

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
BACHARELADO EM GEOFÍSICA

Uma Comparação qualitativa e quantitativa entre métodos eletromagnéticos no domínio da frequência e do tempo na aplicação de exploração mineral no Quadrilátero Ferrífero.

Discente: Gabriel Souza e Silva
Matrícula: 190045876

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Giannoccaro Von Huelsen

Brasília-DF

2025

Gabriel Souza e Silva

Uma Comparação qualitativa e quantitativa entre métodos eletromagnéticos no domínio da frequência e do tempo na aplicação de exploração mineral no Quadrilátero Ferrífero.

Trabalho final de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como exigência e requisito para obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica G. Von Huelsen

Brasília-DF

2025

Gabriel Souza e Silva

Uma Comparação qualitativa e quantitativa entre métodos eletromagnéticos no domínio da frequência e do tempo na aplicação de exploração mineral no Quadrilátero Ferrífero.

Banca examinadora:

Profa. Dra. Mônica G. Von Huelsen
Prof. Dr. Giuliano Marotta
Msc. Marcos César Soares de Queiroz

Brasília-DF

2025

Sumário

Resumo 10
Abstract 10
1. Introdução 8
2. Contexto Geológico 9
3. Referencial Teórico 11
3.1 Teoria do Método Eletromagnético 11
3.2 Fundamentos da Eletromagnetometria 12
3.3 Domínio da Frequência 13
3.4 Domínio do Tempo 14
4. Metodologia e Processamento de dados 16
5. Resultados 19
6. Discussão e Conclusões 25
Referências 26
Anexo 1 30
Anexo 2 33

Resumo

A província do Quadrilátero Ferrífero tem sido extensivamente investigada ao longo das últimas décadas devido ao seu elevado potencial mineralógico, destacando-se como uma das regiões mais importantes para a economia brasileira. Esta área é uma das poucas regiões brasileiras que dispõe de mais de um método geofísico aplicado na exploração mineral (principalmente ferro e ouro). Neste trabalho, analisaram-se dois levantamentos eletromagnéticos aerotransportados por helicóptero realizados sobre a mesma área: o levantamento *AERODAT*, operando no domínio da frequência com três canais (33 kHz, 4175 Hz e 500 Hz), adquirido pelo Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) em parceria com mineradoras locais, e o levantamento *AEROTEM*, no domínio do tempo, obtido pelo Serviço Geológico Brasileiro antiga Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

Para a interpretação dos dados, foram utilizados perfis, malhas correspondentes a diferentes canais — representando distintas profundidades de investigação — e seções de profundidade-condutividade (*CDIs*) geradas para ambos os métodos, além de malhas 3D. Essa abordagem permitiu uma comparação direta e consistente entre as duas plataformas.

Os resultados revelaram três principais condutores, identificados tanto nos dados do *AERODAT* quanto nos do AEROTEM, demonstrando uma forte correspondência entre os métodos, apesar da expressiva diferença de resolução associada ao número de canais disponíveis em cada técnica.

Palavras Chave: eletromagnetometria, TDEM, FDEM, quadrilátero-ferrífero.

Abstract

The Quadrilátero Ferrífero province has been extensively investigated over the past decades due to its high mineral potential, standing out as one of the most important regions for the Brazilian economy. This area is one of the few Brazilian regions that has more than one geophysical method applied in mineral exploration (mainly iron and gold). In this study, two helicopter-borne electromagnetic surveys conducted over the same area were analyzed: the AERODAT survey, operating in the frequency domain with three channels (33 kHz, 4175 Hz, and 500 Hz), acquired by the National Department of Mineral Production (DNPM) in partnership with local mining companies, and the AEROTEM survey, operating in the time domain, obtained by the Geological Survey of Brazil formerly the Mineral Resources Research Company (CPRM).

For data interpretation, profiles, grids corresponding to different channels—representing distinct investigation depths—and conductivity–depth sections (CDIs) generated for both methods were used, along with 3D grids. This approach enabled a direct and consistent comparison between the two platforms.

The results revealed three main conductors, identified in both the AERODAT and AEROTEM datasets, demonstrating a strong correspondence between the methods despite the significant difference in resolution associated with the number of channels available in each technique.

Keywords: electromagnetometry, TDEM, FDEM, quadrilátero-ferrífero.

Lista de Figuras

Figura 1 - Mapa de localização. (Fonte: Ruchkys U.A, 2012) 8
Figura 2 - Mapa geológico simplificado da região do Quadrilátero Ferrífero. Em vermelho indicando a área dos levantamentos. O Supergrupo Rio das Velhas é apresentado em associação de litofácies de acordo com Baltazar e Zucchetti (2007) (Fonte: Modificado de Araújo J.C. Souto, 2018). 10
Figura 3 – Imagem didática da teoria do método eletromagnético. (Fonte: Adaptado de Huelsen, M. G. V., 2025) 11
Figura 4 - À esquerda um esquema da plataforma utilizada no levantamento aéreo e a direita as áreas dos 4 blocos que foram sobrevoados. (Fonte: Modificado de DNPM, 1992). 14
Figura 5 - Helicóptero Esquilo AS350 B3 – PT-YOY. Usado no levantamento da área em 2011 pela SGB. (Fonte: SGB, 2012) 15
Figura 6 - Linhas de voo da área de levantamento da plataforma no domínio do tempo. (Fonte: Autores). 15
Figura 7 - Mapa com, ao fundo a imagem da malha de condutividade (S/m) do canal (Zoff) 3 (sem filtros no domínio do tempo), a frente seis linhas de voo para fins de comparação e sobreposição e dois círculos pontilhados mostrando a falta de dados do levantamento TDEM. Linhas de voo em marrom (domínio da frequência) e em preto domínio do tempo. (Fonte: Autores). 17
Figura 8 - Mapa com a imagem da malha da resistividade (Ω.m) do canal de Média frequência (fdem) ao fundo, o polígono preto indica a área que foi realizada a inversão e as linhas em marrom a localização das cdis (L1, L2 e L3) obtidas nessa pesquisa. (Fonte: Autores) 18
Figura 9 - Perfis da linha L1 (de NW a SE da Figura 8) que mostram: A) a variação da condutividade (em mS/m) para os canais FDEM; de alta, média e baixa frequência; B) a variação do campo eletromagnético secundário (em nT/s) para os canais de 1 a 16 (TDEM). (Fonte: Autores) 19
Figura 10 - Perfis da linha L2 (de NW a SE da Figura 8) que mostram: A) a variação da condutividade (em mS/m) para os canais FDEM; de alta, média e baixa frequência; B) a variação do campo eletromagnético secundário (em nT/s) para os canais de 1 a 16 (TDEM). (Fonte: Autores) 20
Figura 11 - Perfis da linha L3 (de NW a SE da Figura 8) que mostram: A) a variação da condutividade (em mS/m) para os canais FDEM; de alta, média e baixa frequência; B) a variação do campo eletromagnético secundário (em nT/s) para os canais de 1 a 16 (TDEM). (Fonte: Autores). 20
Figura 12 - À esquerda imagens da condutividade aparente para as frequências alta (a), média (c) e baixa (e) da plataforma *AERODAT* - *FDEM*; e à direita imagens do campo secundário para os canais Zoff 1 (b), Zoff 6 (d) e Zoff 11 (f) - TDEM, destacando a localização das três linhas consideradas para comparação e a mineradora de Roça Grande. (Fonte: Autores). 21
Figura 13 - Acima, mostram dois mapas com as imagens *CMY* de cada plataforma. À esquerda, a imagem ternária *FDEM* e à direita a imagem ternária *TDEM*. (Fonte: Autores) 22
Figura 14 - Acima, mostram os dois modelos resultados das inversões. e A) À esquerda, o modelo na plataforma no domínio da frequência (Fonte: Autores). B) À direita, o modelo na plataforma no domínio do tempo (Fonte: Almeida, 2022). As Figura C e D mostram as isosuperfícies condutivas sobrepostas obtidas para FDEM (lilás; condutividade de 0,01mS/m) e TDEM (cinza=$3{,}74.10^{-9}$ mS/m, azul =$7{,}53.10^{-9}$ mS/m e vermelho = $1{,}89.10^{-8}$mS/m, onde C) vista superior e D) vista frontal. 23
Figura 15 - Imagens da CDIs das linhas L1, L2 e L3 obtidas para cada plataforma: A1) CDI da linha L1 da plataforma FDEM; A2) CDI da linha L1da plataforma TDEM; B1) CDI da linha L2

da plataforma FDEM; B2) CDI da linha L2 da plataforma TDEM. C1) CDI da linha L3 da plataforma FDEM; C2) CDI da linha L3 da plataforma TDEM. 24

1. Introdução

A aplicação de métodos geofísicos tem desempenhado um papel fundamental na prospecção mineral, especialmente em áreas de grande potencial econômico. Entre essas metodologias, os levantamentos eletromagnéticos (EM) aerotransportados destacam-se pela sua capacidade de mapear condutividades elétricas do subsolo, fornecendo informações cruciais sobre a geologia e os recursos minerais de uma região. O surgimento dos sistemas eletromagnéticos remonta ao ano de 1946, impulsionado pela crescente demanda por recursos minerais após a Segunda Guerra Mundial. Esse contexto motivou um aumento significativo nos investimentos em tecnologias de prospecção, especialmente no desenvolvimento de sistemas aerotransportados.

O primeiro levantamento eletromagnético foi realizado nesse mesmo ano, quando as empresas Stanmac e McPhar Engineering desenvolveram um sistema portátil para mapear um lago congelado. Já o primeiro levantamento aerotransportado no domínio da frequência foi realizado em 1947, enquanto o primeiro levantamento no domínio do tempo ocorreu na década de 1950, com o desenvolvimento do sistema INPUT (*Induced Pulse Transient*) de acordo com Palacky & West (1991, apud Von Huelsen, 2007).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal apresentar uma visão geral sobre o funcionamento dos métodos eletromagnéticos no domínio do tempo (TDEM) e no domínio da frequência (FDEM), além de realizar uma comparação qualitativa e quantitativa entre os dados adquiridos por essas duas metodologias. A área de estudo está localizada na província do Quadrilátero Ferrífero, especificamente no *Greenstone Belt* Rio das Velhas (GBRV), em Minas Gerais (Figura 1) — uma das mais importantes províncias auríferas e ferríferas do mundo. Esta comparação visa contribuir para uma melhor compreensão da aplicabilidade e das limitações de cada método na caracterização geofísica de ambientes geológicos complexos.

