mostra as duas falhas a que se referem as superfícies na visão em 3D (estruturas vermelhas). Vista para NW.

Usando o modelo de frentes de empurrão é possível interpretar as variações na amplitude das anomalias não só como efeitos de alteração hidrotermal, mas também como da variação de profundidade das fontes magnéticas devido aos esforços em escala local.

Limitados pelas transcorrências, os blocos falhados foram deslocados horizontalmente e verticalmente. Os deslocamentos horizontais são responsáveis pelas quebras e deslocamentos dos marcadores magnéticos e anomalias EM, já os deslocamentos verticais pela variação da amplitude das anomalias, principalmente pelas variações mais abruptas.

As anomalias EM associadas ao depósito São Bento e à sua possível extensão NE foram modelados com o uso de Placas de Maxwell e o resultado está representado na Figura 60. A placa vermelha, que ajusta a anomalia do depósito São Bento, apresenta ótima correlação com a geometria da mineralização São Bento e com teores de ouro em furos de sondagem, dando confiança ao processo de interpretação.

A anomalia deslocada para NW foi modelada pela placa azul. Apresenta mesma direção da mineralização e da outra placa, porém mergulho e profundidade diferentes, sugerindo uma rotação do mergulho, que se torna mais suave para NE.

Esta interpretação corrobora com a interpretação em escala regional feita anteriormente (Figura 42) e é mais um indício da mudança na geometria dos corpos ao longo dos lineamentos mineralizados, em direção a NE. Também indica que houve soerguimento do bloco a SW da falha modelada, que está de acordo com a geometria de frentes de empurrão interpretada anteriormente.

A Figura 60 mostra que duas falhas poderiam ser associadas ao deslocamento do condutor. Ambas estão localizadas entre ambos os condutores modelados e seriam capazes de explicar a movimentação entre os blocos. Entretanto, não é possível determinar qual delas é de fato associada ao deslocamento.

Os dados magnéticos indicam que a falha NWW-SEE (em verde) seria a melhor escolha, porém, considerando a interpretação qualitativa na Figura 47, que mostra uma quebra nas unidades Santa Quitéria e Córrego do Sítio, a outra falha seria a estrutura responsável pelo deslocamento.

Nota-se, ainda, que a placa associada à extensão NE ainda não foi testada por furos de sondagem. Programas históricos de exploração testaram a continuidade natural do depósito São Bento, sem considerar qualquer complicação estrutural, e não obtiveram intersecções econômicas. Os resultados da interpretação dos dados geofísicos poderiam explicar a falta de bons resultados e devem ser considerados em programas futuros.

Este alvo é um exemplo da importância do controle estrutural exercido pelas falhas mapeadas sobre os depósitos da região do Projeto Córrego do Sítio. Devido à ausência de dados que indicassem o suposto deslocamento da mineralização, a extensão NE interpretada do depósito mais importante da região não foi testada.

Um exemplo dos efeitos interpretados de estruturas brasileiras sobre horizontes reativos e zonas de cisalhamento é representado pelo modelo esquemático da Figura 61 e resume parte das interpretações feitas até o momento.

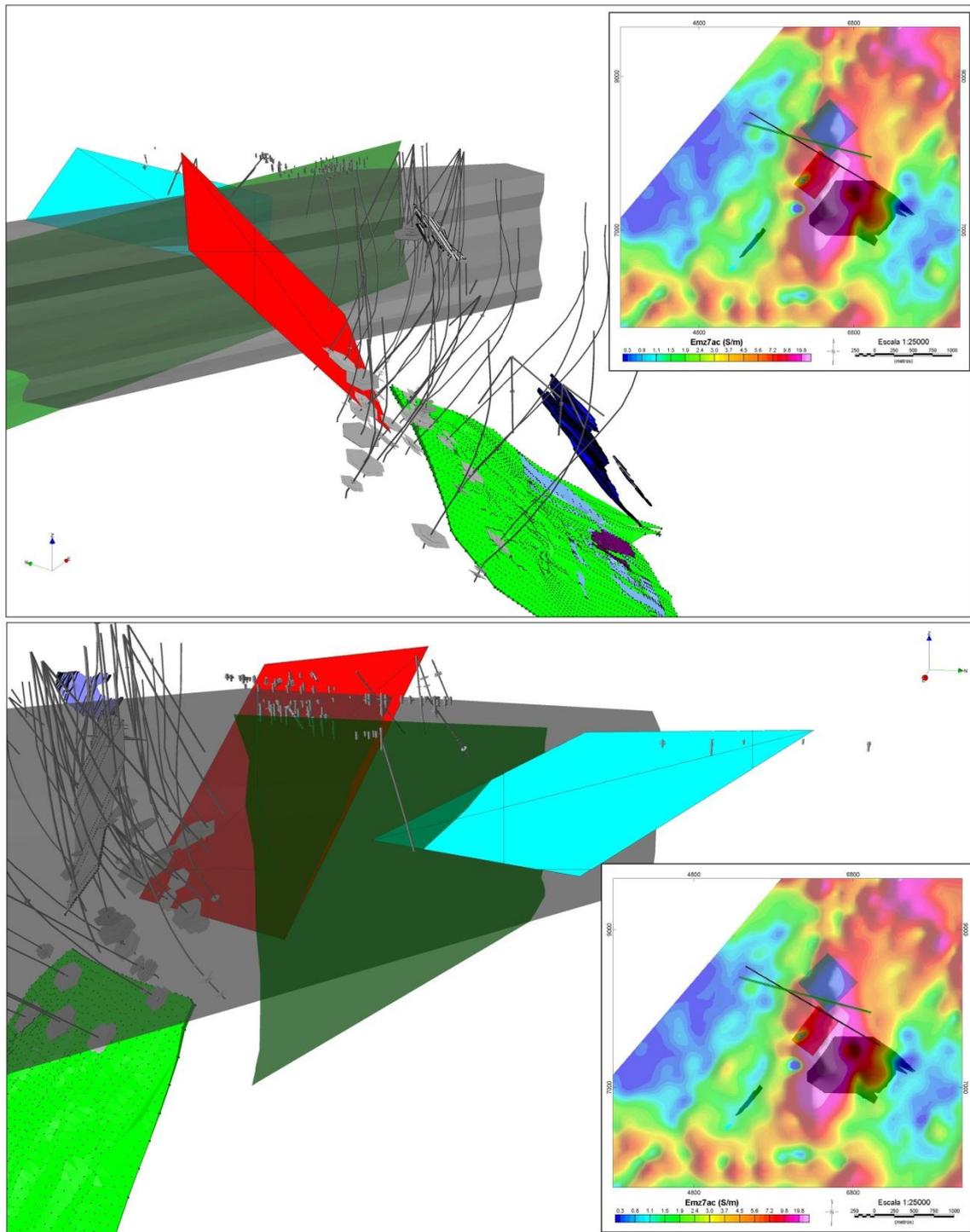


Figura 60: Modelagem dos dados EM sobre o alvo São Bento e sua extensão NE interpretada e relação com falhas modeladas. Os retângulos azul e vermelho representam as placas obtidas, e os planos cinza e verde representam as falhas modeladas. Furos de sondagem são representados pelas linhas cinza, sendo a largura da linha função do teor de ouro presente. Mapas em planta foram adicionados para referência, as placas, modelos de minério e falhas (linhas verde e preta) foram representadas sob dados de condutividade aparente – canal 7. Vista para NE (acima) e SW (abaixo).

Nesta figura, zonas de descolamento e falhas transcorrentes de direção NWW-SEE são formadas como consequência da compressão brasiliana e cortam e deslocam as

estruturas originais. Os deslocamentos horizontais representados são observados nos dados magnéticos como descontinuidades bem marcadas. Já os deslocamentos verticais representados são associados à mudança de amplitude das anomalias, como é observado na porção NE da BIF que hospeda o depósito São Bento.

A região central do bloco foi elevada em relação às demais e contém as mineralizações condutivas de maior significância do bloco, possivelmente representando a crista de uma frente de empurrão. As regiões anexas se situam em um nível estrutural inferior e podem hospedar depósitos em profundidade. Os deslocamentos horizontais são responsáveis pela quebra dos horizontes e interrupção das mineralizações.

Tais controles estruturais devem ser considerados na exploração por continuidade de depósitos existentes e por depósitos análogos para que oportunidades como a extensão NE deslocada do São Bento sejam devidamente notadas e testadas.

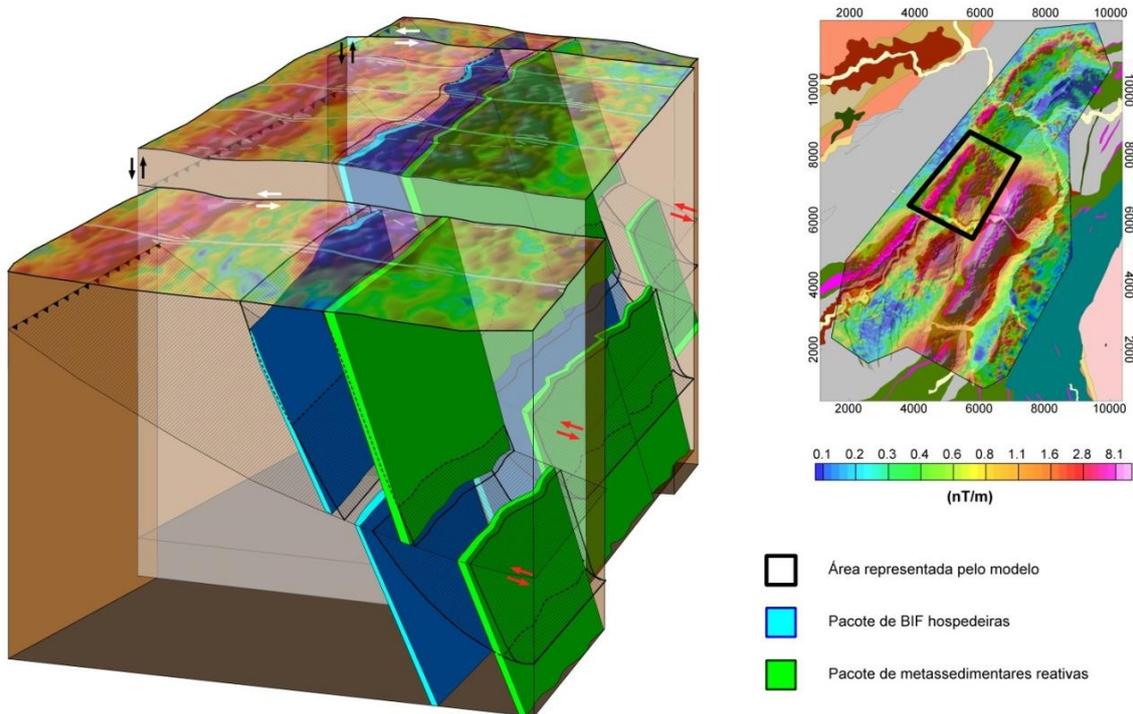


Figura 61: Modelo esquemático representando os efeitos das estruturas NWW-SEE observadas no bloco central. As mineralizações se dão no contato entre BIF e metassedimentos com zonas de cisalhamento (planos de maior inclinação, quadriculados). Superfícies de descolamento (planos de menor inclinação, tracejados) e transcorrências são geradas pela compressão NWW-SEE e as estruturas mineralizadas originais são quebradas e sofrem deslocamento horizontal e vertical ao longo dos planos de falha (em branco). Vista para norte.

### 3.3. BLOCO SW

#### 3.3.1. OBJETIVOS

Os objetivos da interpretação dos dados nesta área são caracterizar os depósitos presentes neste bloco para complementar a interpretação dos dados no bloco central e avaliar o uso da geofísica na exploração por depósitos análogos, principalmente no caso dos depósitos do tipo Córrego do Sítio.

Depósitos de tamanho significativo do tipo São Bento não são encontrados nesta área, mesmo que sistemas orogênicos sejam conhecidamente extensos, como mostra as mineralizações do tipo Córrego do Sítio, que ocorrem ao longo de toda a área. Por isso, evidências da presença de depósitos tipo São Bento foram procuradas.

#### 3.3.2. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS

Esta área é dominada por depósitos do tipo Córrego do Sítio, sendo os principais: Rosalino, Cachorro Bravo e Carvoaria Velha (Figura 62). Também são observados o depósito João Burro, associado ao lineamento Cristina, e a ocorrência Donana, que representa o limite SW do lineamento São Bento na área do Projeto Córrego do Sítio.

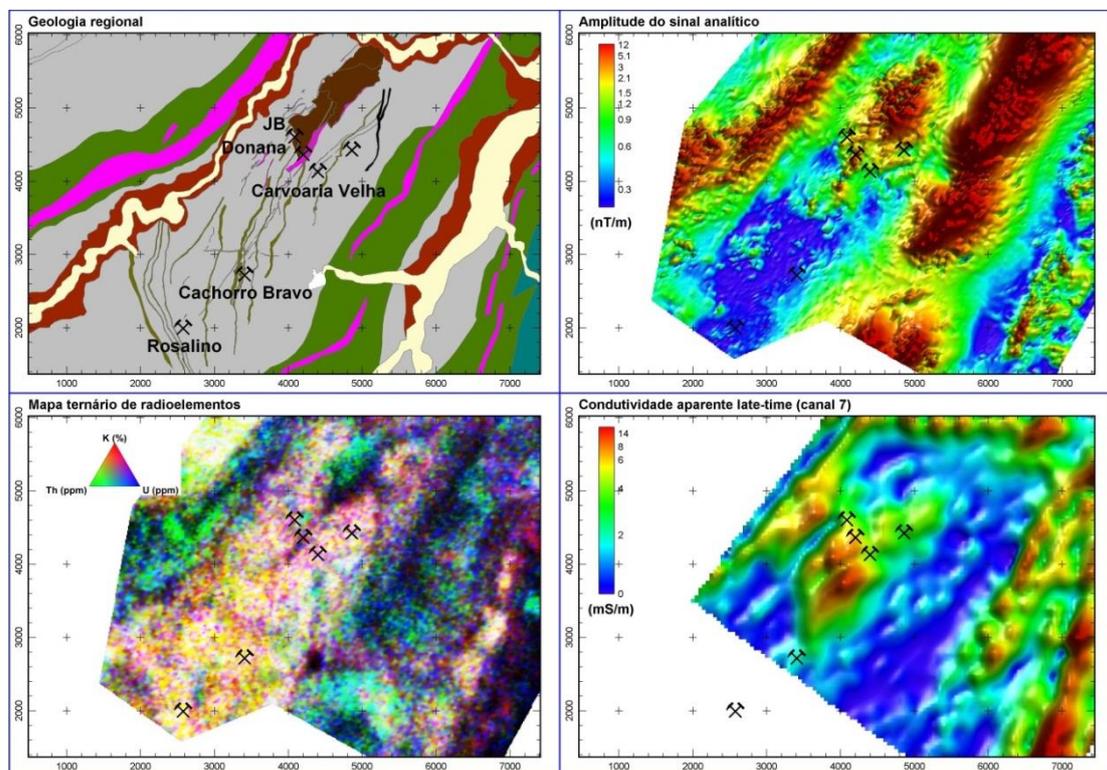


Figura 62: Comparação dos dados aerogeofísicos e geologia regional na área do bloco SW.

Os principais corpos mineralizados explorados nesta região estão associados ao lineamento Córrego do Sítio, sendo os demais de importância secundária. Constituídos por mineralização em rochas metassedimentares e associados a sulfetação baixa (< 2%) e venulação de quartzo intensa, são alvos complicados do ponto de vista geofísico, já que não há contraste de susceptibilidade magnética ou condutividade elétrica suficiente entre a zona mineralizada e as encaixantes, ambas supostamente resistivas e pouco magnéticas.

Os dados magnéticos no bloco SW são dominados pela resposta das BIF 4 e 5 da Figura 32 (BIF ao leste e ao oeste no bloco central) e da extensão SW das BIF mineralizadas do bloco central, que se limitam à porção NE deste bloco e representam o limite SW do lineamento São Bento (Figura 63).

A unidade Córrego do Sítio, que domina a área de interesse, não é magnética. Anomalias positivas lineares de baixa amplitude também são observadas e são associadas aos diques máficos, muito mais comuns nesta região do que no bloco central.

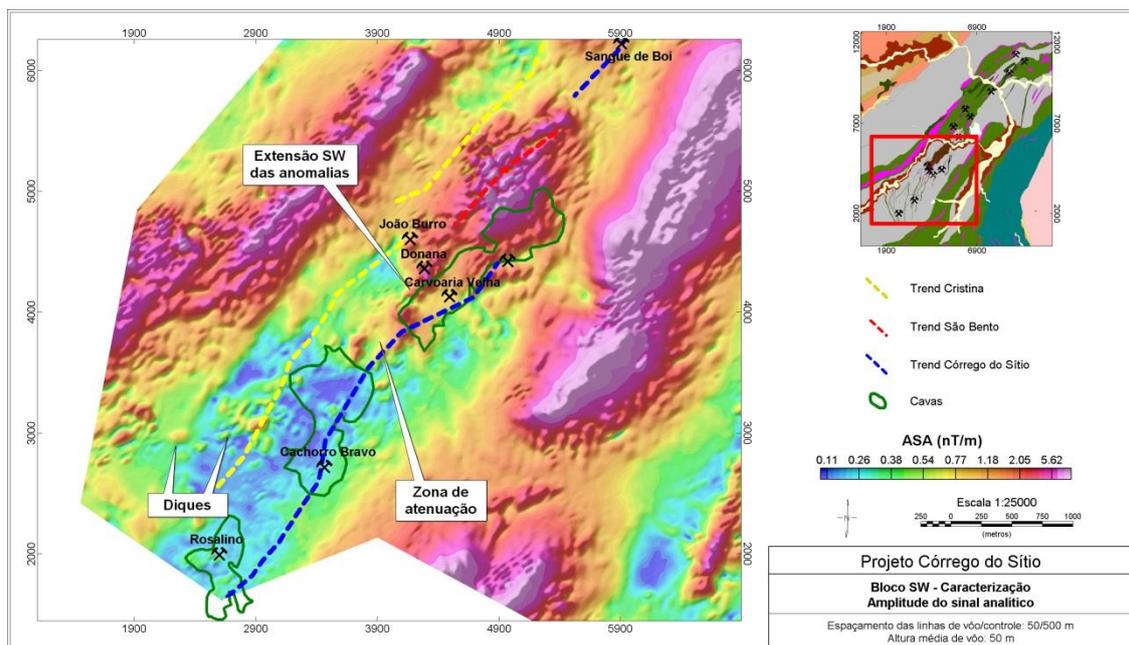


Figura 63: Dados de amplitude do sinal analítico sobre a região do bloco SW, lineamentos mineralizados e cavas Rosalino, Cachorro Bravo e Carvoaria Velha.

A espessura dos diques e sua natureza pouco magnética tornou sua identificação usando dados aeromagnéticos difícil, em função do espaçamento das linhas e altura de vôo significativos, mesmo se tratando de um aerolevante de detalhe. Os diques

apresentam espessura de metros a poucas dezenas de metros e não são facilmente mapeáveis com a geometria de aquisição aplicada.

É possível observar exemplos de anomalias associadas a diques em regiões não dominadas por BIF, porém em pequena quantidade quando comparadas à quantidade de diques mapeados. Portanto, o mapeamento dos diques apresentado no mapa de interpretação qualitativa dos dados é incompleto. Levantamentos terrestres, de maior resolução e proximidade às fontes magnéticas, devem ser considerados para este fim.

Os depósitos do tipo Córrego do Sítio na área não estão associados a respostas magnéticas consideráveis. O depósito Carvoaria Velha localiza-se na porção SE da anomalia magnética relacionada à BIF que hospeda a ocorrência Donana e aparenta estar associada a uma zona de atenuação. Entretanto, como não há nenhuma unidade magnética mapeada na região, dominada pela unidade Córrego do Sítio, a ausência de anomalia significativa se deve, provavelmente, à falta de horizontes magnéticos.

A ocorrência Donana está associada à anomalia magnética da BIF mapeada a NE do bloco SW. Não há indícios de desmagnetização associada, possivelmente devido ao limitado tamanho da mineralização. Já o depósito João Burro se dá num pacote de lentes de BIF a NW da BIF principal, porém também não são observados indícios de desmagnetização consistentes. Não há qualquer relação entre os lineamentos Cristina e Córrego do Sítio e os dados magnéticos no extremo SW da área.

O mapa geológico mostra que as BIF mapeadas são limitadas à região da ocorrência Donana. Entretanto, notam-se anomalias magnéticas sutis na direção SW, entre as cavas Carvoaria Velha e Cachorro Bravo, sugerindo que as lentes exibem continuidade para SW, possivelmente em profundidade (Figura 63). Uma possível zona de atenuação da anomalia também foi identificada.

A Figura 64 mostra as estruturas interpretadas neste bloco sobre dados de amplitude do sinal analítico. A forma complexa das anomalias das BIF ao oeste e leste são evidências das consequências das deformações, como foi discutido anteriormente.

Neste caso, o efeito das falhas transcorrentes NWW-SEE domina os dados magnéticos, enquanto que as falhas NNW-SSE são de importância secundária, embora ambas estejam relacionadas a deformações significativas. Assim como no bloco central, são observados deslocamentos dos marcadores magnéticos e variações abruptas na

intensidade das anomalias. Entretanto, nota-se que, neste bloco, a intensidade das deformações é maior, evidenciado pela forma complexa das anomalias das BIF 4 e 5, a oeste e leste, respectivamente.

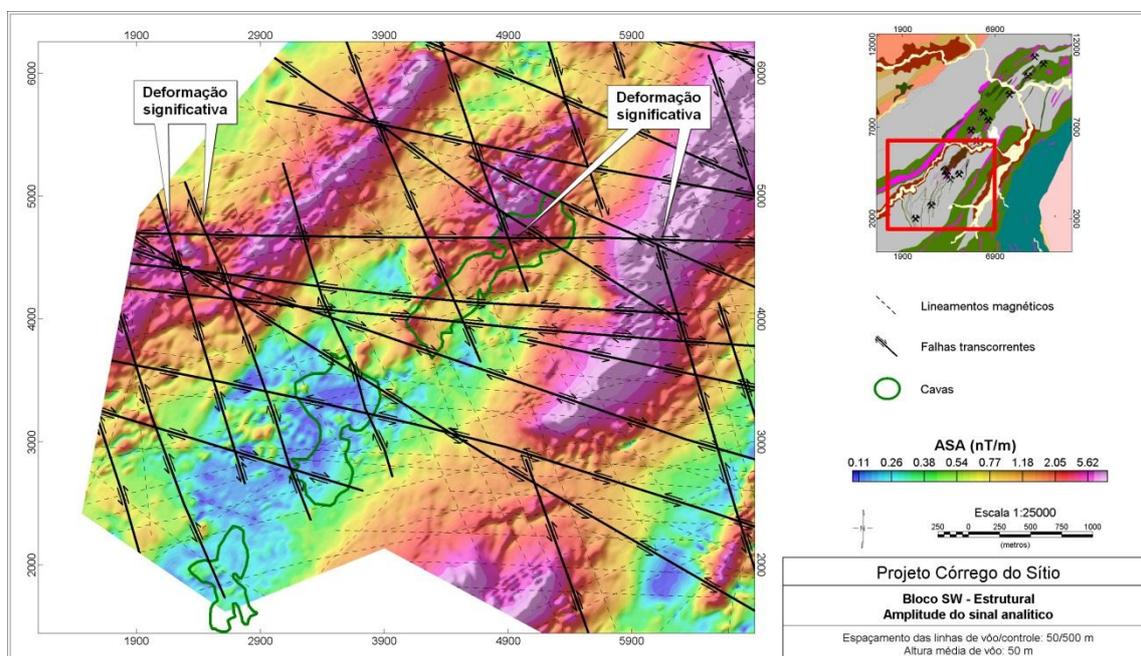


Figura 64: Dados de amplitude do sinal analítico, cavas e estruturas interpretadas na região do bloco SW.

A Figura 65 mostra que são observados altos topográficos lineares paralelos à mineralização na área e os efeitos das estruturas interpretadas na topografia é significativo. Novamente, as falhas NWW-SEE são dominantes e suas consequências vistas na forma de deslocamentos dos altos topográficos, de maneira semelhante à observada no bloco central.

Diversos lineamentos magnéticos atravessam as áreas das cavas e galerias subterrâneas e são possivelmente associados a estruturas rúpteis de larga escala e extensão vertical significativa. Desta forma, podem representar um risco geomecânico durante o desenvolvimento das cavas, além de estarem relacionados a problemas hidrogeológicos em minas subterrâneas.

Estruturas aproximadamente perpendiculares às mineralizações e mergulho subvertical são responsáveis por problemas relacionados à percolação de água nas minas subterrâneas (Júlia Alves, 2014, pers comm.). Desta forma, as estruturas NWW-SEE, de mergulho subvertical, representam o maior risco neste caso e a localização das estruturas mapeadas deve ser levada em conta durante estudos hidrogeológicos ou geomecânicos futuros.