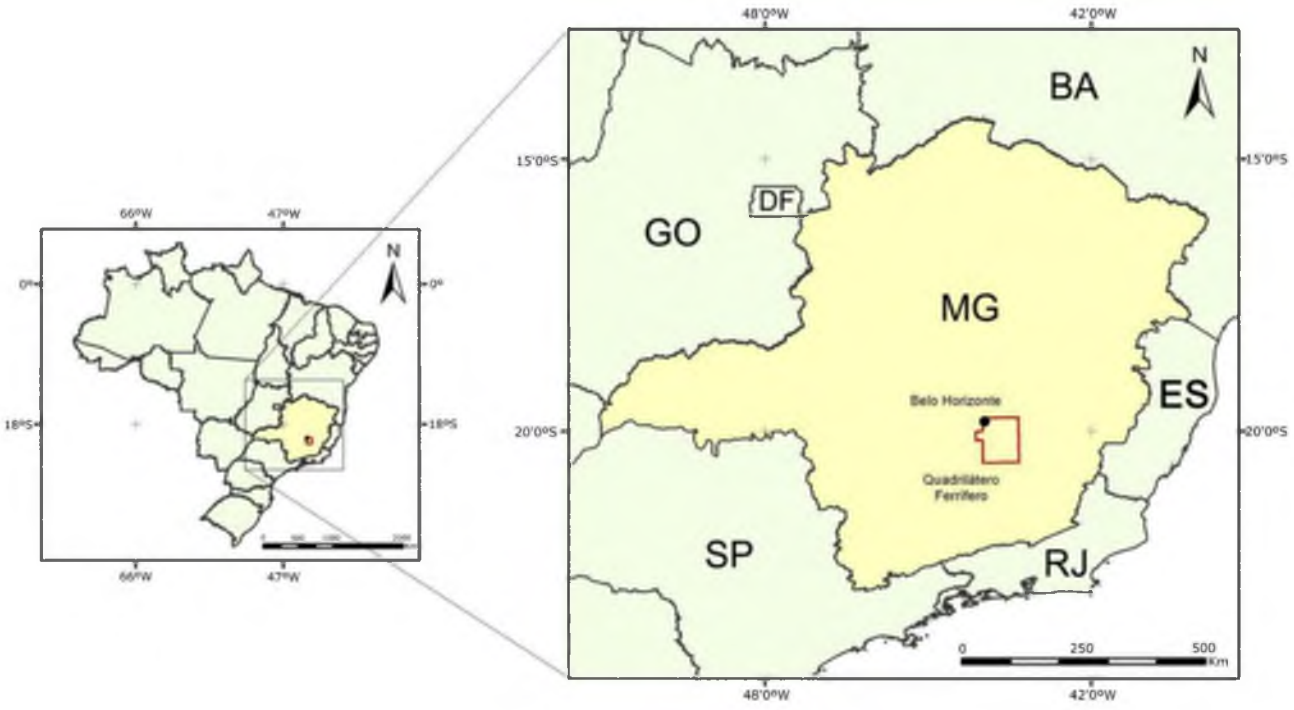


Figura 1 - Mapa de localização. (Fonte: Ruchkys U.A, 2012)

2. Contexto Geológico

O Quadrilátero Ferrífero (QF), situado na porção sul do Cráton do São Francisco, constitui uma das mais importantes províncias metalogenéticas, reconhecida pela expressiva produção de minério de ferro e ouro. Essa relevância econômica impulsionou inúmeros estudos geológicos e geofísicos, voltados à compreensão da evolução tectono-estratigráfica da região e à definição de critérios de prospecção mineral mais eficientes (Rosière & Chemale Jr., 2000).

Do ponto de vista litoestratigráfico, o QF é composto por cinco unidades principais: os terrenos granítico-gnáissicos arqueanos (TTG's), o Supergrupo Rio das Velhas (SGRV), o Supergrupo Minas (SGM), o Grupo Itacolomi e o Supergrupo Espinhaço (Alkmim & Marshak, 1998). Os terrenos granítico-gnáissicos formam a base estrutural da região e correspondem a complexos polideformados, como Caeté, Bonfim, Belo Horizonte e Santa Rita. Essas rochas, formadas predominantemente por ortognaisses do tipo tonalito-trondhjemito-granodiorito (TTG), migmatizados ou não, contêm intrusões de granitóides, anfibolitos e pegmatitos, e foram geradas nos ciclos Arqueano e Transamazônico. Seus contatos com as unidades supracrustais são de natureza tectônica, refletindo longas histórias de deformação e retrabalhamento crustal (Cordani et al., 1980; Machado & Carneiro, 1992; Noce et al., 1992).

O Supergrupo Rio das Velhas, de idade arqueana, representa uma sequência do tipo greenstone belt e é dividido, tradicionalmente, nos Grupos Nova Lima (base) e Maquiné (topo) (Dorr, 1969). O Grupo Nova Lima compreende essencialmente rochas metavulcânicas e metassedimentares, subdivididas em unidades químicas e clásticas (Ladeira, 1980). Parte expressiva de suas sequências sedimentares é formada por depósitos turbidíticos de composição básica a félsica (Schrank & Silva, 1993). Sobreposto a esse conjunto, o Grupo Maquiné é composto por quartzitos, filitos quartzosos e conglomerados, representando uma sucessão mais continental e sedimentar.

Estudos posteriores propuseram revisões significativas na estratigrafia do SGRV. Pinto & Silva (1996) e Zucchetti, Baltazar & Raposo (1996), sugeriram uma subdivisão em blocos tectônicos distintos — Nova Lima, Caeté, Santa Bárbara e São Bartolomeu — que correspondem a diferentes ambientes petrogenéticos. As unidades foram redefinidas e elevadas à categoria de formações, incluindo o Complexo Córrego dos Boiadeiros e o Grupo Quebra Osso, incorporados ao Grupo Nova Lima. O Complexo Córrego dos Boiadeiros foi caracterizado como um sill ultrabásico intrusivo, marcando o início da sequência.

O Supergrupo Minas, de idade paleoproterozoica, sobrepõe-se aos TTG's e ao SGRV, geralmente em contato tectônico. É composto, da base para o topo, pelos Grupos Caraça, Itabira e Piracicaba (Dorr, 1969). O Grupo Caraça inicia-se com a Formação Moeda, formada por quartzitos e níveis conglomeráticos auríferos-uraníferos, transicionando para a Formação Batatal, dominada por filitos sericíticos e ferruginosos. O Grupo Itabira apresenta, em sua base, a Formação Cauê, constituída por formações ferríferas bandadas e dolomitos subordinados, e no topo, a Formação Gandarela, composta por mármores dolomíticos e itabiritos. Já o Grupo Piracicaba reúne as formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões, Barreiras e Sabará, esta última composta por clorita xistos, metagrauvacas e metaconglomerados, podendo atingir espessuras de até 3000 metros (Dorr, 1969). Devido à diversidade litológica e espessura expressiva, alguns autores propõem elevar a Formação Sabará à categoria de grupo (Barbosa, 1968; Ladeira, 1980).

O Supergrupo Espinhaço, de idade mesoproterozoica, ocorre principalmente na Serra das Cambotas, a nordeste do QF. Ele é composto por espessas sequências quartzíticas, cuja posição estratigráfica tem sido amplamente debatida, uma vez que inclui pacotes distintos tectonicamente justapostos (Freitas, Crocco-Rodrigues & Rosière, 1991; Crocco-Rodrigues, Ribeiro-Rodrigues & Rosière, 1991). O Grupo Itacolomi, também mesoproterozoico, representa uma sequência

sedimentar continental, composta por arenitos e conglomerados, que recobre discordantemente o Supergrupo Minas.

Além dessas unidades, o QF é cortado por numerosos corpos ígneos máficos, incluindo diques e sills de rochas básicas com direção predominante norte-sul. Duas gerações principais foram identificadas: uma associada ao Proterozoico, com idade aproximada de 1,7 Ga, relacionada à abertura do protooceano Brasiliano/Panafricano, e outra de idade mesocenozóica, vinculada à fragmentação do Gondwana (Carneiro, Noce & Teixeira, 1995; Silva, Chemale & Kuyumjian, 1995).

Do ponto de vista metamórfico, as rochas dos terrenos granítico-gnáissicos foram submetidas a condições de fácies anfibolito a granulito e posteriormente retrometamorfizadas em fácies xisto verde. As rochas supracrustais do SGRV e do SGM exibem paragêneses compatíveis com fácies xisto verde a anfibolito, embora em alguns locais, como no SGM, as condições tenham atingido apenas o anquimetamorfismo. Hertz (1978) e Jordt-Evangelista, Alkmim & Marshak (1991) identificaram auréolas de metamorfismo de contato associadas ao Complexo Bação e à Serra do Curral.

Estruturalmente, o Quadrilátero Ferrífero é caracterizado por intensa deformação, dobramentos isoclinais e falhas de empurrão, refletindo múltiplos eventos tectônicos. O resultado é uma arquitetura complexa, em que unidades de diferentes idades e origens se intercalam por contatos tectônicos (e.g. Dorr 1969; Marshak & Alkmim 1989; Chemale, Rosiere & Endo 1994; Marshak et al. 1997; Alkmim & Marshak 1998; Baltazar & Zucchetti 2007). Essa complexidade estratigráfica e estrutural explica as dificuldades em estabelecer empilhamentos estratigráficos contínuos, sobretudo no Greenstone Belt Rio das Velhas, fortemente afetado por metamorfismo e intemperismo intensos.

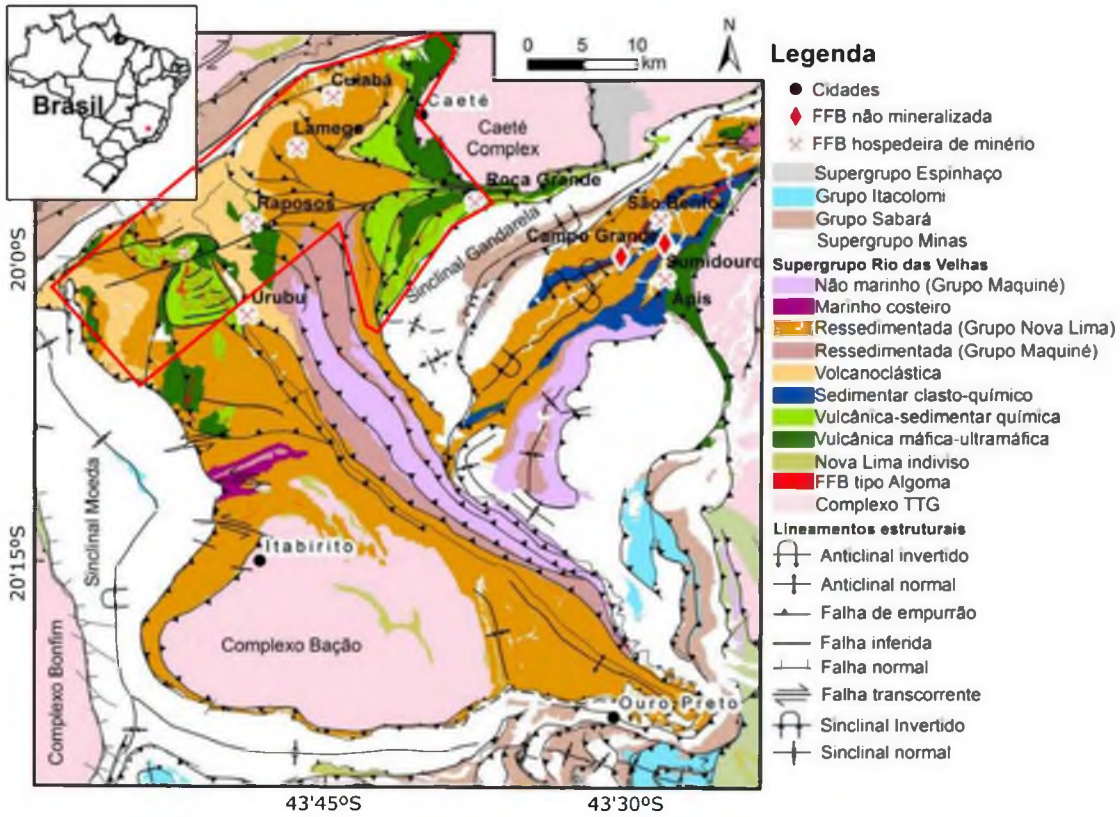


Figura 2 - Mapa geológico simplificado da região do Quadrilátero Ferrífero. Em vermelho indicando a área dos levantamentos. O Supergrupo Rio das Velhas é apresentado em associação de litofácies de acordo com Baltazar e Zucchetti (2007) (Fonte: Modificado de Araújo J.C. Souto, 2018).

3. Referencial Teórico

3.1 Teoria do Método Eletromagnético

O método eletromagnético é uma técnica geofísica utilizada para investigar as propriedades elétricas do subsolo por meio da interação entre campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo. Seu princípio baseia-se na indução eletromagnética: uma corrente elétrica primária, gerada artificialmente ou de origem natural, induz correntes secundárias nas formações geológicas, cuja resposta é medida na superfície por sensores, como é mostrado na Figura 3. Se esses contrastes forem suficientemente grandes, então as anomalias serão detectadas (Ogilvy & Lee, 1991).