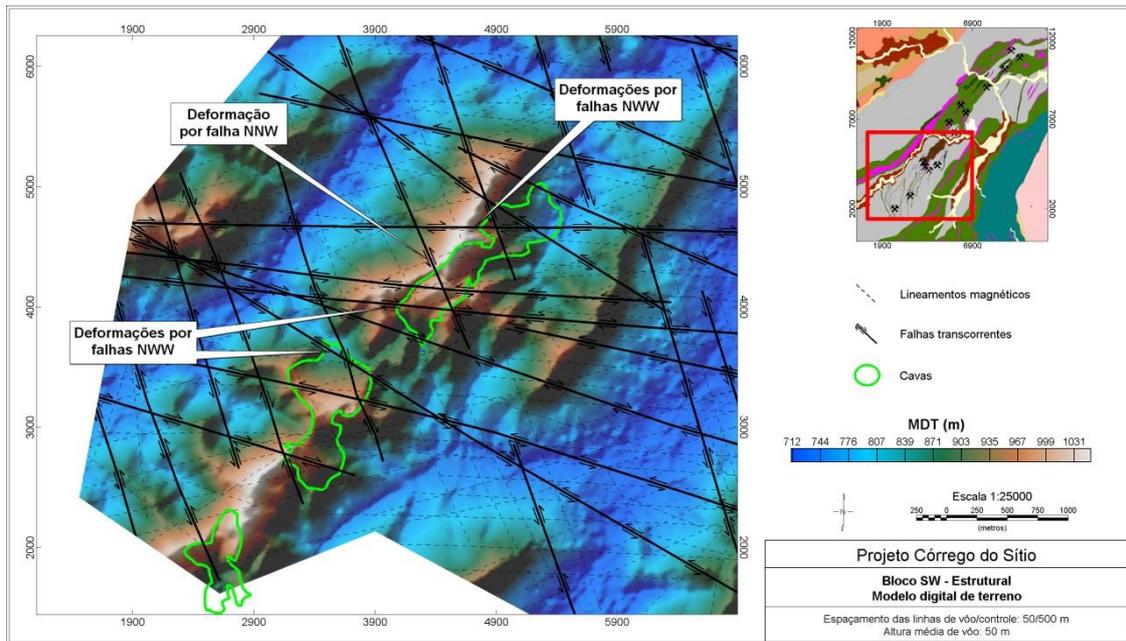


Figura 65: Topografia, cavas e estruturas interpretadas na região do bloco SW.

Os dados de razão Th/K mostram que o lineamento Córrego do Sítio apresenta excelente correlação com uma anomalia linear. O lineamento Cristina não apresenta resposta significativa e o limitado lineamento São Bento está associado à resposta de uma BIF supostamente não alterada (Figura 66, zona de cor azul).

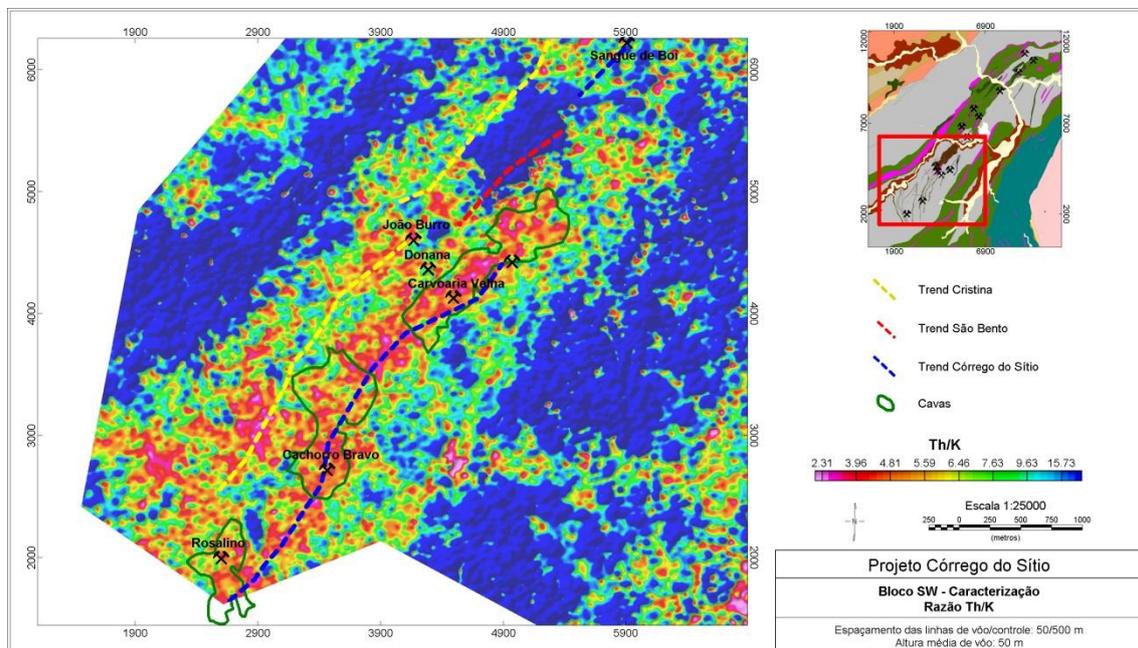


Figura 66: Dados de razão Th/K, cavas e lineamentos mineralizados na região do bloco SW.

A ausência de relação entre o lineamento São Bento e dados gamaespectrométricos possivelmente se deve à ausência de alteração em sua porção mapeada e pela profundidade das estruturas de interesse, caso presentes, em sua

possível continuação SW. A correlação entre o lineamento Córrego do Sítio e os dados gamaespectrométricos é a mesma observada no bloco central.

A ausência de anomalias EM intensas e bem definidas mostra que o tipo de mineralização principal nesta área de fato não é condutivo. A Figura 67 mostra que os corpos de minério localizados ao longo do lineamento Córrego do Sítio não apresentam resposta EM consistente e comparável àquela dos depósitos São Bento. Entretanto, anomalias de intensidade moderada, associadas aos alvos João Burro e L foram identificadas nos arredores das cavas em operação.

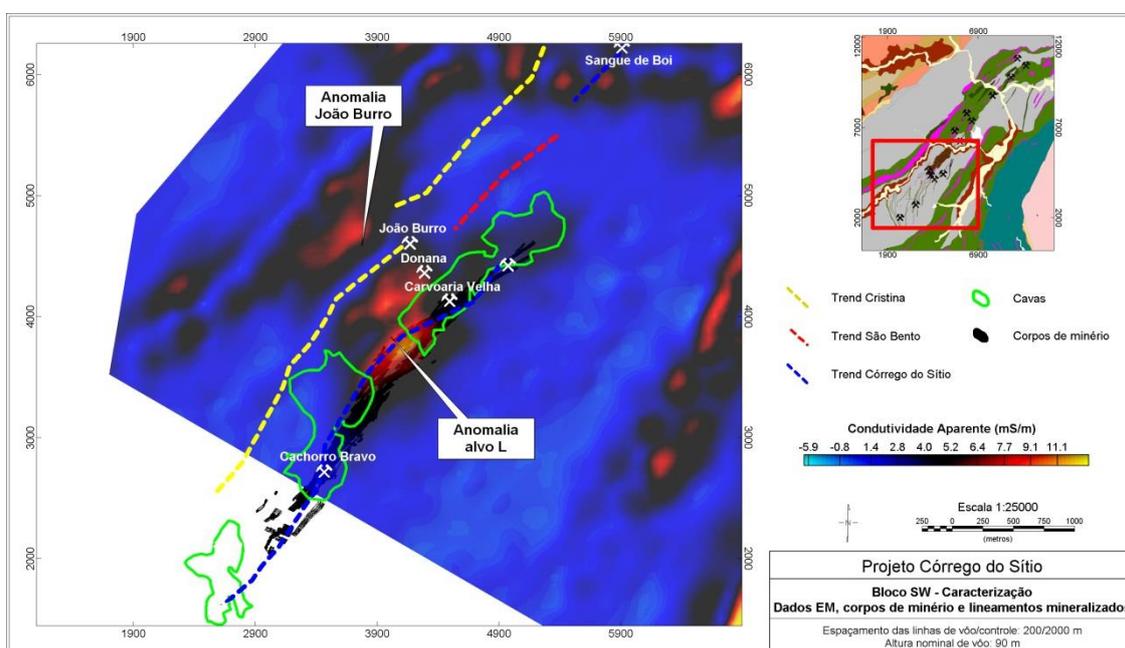


Figura 67: Dados de condutividade aparente *late-time* (canal 7), cavas, lineamentos estruturais e projeção dos corpos de minério associados ao lineamento Córrego do Sítio na região do bloco SW.

As anomalias EM identificadas exibem boa correlação com os lineamentos estruturais e com a zona de atenuação interpretada nos dados magnéticos, além de se situarem a NW da anomalia de razão Th/K atribuída ao lineamento Córrego do Sítio (Figura 68 e Figura 69). Tais anomalias foram desconsideradas desde a realização do levantamento SPECTREM, seja pela baixa amplitude (anomalia João Burro), ou por sua suposta associação a mineralização tipo Córrego do Sítio conhecida (alvo L).

Entretanto, sabe-se que a mineralização Córrego do Sítio não é condutiva e não poderia explicar a anomalia do alvo L. A Figura 70 mostra que o alvo L se trata de um alinhamento de anomalias de boa classificação, que se estende paralelo ao lineamento Córrego do Sítio. Estes, porém, não são coincidentes.

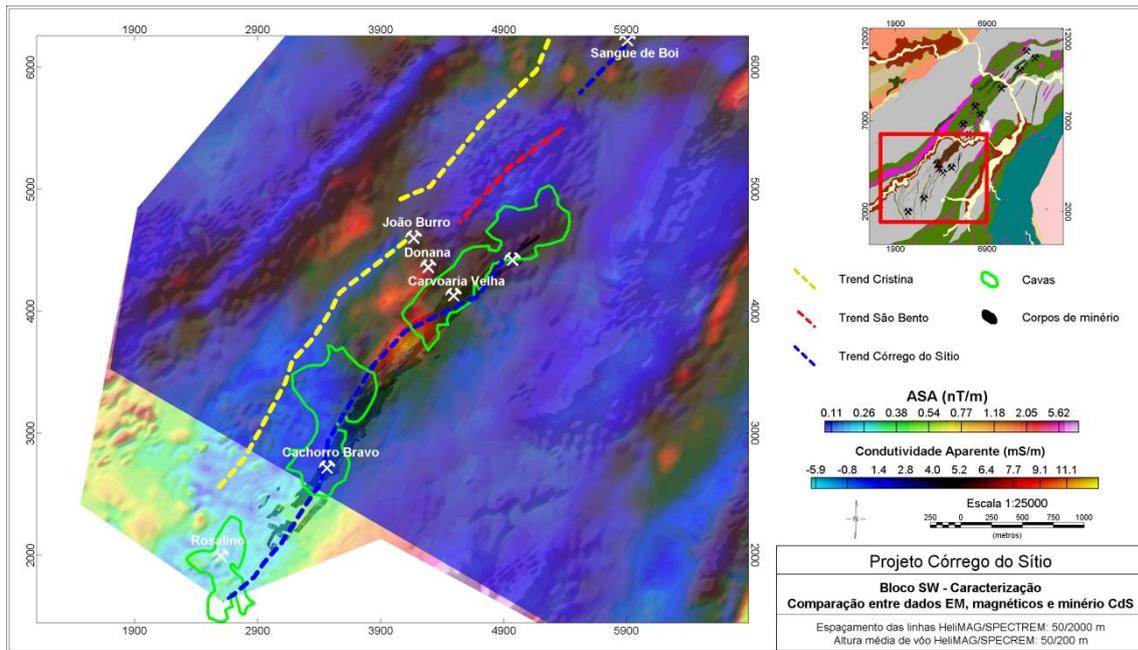


Figura 68: Condutividade aparente *late-time* (canal 7) sobre amplitude do sinal analítico, cavas, lineamentos estruturais e projeção dos corpos de minério associados ao lineamento Córrego do Sítio na região do bloco SW.

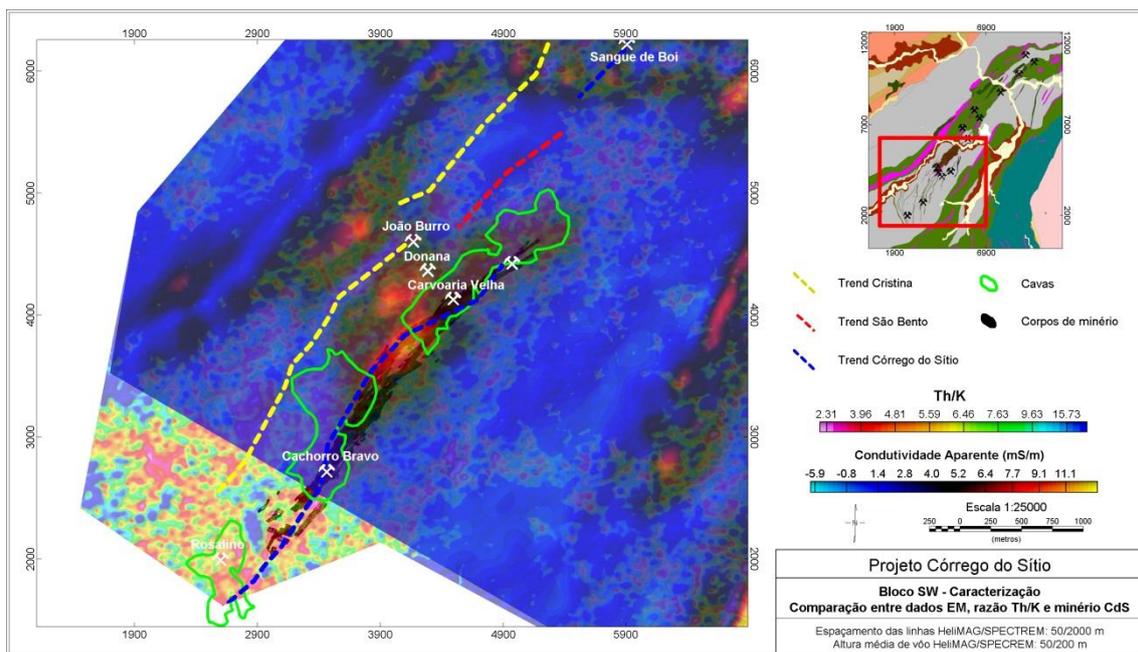


Figura 69: Dados de condutividade aparente *late-channel* (canal 7) sobre razão Th/K, cavas, lineamentos estruturais e projeção dos corpos de minério associados ao lineamento Córrego do Sítio na região do bloco SW

As zonas de cisalhamento interpretadas no bloco central se estendem em direção ao bloco SW, porém sua identificação foi difícil devido à falta de marcadores magnéticos intensos. A zona de cisalhamento interpretada ao SE exhibe boa correlação com o lineamento Córrego do Sítio, enquanto a outra, a NW, coincide com as anomalias EM e zona de atenuação nos dados magnéticos (Figura 71), sugerindo que o alvo L

representa uma zona condutora e desmagnetizada associada à mesma estrutura mapeada no bloco central.

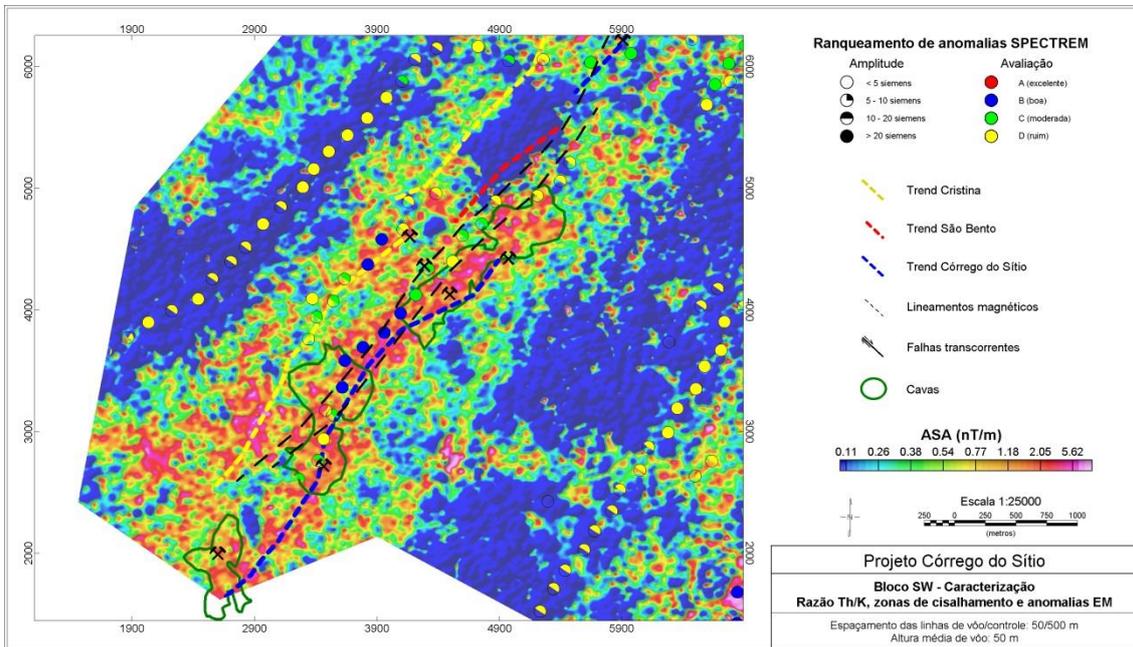


Figura 70: Razão Th/K, lineamentos mineralizados, zonas de cisalhamento interpretadas, cavas e localização das anomalias EM na região do bloco SW.

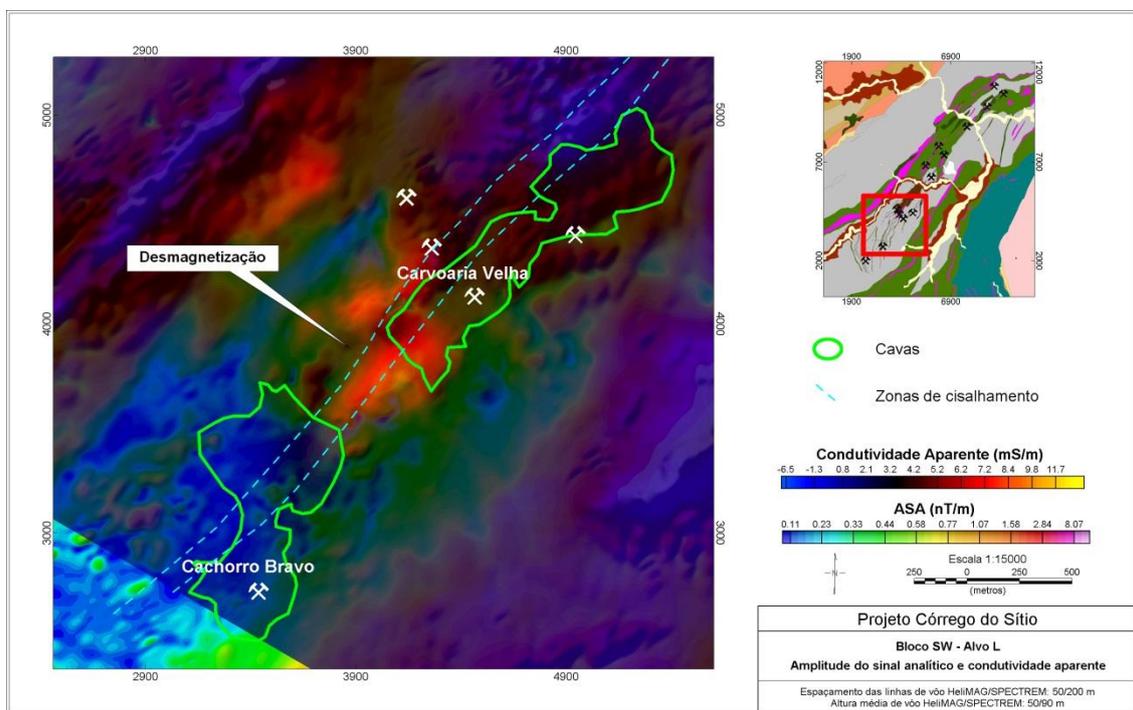


Figura 71: Dados de condutividade aparente *late-time* (canal 7) sobre amplitude do sinal analítico, zonas de cisalhamento interpretadas e cavas na área do alvo L.

A localização das anomalias geofísicas coincidentes e a extensão das BIF interpretada, entre os lineamentos Cristina e Córrego do Sítio, ausência da unidade

Santa Quitéria e de BIF no mapeamento geológico e a ausência de correlação direta com anomalias gamaespectrométricas indica que o suposto depósito tipo São Bento se encontra em profundidade.

Portanto, é possível que o alvo L represente um alvo prospectivo associado à extensão do lineamento São Bento no bloco SW. Entretanto, é uma área que está situada entre duas cavas em operação e é alvo constante de perfurações. Para verificar a viabilidade da interpretação em uma área bastante estudada, foi feito o modelamento da anomalia EM do alvo L e análise de sua geometria em comparação aos corpos de minério já conhecidos.

A Figura 72 mostra que há uma discrepância significativa entre as localizações da placa de Maxwell modelada para a anomalia do alvo L e os corpos de minério do lineamento Córrego do Sítio. O modelo não coincide com o minério e apresenta deslocamento de cerca de 250 metros para NE, além de estar localizado em profundidade, corroborando a interpretação qualitativa.

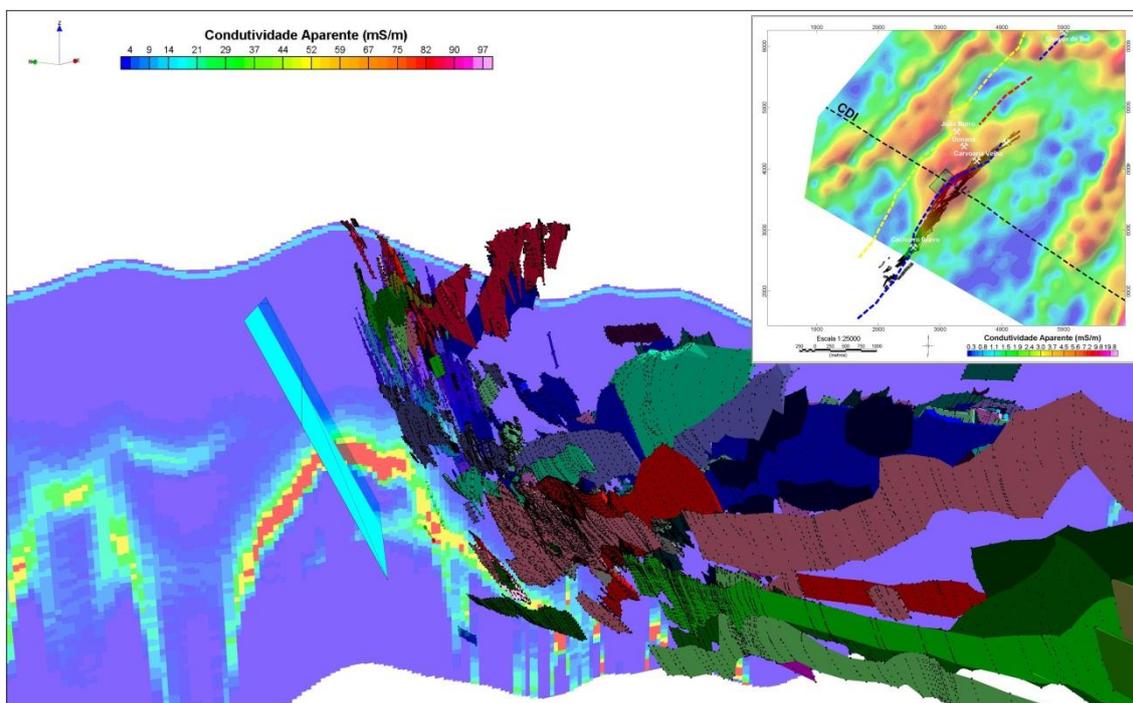


Figura 72: Placa de Maxwell usada para modelar a anomalia do alvo L (retângulo azul-claro), corpos de minério do lineamento Córrego do Sítio (superfícies coloridas) e CDI que cruza a anomalia EM. Vista para NE. O mapa em planta mostra a projeção dos elementos da visualização em 3D para referência.

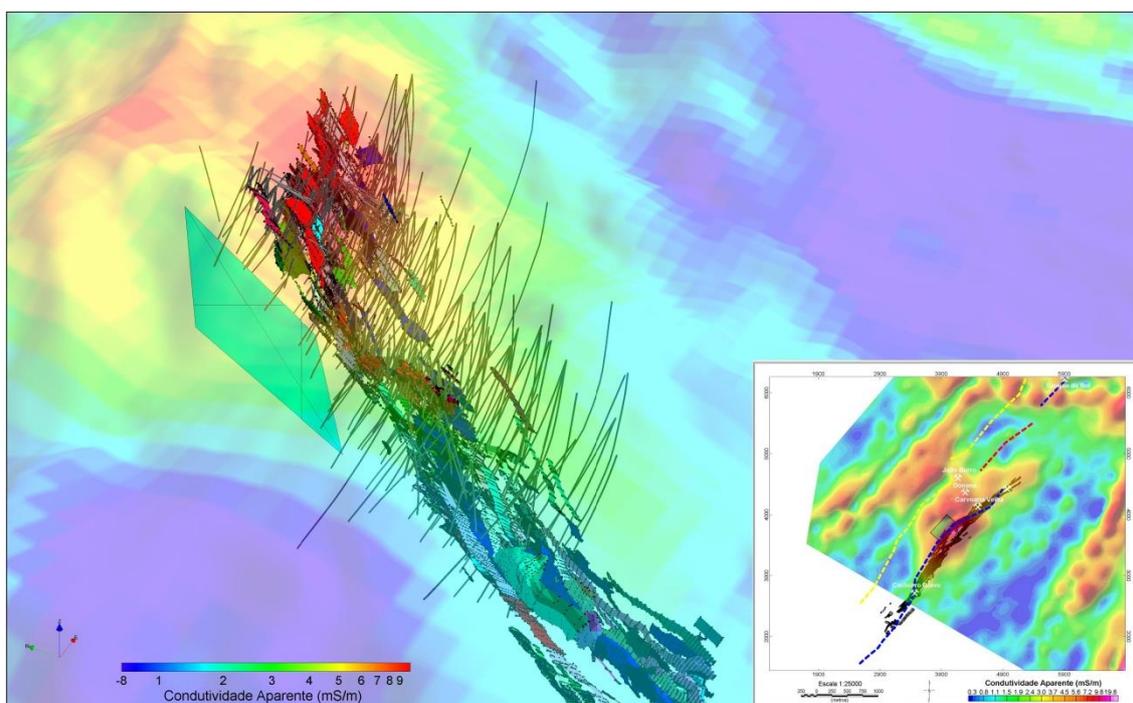
A CDI na Figura 72 indica a presença de condutor a uma profundidade superior à indicada pela placa modelada, pouco deslocada dos corpos de minério conhecidos. Já a Figura 73 mostra que a placa modelada ainda não foi testada adequadamente, sendo

perfurada apenas em sua extremidade NE inferior. O condutor na CDI permanece não testado.

Embora situada em um alto topográfico linear que cruza o bloco SW (Figura 65), não há evidências de relação direta entre a elevação e os dados EM, mesmo que a forma do modelo digital de terreno se assemelhe àquela do bloco central, interpretada como uma frente de empurrão (Figura 65).

O condutor tipo São Bento, neste caso, estaria localizado no interior do alto topográfico na Figura 65, em profundidade, na porção da unidade Santa Quitéria coberta pela unidade Córrego do Sítio, enquanto que os depósitos do tipo Córrego do Sítio estariam localizados na unidade superior. A anomalia é isolada e possivelmente está associada a mineralização em um alvo estrutural favorável, como a crista de BIF da unidade Santa Quitéria no anticlinal Conceição.

O bloco SW é dominado pela unidade Córrego do Sítio, enquanto que o central é dominado pela unidade Santa Quitéria. Esta diferença indica que o bloco central está localizado num nível estrutural superior, já que a unidade mais profunda se encontra exposta ao longo, e está de acordo com as interpretações efetuadas no bloco central. Seria devido a isso a ausência de depósitos conhecidos do tipo São Bento no bloco SW, já que estes ocorreriam em profundidade.



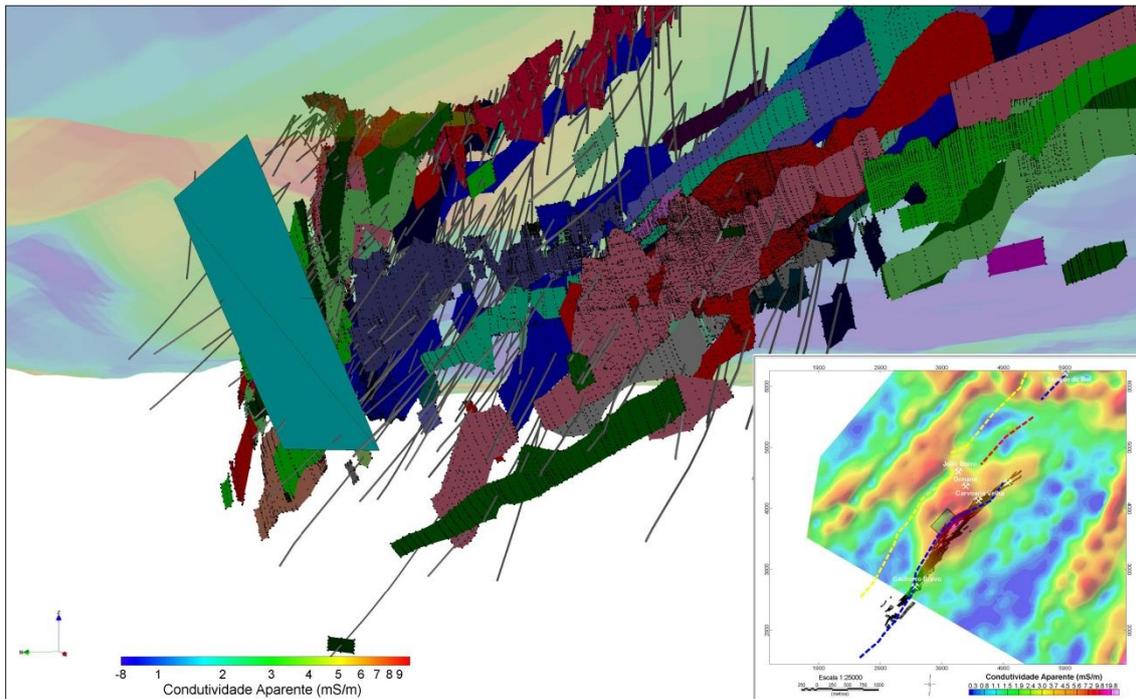


Figura 73: Placa de Maxwell usada para modelar a anomalia do alvo L (retângulo azul-claro), corpos de minério do lineamento Córrego do Sítio (superfícies coloridas) e furos de sondagem (linhas cinza). A superfície representa os dados de condutividade aparente sobre a topografia. Vista para NE (acima) e para E (abaixo). O mapa em planta mostra os elementos da visualização em 3D para referência.

A diferença entre os níveis estruturais dos blocos central e SW poderia ser devido a uma movimentação vertical entre eles a partir de uma das falhas transcorrentes NWW-SEE mapeadas. O bloco central teria sido soerguido em relação ao SW, assim como interpretado na Figura 61, porém relacionado a outra falha a SW. A esta estrutura também estaria relacionado a rotação de mergulho inferida a partir dos resultados na Figura 42.

Desta forma, o bloco central estaria exposto a maior intemperismo e a erosão seria responsável pela exposição da unidade Santa Quitéria e dos depósitos São Bentos. No caso do bloco SW, a mineralização São Bento permaneceu longe da ação do intemperismo no interior do Anticlinal Conceição.

No caso do alvo João Burro, são conhecidos corpos de minério aflorantes e de pouca continuidade em profundidade (Figura 74). Entretanto, a placa de Maxwell utilizada para modelar a respectiva anomalia apresenta boa correlação com a porção SW do depósito e indica que há continuação em profundidade ainda não testada pelos furos de sondagem.

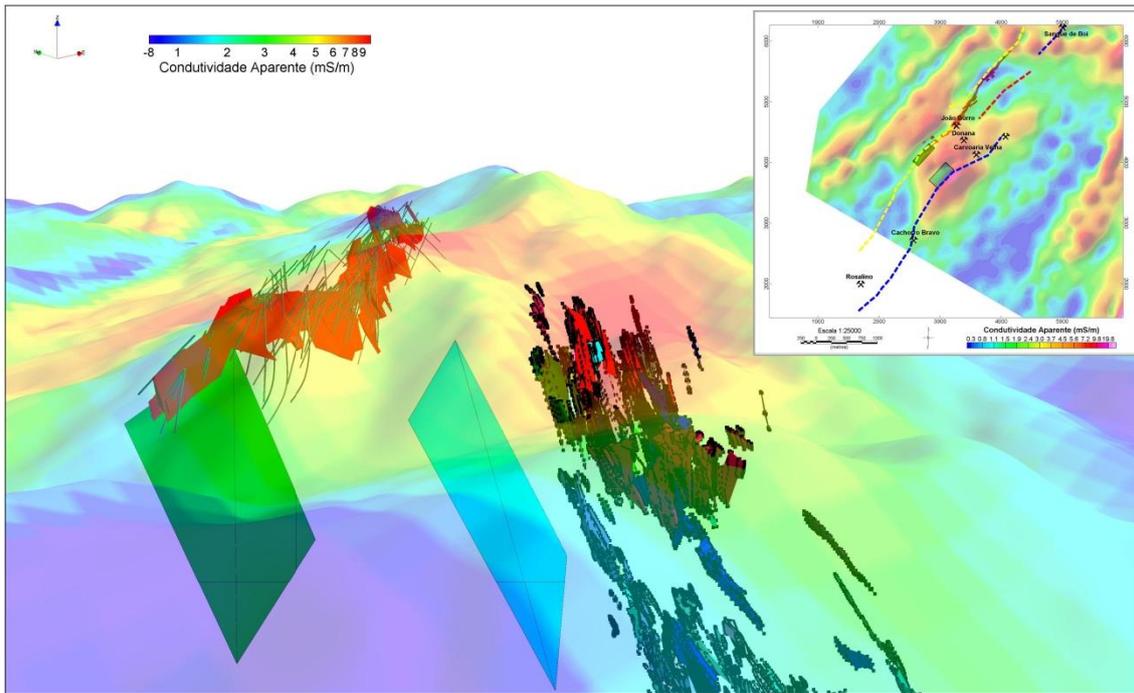


Figura 74: Placas modeladas para as anomalias dos alvos L e João Burro (retângulos), corpos de minério do lineamento Córrego do Sítio (superfícies coloridas) e depósito João Burro (superfícies vermelhas) e furos de sondagem na área do alvo João Burro (linhas cinza) sob dados de condutividade aparente plotados sobre a topografia. Vista para NE. O mapa em planta mostra a projeção em planta dos elementos da visualização em 3D para referência.

Vella (1995) observou que depósitos orogênicos em BIF ricos em pirita e pirrotita são relacionados a anomalias EM consideráveis, enquanto depósitos ricos apenas em pirita não. Além disso, notou um aumento na concentração relativa pirrotita/pirita nas zonas sulfetadas em profundidade.

Neste caso, a anomalia EM, de baixa intensidade, pode ser atribuída a um aumento da concentração de sulfetos ou da proporção pirrotita/pirita em profundidade, já que não há evidência que levem a crer que a anomalia está relacionada a um depósito diferente daquele já conhecido, que não apresenta anomalia EM em sua porção NE.

### 3.4. BLOCO NE

#### 3.4.1. OBJETIVOS

Os alvos do bloco NE correspondem à extensão dos lineamentos estruturais mineralizados em direção à porção NE da área do Projeto Córrego do Sítio. É uma área ainda pouco explorada, em termos de furos de sondagem, mas que apresenta grande potencial, com ocorrências históricas e garimpos.

Os objetivos da interpretação no bloco NE são avaliar a prospectividade desta área do ponto de vista geofísico usando os resultados obtidos nos demais blocos, avaliar a extensão dos lineamentos estruturais mineralizados para o NE dos depósitos no bloco central e gerar alvos para detalhamento em campanhas futuras.

### 3.4.2. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS

A Figura 75 mostra que o bloco NE contém diversas lentes de BIF e diques máficos inseridos numa faixa aflorante da unidade Santa Quitéria, que atravessa um pacote formado pela unidade Córrego do Sítio.

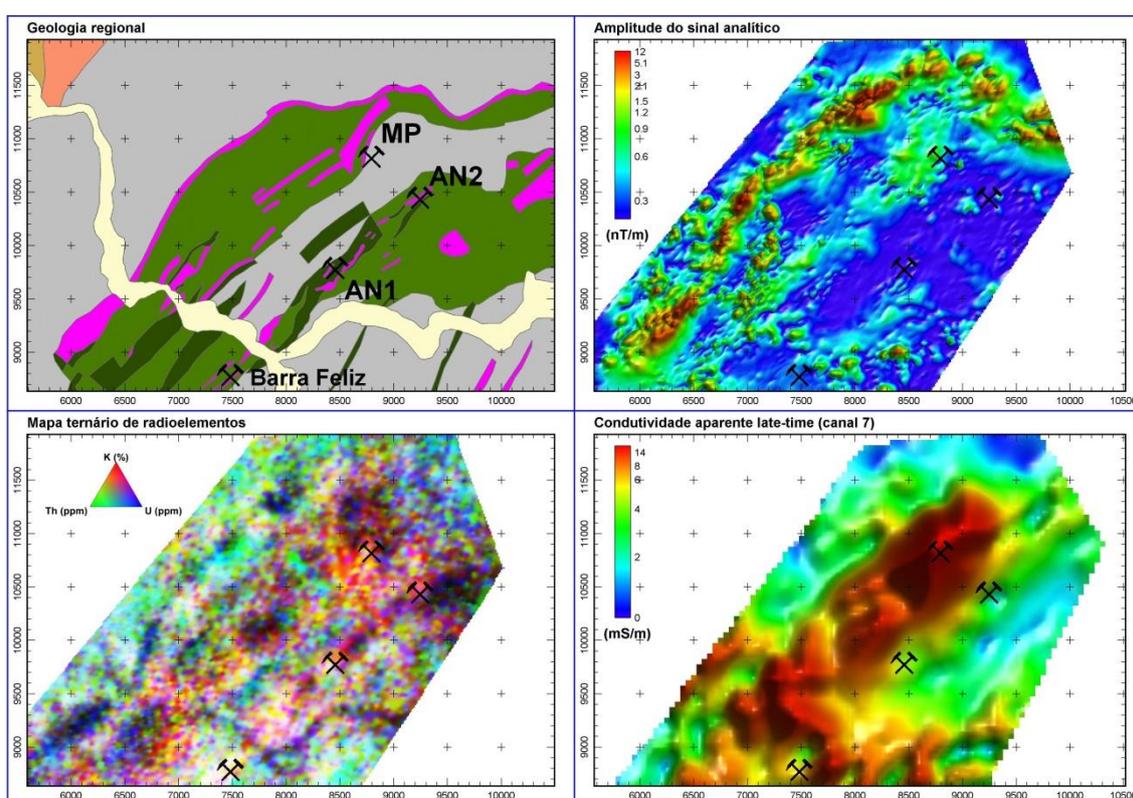


Figura 75: Comparação entre geologia regional e dados aerogeofísicos para a área do bloco NE. As principais ocorrências estão representadas pelos símbolos pretos.

As ocorrências AN1 e AN2 são inferidas, com base em dados geológicos, como a extensão NE do lineamento Córrego do Sítio no bloco NE. As galerias próximas à ocorrência MP representam uma mineralização interpretada como do tipo São Bento (Figura 76). Entretanto, a quantidade de informações acerca destas ocorrências é limitada e o traçado dos lineamentos questionável.

Os dados magnéticos neste bloco são dominados por anomalias atribuídas à BIF 1 da Figura 32. Situada no contato entre as unidades Santa Quitéria e Córrego do Sítio,

esta estrutura circunda o limite NE dos lineamentos mineralizados (Figura 76). As demais lentes de BIF mapeadas são descritas como xistos ferruginosos e não apresentam resposta magnética característica. Os diques máficos também não apresentam resposta consistente, mesmo apresentando espessura considerável.

Notam-se diferenças no mapeamento geológico e os dados geofísicos no extremo norte na área. A mudança de direção para leste indicada não é observada nos dados magnéticos, que sugerem uma dobra mais suave e deformação dútil no limite NE da área.

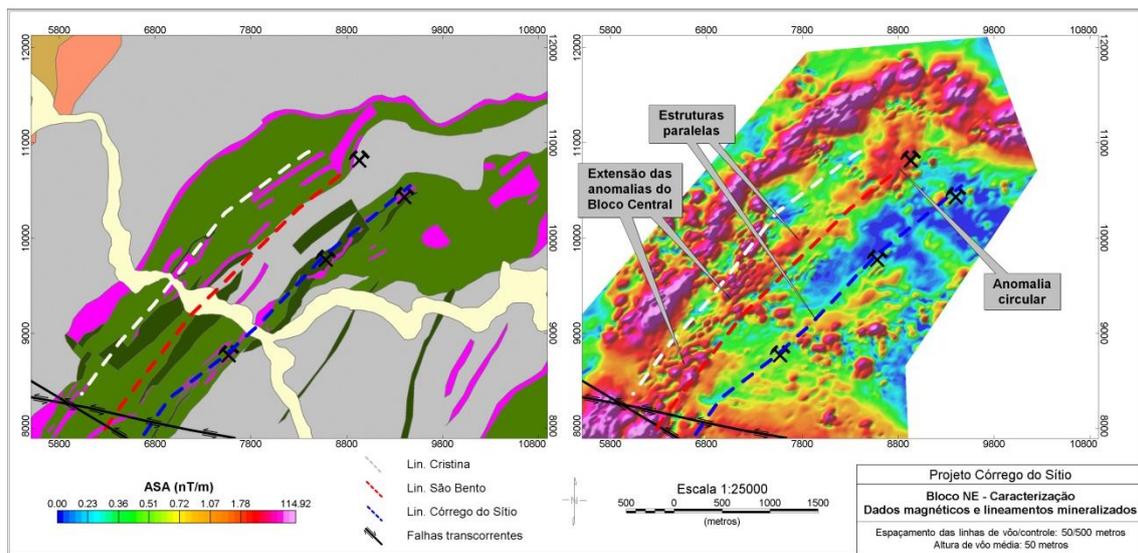


Figura 76: Comparação entre geologia regional (à esquerda), lineamentos mineralizados (linhas tracejadas) e amplitude do sinal analítico (à direita). As falhas representadas (linhas pretas) são as mesmas da Figura 60, responsáveis pelo deslocamento de parte do depósito São Bento.

São observadas duas sequências de anomalias lineares de baixa amplitude paralelas à BIF 1 (estruturas paralelas na Figura 76). Aquela associada ao lineamento São Bento está associada à continuação da estrutura deslocada interpretada no bloco central em direção a NE. Já a associada ao lineamento Córrego do Sítio parece estar associada a um conjunto de diques e lentes finas de BIF, de resposta magnética muito sutil e inconsistente.

A BIF 1 é historicamente considerada de pouca importância exploratória, sendo a área a SE, no centro do bloco, de maior potencial. Esta é uma situação análoga àquela observada no bloco central, onde as anomalias EM prospectivas associadas às BIF mineralizadas se encontram a SE da BIF 5, estéril e sem condutores associados.

A Figura 76 mostra, também, que a ocorrência MP está associada a uma anomalia magnética circular de baixa amplitude que representa o limite NE do lineamento São Bento. Sua forma não condiz com a direção geral da geologia e não pode ser atribuída aos xistos ferruginosos mapeados, indicando a presença de uma fonte magnética estranha ao contexto geológico conhecido. Além disso, os comprimentos de onda da anomalia circular e da anomalia da BIF 1, aflorante, são distintos e indicam que a fonte da anomalia circular é mais profunda e não relacionada às BIF aflorantes.

Os dados EM indicam que o alinhamento CdS de anomalias EM se estende para este bloco, cujo limite NE é representado por uma anomalia intensa associada à ocorrência MP (Figura 77). Outras anomalias de menor intensidade (CC e A1) também são observadas e conferem um aspecto intermitente ao alinhamento CdS nesta área. Apenas o lineamento São Bento está associado a anomalias EM, assim como observado nos blocos central e SW.

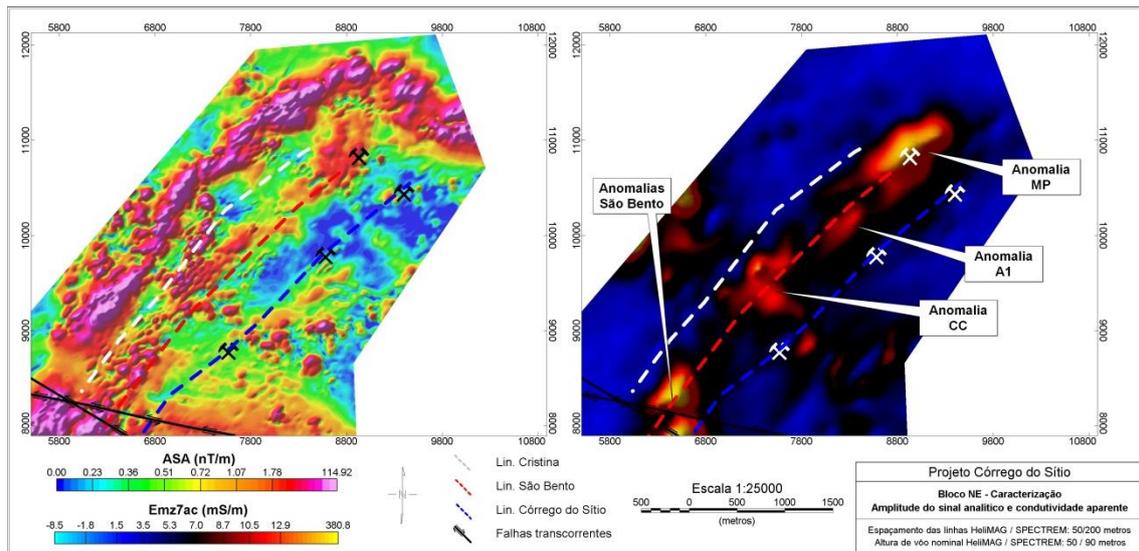


Figura 77: Comparação entre amplitude do sinal analítico e condutividade aparente *late-channel* (canal 7) na área do bloco NE.

Os dados magnéticos e EM nesta área são afetados pelo ruído proveniente de uma linha de tensão, presente na forma de uma anomalia linear NW-SE, aproximadamente perpendicular à direção geral da geologia, que atravessa o alinhamento CdS na região da anomalia CC (Figura 77). Esta é então interpretada como a sobreposição de ruído e da resposta natural das rochas, já que apresenta amplitude maior do que as demais áreas afetadas pela linha de tensão, a NW e SE.

Assim como no caso do bloco central, os alinhamentos de anomalias magnéticas e EM estão associados a anomalias lineares contínuas de razão Th/K, que também representam uma extensão das anomalias geofísicas do bloco central no bloco NE (Figura 78). Os lineamentos Córrego do Sítio e São Bento mostram boa correlação com as zonas de enriquecimento potássico, especialmente o primeiro. Já o lineamento Cristina não apresenta resposta gamaespectrométrica.

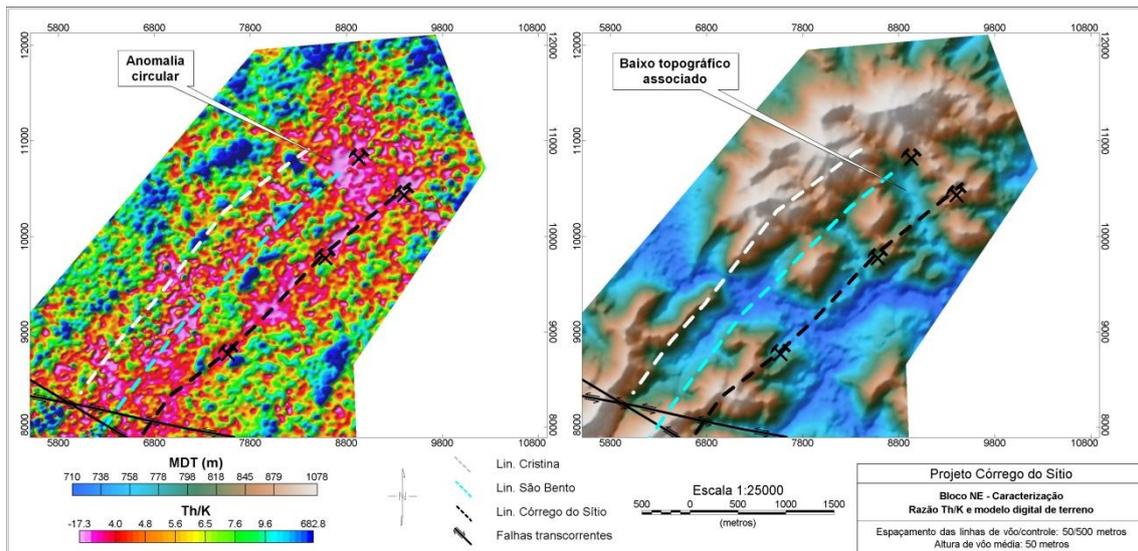


Figura 78: Comparação entre dados de razão Th/K e modelo digital de terreno na região do bloco NE.

Uma anomalia de razão Th/K aproximadamente circular na região da ocorrência MP coincide com as demais anomalias EM e magnética. (Figura 75). Entretanto, esta anomalia está localizada num baixo topográfico, cuja forma é idêntica à da anomalia, indicando que é possivelmente produto da deposição de sedimentos no vale, e não associada a alteração.

As anomalias lineares de Th/K, às quais os lineamentos mineralizados estão associados, não apresentam relação direta com baixos topográficos e, no caso do lineamento Córrego do Sítio, acompanham um alto topográfico. São, portanto, interpretadas como zonas de enriquecimento potássico. A boa correlação de mineralizações Córrego do Sítio a anomalias Th/K torna as zonas entre as ocorrências AN1, AN2 e Barra Feliz alvos de interesse.

A Figura 79 mostra que a zona de cisalhamento interpretada no bloco central apresenta continuação para este bloco e a mesma boa correlação com os dados magnéticos, gamaespectrométricos e EM, indicando que as anomalias identificadas

estariam associadas a possíveis mineralizações do tipo São Bento, assim como no bloco central. Entretanto, as anomalias EM CC e MP estão diretamente relacionadas às anomalias magnéticas moderadas, que indica que não são associadas a zonas de desmagnetização. Já a anomalia A1 parece estar associada a uma zona de atenuação entre as anomalias magnéticas dos alvos CC e MP.