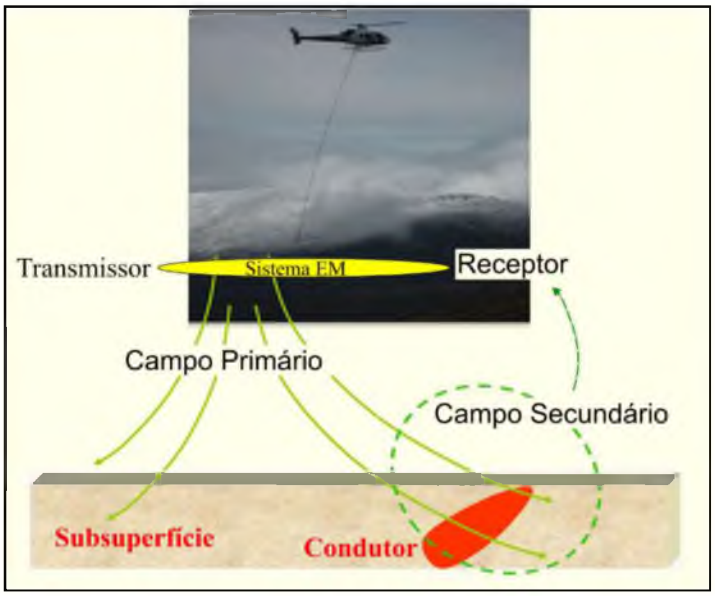


Figura 3 – Imagem didática da teoria do método eletromagnético. (Fonte: Adaptado de Huelsen, M. G. V., 2025)

A análise dessas respostas permite determinar parâmetros como condutividade elétrica, resistividade e permeabilidade magnética dos materiais em subsuperfície. Essas propriedades estão diretamente relacionadas à composição, estrutura e conteúdo fluido das rochas, possibilitando a caracterização detalhada do subsolo sem necessidade de perfurações.

Na engenharia, o método eletromagnético é amplamente empregado em estudos geotécnicos, mapeamento de cavidades, detecção de dutos e avaliação de contaminação em solos e águas subterrâneas. Na mineração, é aplicado na prospecção de minerais condutores, como sulfetos metálicos, grafita e minério de ferro, bem como na definição de corpos mineralizados e no acompanhamento de operações de lavra.

Por sua natureza não destrutiva, versatilidade e capacidade de fornecer resultados em tempo real, o método eletromagnético constitui uma ferramenta de grande importância para a exploração e o monitoramento de recursos naturais.

3.2 Fundamentos da Eletromagnetometria

O entendimento dos fenômenos ondulatórios durante a propagação no meio e interação da onda eletromagnética com as estruturas em subsuperfície é vital para a correta utilização do método e interpretação de dados, sendo assim, torna-se necessário o entendimento da teoria eletromagnética clássica de Maxwell (Font, 2016).

Na maioria das análises, considera-se a Terra como um meio isotrópico e homogêneo, cujos parâmetros elétricos são independentes do tempo, da temperatura e da pressão. Um modelo completo pode ser elaborado mediante a justaposição de diversas regiões isotrópicas e homogêneas, em cada uma das quais é possível formular uma equação de onda, cuja solução fundamenta-se nas equações de Maxwell, tais como a **Lei de Ampère-Maxwell (Equação 1), Lei de Faraday (Equação 2), Lei de Gauss para o Magnetismo (Equação 3) e Lei de Gauss (Equação 4)** (Font, 2016).

$$\vec{\nabla} \, x \, \vec{h} = \vec{j} + \frac{\partial d}{\partial t} \tag{1}$$

Onde $\vec{\nabla} \times \vec{h}$: Rotacional de um campo h, $\vec{h}$: Intensidade do campo magnético (A/m), $\vec{j}$: Densidade de corrente (A/m²), d: Deslocamento elétrico (C/m²).

$$\vec{\nabla} x \vec{e} = \frac{-\partial \vec{b}}{\partial t} \tag{2}$$

Onde $\vec{\nabla} \times \vec{e}$: rotacional de um campo e, $\vec{e}$: Campo elétrico (V/m), $\vec{b}$: Indução magnética (W/m² ou Tesla).

$$\nabla \cdot \vec{b} = 0 \tag{3}$$

Onde $\nabla \cdot \vec{b}$ é o divergente do campo magnético b.

$$\nabla \cdot \vec{d} = \rho \tag{4}$$

Onde $\nabla \cdot \vec{d}$ é o divergente da densidade de fluxo elétrico d, ρ: densidade volumétrica de carga elétrica (C/m³).

Aplicando o gradiente nas equações 1 (Lei de Ampère-Maxwell) e 2 (Lei de Faraday) obtém-se as equações de onda abaixo (5 e 6) no domínio do tempo (Nabighian & Macnae, 1987):

$$\vec{\nabla} e - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{e}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{e}}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} h - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{h}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{h}}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

Onde μ: permeabilidade magnética (W/A), ε: permeabilidade dielétrica (C^2/Nm^2) e σ: condutividade elétrica (S/m).

A solução das equações acima fornece o comportamento do campo magnético e elétrico com a profundidade e em função da condutividade do meio.

3.3 Domínio da Frequência

A plataforma *AERODAT*, que aplica o método eletromagnético no domínio da frequência (FDEM, *Frequency-Domain Electromagnetic*) utiliza múltiplos pares de bobinas transmissoras e receptoras operando simultaneamente em diferentes frequências. Neste sistema, uma corrente elétrica senoidal de baixa frequência é injetada na bobina transmissora, gerando um campo magnético primário oscilante. Esse campo, ao interagir com o subsolo, induz correntes de Foucault nas formações geológicas condutivas, gerando, por sua vez, um campo magnético secundário. A resposta total do sistema é composta pela soma dos campos magnéticos primário e secundário, que são detectados pelas bobinas receptoras, sendo que o campo primário tende a ser significativamente mais intenso do que o secundário (Steuer & Auken 2007).

A distribuição e intensidade do campo secundário dependem das propriedades elétricas do meio, especialmente da condutividade elétrica. A configuração geométrica das bobinas influencia diretamente na sensibilidade do sistema, podendo ser dispostas em arranjos coplanares horizontais, coplanares verticais ou coaxiais verticais (Steuer & Auken, 2007). No levantamento aqui analisado, foram utilizados apenas os arranjos coplanar horizontal e coaxial vertical.

O levantamento FDEM foi realizado pelo Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) em 1992, utilizando um helicóptero equipado com um sistema eletromagnético multifrequencial composto por cinco pares de bobinas. Os pares estavam distribuídos nos seguintes arranjos:

- **Coaxial vertical**: operando nas frequências de 935 Hz e 4600 Hz;
- **Coplanar horizontal**: operando nas frequências de 500 Hz, 4175 Hz e 33000 Hz.

O espaçamento entre as bobinas transmissora e receptora era de 7 metros, com sistema adicional de detecção de linhas de transmissão na frequência de 50 Hz. O levantamento foi realizado com espaçamento entre linhas de voo de 250 metros, a uma altitude de 60 metros e velocidade de cruzeiro de aproximadamente 90 km/h (DNPM, 1992). Além do sistema FDEM, o projeto contou com sensores adicionais, incluindo Very Low Frequency (VLF), magnetômetro, gamaespectrômetro, além de sistemas de navegação e posicionamento por GPS (Figura 4).

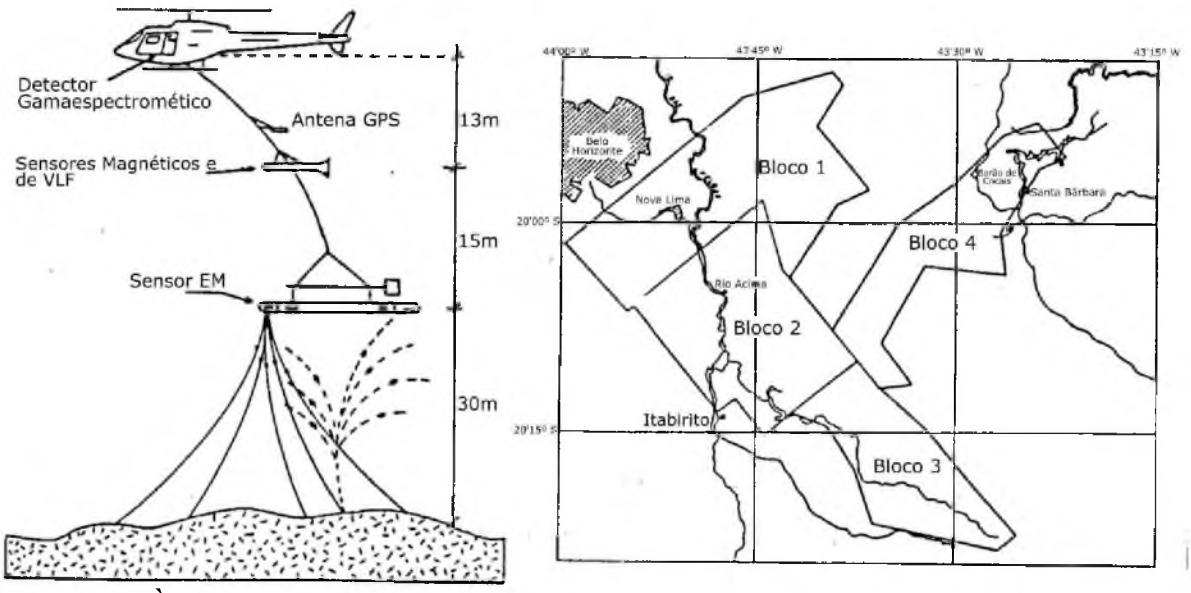


Figura 4 - À esquerda um esquema da plataforma utilizada no levantamento aéreo e a direita as áreas dos 4 blocos que foram sobrevoados. (Fonte: Modificado de DNPM, 1992).

Foram sobrevoados 6726km de distância durante toda a operação, separados em 4 blocos (Figura 4), porém para este trabalho foi usado apenas uma parte do bloco 1, estrategicamente selecionado por haver condutores de interesse e levantamentos em comum das duas aeronaves (domínio da frequência e do tempo).

3.4 Domínio do Tempo

A plataforma *AEROTEM*, que aplica o método eletromagnético no domínio do tempo (TDEM, *Time-Domain Electromagnetic*) baseia-se na geração de um campo eletromagnético primário por meio da aplicação de pulsos de corrente elétrica na bobina transmissora, separados por intervalos de tempo regulares. A rápida interrupção dessa corrente provoca uma variação brusca no campo magnético gerado, o que induz correntes elétricas (correntes de Foucault) em condutores presentes no subsolo. Como resultado, é gerado um campo magnético secundário, cuja intensidade e comportamento temporal dependem diretamente das propriedades de condutividade elétrica das formações geológicas. Esse campo secundário é medido por uma bobina receptora, na ausência do campo primário (Nabighian & Macnae, 1991).

Durante o intervalo de aquisição, o sistema receptor registra uma tensão variável no tempo, proporcional à taxa de variação do campo magnético secundário. A forma de onda empregada no sinal transmitido é tipicamente uma onda semi-senoidal repetida periodicamente com polaridades opostas, escolhida devido à necessidade de gerar correntes intensas para excitar o meio. Essa forma de onda é mais eficiente e tecnicamente viável de ser produzida em sistemas com bobinas transmissoras (Liu & Asten, 1992; Liu & Lamontagne, 1998).

A aquisição dos dados TDEM foi realizada dentro do Programa de Aceleração de Crescimento (PAC 2009/2010), assim Serviço Geológico do Brasil (SGB) em 2011 celebrou com a Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda um contrato para executar a aquisição de dados geofísicos, utilizando o sistema ***AEROTEM***, desenvolvido pela empresa *Aeroquest*. Esse sistema é composto por uma unidade de aquisição de dados **AERODAS** (Figura 5), instalada no interior da aeronave, e por um conjunto transmissor/receptor rebocado externamente, suspenso a aproximadamente 60 metros abaixo do helicóptero.

Durante o levantamento, foram percorridos cerca de 7.000 km de linhas de voo, com direção de linhas de voo N45°W, espaçamento de 250 metros entre linhas, altura de voo variando entre 90 e 120 metros, velocidade média de 80 km/h e intervalo entre medições consecutivas de 0,1s (SGB, 2012; Figura 6). A operação foi dividida em dois blocos, sendo utilizada neste estudo apenas uma porção do Bloco 1, correspondente à área geográfica já coberta anteriormente pelo levantamento realizado pelo DNPM em 1992, com o objetivo de permitir a comparação entre os métodos.



Figura 5 - Helicóptero Esquilo AS350 B3 – PT-YOY. Usado no levantamento da área em 2011 pela SGB. (Fonte: SGB, 2012)

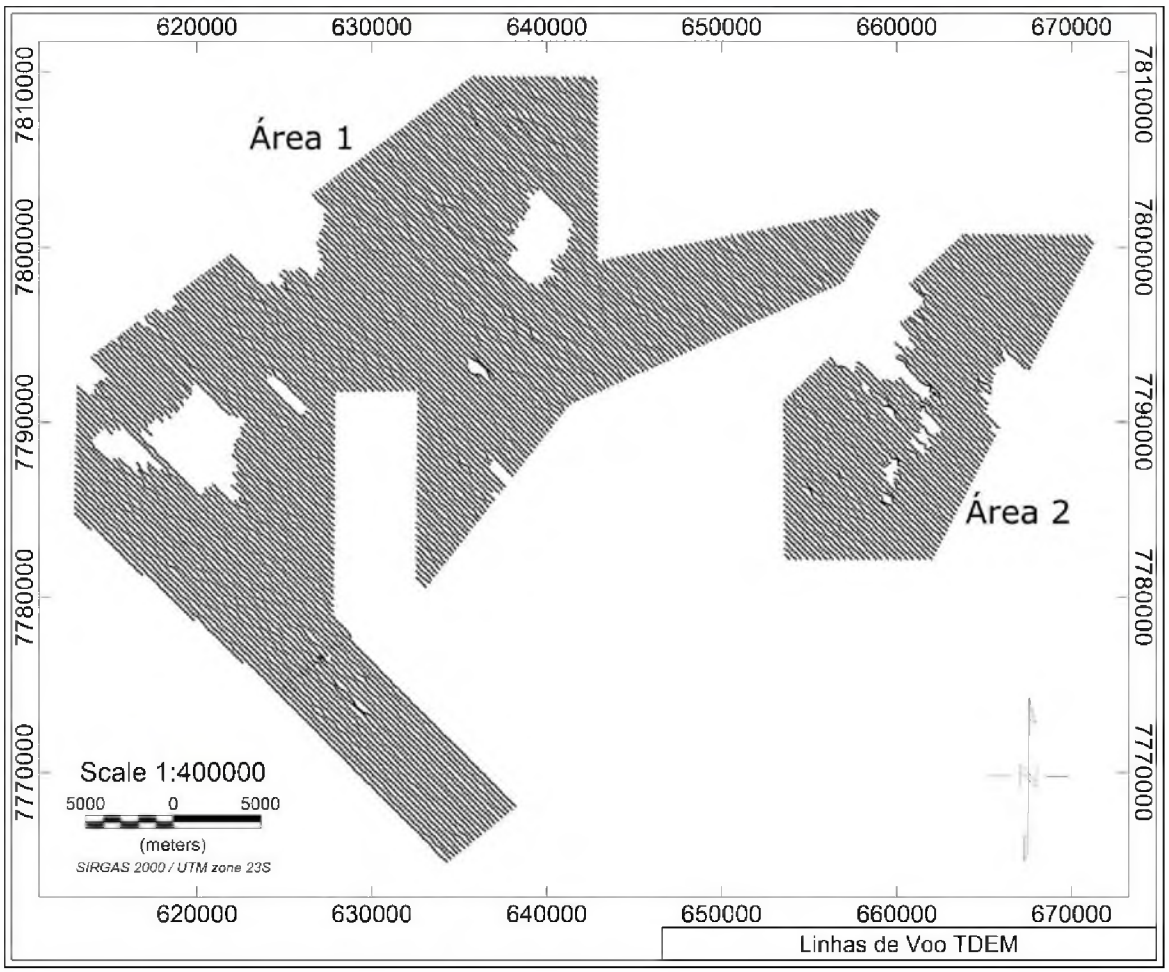


Figura 6 - Linhas de voo da área de levantamento da plataforma no domínio do tempo. (Fonte: Autores).

4. Metodologia e Processamento de dados

O objetivo central deste trabalho é realizar uma comparação direta entre os dados eletromagnéticos adquiridos por dois projetos distintos: o levantamento no domínio da frequência, celebrado pelo Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM, 1992), e o levantamento no domínio do tempo, conduzido pela SGB (Serviço Geológico Brasileiro, 2012). Para tal, os dados foram processados com base nos arquivos originais fornecidos por ambos os órgãos para gerar malhas e posteriormente efetuar filtragens.

O processamento e a análise comparativa foram conduzidos utilizando o software **Oasis Montaj™** (Bentley, 2024), com o intuito de gerar perfis e malhas referentes aos dois métodos, que pudessem ser confrontados lado a lado de forma sistemática.

Inicialmente, foi necessário realizar a conversão do sistema de coordenadas dos dados da DNPM, originalmente em WGS84, para o sistema **SIRGAS2000**, adotado como padrão para todos os dados do estudo. Os dados da SGB (domínio do tempo) já estavam referenciados neste sistema, não sendo necessária qualquer conversão adicional.

Após a padronização das coordenadas, as linhas de voo foram plotadas em um único mapa. No entanto, observou-se uma leve diferença de inclinação (cerca de 5 °) entre os conjuntos de dados (Figura 7). Para corrigir essa inconsistência, foram utilizadas duas ferramentas chamadas: *Grid Profile,* que converte os dados de um grid de volta para o banco de dados de forma interativa e a *Sample a Grid,* que traz informações de um grid a partir de coordenadas do banco de dados. Esses dois processos foram realizados para que criássemos perfis sobrepostos (Figura 12).

Com a aplicação dessas ferramentas, foi possível gerar perfis comparáveis, tanto para o domínio do tempo quanto para o da frequência, adotando as mesmas coordenadas UTM (UTME e UTMN), de modo a sobrepor corretamente os dados (Figura 8). Ressalta-se que os dados da SGB (TDEM) apresentaram lacunas em duas áreas específicas, conforme destacado na Figura 7 (círculos tracejados).

No banco de dados FDEM foram disponibilizados os canais dos arranjos coaxial vertical (frequências 935 Hz e 4600 Hz) e coplanar horizontal (frequências: baixa - 500 Hz, média - 4175 Hz e alta - 33000 Hz), além dos canais da condutividade para cada frequência do arranjo coplanar. Com esses dados foram gerados os perfis da condutividade, as malhas de 50x50 metros utilizando o interpolador Krigging e filtro cosseno direcional para cada canal de frequência do arranjo coplanar (Anexo 1).

No banco de dados do domínio do tempo, foram disponibilizados diversos canais de leitura. Para fins comparativos, optou-se por utilizar os canais *off times* (Zoff), que registram a resposta eletromagnética imediatamente após a interrupção do campo primário. No total, foram analisados 16 canais Zoff os quais foram divididos em três categorias: os canais iniciais */early* (1, 2, 3, 4, 5), intermediários/*intermediates* (6, 7, 8, 9, 10) e os tardios/*lates* (11, 12, 13, 14, 15, 16). Assim foram gerados os perfis, as malhas 70x70 metros, utilizando o método de interpolação Krigging e os filtros cosseno direcional e *hanning*, para cada canal TDEM *offtime* (Anexo 2*)*.

Neste trabalho, também é apresentado um produto CMY (Figura 13), tanto para a plataforma no domínio do tempo quanto para a plataforma no domínio da frequência. Nesse tipo de composição, cada canal eletromagnético é associado a uma cor primária do modelo: o ***Cyan*** representa um canal profundo (Zoff 11 e Baixa frequência), o ***Magenta*** caracteriza um canal intermediário (Zoff 6 e média frequência) e o ***Yellow*** corresponde a um canal raso (Zoff 1 e alta frequência). A construção desses mapas permite visualizar simultaneamente diferentes respostas, referentes aos

canais com diferentes profundidades, medidas ao longo do levantamento, condensando em uma única imagem a evolução das assinaturas eletromagnéticas com a profundidade de investigação.

Com relação à inversão dos dados, foi escolhida uma área onde se encontram a maioria dos condutores que é observado nos canais das duas plataformas (Figura 8). Para obtenção do voxel foi utilizado o interpolador Krigging com malha de 100 m × 100 m × 4 m, considerando-se apenas os canais coplanares no processo de inversão para os dados FDEM (Figura 14).

Finalmente foram obtidas as imagens da condutividade pela profundidade (*Conductivity-Depth Images* (*CDIs*)), que são seções que mostram a variação da condutividade elétrica em profundidade ao longo de um perfil, obtidas a partir da inversão dos dados eletromagnéticos. Os parâmetros usados para a plataforma da frequência, foram basicamente os padrões que o Oasis possui e para o domínio do tempo foram utilizadas seções *CDIs* produzidas por **Almeida (2022)** (Figura 15).

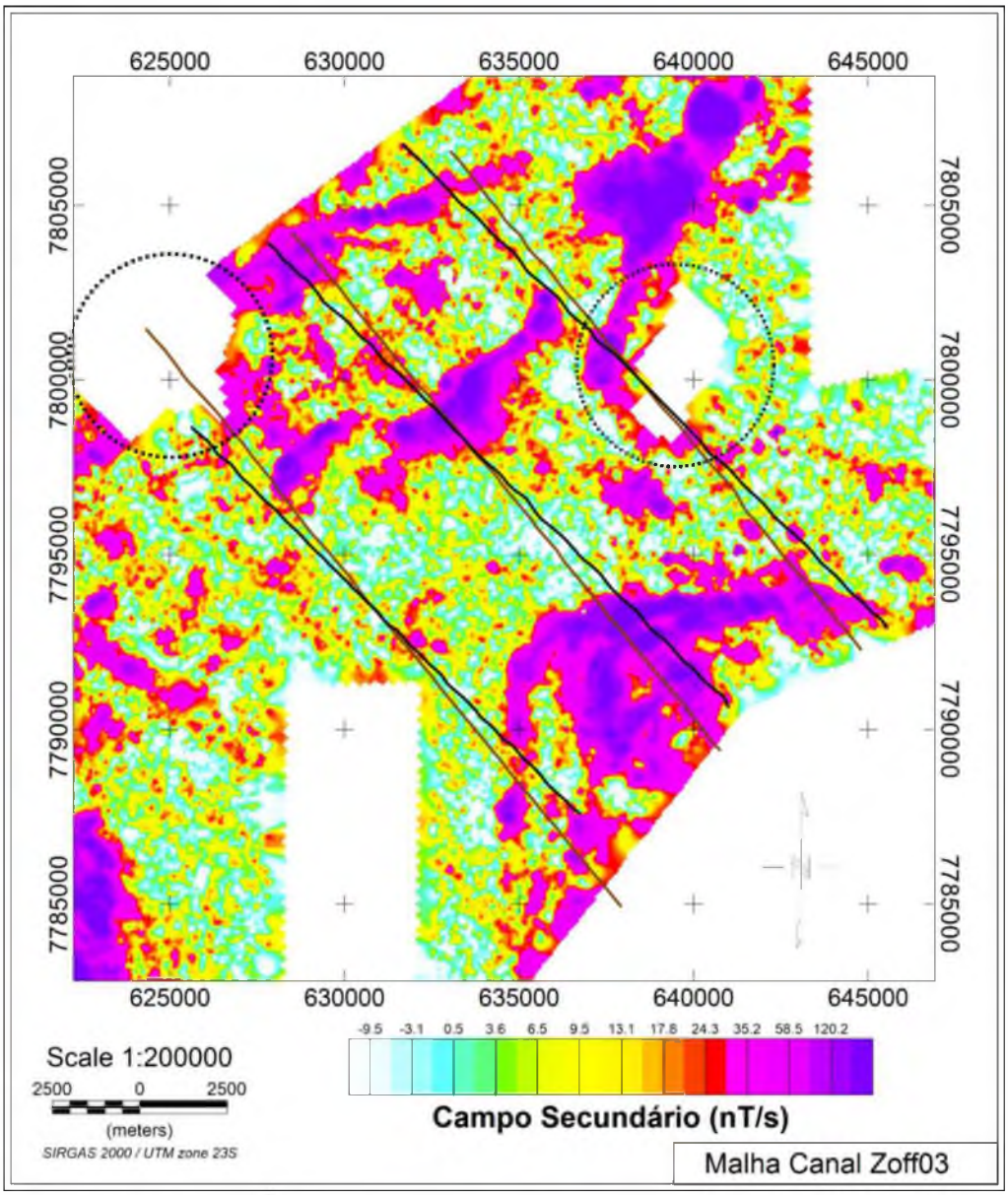


Figura 7 - Mapa com, ao fundo a imagem da malha de condutividade (S/m) do canal (Zoff) 3 (sem filtros no domínio do tempo), a frente seis linhas de voo para fins de comparação e sobreposição e dois círculos pontilhados mostrando a falta de dados do levantamento TDEM. Linhas de voo em marrom (domínio da frequência) e em preto domínio do tempo. (Fonte: Autores).