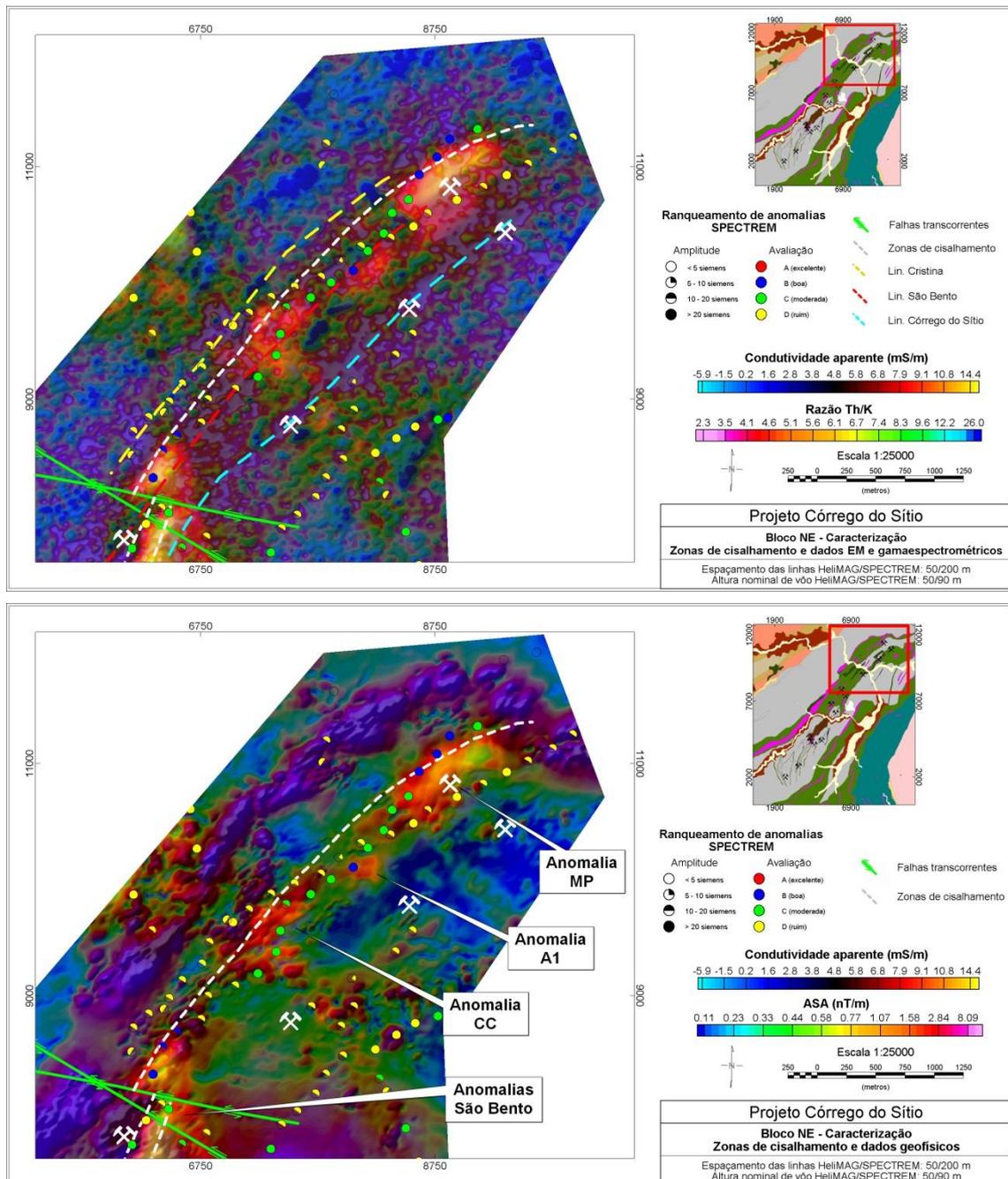


Figura 79: Dados de condutividade aparente late-channel (canal 7) sobre razão Th/K (acima) e sobre amplitude do sinal analítico (abaixo), lineamentos mineralizados, zona de cisalhamento interpretada e ranqueamento de anomalias EM na região do bloco NE.

A Figura 80 mostra o efeito das falhas transcorrentes interpretadas sobre os dados magnéticos e EM. Diferentemente do bloco central, o efeito das falhas NNW-SSE domina no bloco NE, sendo as falhas NWW-SEE de menor importância. Ambos os alinhamentos de anomalias EM e magnéticas exibem forte controle estrutural, que parece lhes conferir um aspecto intermitente. As anomalias EM CC, A1 e MP são separadas por zonas menos condutivas, limitadas por falhas.

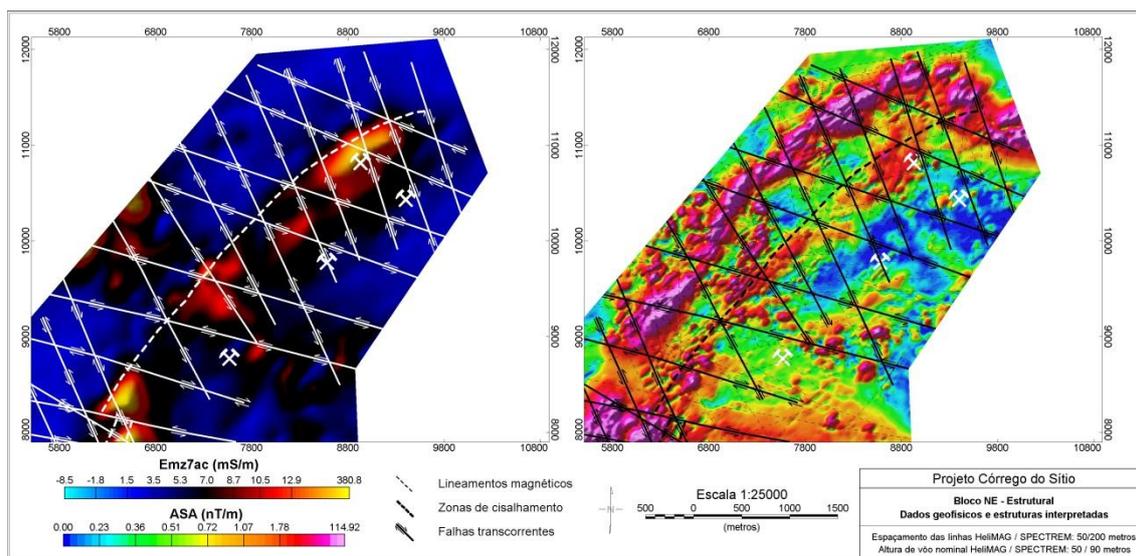


Figura 80: Falhas transcorrentes e zonas de cisalhamento sobre condutividade aparente late-channel (canal 7) (à esquerda) e amplitude do sinal analítico (à direita) na região do bloco NE.

A Figura 81 mostra que o mesmo padrão intermitente é observado na topografia e indica que não só as falhas mapeadas não são artefatos gerados durante o aerolevantamento, mas também são responsáveis por alterações de ambos os dados geofísicos e topografia. Novamente, o efeito das falhas NNW-SSE domina a topografia, em comparação ao efeito das falhas NWW-SEE.

A zona de cisalhamento mapeada se situa a SE do extenso alto topográfico associado à BIF 1 e não há correlação direta entre as feições topográficas e os dados geofísicos a SE da BIF 5 (Figura 81). Entretanto, as anomalias identificadas indicam a presença de um condutor profundo.

Alinhamentos de altos topográficos a SE da BIF 1 poderiam representar estruturas paralelas semelhantes às aquelas observadas no bloco central e, portanto, uma possível expressão superficial de estruturas prospectivas em profundidade. A zona de cisalhamento interpretada então representaria o afloramento do plano que intercepta estas estruturas prospectivas em profundidade.

Então, a zona de cisalhamento interpretada e as anomalias geofísicas a que está relacionada são interpretadas como a continuação NE da estrutura prospectiva que contém a mineralização São Bento no bloco central. Não foram identificadas zonas de cisalhamento associadas aos demais lineamentos mineralizados, mas a resposta gamaespectrométrica do lineamento Córrego do Sítio é muito similar àquela observada nos demais blocos, o que sugere que este também ocorre no bloco NE.

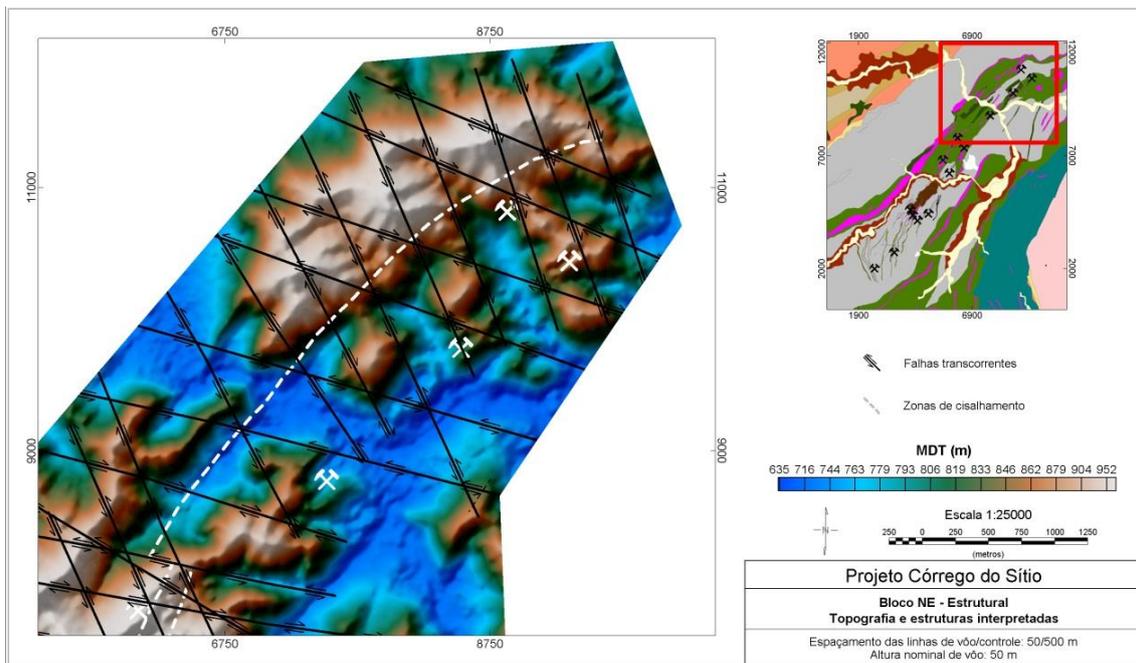


Figura 81: Estruturas interpretadas sobre o modelo digital de terreno na região do bloco NE.

A anomalia MP exibe uma resposta que difere do esperado para mineralizações tipo São Bento. É caracterizada por resposta EM intensa e bem definida, comparável àquela do depósito São Bento, mas está associada a uma anomalia magnética fraca, mas positiva e isolada, indicando a presença de uma estrutura moderadamente magnética.

A mineralização de sulfetos em grande quantidade é frequentemente associada a anomalias magnéticas. Modelos prospectivos para depósitos VMS em território canadense nas décadas de 60 e 70 consideravam que os corpos de sulfetos maciço deveriam estar associados a anomalias magnéticas mensuráveis. A grande exceção foi a descoberta de Kidd Creek, que não apresenta anomalia magnética (Donohoo, 1970).

No caso de depósitos hospedados em BIF, os dados no bloco central mostram que a mineralização deveria ser desmagnetizante. Entretanto, se os sulfetos estiverem associados a estruturas não magnéticas, como fácies de BIF paramagnéticas, em

concentração suficiente e forem dominados por pirrotita magnética, poderiam gerar a anomalia magnética observada.

As Tabelas 1 e 2 mostram que a magnetita é o principal controle sobre a susceptibilidade magnética das BIF, sendo a pirrotita secundária. Portanto, a sulfetação, quando associada a BIF magnéticas, causaria um contraste negativo, mas quando associadas a BIF não magnéticas, como os xistos ferruginosos, poderia gerar uma anomalia sutil.

A Figura 82 mostra que as anomalias magnéticas no bloco NE apresentam o mesmo padrão de anomalias reversas observado no bloco central. Entretanto, as anomalias identificadas são máximos locais moderados observados ao longo de uma tendência sutil. As anomalias poderiam, então, representar altas concentrações de sulfetos ao longo da estrutura pouco magnética responsável pela tendência sutil.

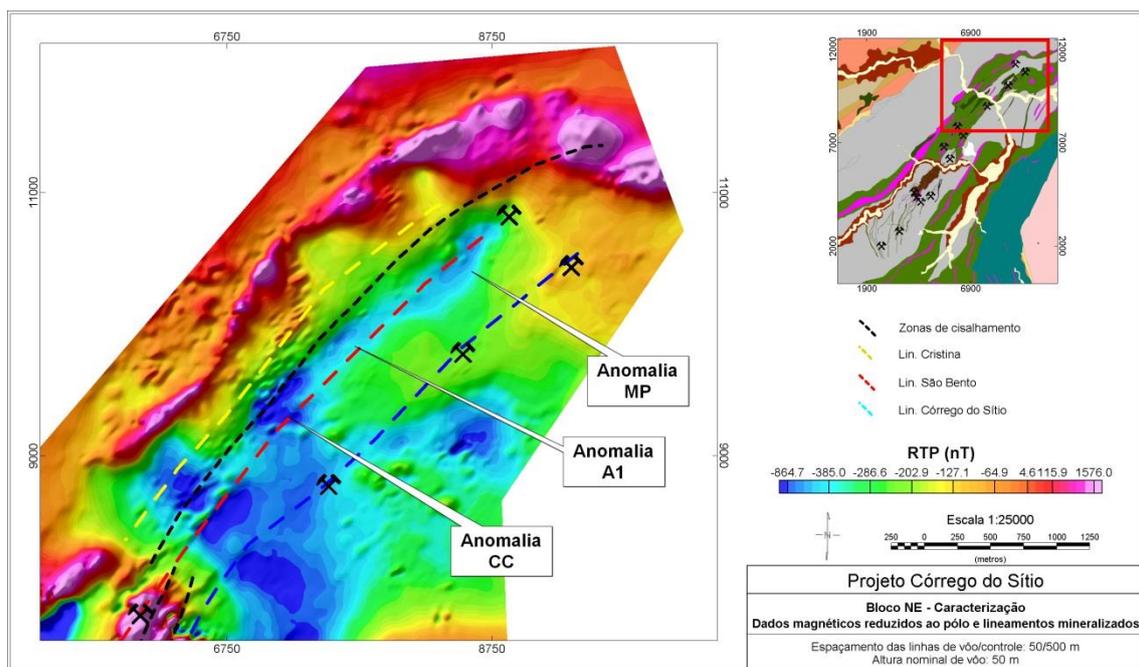


Figura 82: Dados magnéticos reduzidos ao pólo, zonas de cisalhamento interpretadas e lineamentos mineralizados na região do bloco NE.

Os dados magnéticos na Figura 82 mostram que a BIF 1 apresenta, assim como aquelas das Figura 43 e Figura 44, uma rotação no mergulho em direção a NE. Visando analisar a geometria das fontes das anomalias magnéticas em profundidade e entender sua associação com as anomalias EM, foram feitas inversões MVI dos dados do bloco e modelamento direto das anomalias da BIF 1 na porção NE da área.

Os corpos tabulares modelados sugerem a presença de fontes magnéticas de mergulho suave para SE, assim como observado para as placas de Maxwell na extensão NE do bloco central (Figura 83). Porém, não foi possível explicar as anomalias sem o uso de corpos magnéticos de mergulho NW. Estes indicam a presença de uma dobra relativamente aberta, cujos flancos são relacionados aos corpos usados. As anomalias EM estariam associadas ao flanco SE da dobra interpretada.

A topografia no bloco NE apresenta características semelhantes às aquelas observadas no bloco central (Figura 78). A elevação associada à BIF 1 é a feição mais aparente, mas altos topográficos alinhados ao SE configuram outros alinhamentos que estão associados às anomalias magnéticas, EM e gamaespectrométricas identificadas. Entretanto, nota-se que a topografia no bloco NE é mais suave do que a observada nos demais blocos (Figura 24), o que também aponta para dobras mais abertas.

A diferença na geometria das dobras nos blocos central e NE sugere que a fase de compressão E-W brasileira foi mais suave neste bloco, com deformação de menor intensidade e falhas transcorrentes de efeito menos aparente. Esta é a possível causa da predominância de transcorrências NNW-SSE na deformação das anomalias geofísicas.

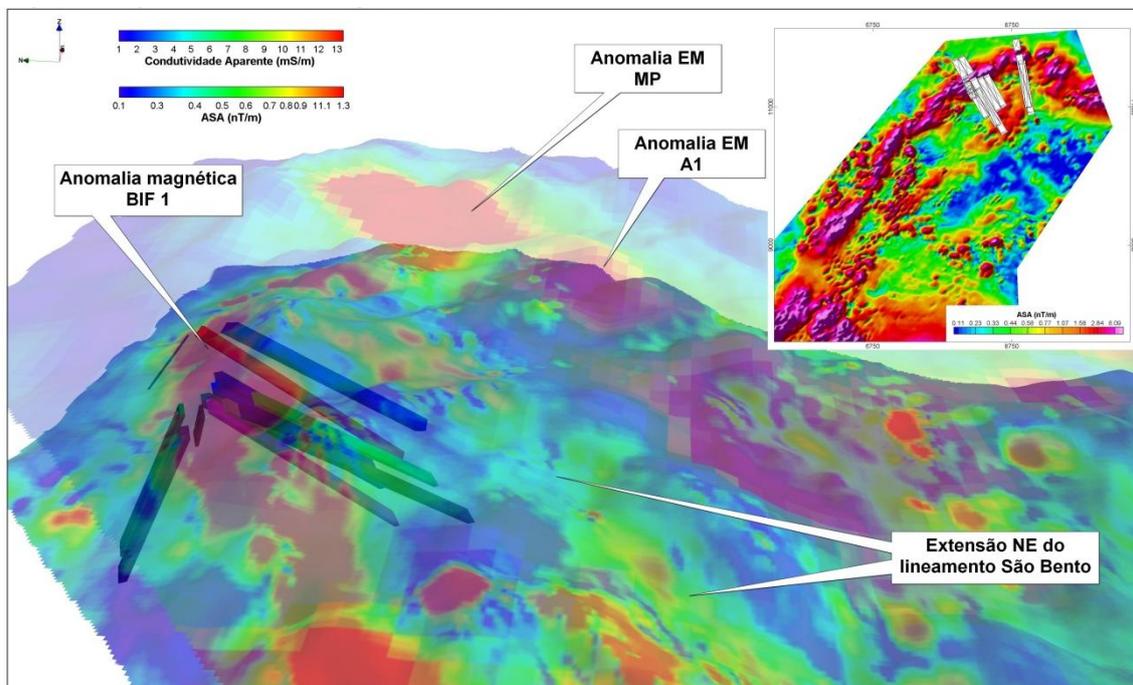


Figura 83: Corpos tabulares (prismas coloridos) usados para modelar a porção NE da anomalia magnética da BIF 5 sob dados de condutividade aparente *late-time* (canal 7; superfície superior) e amplitude do sinal analítico (superfície inferior) sobre a topografia. A superfície superior foi deslocada verticalmente em 400 metros. Vista para leste. O mapa em planta mostra os corpos modelados em planta sobre a amplitude do sinal analítico.

A inversão MVI aplicada produziu um modelo que exibe boa correlação com o flanco SE interpretado para a estrutura da BIF 1, porém não há indicação de um flanco NW (Figura 84). O processo não foi capaz de recuperar o mesmo modelo obtido via modelamento direto, seja pela incapacidade da metodologia de considerar estruturas complexas sem vínculos, ou pela falta de poder de resolução do modelo. Assim como no bloco central, foi gerado um modelo com células de 25 metros.

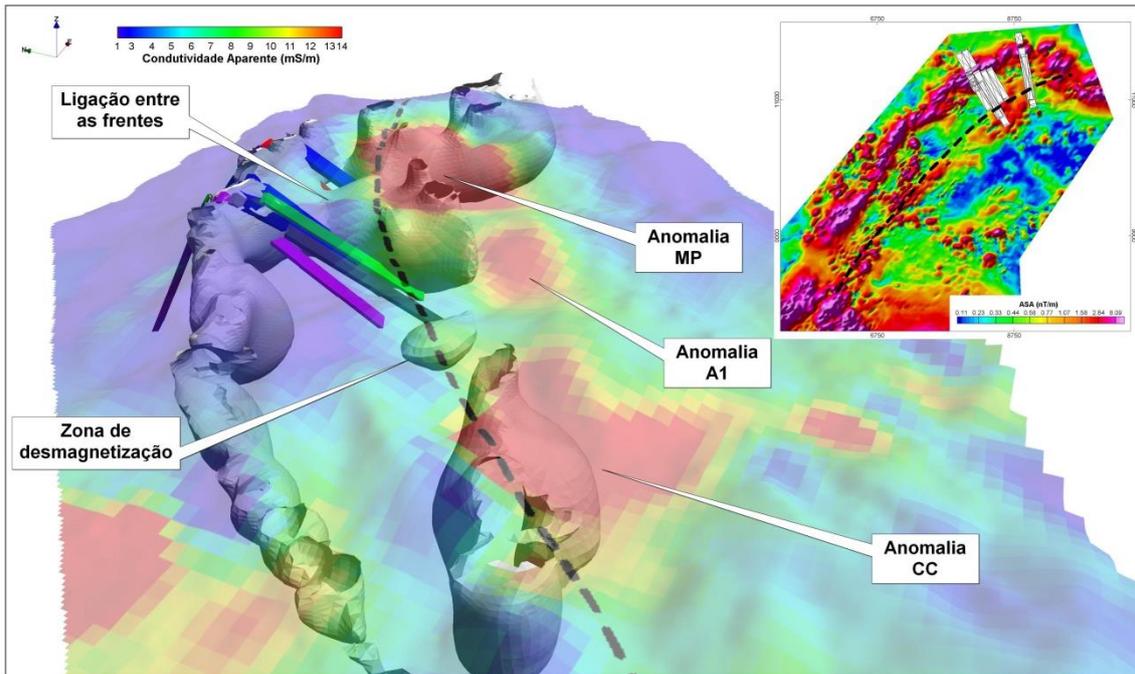


Figura 84: Comparação entre corpos tabulares modelados (polígonos coloridos), modelo obtido através de inversão MVI dos dados magnéticos (isosuperfície branca, valor de 0,008), dados EM e zona de cisalhamento interpretada (linha tracejada, sobre a topografia). O mapa em planta mostra a projeção dos corpos modelados, a zona de cisalhamento e dados de amplitude do sinal analítico.

As anomalias magnéticas paralelas à BIF 1 foram modeladas como uma sequência de corpos magnéticos, sendo a anomalia A1 associada a um afinamento da isosuperfície considerada, assim como observado no bloco central. Isto sugere que esta está associada a uma zona de desmagnetização e configura um alvo do tipo São Bento.

A anomalia MP está associada a uma zona magnética conectada em profundidade com a estrutura da BIF 1, sugerindo a presença de duas cristas associadas a uma mesma dobra regional, sendo a anomalia MP relacionada à crista mais profunda, a SE da BIF 1. A conexão observada representaria uma ligação entre possíveis frentes de empurrão, o alto topográfico associado à BIF 5 e a estrutura magnética em profundidade.

A presença da zona de cisalhamento identificada, assim como no bloco central, no caso das BIF 4, 5 e 6, parece condicionar a ocorrência de condutores ao longo dos lineamentos mineralizados. Apenas a estrutura magnética interpretada que está associada a uma das zonas de cisalhamento mapeadas e é a única a apresentar anomalias EM.

A relação entre as zonas magnéticas e condutivas em 3D pode ser vista na Figura 85, que mostra as CDI associadas às anomalias MP e A1 e uma isosuperfície do modelo magnético. Observa-se que as zonas mais condutivas da área estão diretamente associadas às zonas magnéticas, sendo que ambas indicam um condutor na mesma profundidade da isosuperfície escolhida. Isto reforça a interpretação de que a fonte magnética é também a fonte da anomalia EM e possivelmente se trata de mineralização maciça de pirrotita magnética.