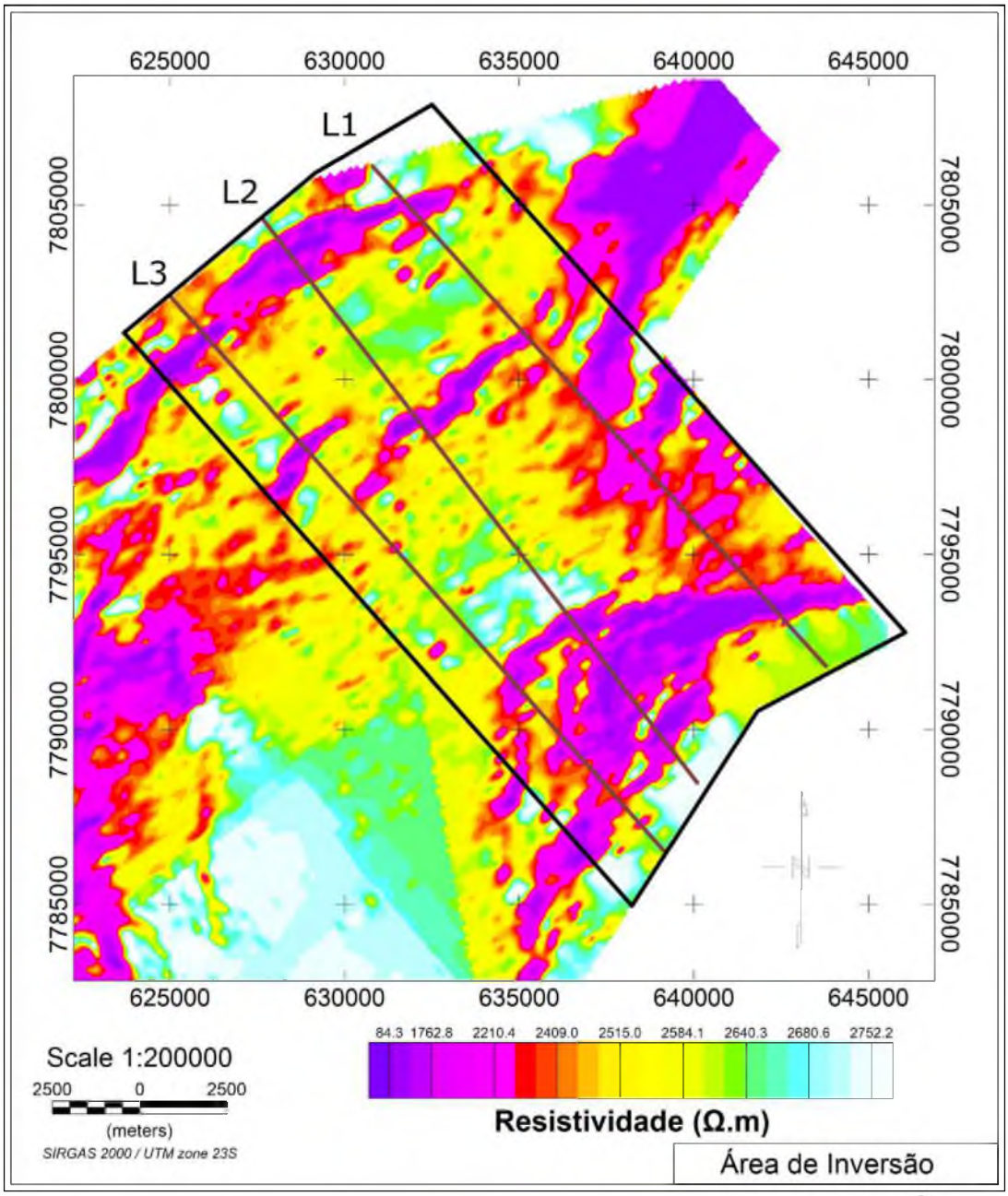


Figura 8 - Mapa com a imagem da malha da resistividade (Ω.m) do canal de Média frequência (fdem) ao fundo, o polígono preto indica a área que foi realizada a inversão e as linhas em marrom a localização das *cdis* (L1, L2 e L3) obtidas nessa pesquisa. (Fonte: Autores)

5. Resultados

Os dados das duas plataformas foram organizados de forma paralela para possibilitar uma comparação direta entre os resultados no domínio da frequência (FDEM) e no domínio do tempo (TDEM).

Para os perfis FDEM, foram utilizados três canais de condutividade, representando diferentes profundidades de investigação: Alta frequência (33.000 Hz) – profundidade rasa; Média frequência (4175 Hz) – profundidade intermediária; Baixa frequência (500 Hz) – profundidade alta (Figuras 9A, 10A e 11 A).

No caso do TDEM, foram usados os 16 canais Zoff (1 a 16), agrupados em três categorias que também representam intervalos de profundidades: *Early time*: Zoff 1–5 (canais rasos); *Intermediate time*: Zoff 6–10 (canais intermediários) e *Late time*: Zoff 11–15 (canais profundos; Figuras 9B, 10B e 11B).

Para a elaboração das malhas comparativas, foram selecionados três canais representativos da variação em profundidade: No método FDEM foram selecionadas 3 frequências: alta, média e baixa, associadas às diferentes profundidades de investigação. Para o método TDEM os canais escolhidos correspondem aos *offsets* Zoff1, Zoff6 e Zoff11, que refletem, respectivamente regiões rasas, intermediárias e profundas (Figura 12). Posteriormente foram geradas imagens CMY dos dois conjuntos de malhas (Figura 13), o resultado 3D da inversão para os dados FDEM e TDEM (Justino, 2022) (Figura 14) e as seções FDEM e TDEM (Figura 15).

Essa abordagem permite identificar e comparar os principais condutores mapeados por cada técnica, avaliando a coerência entre os métodos em diferentes profundidades.

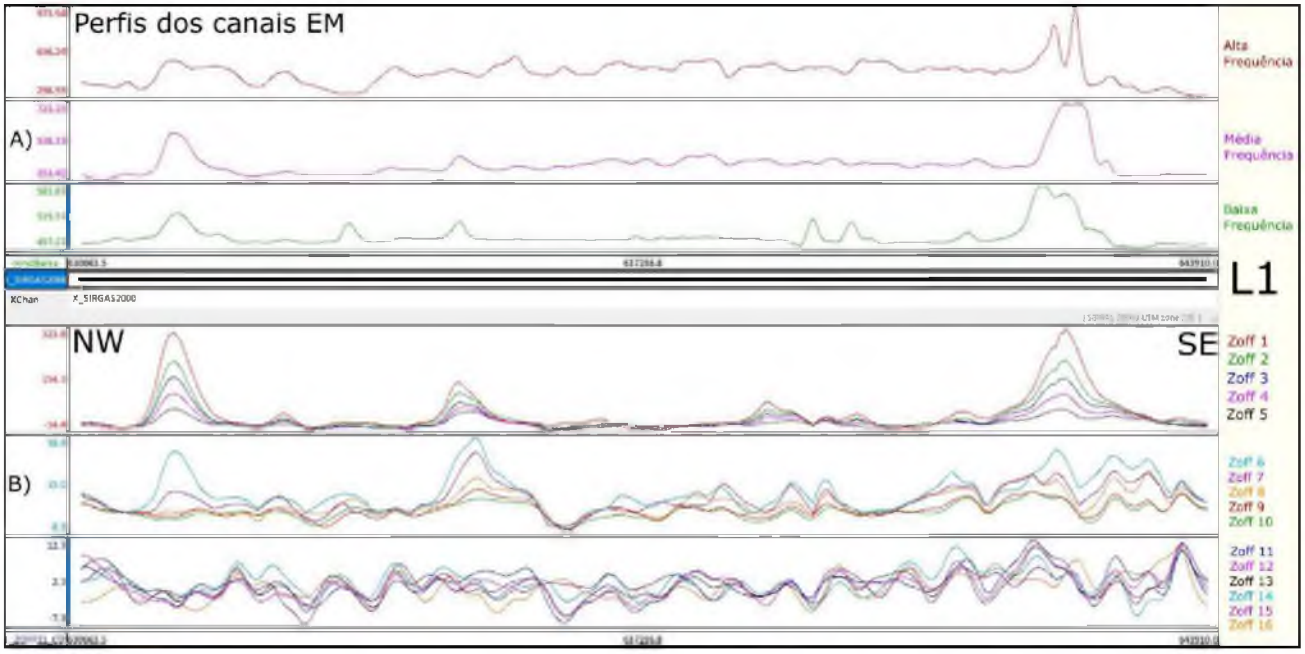


Figura 9 - Perfis da linha L1 (de NW a SE da Figura 8) que mostram: A) a variação da condutividade (em mS/m) para os canais FDEM; de alta, média e baixa frequência; B) a variação do campo eletromagnético secundário (em nT/s) para os canais de 1 a 16 (TDEM). (Fonte: Autores)

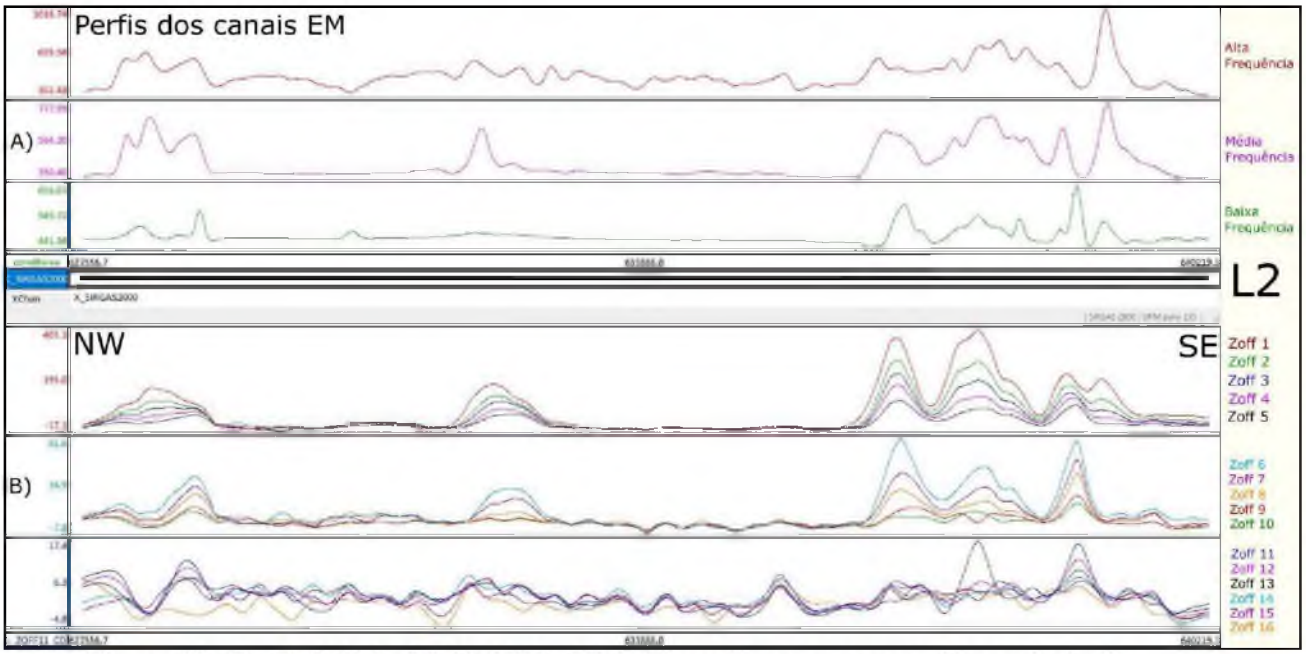


Figura 10 - Perfis da linha L2 (de NW a SE da Figura 8) que mostram: A) a variação da condutividade (em mS/m) para os canais FDEM; de alta, média e baixa frequência; B) a variação do campo eletromagnético secundário (em nT/s) para os canais de 1 a 16 (TDEM). (Fonte: Autores)