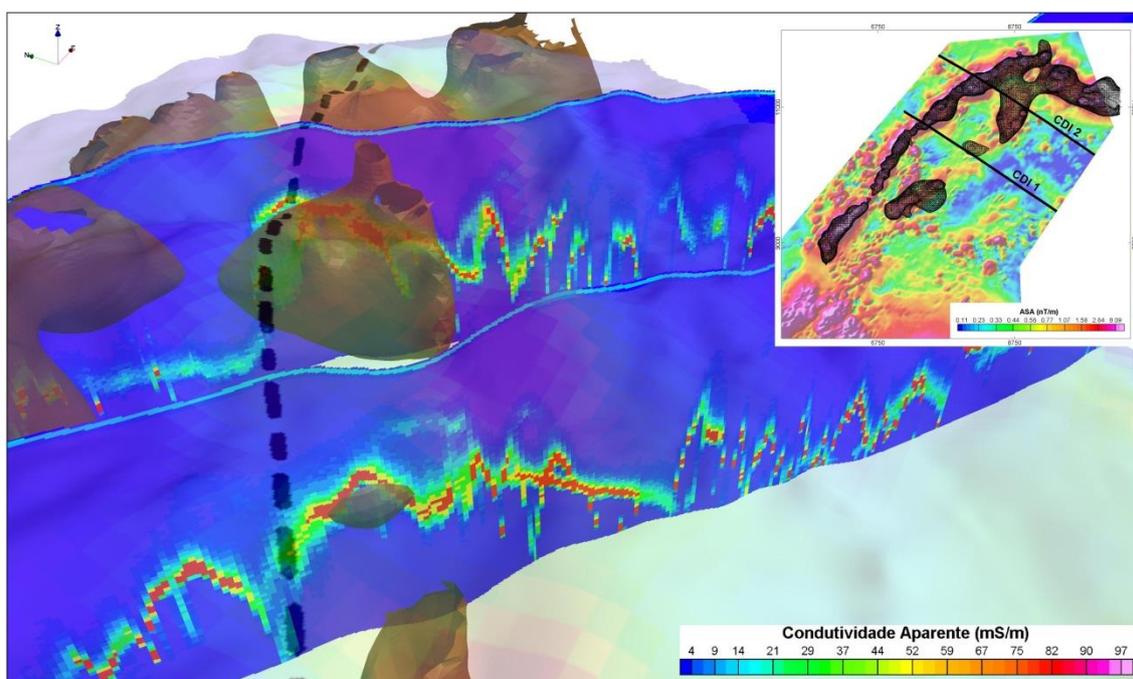


Figura 85: Comparação entre CDI sobre os alvos A1 e MP, isosuperfície do modelo magnético invertido (superfície marrom) e zona de cisalhamento interpretada (linha tracejada, sobre a topografia). O mapa em planta mostra a projeção da isosuperfície e a localização das CDI, sobre dados de amplitude do sinal analítico.

Como mostra a Figura 86, o modelamento da anomalia MP usado placas de Maxwell também revelou que os condutores apresentam associação direta com as zonas magnéticas invertidas, mas também indica que o mergulho das estruturas é ainda mais raso do que aquelas modeladas para a extensão NE do depósito São Bento, mais uma vez indicando rotação anti-horária do mergulho das estruturas em direção a NE.

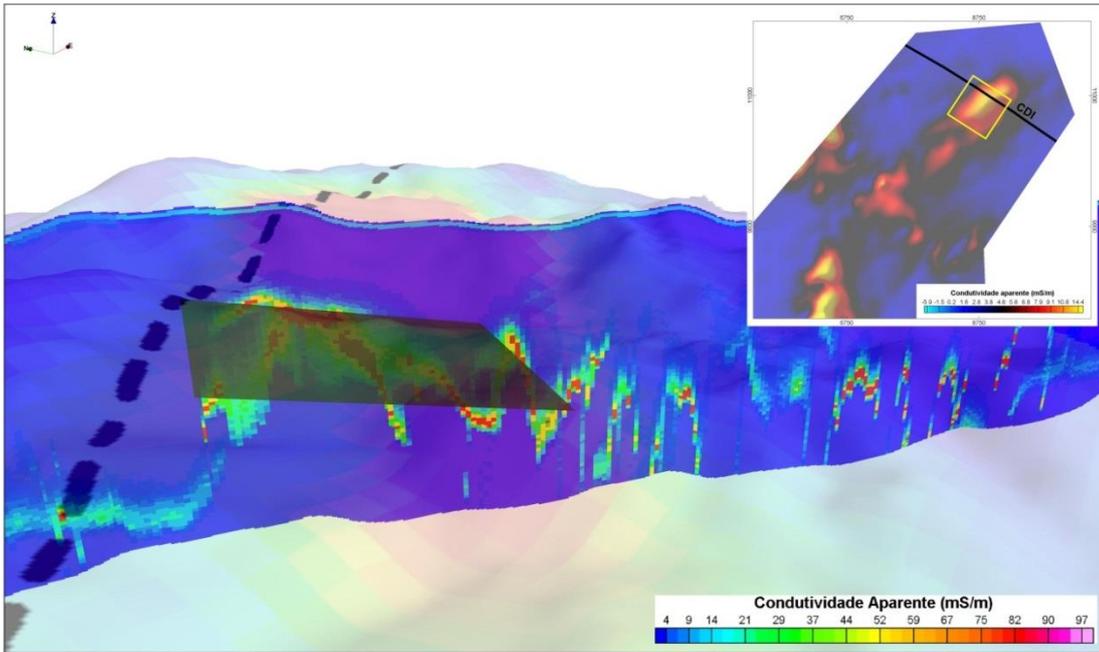


Figura 86: Comparação entre CDI sobre o alvo MP, zona de cisalhamento interpretada (linha tracejada, sobre a topografia) e placa de Maxwell usada para modelar a anomalia MP (quadrado preto). O mapa em planta mostra a linha à qual a CDI se refere e a localização e extensão da placa (amarelo).

A interpretação dos dados geofísicos para o alvo MP foi sumarizada na Figura 87. O condutor, que representa mineralização do tipo São Bento e é a fonte das anomalias EM e magnéticas, estaria situado numa frente de empurrão em profundidade, hospedado em BIF de mergulho suave, dobrada devido à compressão das orogénias.

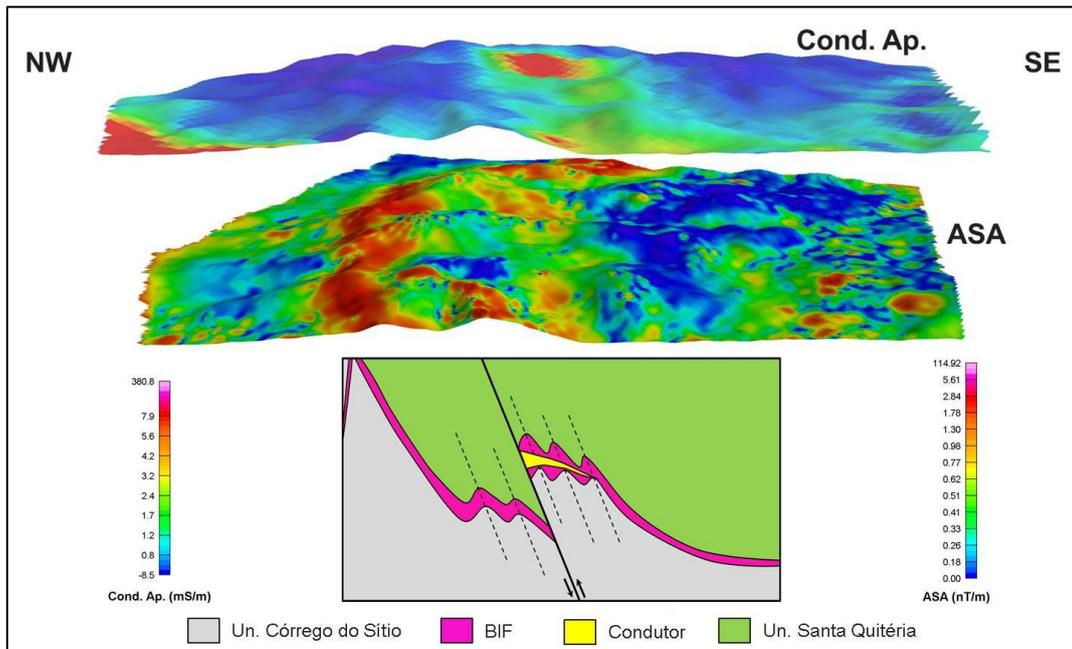


Figura 87: Seção interpretativa a partir dos resultados da interpretação dos dados magnéticos. Dados de condutividade aparente late-channel (canal 7) sobre topografia (acima) e dados de amplitude do sinal analítico sobre topografia (abaixo).

A presença da zona de cisalhamento permitiu a passagem do fluido mineralizador, que reagiu com os horizontes favoráveis. A ausência destas estruturas na região da BIF 1 explicaria a falta de condutores associados.

A diferença na profundidade dos depósitos tipo Córrego do Sítio e São Bento inferida a partir dos dados geofísicos do bloco SW também é observada neste caso. As respostas gamaespectrométricas do alvo tipo São Bento, inconsistente, e do lineamento Córrego do Sítio, muito bem definida, e o modelamento das anomalias EM e magnéticas indicam que o condutor inferido se encontra em profundidade superior aos alvos tipo Córrego do Sítio, supostamente aflorantes ou próximos da superfície. Esta interpretação corrobora o abaixamento e rotação do bloco NE em relação ao central, inferido a partir do modelamento dos dados geofísicos do bloco central.

A anomalia MP é considerada de prioridade máxima, enquanto as outras de prioridade inferior. A anomalia A1 apresenta características semelhantes às observadas no bloco central, mas é de amplitude inferior. A anomalia CC é mais intensa do que a A1 e está associada a anomalia magnética mais bem definida. Entretanto, como pode ser fruto de ruído, deve ser considerada de menor prioridade.

As anomalias de razão Th/K associadas ao lineamento Córrego do Sítio também deve ser investigadas em detalhe. Possuem correlação semelhante àquela observada no bloco SW e podem indicar que as ocorrências AN1 e AN2 apresentam potencial maior do que antes previsto, de forma semelhante ao interpretado para as zonas de alteração dos depósitos Sangue de Boi e Barra Feliz, no bloco central.

### 3.5. ALVO A

#### 3.5.1. OBJETIVOS

O alvo A se situa a SE dos principais depósitos da região do Projeto Córrego do Sítio e é considerado um alvo de alta prioridade. Antigas cavas de garimpo são encontradas na região e a exploração no local se baseou em avaliar as ocorrências explotadas pelos garimpeiros.

Resultados positivos foram obtidos a partir de campanhas de amostragem de solo e furos de sondagem iniciais, de abrangência limitada. Trabalhos adicionais são necessários para explorar a área adequadamente.

Os objetivos da interpretação dos dados nesta área são avaliar esta região conhecidamente prospectiva usando a interpretação dos dados geofísicos nos demais blocos, definir a resposta geofísica das ocorrências conhecidas, definir um modelo exploratório para a mineralização da área e buscar novos alvos exploratórios.

### 3.5.2. GEOLOGIA

O mapa da Figura 88 é resultado de um programa de mapeamento geológico, de escala 1:2500, conduzido na área ao redor das cavas 1, 2 e 3. Diferentemente dos demais depósitos a NW, as ocorrências estão situadas próximas ao contato entre metaultramáficas maciças e talco xistos da unidade Quebra Ossos e a unidade Santa Quitéria. A unidade Córrego do Sítio ocorre a oeste da área, mas é de pouco interesse neste caso (Ferreira, 2013).

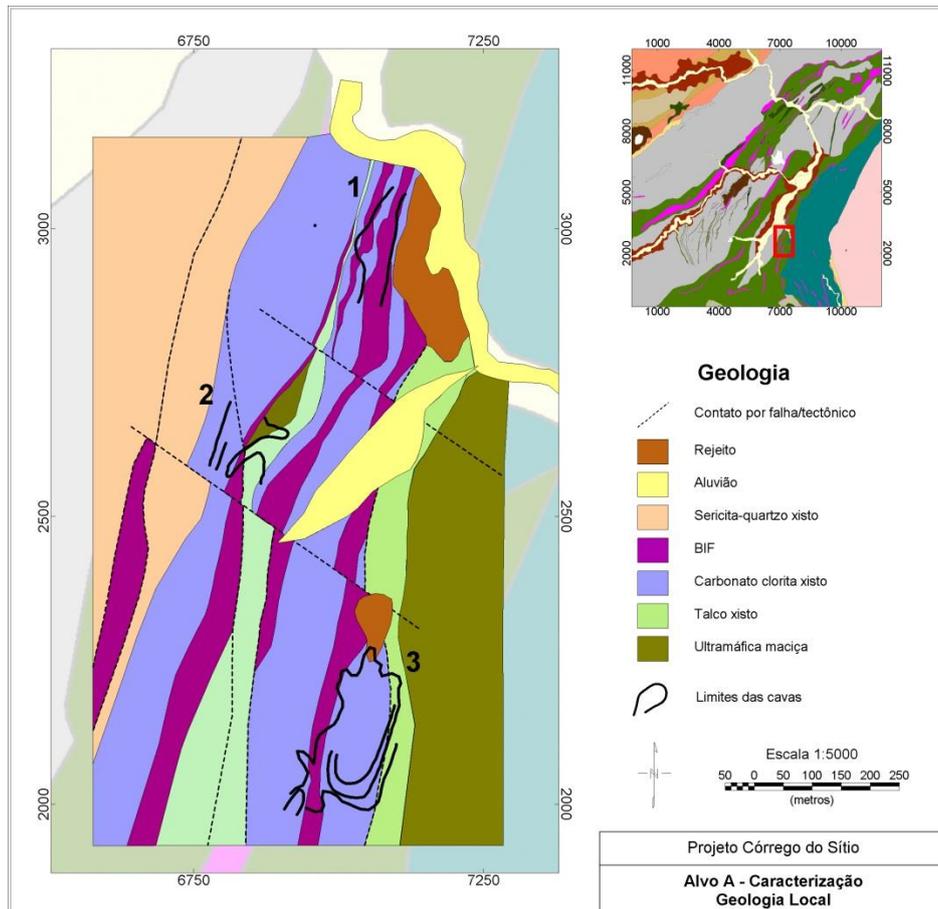


Figura 88: Geologia local e cavas na região do alvo A.

Nesta área, são observadas diversas lentes de BIF de espessura métrica a decamétrica. A hematita é o óxido de ferro dominante e magnetita e goetita subordinadas. O contato entre as BIF e os demais litotipos é gradacional e o nível de

intemperismo torna seu mapeamento e individualização difícil. Falhas foram mapeadas na área, porém há incerteza considerável em sua localização e orientação (Ferreira, 2013).

A área de interesse situa-se na porção sul do alinhamento Brumal, um alinhamento de lentes de BIF de direção N-NE que se estende até a mina do Pilar ao NE (Figura 89). Associadas a estas BIF estão diversas ocorrências de ouro históricas e antigas cavas, sendo que as cavas 1, 2 e 3, foram os focos da exploração no local.

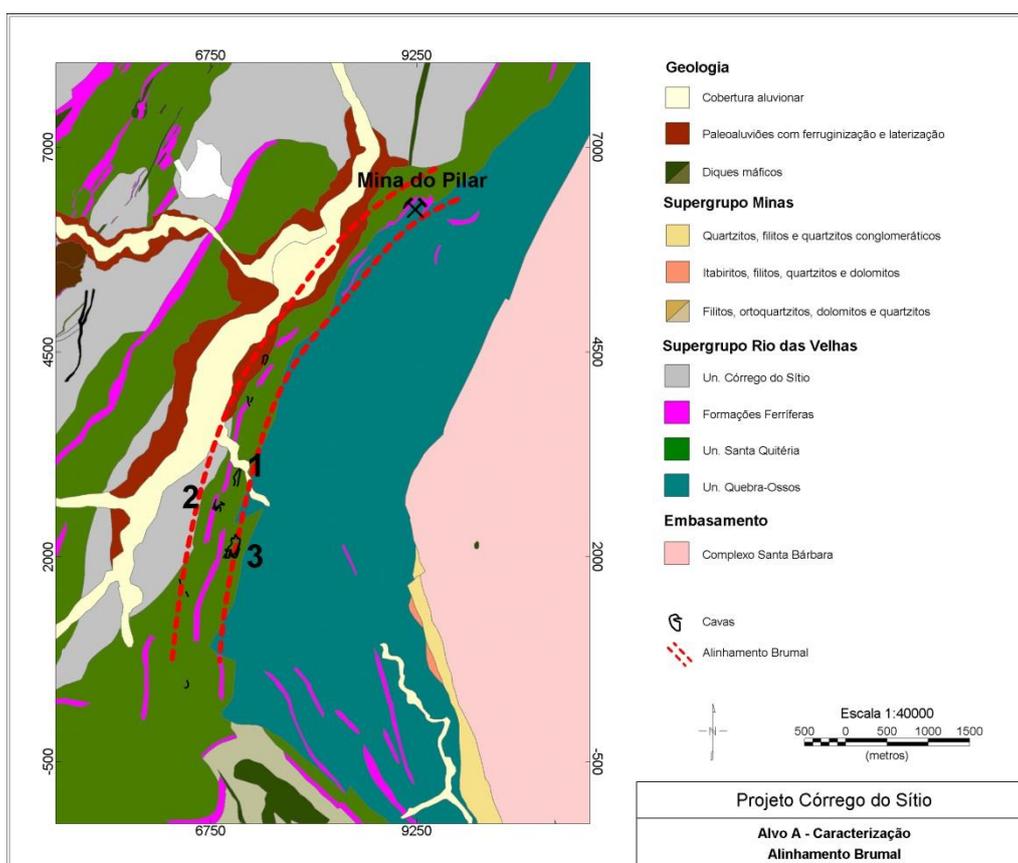


Figura 89: Alinhamento Brumal, localização da Mina do Pilar e cavas sobre geologia regional.

Sondagens próximas à cava 1 indicam que a mineralização no alvo A é caracterizada por zonas de venulação intensa de quartzo com sulfetos em grande quantidade, principalmente pirrotita, associadas a zonas de silicificação e carbonatização em BIF hidrotermalizadas, principalmente, e em clorita xistos laterizados, subordinadamente. O ouro está associado à arsenopirita, cuja ocorrência condiciona os maiores teores (Ferreira, 2013).

Corpos de minério foram modelados a partir dos furos de sondagem efetuados. Consistem em lentes de orientação NNE, aflorantes e subverticais, de mergulho para

SEE. Entretanto, a exploração foi limitada aos arredores imediatos da cava 1 e o foco agora se concentra na avaliação da continuidade da mineralização identificada e sua relação com as demais ocorrências.

### 3.5.3. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS

A Figura 90 mostra a comparação entre a geologia local e os dados geofísicos. Nota-se que as BIF estão associadas a anomalias magnéticas lineares de amplitude variável, sendo que apenas uma das lentes exibe anomalia magnética de boa continuidade e correlação com o mapeamento local.

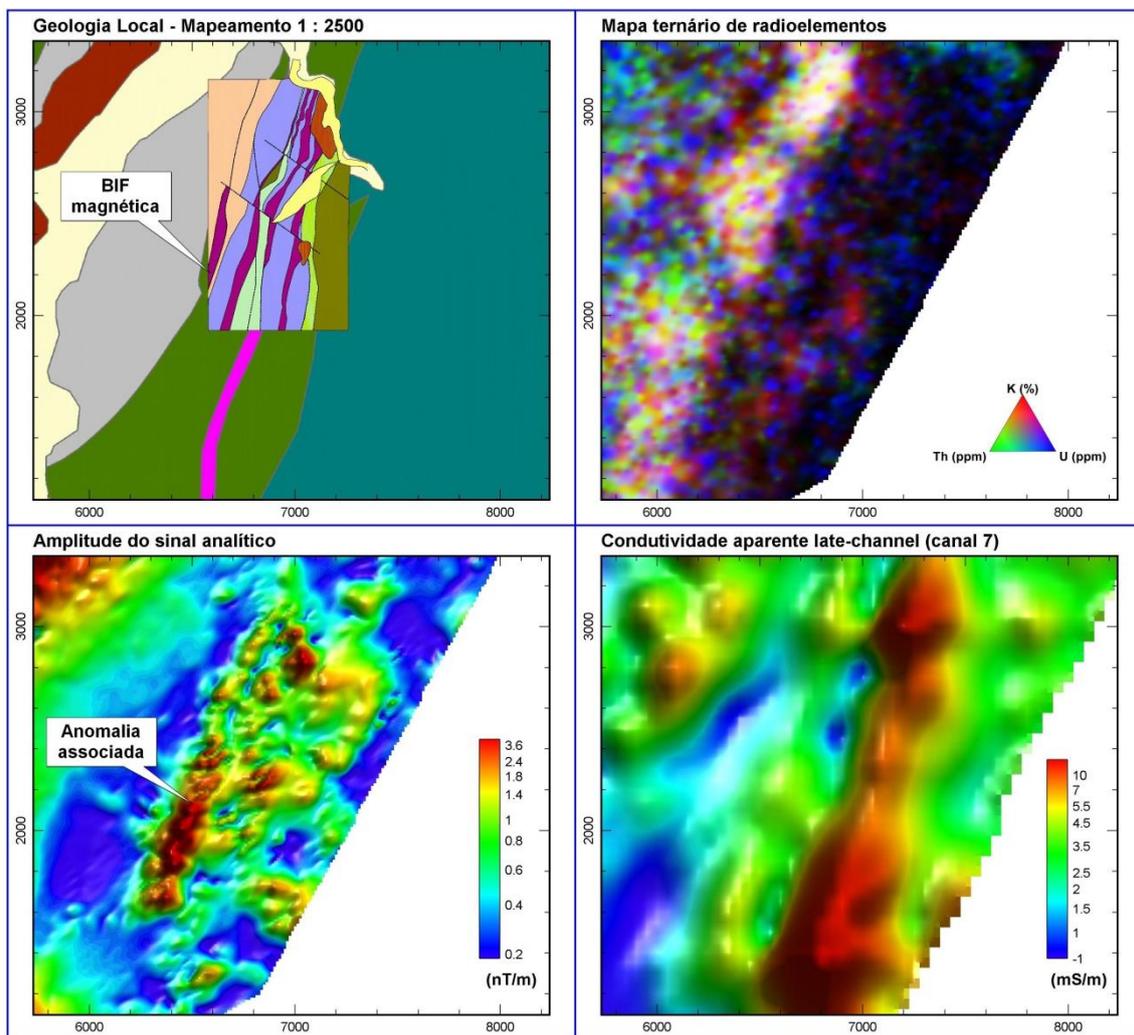


Figura 90: Comparação entre geologia local e dados aerogeofísicos na região do alvo A.

Comparadas às demais BIF da área do projeto Córrego do Sítio, as lentes encontradas nesta área estão relacionadas a anomalias magnéticas de baixa amplitude, provavelmente devido ao alto nível de intemperismo e oxidação das BIF e sua pequena espessura.

A Figura 91 mostra que a BIF responsável pela maior anomalia magnética da área não é mapeada completamente. Esta apresenta anomalia normal, enquanto as demais lentes, a leste, estão associadas a anomalias reversas, padrão semelhante ao observado nos blocos SW, central e NE, onde BIF de anomalias intensas se situam a W-NW e BIF de anomalia reversa se situam a E-SE.

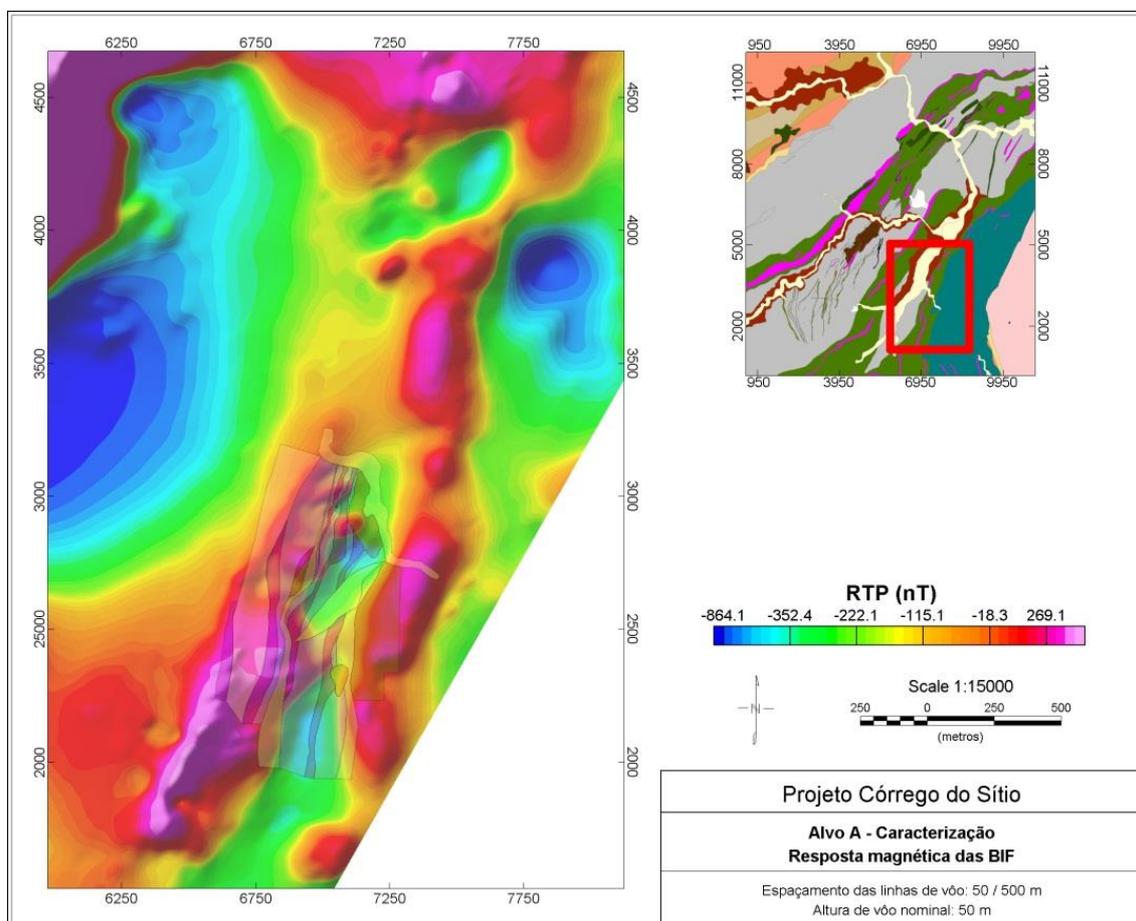


Figura 91: Mapeamento local sobre dados de redução ao pólo na região do alvo A.