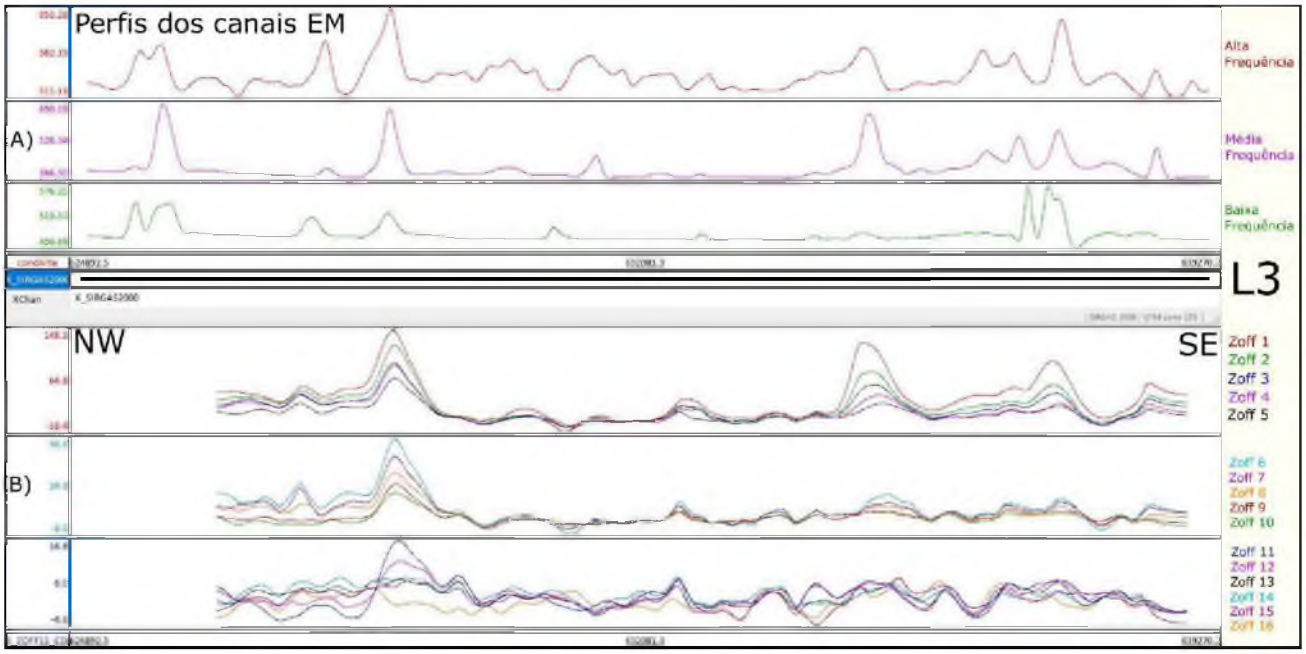


Figura 11 - Perfis da linha L3 (de NW a SE da Figura 8) que mostram: A) a variação da condutividade (em mS/m) para os canais FDEM; de alta, média e baixa frequência; B) a variação do campo eletromagnético secundário (em nT/s) para os canais de 1 a 16 (TDEM). (Fonte: Autores).

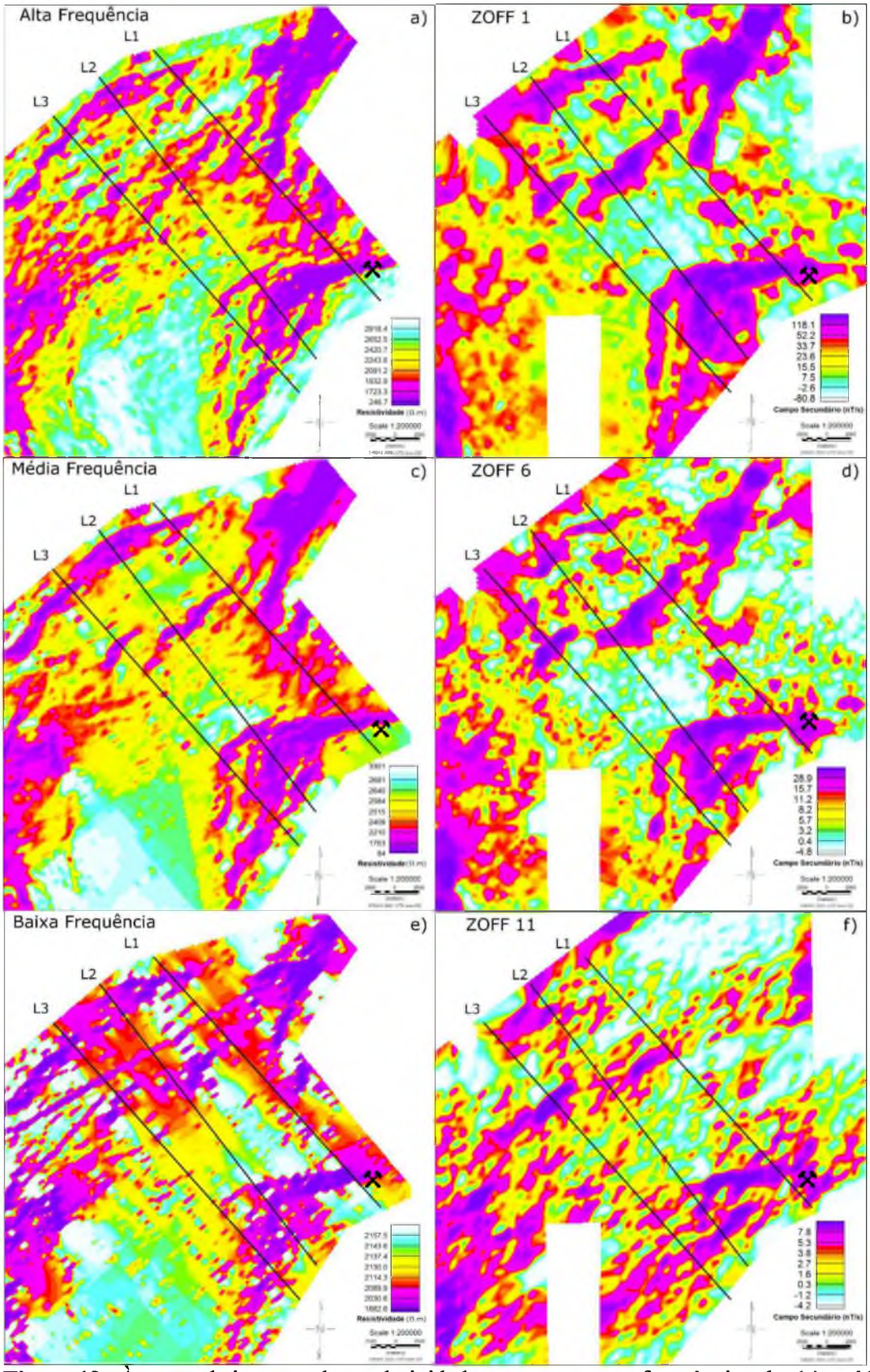


Figura 12 - À esquerda imagens da condutividade aparente para as frequências alta (a), média (c) e baixa (e) da plataforma *AERODAT - FDEM*; e à direita imagens do campo secundário para os canais Zoff 1 (b), Zoff 6 (d) e Zoff 11 (f) - TDEM, destacando a localização das três linhas consideradas para comparação e a mineradora de Roça Grande. (Fonte: Autores).

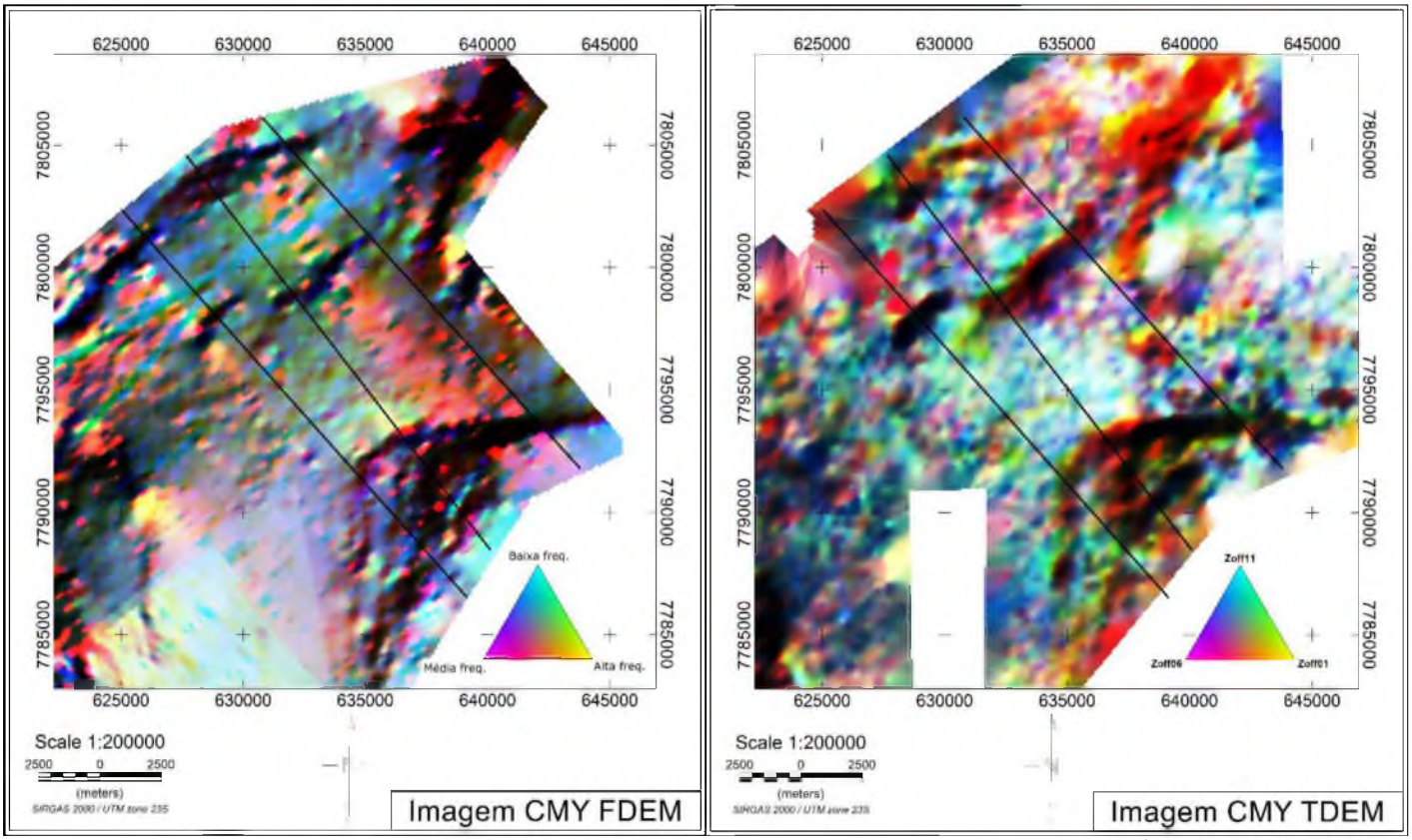


Figura 13 - Acima, mostram dois mapas com as imagens *CMY* de cada plataforma. À esquerda, a imagem ternária *FDEM* e à direita a imagem ternária *TDEM*. (Fonte: Autores)

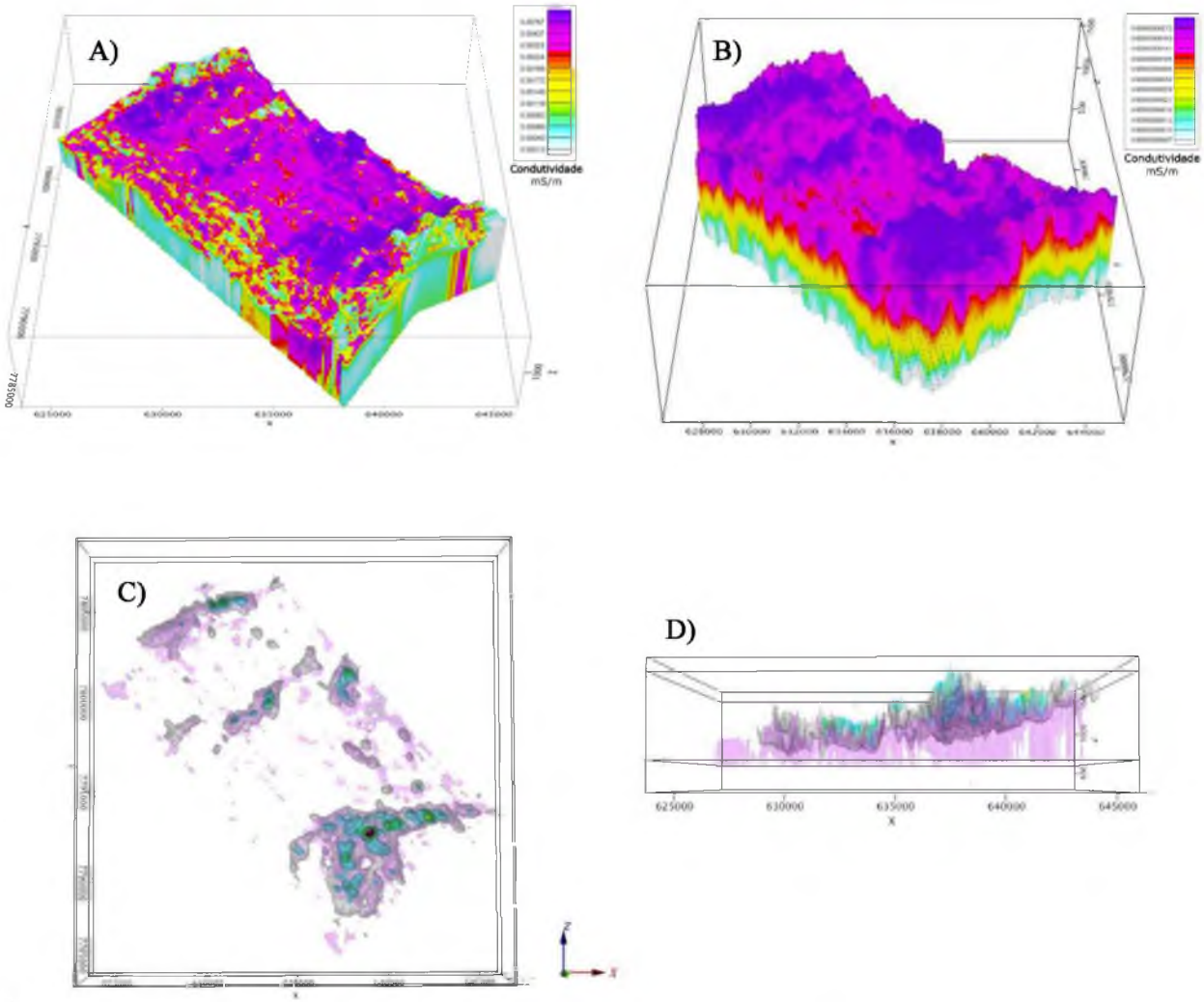


Figura 14 - Acima, mostram os dois modelos resultados das inversões. e A) À esquerda, o modelo na plataforma no domínio da frequência (Fonte: Autores). B) À direita, o modelo na plataforma no domínio do tempo (Fonte: Almeida, 2022). As Figura C e D mostram as isosuperfícies condutivas sobrepostas obtidas para FDEM (lilás; condutividade de 0,01mS/m) e TDEM (cinza=3,74.10^{-9} mS/m, azul =7,53.10^{-9} mS/m e vermelho = 1,89.10^{-8}mS/m, onde C) vista superior e D) vista frontal.

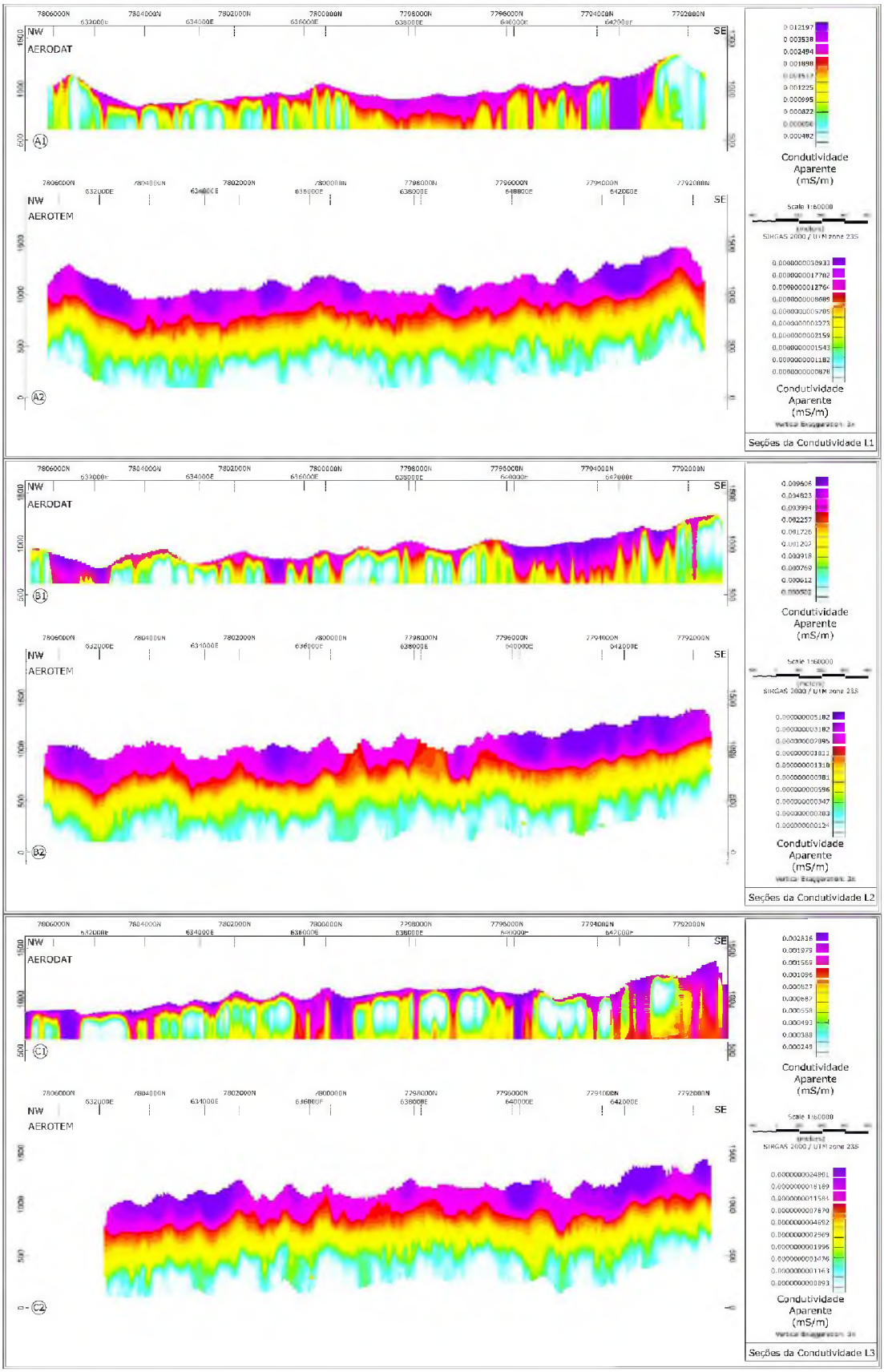


Figura 15 - Imagens da *CDIs* das linhas L1, L2 e L3 obtidas para cada plataforma: A1) *CDI* da linha L1 da plataforma *FDEM*; A2) *CDI* da linha L1da plataforma *TDEM*; B1) *CDI* da linha L2 da plataforma *FDEM*; B2) *CDI* da linha L2 da plataforma *TDEM*. C1) *CDI* da linha L3 da plataforma *FDEM*; C2) *CDI* da linha L3 da plataforma *TDEM*

6. Discussão e Conclusões

De maneira geral, os perfis analisados ao longo das três linhas, das Figuras 9, 10 e 11, revelam três principais conjuntos de anomalias eletromagnéticas localizadas nas porções noroeste, central e sudeste das seções. Essas anomalias são particularmente evidentes nos perfis do campo eletromagnético secundário (canais Zoff 1 a 11), com destaque para as anomalias a sudeste, que se apresentam de forma mais intensa, nos dois métodos (TDEM e FDEM). A anomalia central fica mais clara nos perfis dos canais TDEM.

Na comparação entre os dois métodos, foram utilizadas as seguintes correspondências entre profundidade e frequência/tempo: Zoff1 (raso) com alta frequência; Zoff6 (intermediário) com média frequência e Zoff11 (profundo) com baixa frequência.

As imagens comparativas da Figura 12 demonstra, de forma geral, estruturas condutivas orientadas na direção NE–SW, com uma variação local próxima à região da Mina de Lamego, onde a direção muda de N–S para E–W. As imagens FDEM mais rasas (a e c) apresentam anomalias pontuais de menor extensão, enquanto que a imagem e, correspondente à maior profundidade apresentando uma resposta mais degradada. Já com relação às imagens b, d e f, as associadas a tempos intermediários (b), revelam anomalias mais extensas, que tendem a diminuir com o aumento da profundidade (f).

A Figura 14 destaca algumas vistas 3D, resultados das inversões FDEM e TDEM. A localização da anomalia condutiva (Figura 14 C) mostra que existem coincidência para os dois casos; em termos de profundidade as anomalias a NW (1300m a 700m para TDEM e 1000 a 600 para FDEM) apresentam maior concordância e são mais profundas que as anomalias a SE (1400m a 890 m para TDEM e 1200 a 600m para FDEM).

Ao comparar as seções de profundidade-condutividade (*CDIs*) geradas a partir das duas plataformas (Figura 15), observam-se diferenças significativas. Essas diferenças são atribuídas, principalmente, à maior resolução do método TDEM, proporcionada pela maior quantidade de canais disponíveis. No FDEM, a baixa resolução vertical associada aos poucos canais disponíveis tende a produzir anomalias mais "verticalizadas" e com menor continuidade lateral, enquanto no TDEM a resposta tende a ser mais suavizada. Ainda assim, as principais anomalias (centrais, à noroeste e à sudeste) ainda são detectadas em profundidade pelo FDEM, e que também são identificadas no TDEM, ainda que com menor clareza. Ambos os métodos detectam a mesma capa condutiva superior, o que reforça a coerência entre as plataformas, apesar das diferenças de sensibilidade, resolução e penetração.