As ultramáficas da unidade Quebra Ossos não apresentam resposta magnética bem definida e estão associadas a anomalias de baixa amplitude e alta frequência. Apenas o contato entre as ultramáficas e a unidade Santa Quitéria gera uma anomalia magnética consistente (Figura 91). Os demais litotipos na área não apresentam resposta magnética.

Os dados EM na região do alvo A são caracterizados por um alinhamento de anomalias EM positivas, associado às anomalias magnéticas mal definidas das lentes de BIF do alinhamento Brumal (Figura 92).

Diversas anomalias ao longo do alinhamento Brumal receberam boa classificação, sendo que a anomalia próxima à cava 1 foi classificada como anomalia de nota “A” e superou as anomalias relacionadas a todos os outros alvos do projeto Córrego do Sítio, incluindo os altamente condutivos depósitos São Bento e Shaft (SPECTREM Air, 2002).

O alinhamento Brumal, na região do alvo A, apresenta duas anomalias marcantes. Uma localizada em seu extremo SW, associada ao alvo PJ, ao sul da cava 3, e outra associada à cava 1. Há continuidade sutil entre ambas, caracterizada por anomalias de amplitude moderada a baixa, onde se localizam as cavas 2 e 3. Outra anomalia sutil, associada a alvo NA, está situada a norte da anomalia da cava 1 (Figura 92).

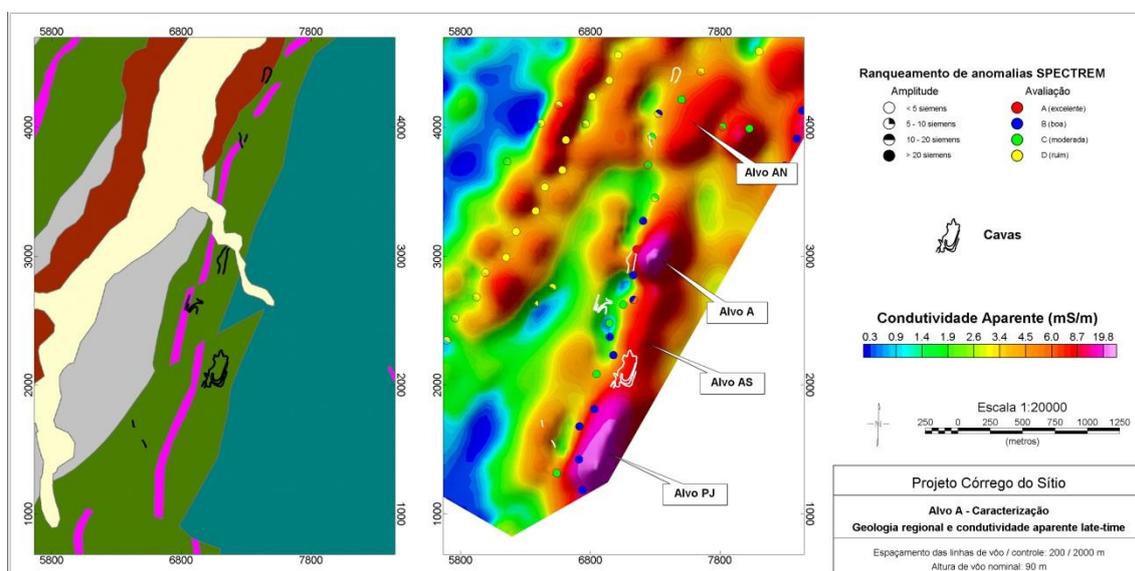


Figura 92: Geologia regional (à esquerda), dados de condutividade aparente *late-time* (canal 7, à direita) e ranqueamento de anomalias EM.

Cook (2003) modelou o alinhamento de anomalias EM como uma série de placas de Maxwell paralelas que indicam a presença de uma zona condutora contínua, de extensão em profundidade considerável, que se estende do alvo PJ até a cava 1. Os resultados foram revistos e as placas apresentadas na Figura 93.

Apenas a placa relacionada à melhor anomalia EM, no limite norte da cava 1, foi testada com furos de sondagem. Teores auríferos significativos com boa correlação com a geometria do modelo foram encontrados e conferem confiabilidade às placas modeladas. As demais placas indicam que a mineralização condutiva já testada na cava

Ápis se estende para NE e SSW e se torna mais intensa no extremo SW. São alvos que permanecem em aberto.

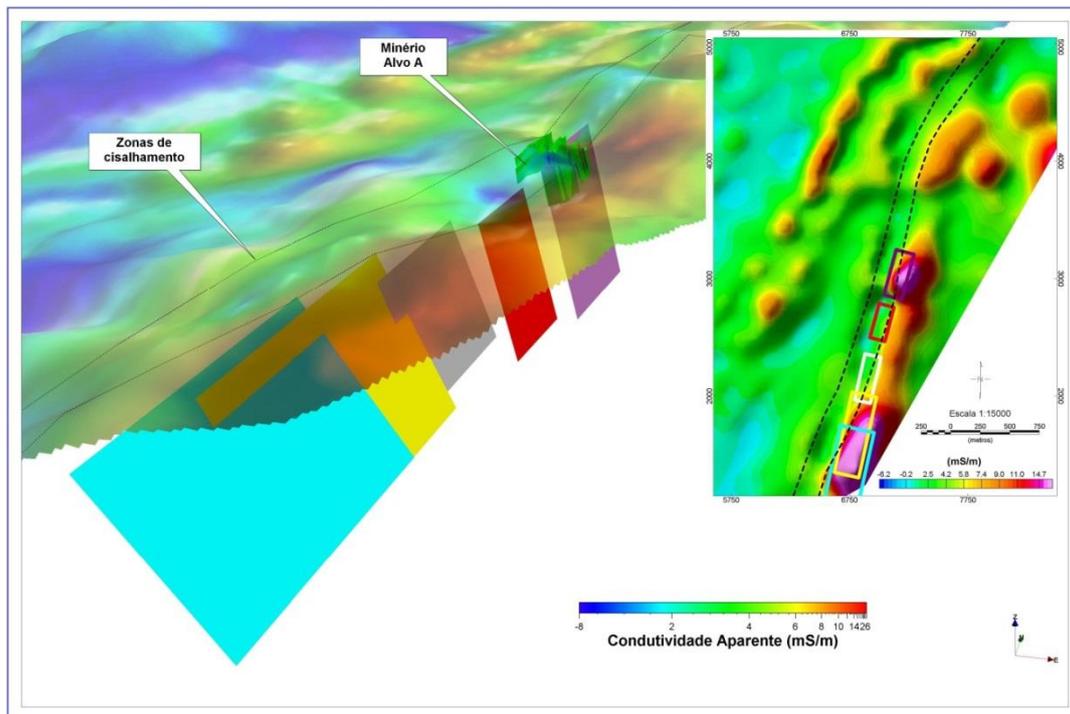


Figura 93: Placas de Maxwell usadas na modelagem das anomalias associadas ao alinhamento Brumal sob dados de condutividade aparente late-channel (canal 7) sobre a topografia. Vista para NW. As zonas de cisalhamento interpretadas estão representadas como linhas pretas tracejadas. O mapa à direita apresenta os mesmos elementos em planta.

Os dados gamaespectrométricos definem claramente o contato entre as unidades Córrego do Sítio e Santa Quitéria, além de picos pontuais de concentração de potássio dentro da zona de baixas contagens relacionada às unidades Santa Quitéria e Quebra Ossos. O contato entre as unidades Santa Quitéria e Quebra Ossos é sutil, sendo a anomalia magnética um indicador mais eficiente de sua localização (Figura 91).

Os dados de concentração de potássio são dominados pela resposta dos xistos da unidade Córrego do Sítio. Já o mapa de razão Th/K mostra uma anomalia linear positiva associada às anomalias EM e alinhada em relação à direção geral das anomalias magnéticas e cavas antigas, se estendendo em direção a NNE (Figura 94).

Esta anomalia está associada a uma crista no modelo digital de terreno, excluindo efeitos topográficos. Portanto, a anomalia é possivelmente relacionada a uma área de enriquecimento em potássio devido a alteração hidrotermal.

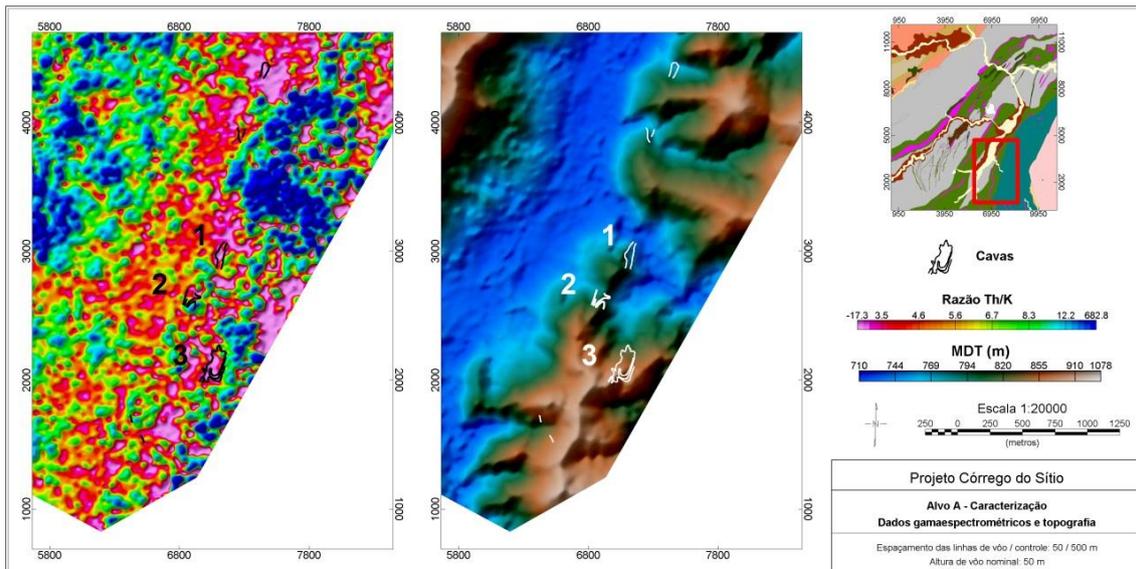


Figura 94: Comparação entre os dados de razão Th/K e topografia na região do alvo A.

A Figura 95 mostra que as anomalias EM identificadas estão associadas a zonas de atenuação nos dados magnéticos, localizadas a leste da BIF magnética indicada na Figura 90.

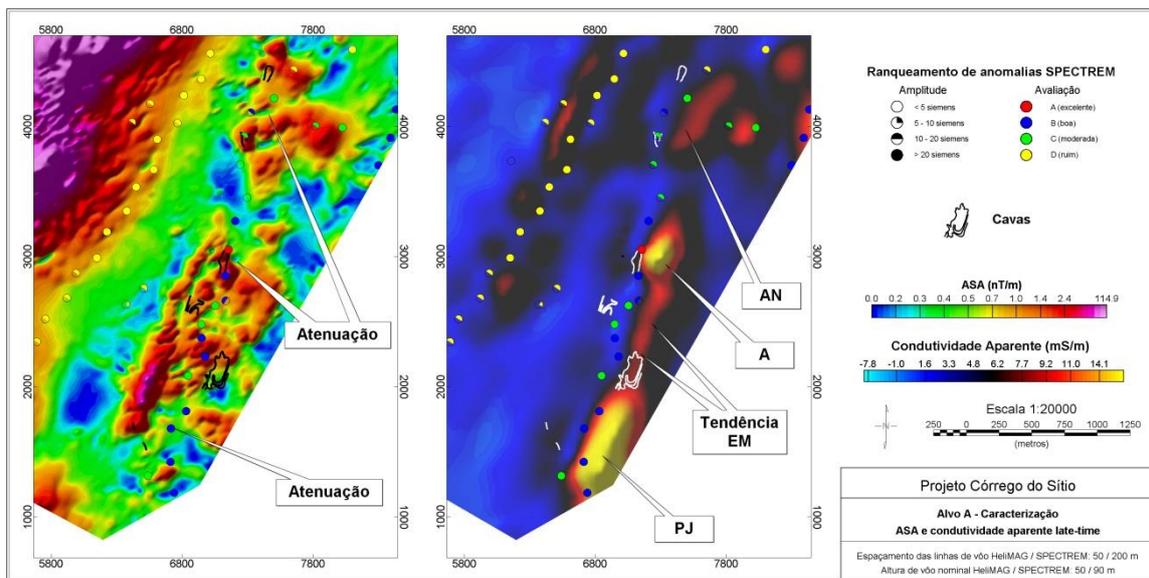


Figura 95: Comparação entre dados de amplitude do sinal analítico (à esquerda) e condutividade aparente *late-time* (canal 7, à direita). As cavas e o ranqueamento de anomalias EM também estão representados em ambos os mapas.

A Figura 96 mostra que a faixa de enriquecimento em potássio identificada está associada às demais anomalias identificadas ao longo do Alinhamento Brumal. Há uma forte correlação com o alinhamento das anomalias EM e com a posição das cavas, o que sugere que as zonas de desmagnetização, que contém os condutores, estão associadas a zonas de enriquecimento potássico aflorantes ou subaflorantes.

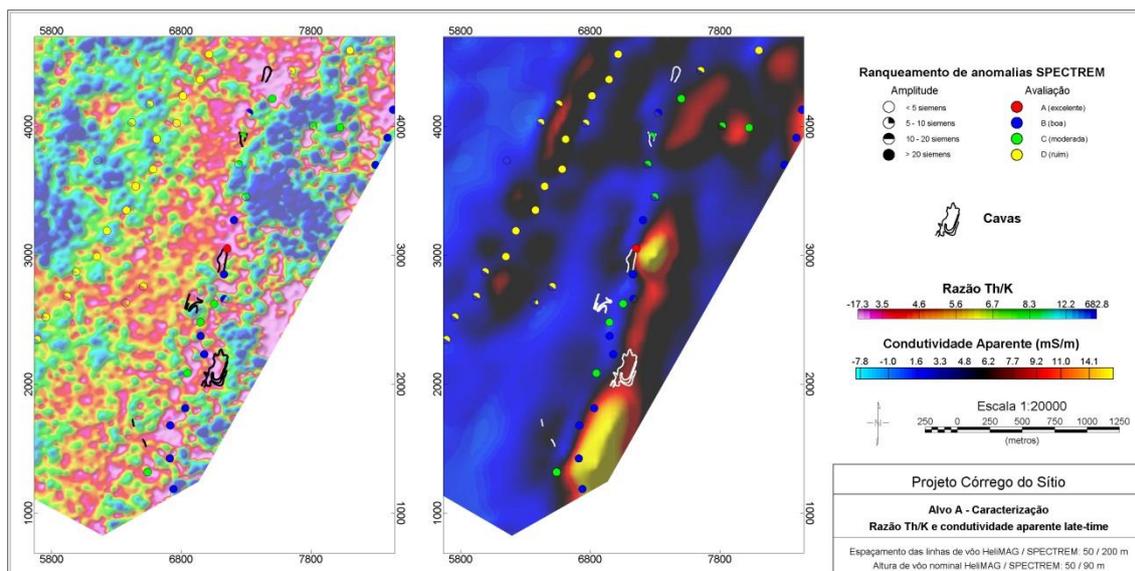


Figura 96: Comparação entre dados de razão Th/K (à esquerda) e condutividade aparente *late-channel* (canal 7, à direita). As cavas e o ranqueamento de anomalias EM também estão representados em ambos os mapas.

A Figura 97 mostra que dois lineamentos magnéticos de direção aproximada NNE-SSW apresentam associação com as anomalias magnéticas, EM e gamaespectrométricas, sugerindo que a mesma relação entre depósitos do tipo São Bento e zonas de cisalhamento observada nos blocos SW, central e NE é encontrada nesta área. Portanto, os dois lineamentos da Figura 97 mapeados também são interpretados como zonas de cisalhamento, análogas àquelas interpretadas nos blocos principais.

Medidas de susceptibilidade magnética e condutividade elétrica foram feitas em testemunhos de sondagem a fim de caracterizar a resposta geofísica da mineralização no alvo A e comparar com a interpretação dos dados aéreos. A Figura 98 mostra os resultados para o furo de sondagem F12, executado para testar a anomalia EM da cava 1 e a placa modelada para a anomalia do alvo A (Figura 97).

Os valores de concentração de ouro estão fortemente correlacionados com picos de condutividade elétrica e susceptibilidade magnética, o que indica que o minério está diretamente associado à fonte da anomalia EM observada, os intervalos sulfetados, e é moderadamente magnético. A boa correlação entre susceptibilidade magnética e teor de ouro indica que os melhores teores estão associados a intervalos pirrotíticos.

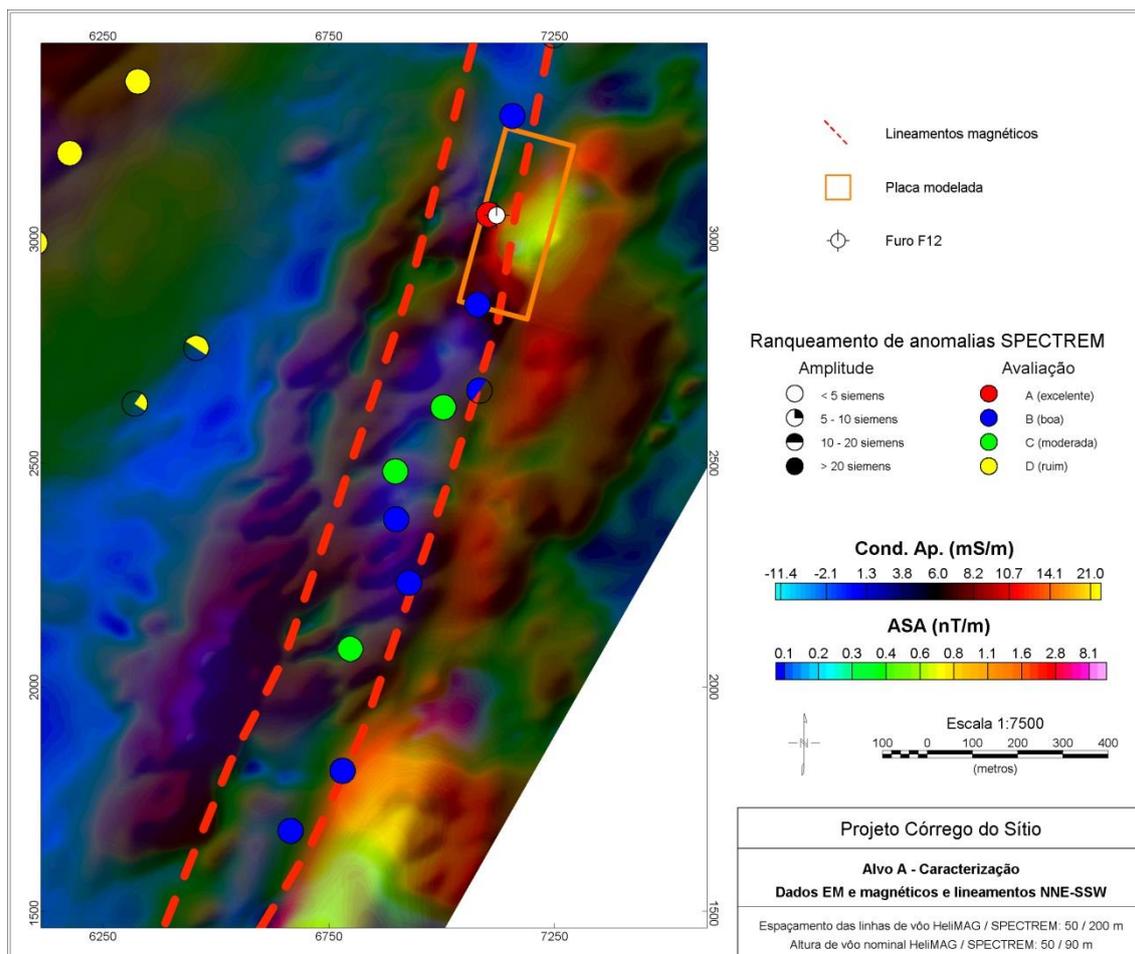


Figura 97: Dados de condutividade aparente *late-channel* (canal 7) sobre amplitude do sinal analítico, zonas de cisalhamento interpretadas e ranqueamento de anomalias EM.

Picos de ambas as propriedades físicas também são observados nos intervalos de xisto grafitoso, mas estes estão sempre associados à presença de sulfetos, o que indica que o xisto grafitoso não alterado não apresenta contraste.

Um intervalo de BIF não magnética e veios de quartzo sulfetados estéreis foram interceptados a 50 metros de profundidade, mas não apresentam teores econômicos. A ausência de picos de condutividade elétrica e susceptibilidade magnética indica que a sulfetação é baixa, explicando os teores obtidos.

Conclui-se, então, que não há outra fonte de anomalias EM relevante além dos intervalos sulfetados em BIF fortemente alteradas. No caso da susceptibilidade magnética, as bandas de pirrotita apresentam valores significantes, porém pequenos quando comparados às BIF originais (Tabelas 1 e 2), gerando um contraste negativo, diferentemente do que é inferido para o bloco NE.

Os produtos de alteração (veios de quartzo, talco xisto) presentes no furo apresentam valores muito baixos de susceptibilidade magnética e indicam que a alteração também é desmagnetizante. Entretanto, apenas a alteração associada a altos de condutividade elétrica apresenta teores econômicos. Assim, neste caso, os dados EM são uma ferramenta que possibilita a detecção de zonas prospectivas eficientemente neste caso.

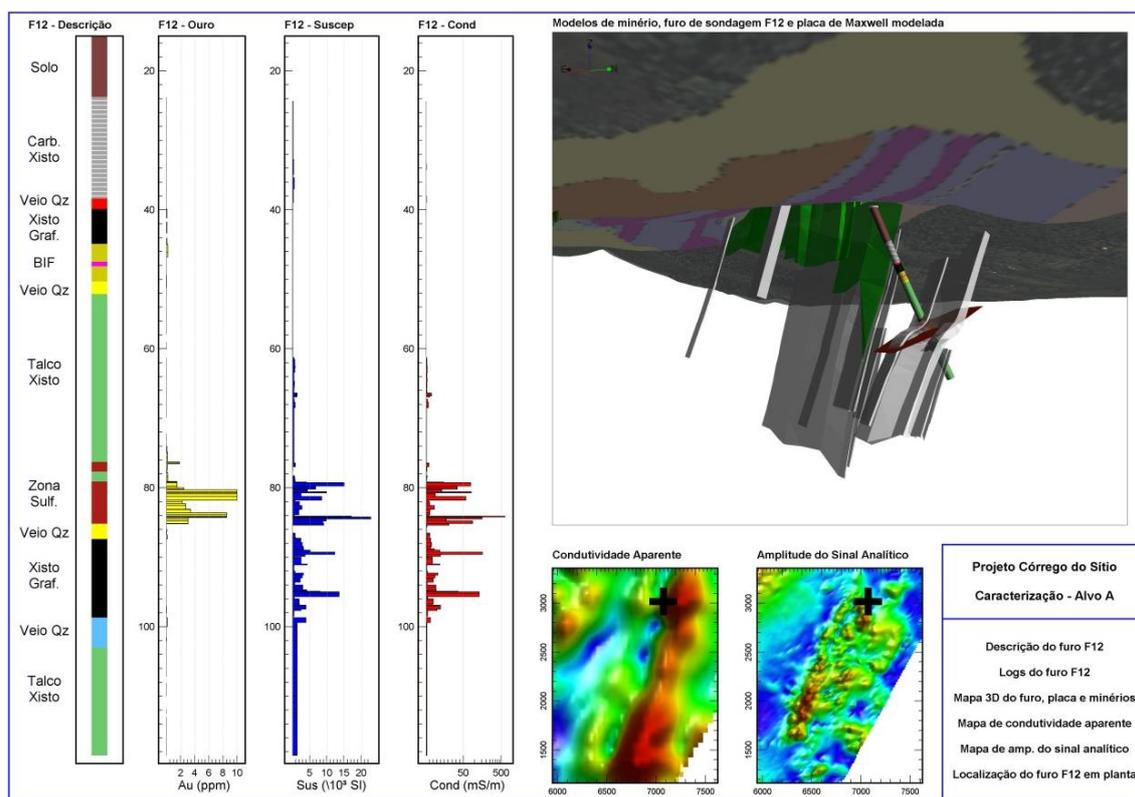


Figura 98: À esquerda, descrição e logs de susceptibilidade magnética, condutividade elétrica e concentração de ouro do furo de sondagem F12. À direita, visualização em 3D mostrando o furo modulado por condutividade e sua relação com os corpos de minério modelados. Abaixo, estão representados mapas de condutividade aparente late-channel (canal 7) e amplitude do sinal analítico, sendo a posição do furo representada pela cruz preta.

A relação entre as medidas petrofísicas e interpretação dos dados aéreos na região do alvo A é muito semelhante às observações feitas na interpretação dos dados no bloco central, no caso do depósito São Bento, o que indica que as mineralizações associadas às cavas no alinhamento Brumal ao longo das zonas de cisalhamento mapeadas são do tipo São Bento.

As figuras 99 e 100 mostram que os efeitos das falhas transcorrentes NWW-SEE e NNE-SSW mapeadas sobre os dados magnéticos e EM. As estruturas de ambas as direções têm efeito significativo sobre a geometria das anomalias magnéticas e EM.

No caso dos dados magnéticos, as falhas NNW-SSE aparentam ter maior impacto e limitam zonas de magnetismo distinto. No caso dos dados EM, as transcorrências NWW-SEE limitam as anomalias. Além disso, nota-se que o alinhamento de anomalias EM apresenta-se levemente deslocado para leste próxima à cava 1.

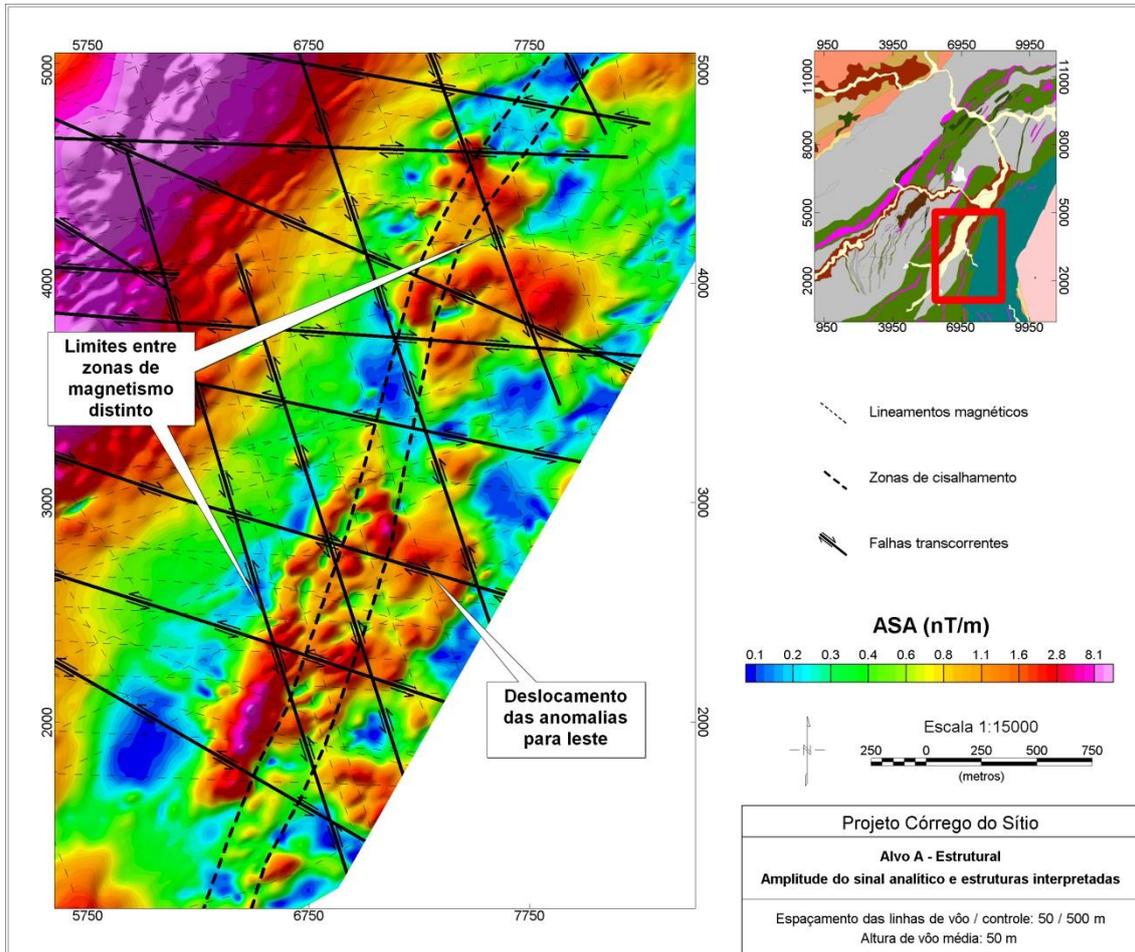


Figura 99: Falhas transcorrentes, zonas de cisalhamento e lineamentos magnéticos (linhas pretas) sobre dados de amplitude do sinal analítico.

O mesmo padrão intermitente das anomalias EM e interação entre falhas transcorrentes e variação de amplitude das anomalias magnéticas dos blocos SW, central e NE são observados no alvo A. Desta forma, a deformação inferida a partir dos dados geofísicos dos demais blocos, que sugere a formação de frentes de empurrão num regime transpressivo, se aplica neste caso.

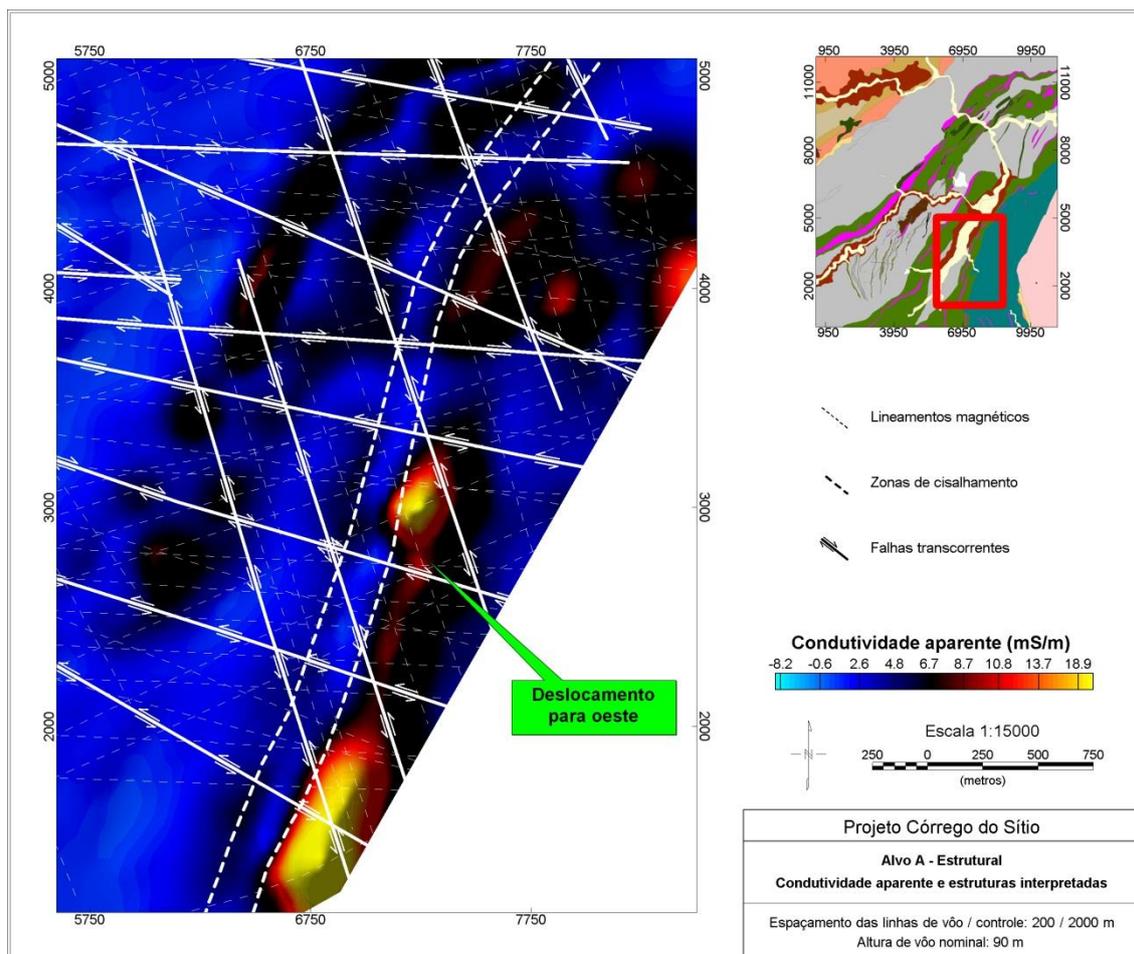


Figura 100: Falhas transcorrentes, zonas de cisalhamento e lineamentos magnéticos (linhas brancas) sobre dados de condutividade aparente late-channel (canal 7) na região do alvo A.

A Figura 101 mostra uma comparação entre os dados magnéticos e EM no bloco central e no alvo A. Nota-se como a resposta geofísica do depósito São Bento se assemelha à do alvo A. Ambas as áreas apresentam zonas de cisalhamento interpretadas que controlam as anomalias magnéticas e EM, com direção condizente com os lineamentos mineralizados, a mesma correlação negativa entre as respostas magnética e EM e a mesma tendência de enriquecimento em potássio.

A Mina do Pilar está localizada no extremo norte do alinhamento Brumal e das zonas de cisalhamento interpretadas. Sua mineralização, assim como na mina São Bento, está associada a hidrotermalização de BIF (AngloGold Ashanti, 2013).

A Figura 102 mostra que a região da mina do Pilar também apresenta a correlação negativa entre dados magnéticos e EM, associada a anomalias de razão Th/K, controladas pelas zonas de cisalhamento mapeadas, assim como observado nos dados do alvo A. Isto sugere que a mineralização no alvo A pode representar uma de várias

mineralizações no alinhamento Brumal ao longo das zonas de cisalhamento interpretadas, de forma semelhante ao lineamento São Bento e as zonas de cisalhamento associadas nos blocos SW, central e NE. A mina do Pilar, no extremo NE do alinhamento Brumal, seria um análogo do alvo MP no bloco NE. Ambos são localizados no limite das zonas de cisalhamento, numa zona de complicação estrutural (figuras 76 e 89)

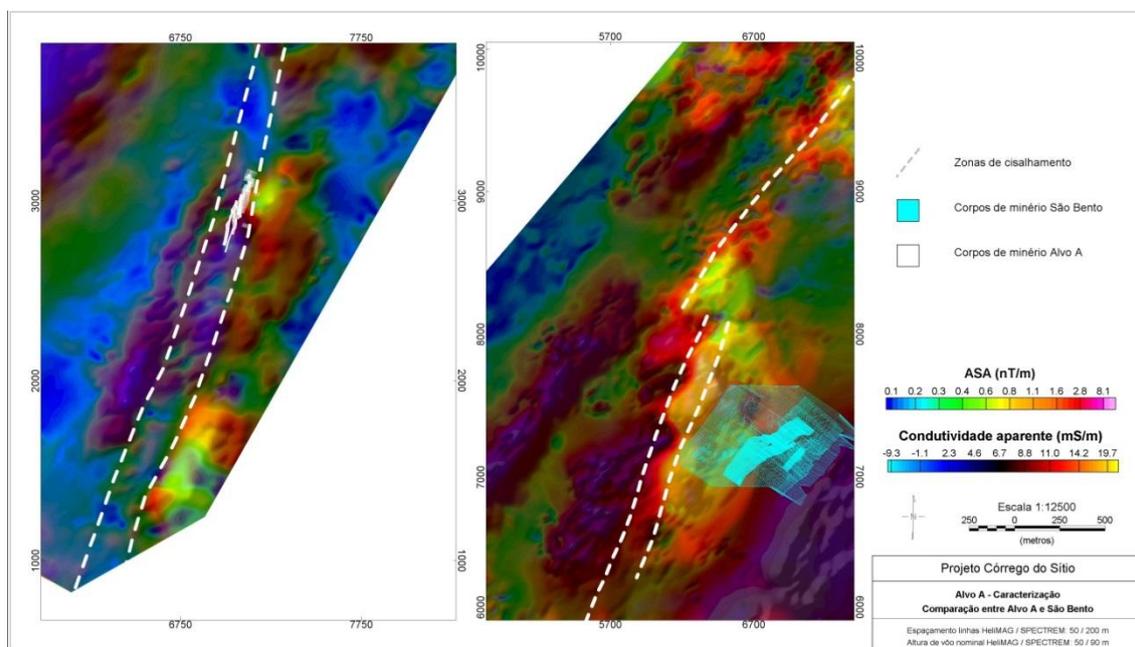


Figura 101: Comparação entre as respostas geofísicas dos alvos A, à esquerda, e São Bento, à direita. Ambos os mapas mostram dados de condutividade aparente sobre amplitude do sinal analítico. Os corpos de minério do depósito São Bento e alvo A estão representados em azul e branco, respectivamente.

A Figura 103 mostra a comparação entre o alinhamento CdS e as anomalias associadas ao alinhamento Brumal. Nota-se que têm direção aproximadamente paralela, incluindo inflexão para NE na porção central, e a mesma correlação com os demais dados geofísicos, como discutido anteriormente.

Supõe-se, então, que as zonas de cisalhamento interpretadas no alvo A, que se estendem desde o alvo PJ até a Mina do Pilar, foram formadas da mesma maneira que aquelas nos blocos NE, central e SW e podem estar associadas a um possível lineamento mineralizado análogo ao lineamento São Bento.

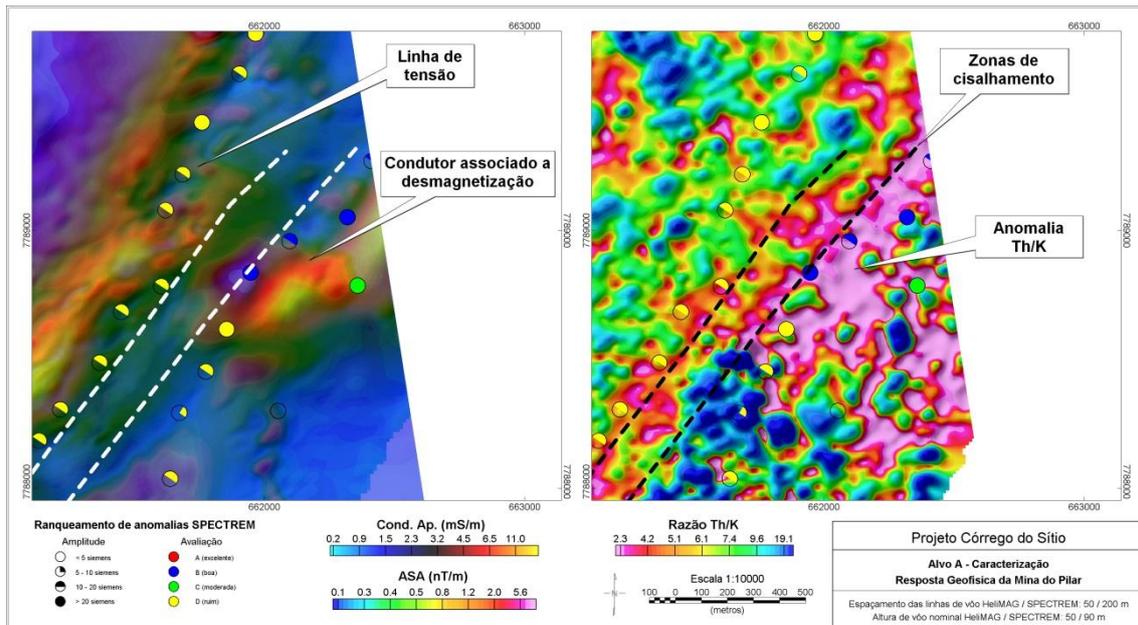


Figura 102: Resposta geofísica da Mina do Pilar, localizada no limite norte do alinhamento Brumal. Dados EM sobre amplitude do sinal analítico à esquerda e dados de razão Th/K e localização e ranqueamento das anomalias EM. As linhas tracejadas se referem às zonas de cisalhamento interpretadas.

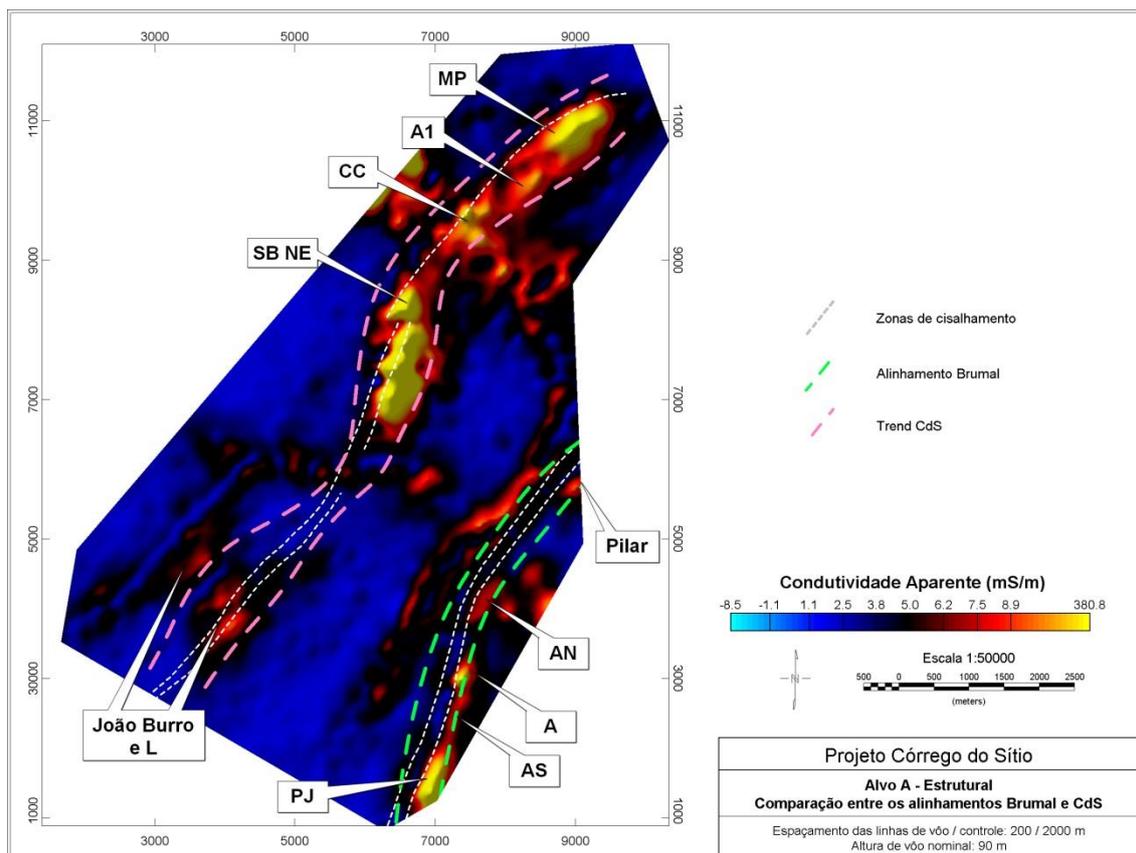


Figura 103: Comparação entre os alinhamentos Brumal e Córrego do Sítio e zonas de cisalhamento no alvo A e blocos SW, central e NE. Os condutores identificados foram apontados.

A anomalia do alvo PJ, mais intensa e extensa, pode representar uma zona de mineralização mais possante, ou espessa, e deve ser considerada prioritária. A tendência

entre as anomalias A e PJ (alvo AS) pode estar relacionada a mineralização oxidada, ou menos espessa. A anomalia AN também apresenta as características observadas nas demais áreas de interesse e sugere que a mineralização da cava 1 se estende em direção a NE.

Neste caso, não foram identificadas assinaturas geofísicas possivelmente associadas a mineralização do tipo Córrego do Sítio, apenas de mineralizações tipo São Bento.

Assumindo que as zonas de cisalhamento interpretadas de fato se referem a estruturas sinclínicas análogas aos lineamentos mineralizados a NW, a Figura 104 mostra um modelo esquemático que poderia explicar as características geofísicas observadas para os blocos SW, central e NE, no caso da mineralização tipo São Bento.

Na Figura 104, a camada verde representada corresponde ao pacote de BIF reativas que hospeda os principais depósitos tipo São Bento nos blocos principais da área de interesse. As dobras isoclinais observadas são consequências da sobreposição das deformações das orogênias Rio das Velhas, Transamazônica e Brasiliana. O alinhamento Brumal corresponde a afloramentos de BIF presentes numa dobra análoga àquela que hospeda os depósitos nos blocos principais.

A Orogenia Brasiliana foi responsável pela criação das superfícies de descolamento e falhas transcorrentes, consequências da compressão diferencial sofrida pelas rochas na área durante esta fase de deformação. Locais onde a compressão foi máxima deram origem a frentes de empurrão, representados pelas elevações, que deram origem aos afloramentos de BIF observados atualmente.

Nas frentes de empurrão, a concentração de solução hidrotermal oriunda das zonas de cisalhamento foi máxima durante a remobilização induzida pela Orogenia Brasiliana, dando origem a mineralizações mais ricas e, conseqüentemente, as anomalias EM observadas.

Desta forma, explica-se o padrão intermitente de anomalias EM, já que apenas as regiões mais prospectivas ao longo dos alinhamentos prospectivos, as armadilhas estruturais, estariam associadas a mineralização mais intensa e, conseqüentemente, anomalias EM. Além disso, a deformação induzida pelas falhas transcorrentes também

provocou alterações em escala local devido a deslocamentos verticais entre blocos. Estes, porém, não foram representados no modelo.

Entretanto, é possível que as frentes tenham sido formadas durante o evento mineralizador, anterior à Orogenia Brasileira, e que a transpressão brasileira interpretada apenas deformou as estruturas pré-existentes. Desta forma, a mineralização se deu nas armadilhas formadas no pico metamórfico, durante o período de relaxamento do Orógeno Rio das Velhas. Os dados não permitem a diferenciação entre os eventos neste caso.

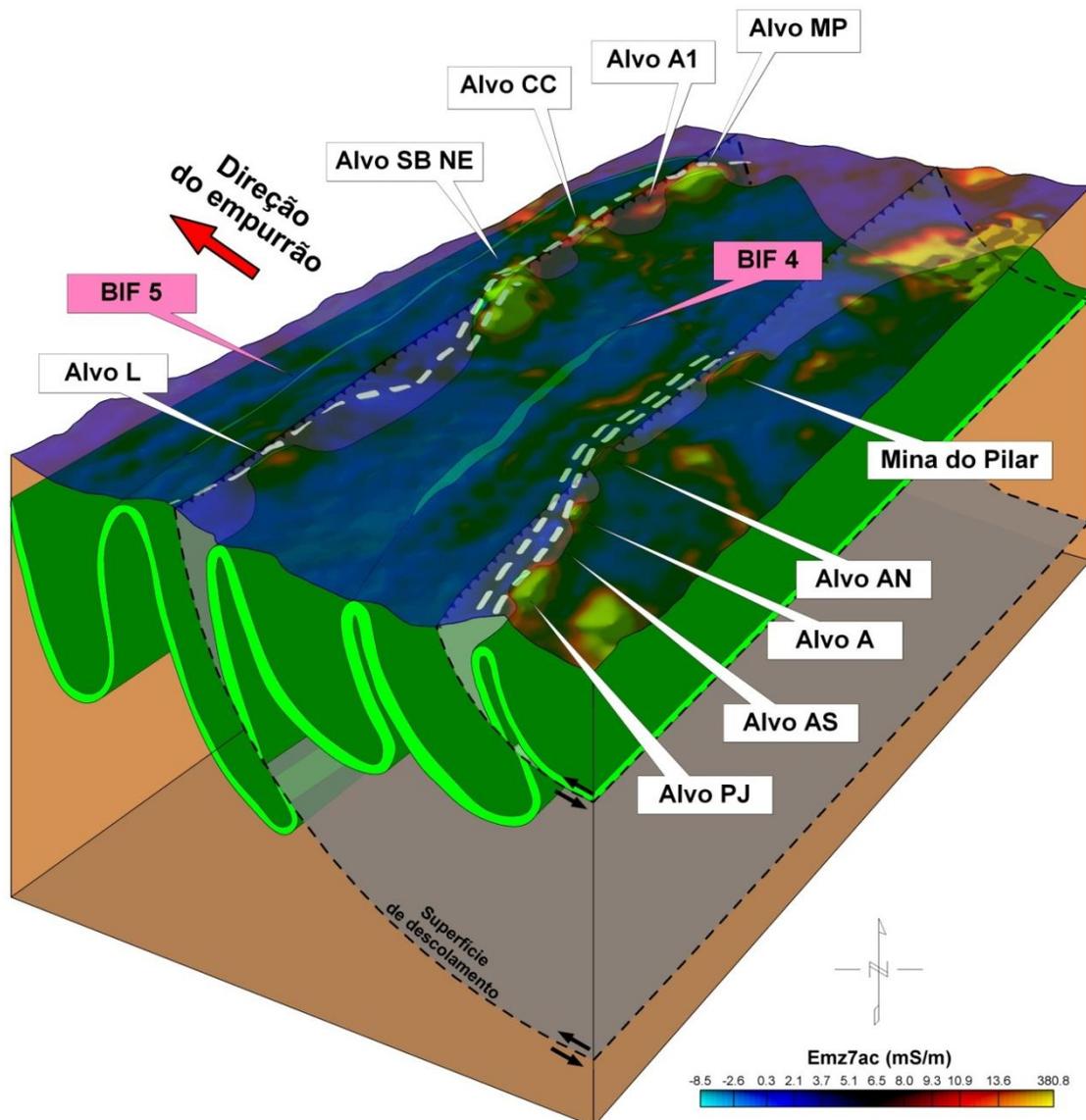


Figura 104: Seção esquemática do modelo de frentes de empurrão proposto para o pacote de BIF (camada verde) e sua relação com os EM. A camada verde representa o pacote de BIF prospectivo que hospeda os principais depósitos na região sob dados de condutividade aparente *late-channel* (canal 7) transparentes sobre a topografia. As linhas tracejadas brancas representam as zonas de cisalhamento interpretadas. Os planos em cinza representam zonas de descolamento geradas pela compressão brasileira.

Desta descrição se exclui as mineralizações do tipo Córrego do Sítio e Cristina, já que não apresentam resposta EM bem definida. De qualquer maneira, a geometria esperada para as estruturas prospectivas no caso de depósitos tipo São Bento permite a extrapolação da geometria das hospedeiras dos outros depósitos, já que há uma correlação consistente entre suas posições relativas, como observado no exemplo dos depósitos São Bento e Córrego do Sítio nos blocos SW, central e NE.

Quatro altos estruturais lineares aproximadamente paralelos, associados a pacotes de BIF, são observados na área de interesse (Figura 105). São cristas relacionadas às BIF do alvo A (alinhamento Brumal) e aos demais alinhamentos nos blocos SW, central e NE.

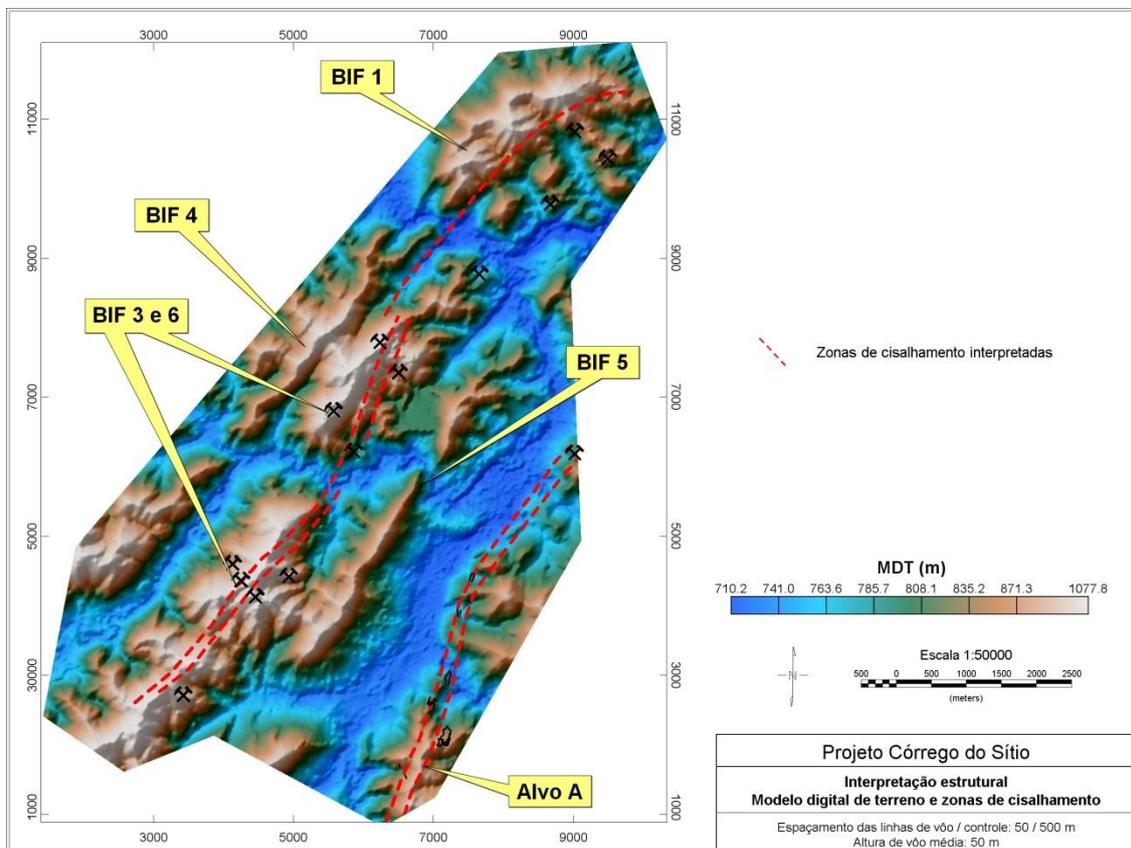


Figura 105: Efeitos da evolução estrutural da área do Projeto Córrego do Sítio sobre a topografia atual e zonas de cisalhamento interpretadas.

Estas cristas representam a expressão superficial das frentes de empurrão criadas em escala regional e são um indicativo direto da validade do modelo estrutural considerado. É também possível observar quebras e deslocamentos horizontais destas cristas na direção NWW-SEE, relacionadas à transpressão gerada durante a deformação.

Sabe-se que nem todos os alinhamento de BIF são prospectivos, apenas aqueles relacionados às BIF 3 e 6, parte da BIF 1 e às BIF do alvo Ápis e alinhamento Brumal. Esta diferença é atribuída à falta de interação com estruturas de direção NNE-SSW, possíveis zonas de cisalhamento, que condicionam a formação de depósitos nesta área.

#### **4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES**

A área do Projeto Córrego do Sítio apresenta grande potencial aurífero, porém ainda contém áreas pouco exploradas e apresenta evolução geológica complexa e incerta. Trabalhos centrados em exploração geofísica certamente beneficiariam a exploração por depósitos auríferos nesta área, porém são raros e, geralmente, de escala regional. A aquisição de dados aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos de alta resolução durante o aerolevanteamento HeliMAG permitiu que esta deficiência fosse abordada com este trabalho.

Este trabalho consistiu na análise dos dados HeliMAG e sua integração com dados eletromagnéticos históricos de forma a contribuir para o entendimento geológico da área de interesse, caracterizar os depósitos lá presentes, avaliar seus controles estruturais e definir um modelo exploratório para as mineralizações dominantes a ser aplicado em áreas pouco exploradas, de modo a orientar programas de exploração futuros.

Inicialmente, foi estabelecido um padrão de resposta para os litotipos dominantes da área e um mapa de interpretação qualitativa foi criado a partir da integração de dados gamaespectrométricos e magnéticos. Devido ao contraste petrofísico variável entre as unidades dominantes e a grande variabilidade das propriedades físicas das BIF, devido a mudanças de fácies, não foi possível adicionar valor significativo ao mapeamento geológico. Entretanto, foram mapeadas algumas feições que diferem daquelas mapeadas e têm impacto considerável na exploração aurífera, como as lentes de BIF e sua geometria na região do bloco NE e alvo A.

A análise dos lineamentos magnéticos mapeados indica um arcabouço estrutural complexo, cujas famílias de estruturas principais sugerem que uma combinação entre as principais teorias de evolução estruturais para esta área é adequada para explicar as observações.

Foram identificados, basicamente, lineamentos associados a estruturas D2 de Baltazar & Zucchetti (2007), interpretadas como zonas de cisalhamento, e duas famílias de falhas transcorrentes, cuja relação de corte e associação a demais lineamentos indicam que representam estruturas transamazônicas e brasileiras.

A dispersão das direções dos lineamentos apenas ao redor da direção principal da Orogenia Brasileira indica que esta reativou as estruturas transamazônicas presentes e que houve variações locais no esforço exercido sobre os blocos principais da área de interesse, possivelmente associadas a efeitos paleotopográficos ou à forma do Complexo Santa Bárbara.

O modelamento das anomalias magnéticas das BIF 4 e da BIF magnética do alvo A indica geometrias complexas, com mudanças abruptas associadas a falhas transcorrentes brasileiras. A rotação anti-horária no mergulho dos modelos magnéticos em direção ao NE indica que houve compressão diferencial ao longo do Anticlinal Conceição, mais suave a NE e intensa a SW, durante a Orogenia Brasileira, dando origem ao contexto transpressional inferido pela interpretação dos lineamentos magnéticos. Evidências desta rotação também são observadas na modelagem de dados EM nos blocos SW, central e NE.

Frentes de empurrão foram propostas para explicar mineralizações na região oeste do QF e podem ter se desenvolvido também na área de interesse em decorrência desta compressão diferencial. Movimentos relativos entre blocos estruturais, associadas às falhas transcorrentes que promoveram basculamento das fontes magnéticas, foram inferidos a partir da interpretação quantitativa dos dados geofísicos e indicam que o bloco central foi soerguido em relação aos demais. Desta forma, explicam-se as diferenças nas importâncias relativas dos depósitos São Bento e Córrego do Sítio e dominância das unidades Santa Quitéria e Córrego do Sítio nos blocos principais e os alvos em profundidade nos blocos NE e SW.

Evidências da presença de frentes de empurrão foram também observadas na topografia, que indica que o depósito São Bento é hospedado na crista da frente de empurrão formada pelo soerguimento do bloco central. Diversos efeitos locais também foram notados, associados a variações bruscas nas intensidades de anomalias magnéticas. O controle estrutural sobre os depósitos é intenso e deve ser considerado durante a exploração por depósitos análogos.

O alvo associado à porção deslocada do depósito São Bento é um exemplo da importância da aplicação deste modelo na geração de alvos. Entretanto, as aplicações destas estruturas são várias. Assim como discutido, podem beneficiar análises hidrogeológicas e geomecânicas para o desenvolvimento das minas em operação.

A mineralização do tipo São Bento, dominante no bloco central, é associada a anomalias EM, a zonas de desmagnetização e, secundariamente, a zonas de enriquecimento potássico, localizadas ao longo de zonas de cisalhamento NNE-SSW interpretadas. Entretanto, foram identificadas exceções ao modelo exploratório definido, que devem ser verificadas assim que possível e indicam que o agrupamento de depósitos ao longo dos lineamentos estruturais mineralizados realizado a partir de observações geológicas classificou depósitos de resposta geofísica diferente como de mesma natureza geológica.

A interpretação dos dados na área do bloco SW mostrou que os depósitos do tipo Córrego do Sítio são caracterizados pela ausência de anomalias EM e magnéticas e forte correlação com dados gamaespectrométricos. Assim, a aerogamaespectrometria é o único método aerogeofísico capaz de identificar indícios deste tipo de mineralização.

A semelhança entre as associações geofísicas na área do alvo L e dos alvos no bloco central indica que o primeiro representa a possível extensão SW do lineamento São Bento, em direção ao bloco SW, buscada há anos pelas equipes de exploração. Modelamento dos dados EM indica que a fonte se localiza a NW dos corpos de minério do lineamento Córrego do Sítio e permanece não testada. De forma semelhante, foram identificados alvos do tipo São Bento na região do bloco NE, que indicam que o sistema orogênico compreendeu o Anticlinal Conceição em sua totalidade.

O alvo MP foi interpretado como do tipo São Bento, associado a sulfetação maciça em BIF paramagnéticas, devido à sua correlação direta entre dados EM e magnéticos e indica que é necessário considerar variações da resposta prevista para este tipo de depósito devido à natureza da BIF hospedeira inalterada. Alvos do tipo Córrego do Sítio também foram identificados, porém estes dizem respeito apenas a possíveis zonas de alteração relacionadas ao depósito, e não ao minério em si. Portanto, podem estar associadas a zonas alteradas estéreis. De qualquer forma, as anomalias de razão Th/K do lineamento Córrego do Sítio suporta a interpretação da abrangência regional do sistema mineralizador inferido a partir da distribuição de alvos do tipo São Bento.

A associação entre anomalias EM, magnéticas e gamaespectrométricas, ao longo de zonas de cisalhamento que cortam lentes de BIF na região do alvo A, indica que representam mineralização semelhante àquela da mina São Bento. A comparação entre furos de sondagem próximos a antigas cavas de garimpo, medidas petrofísicas feitas em testemunhos de sondagem e medidas petrofísicas em amostras de mineralizações análogas suporta esta conclusão.

A semelhança entre o controle estrutural exercido pelas zonas de cisalhamento e falhas transcorrentes nos blocos principais e alvo A e suas consequências na topografia e a comparação entre a geometria dos alinhamentos CdS e Brumal e das zonas de cisalhamento associadas sugere que o alinhamento Brumal corresponde ao afloramento de uma dobra análoga àquela que hospeda os depósitos nos blocos principais da área e pode representar um novo conjunto de depósitos a serem explorados no futuro, sendo a mina do Pilar a única operação em existência ao longo da estrutura.

A interpretação de uma estrutura análoga àquela amplamente explorada nos blocos principais do Projeto Córrego do Sítio abre novas oportunidades para a exploração no QF, já que mostra que a identificação de estruturas regionais e a avaliação de seu contexto geofísico em termos dos modelos exploratórios desenvolvidos podem permitir a identificação de um sistema mineralizador de escala regional, com diversas ocorrências ao longo da estrutural principal. A aquisição de dados aerogeofísicos de alta resolução foi fundamental para as análises desenvolvidas e este trabalho mostra como este tipo de levantamento pode adicionar valor a projetos em ambiente *greenfields* e *brownfields*.

Uma lista de alvos foi criada a partir das interpretações (Tabela 3). Foram considerados, principalmente, alvos do tipo São Bento, devido à boa resposta a métodos geofísicos, mas também foram identificados alvos do tipo Córrego do Sítio. Prioridades foram atribuídas de acordo com a confiança na interpretação. Apesar de que dados geológicos foram consultados durante este trabalho, a interpretação se baseia principalmente em dados geofísicos. Assim, as conclusões devem ser testadas por programas de detalhamento e furos de sondagem.

<b>ALVO</b>	<b>CONTEXTO GEOFÍSICO</b>	<b>CONTEXTO GEOLÓGICO</b>	<b>PRIOR.</b>
<b>MP</b>	Anomalia magnética fraca isolada, associada a anomalia EM forte. Boa correlação com lineamentos magnéticos.	Limite NE do lineamento São Bento associado a complicação estrutural	1
<b>A1</b>	Zona de desmagnetização associada a anomalia EM moderada e anomalia gama consistente. Boa correlação com lineamentos.	Extensão de mineralização tipo São Bento ao longo da zona de cisalhamento interpretada.	2
<b>CC</b>	Anomalia magnética fraca isolada, associada a anomalia EM moderada e duvidosa. Boa correlação com lineamentos magnéticos.	Extensão de mineralização tipo São Bento ao longo da zona de cisalhamento interpretada.	3
<b>SB NE</b>	Deslocamento da anomalia EM do depósito São Bento para NW.	Extensão NE deslocada da mineralização São Bento	1
<b>L</b>	Anomalia EM associada a zona de desmagnetização e anomalia gama. Boa correlação com lineamentos magnéticos.	Extensão SW do lineamento São Bento em profundidade	1
<b>JB</b>	Anomalia EM moderada na porção sul dos corpos do depósito João Burro.	Extensão em profundidade da mineralização João Burro	2
<b>AN</b>	Anomalia EM fraca associada a desmagnetização e anomalia gama. Boa correlação com lineamentos magnéticos.	Extensão da mineralização no alvo A, ao longo do Alinhamento Brumal, para o NE	2
<b>AS</b>	Tendência EM moderada a fraca associada a zona de desmagnetização e anomalia gama. Boa correlação com lineamentos magnéticos.	Extensão da mineralização do alvo A, ao longo do Alinhamento Brumal, para o sul	2
<b>PJ</b>	Anomalia EM intensa associada a zona de desmagnetização e anomalia gama, de boa correlação com lineamentos magnéticos.	Mineralização tipo São Bento ao longo do alinhamento Brumal	1
<b>SdB NW</b>	Anomalia Th/K bem definida associada ao lineamento Córrego do Sítio e ausência de anomalias EM e magnéticas.	Indicativo de zona de alteração mais extensa do que o depósito conhecido.	3
<b>Barra Feliz</b>	Anomalia Th/K bem definida associada ao lineamento Córrego do Sítio e ausência de anomalias EM e magnéticas.	Indicativo de zona de alteração mais extensa do que o depósito conhecido.	3
<b>AN1 NE</b>	Anomalia Th/K bem definida associada ao lineamento Córrego do Sítio e ausência de anomalias EM e magnéticas	Indicativo de zona de alteração extensa associada à ocorrência.	3

Tabela 3: Alvos recomendados, seus respectivos contextos geofísicos e geológicos e prioridades estabelecidas.

## 5. REFERÊNCIAS

- Alkmim, F.F. & Marshak, S., 1998. *The Transamazonian orogeny in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: Paleoproterozoic collision and collapse in the Southern São Francisco Craton region*. Precambrian Research, 90, 29-58.
- AngloGold Ashanti, 2012. *Córrego do Sítio – Resources and reserves report*. Relatório interno da AngloGold Ashanti, 325 p.
- AngloGold Ashanti, 2013. *A 43-1 technical report on the Córrego do Sítio II mine, AngloGold Ashanti Brazil*. Relatório interno da AngloGold Ashanti, 94 p.
- Austin, L. & Foss, C., 2012. *Rich, attractive and extremely dense: A geophysical review of Australian IOCGs*. Resumo expandido para a 22nd International Geophysical Conference and Exhibition, 4p.
- Blakely, R. J., 1996. *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press, New York, 437p.
- Cant, G., 2010. *Córrego do Sítio II – São Bento Petrophysical Analysis*. Memorando interno da AngloGold Ashanti, 6p.
- Cheng, L. Z., Smith, R. S., Allard, M., Keating, P., Chouteau, M., Lemieux, J., Vallée, M. A., Bois, D. & Fountain, D. K., 2006. *Geophysical case study of the Iso and New Inco deposits, Québec, Canada, Part II: Modelling and Interpretation*. Exploration and Mining Geology, 15 (1-2), 65-76.
- Cook, J., 2003. *Detailed airborne eletromagnetic interpretation, modelling and target definition*. Relatório interno apresentado à AngloGold Ashanti, 23 p.
- Dannemiller, N. & Li, Y., 2006, *A new method for determination of magnetization direction*. Geophysics, 71 (6), L69-L73.
- Dentith, M. & Mudge, S., T., 2014. *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press, Cambridge, 438 p.
- Direen, N. G., Pfeiffer, K. M. and Schmidt, P. W., 2008. *Strong remanent magnetization in pyrrhotite: A structurally controlled example from the*

*Paleoproterozoic Tanami orogenic gold province, northern Australia.*  
Precambrian Research, 165 (1-2), 96-106.

Donohoo, H. V., Podolsky, G. & Clayton, R. H., 1970. *Early geophysical exploration at Kidd Creek Mine.* Mining Congress Journal, 56 (3), 44-53.

Ellis, R. G., de Wet, B., & Macleod, I. N. (2012). *Inversion of magnetic data for remanent and induced sources.* Resumo expandido submetido para a 22nd International Geophysical Conference and Exhibition, 4p.

EMIT, 2014. *Maxwell Manual.* Midland WA, Austrália: EletroMagnetic Imaging Technology, 436 p.

Fedi, M., Florio, G. & Rapolla, A., 1994. *A method to estimate the total magnetization direction from a distortion analysis of magnetic anomalies.* Geophysical Prospecting, 42 (3), 40-58.

Ferreira, M. P., 2013. *Projeto Regional – Alvo A.* Relatório interno da AngloGold Ashanti, 31p.

Guimarães, F., R., 2011. *Análise espacial tridimensional e geoestatística de dados multi-fonte de superfície e subsolo aplicada à modelagem prospectiva de mineralizações auríferas no Quadrilátero Ferrífero – MG.* Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 175 p.

Groves, D. I., Goldfarb., R. J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S. G. & Robert, F., 1998. *Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types.* Ore Geology Reviews, 13, 7-27.

Groves, D. I., Goldfarb., R. J., Knox-Robinson, C. M., Ojala, J., Gardoll, S., Yun, G. Y. & Holyland, P., 2000. *Late-kinematic timing of orogenic gold deposits and significance for computer-based exploration techniques with emphasis on the Yilgarn Block, Western Australia.* Ore Geology Reviews, 17, 1-38.

Hagemann, S., Dalstra, H. I., Hodkiewicz, P., Flis, M., Thorne, W. & McCuaig, C., 2007. *Recent advances in BIF-related iron ore models and exploration strategies.*

In Proceedings of Exploration'07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, Ore Deposits and Exploration Technology, 811-821.

Harris, M. C., Cassidy, L., Locke, C. A., Mauk, J. L. & Stevens, M., 2005. *Geophysical characteristics of the Karangahake epithermal deposit, Hauraki goldfield, New Zealand*. Resumo expandido submetido para a New Zealand Minerals Conference, 10 p.

Hoschke, T., 2011. *Geophysical signatures of copper-gold porphyry and epithermal gold deposits, and implications for exploration*. Dissertação de mestrado, University of Tasmania, 43 p.

Hsu, S., Sibuet, J. & Shyu, C., 1996. *High-resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies: An enhanced analytic signal technique*. Geophysics, 61 (2), 373-386.

IAEA, 2003. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. Tecdoc nº 1363 da International Atomic Energy Agency, 179 p.

Lasa Prospecções S.A., 2013. *Relatório final de aquisição e processamento de dados – Área Santa Bárbara*. Relatório apresentado a AngloGold Ashanti, 71 p.

Li, Y. & Oldenburg, D.W., 1996. *3-D inversion of magnetic data*. Geophysics, 61, 394–408.

Lobato, L. M., Ribeiro-Rodrigues, L. C. & Vieira, F. W. R., 2001. *Brazil's premier gold province. Part II: Geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero*. Mineralium Deposita, 36, 249-277.

Miller, H. G. & Singh, V. J. 1994. *Potential field tilt – A new concept for location of potential field sources*. Applied Geophysics, 32, 213-217.

Minty, B. R. S., 1997. *Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry*. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, 17 (2), 39-50.

Minty, B. R. S., Luyendyk, A. P. J. & Brodie, R. C., 1997. *Calibration and data processing for airborne gamma-ray spectrometry*. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, 17 (2), 51-62.

- Mussett, A. E. & Khan, M. A., 2000. *Looking into the Earth: An introduction to geological geophysics*. Cambridge University Press, Cambridge, 470 p.
- Noce, C. M., Zuccheti, M., Baltazar, O.F., Armstrong, R.C., Dantas, E., Renger, F.E.A. & Lobato, L.M., 2005. *Age of felsic volcanism and the role of ancient continental crust in the evolution of the Neoproterozoic Rio das Velhas Greenstone belt (Quadrilátero Ferrífero, Brazil): U-Pb zircon dating of volcanoclastic graywackes*. *Precambrian Research*, 141, 67-82.
- Noce, C. M., Tassinari, C. & Lobato, M. L., 2007. *Geochronological framework of the Quadrilátero Ferrífero, with emphasis on the age of gold mineralization hosted in Archean greenstone belts*. *Ore Geology Reviews*, 32, 500-510.
- Paine, J., Haederle, M. & Fils, M., 2001. *Using transformed TMI data to invert for remanently magnetized bodies*. *Exploration Geophysics*, 31 (3-4), 238-242.
- Porto, C. G., 2008. *A mineralização aurífera no corpo Cachorro Bravo, Lineamento Córrego do Sítio – Quadrilátero Ferrífero – MG*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 114p.
- Ramos Filho, W., L., Kuyumjian, R., M. & Pires, A., C., B., 2005. *The Chapada Cu-Au deposit and guidelines for mineral exploration program in the Goiás Magmatic Arc*. *Revista Brasileira de Geociências*, 35 (4), 603-605.
- Reeves, 2005. *Aeromagnetic surveys: Principles, practice & interpretation*. E-book publicado por Geosoft Inc., 155 p.
- Ribeiro-Rodrigues, L. C., 1998. *Gold mineralization in Archean banded iron-formation of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil – The Cuiabá Mine*. Tese de doutorado, Aachen University of Technology, 264 p.
- Sales, M. A. S., 1998. *The geological setting of the Lamego banded iron-formation-hosted gold deposit, Quadrilátero Ferrífero District, Minas Gerais – Brazil*. Dissertação de mestrado, Queen's University, 182 p.
- Shearer, S. E., 2005. *Three-dimensional inversion of magnetic data in presence of remanent magnetization*. Dissertação de Mestrado. Center for Gravity, Electrical and Magnetic Studies, Colorado School of Mines, 148 p.

- Silva, A. M., 1999. *Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se uma nova técnica estatística para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero*. Tese de doutorado, Universidade de Brasília, 227 p.
- SPECTREM Air, 2002. *SPECTREM survey of the Brumal area for AngloGold Brazil – Re-Interpretation*. Relatório apresentado à AngloGold Ashanti, 24 p.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. & Sheriff, R. E., 1990. *Applied Geophysics - Second Edition*. Cambridge University Press, Cambridge, 784 p.
- Vella, L., 1994. *Geophysical setting of BIF-hosted gold deposits at Tuckabianna, Western Australia*. In: Dentith et al., 1994. *Geophysical signatures of western Australian mineral deposits*. Publicação especial da ASEG n° 7, 241 -257.
- Venkatakrishnan, S., 2014. *Maximising sustainable free cash flow from a high-quality portfolio*. Slides da palestra proferida durante o 2014 African Mining Indaba, África do Sul.
- Vial, D., S., DeWitt, E., Lobato, L., M. & Thorman, C., H., 2007. *The geology of the Morro Velho gold deposit in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil*. *Ore Geology Reviews*, 32, 511-542.
- Williams, N.C., 2006. *Applying UBC-GIF potential field inversions in Greenfields or Brownfields exploration*. Artigo apresentado durante o AESC2006, Melbourne, Austrália, 10 p.
- Witherly, K. & Allard, M., 2000. *The evolution of the use of geophysics in the search for blind VHMS deposits in the Abitibi greenstone belt, Québec Canada*. Resumo expandido submetido para a SEG 2010 Annual Meeting, 13 p.
- Yang, D. & Oldenburg, D., 2012. *Three-dimensional inversion of airborne time-domain electromagnetic data with applications to a porphyry deposit*. *Geophysics*, 77 (2), B23-B34.