Em última análise, o TDEM tende a ter suas aquisições mais lentas do que as medições realizadas pelo FDEM (Steuer & Auken, 2007). Por esse motivo, o FDEM pode ser mais adequado para levantamentos rápidos em grandes áreas. O TDEM, por sua vez, destaca-se pela maior profundidade de investigação, o que o torna mais eficiente na detecção de alvos mais profundos ou de contraste condutivo mais sutil. Assim, a escolha entre os dois métodos deve considerar os objetivos do levantamento, o tipo de alvo geofísico, o tempo disponível, o orçamento e os recursos operacionais da equipe.

Referências

ALKMIM, F. F. & MARSHAK, S., 1998. Transamazonian orogeny in the Southern Sao Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrifero, Precambrian Research, vol. 90(1-2): 29–58.

ALMEIDA Jr., A. J. , 2022. Modelagem de dados TDEM aplicado à mineração na região de Rio das Velhas (MG), Trabalho de Conclusão de Curso. ....p. 40

ARAÚJO J.C. SOUTO, 2018. Modelo deposicional das formações ferríferas bandadas hospedeiras de ouro no greenstone belt arqueano Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, com base em geoquímica e análises in situ de magnetita por ablação a laser via ICP-MS. Dissertação de mestrado, UFMG, p. 07.

BALTAZAR, O.F., ZUCCHETTI, M., 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. Ore Geology Review, 32: 471–499.

BARBOSA ALM., 1968. Contribuições recentes à geologia do Quadrilátero Ferrífero. IGC-UFMG (1985), 44p.

BENTLEY SYS., 2024. OASIS Montaj. Versão 2024.2 (20241130.26). Software para análise e interpretação geofísica. https://www.seequent.com

CARNEIRO MA, NOCE CM & TEIXEIRA W., 1995. Evolução policíclica do Quadrilátero Ferrífero: uma análise fundamentada no conhecimento atual da geocronologia U-Pb e geoquímica isotópica Sm-Nd. Revista da Escola de Minas, 48 (4): 264-273.

CHEMALE, F., ROSIERE, C.A., ENDO, I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil. Precambrian Iron Form., 65: 25–54.

CORDANI UG, KAWASHITA K, MUELLER G, QUADE H, REIMER V & ROESER HP., 1980. Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento do bordo sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, 52: 785-799.

CROCCO-RODRIGUES FA, RIBEIRO-RODRIGUES LC & ROSIERE CA., 1991. Análise crítica sobre a controvérsia do Grupo Tamanduá, Quadrilátero Ferrífero. In: 6ş Simpósio de Geologia de Minas Gerais/ XXX Semana de Estudos de Ouro Preto, SICEG, Ouro Preto. Anais ..., Revista da Escola de Minas, 45(1/2): 47-48.

DNPM, 1992. Levantamento aéreo magnetométrico, gamaespectrométrico e eletromagnetométrico, projeto rio das velhas.

DORR, J. V. N., 1969. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Geol. Surv. Prof. Pap. 110

FONT, E., 2016. Geophysics Courses (PT Version): Métodos Elétricos e Eletromagnéticos. Universidade de Lisboa, Campo Grande. Website: http://webpages.fc.ul.pt/~ecfont/

FREITAS ME, CROCCO-RODRIGUES FA & ROSIÈRE CA., 1991. A correlação do Quartzito Cambotas com a Sequência Espinhaço apoiada por mapeamento geológico em escala 1:10.000. In: 6s Simpósio de Geologia de Minas Gerais / XXX Semana de Estudos de Ouro Preto, SICEG. Anais, Revista da Escola de Minas, 45(1/2): 51-53.

GAIR, J. E., 1962. Geology and ore deposits of the Nova Lima and Rio Acima quadrangles, Minas Gerais, Brazil, Tech. rep.

HERTZ N., 1978. Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S.G.S. Professional Paper, 641-C: 1-81.

Huelsen, M. G. V., 2025. Anotações das aulas de Introdução ao Método Eletromagnético. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

JORDT-EVANGELISTA H, ALKMIM FF & MARSHAK S., 1991. Metamorfismo progressivo e a ocorrência dos três polimorfos de AlOSiO (cianita, andaluzita e silimanita) na Formação Sabará em Ibirité, Quadrilátero Ferrífero, MG. In: 6ş Simpósio de Geologia de Minas Gerais/ XXX Semana de Estudos de Ouro Preto, SICEG. Anais ..., Revista da Escola de Minas, 45(1 e 2): 157-160.

LADEIRA EA., 1980. Metallogenesis of Gold at the Morro Velho Mine, and in Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Unpubl. PhD thesis, University of Western Ontario, London, 272 pp.

LIU, E. H. & LAMONTAGNE, Y., 1998. Geophysical application of a new surface integral equation method for EM modeling. Geophysics, 63(2): 411-423.

LIU, G. & ASTEN, M., 1992. A comparison of airborne and ground transient EM system in their resolving power against geological noise. Expl. Geophys.

MACHADO N & CARNEIRO MA., 1992. U-Pb evidence of late Archaean tectono-thermal activity in the southern São Francisco shield, Brazil. Canadian Journal of Earth Sciences, 29(11): 2341-2346.

MARSHAK, S., ALKMIM, F.F., 1989. Proterozoic Contraction/Extension tectonics of the Southern São Francisco region, Minas Gerais, Brazil. Tectonics, 8: 555–571.

MARSHAK, S., TINKHAM, D., ALKMIM, F., BRUECKNER, H., BORNHORST, T., 1997. Dome-and-keel provinces formed during Paleoproterozoic orogenic collapse — core complexes, diapirs, or 99 neither?: Examples from the Quadrilátero Ferrífero and the Penokean orogen. Geology, 25: 415–418.

NABIGHIAN, M. N.; MACNAE, C. J., 1987. Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. In Nabighian, M.N. Ed, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, v. 1, Theory, Investigations in geophysics, SEG, 203-252.

NABIGHIAN, M.N., MACNAE, J.C., 1991. Time domain electromagnetic prospecting methods. In: Nabighian, M.N. (Ed.), Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, vol. 2. Society of Exploration Geophysicists

NOCE CM, PINHEIRO SO, LADEIRA EA, FRANCA CR & KATTAH S., 1992. A sequência vulcanossedimentar do Grupo Nova Lima na região de Piedade do Paraopeba, oeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Revista Brasileira de Geociências, 22(2): 175-183.

OGILVY, R.D.; LEE, A.C., 1991. Interpretation of vlf-em in-phase data using current density pseudosections. Geophys. Prospect. 39: 567-580.

PALACKY, G. J. & WEST, G. F., 1991. Airborne Eletromagnetic Methods. In: Huelsen, M.G.V. 2007. Interpretação de dados de eletromagnetometria aerotransportada (AEM) do sistema GEOTEM (domínio do tempo). tese n080, 182p.

PINTO PC & SILVA LC., 1996. Contrasting Tectono-Stratigraphic Domains in the Rio das Velhas Greenstone Belt (RVGB), MG, Brazil. In: SBG, Symposium Archaean Terranes of the South American Platform. Brasília, Anais, 23-25.

ROSIÈRE & CHEMALE JR., 2000. TABIRITOS E MINÉRIOS DE FERRO DE ALTO TEOR DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO – UMA VISÃO GERAL E DISCUSSÃO

RUCHKYS U.A., 2012. Oficinas de sensibilização para conservação de sítios geológicos do Quadrilátero Ferrífero. Terrae Didatica. 8(1):24-33, p. 26.

SCHRANK A & SILVA MG., 1993. Os greenstone belts do Cráton do São Francisco, Brasil. In: DOMINGUEZ JML & MISI A (Ed.). O Cráton do São Francisco. Salvador, SBG/SGM/CNPq, pp. 85-118.

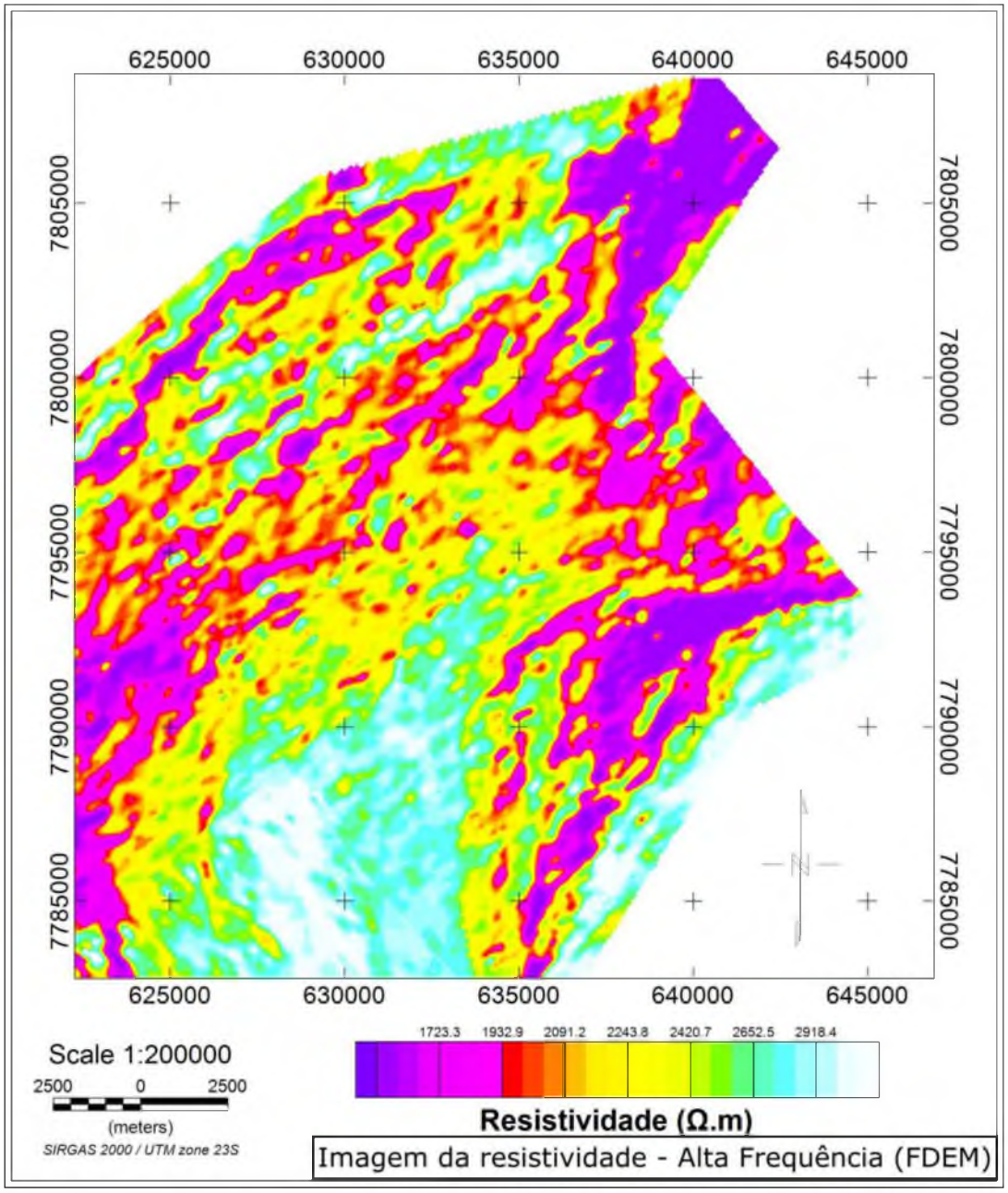
SERVIÇO GEOLÓGICO BRASILEIRO (SGB), 2012. Projeto Aerogeofísico Rio das Velhas - ETAPA II e Projeto Aerogeofísico Nova Redenção. Relatório do SGB. Vol1: 156.

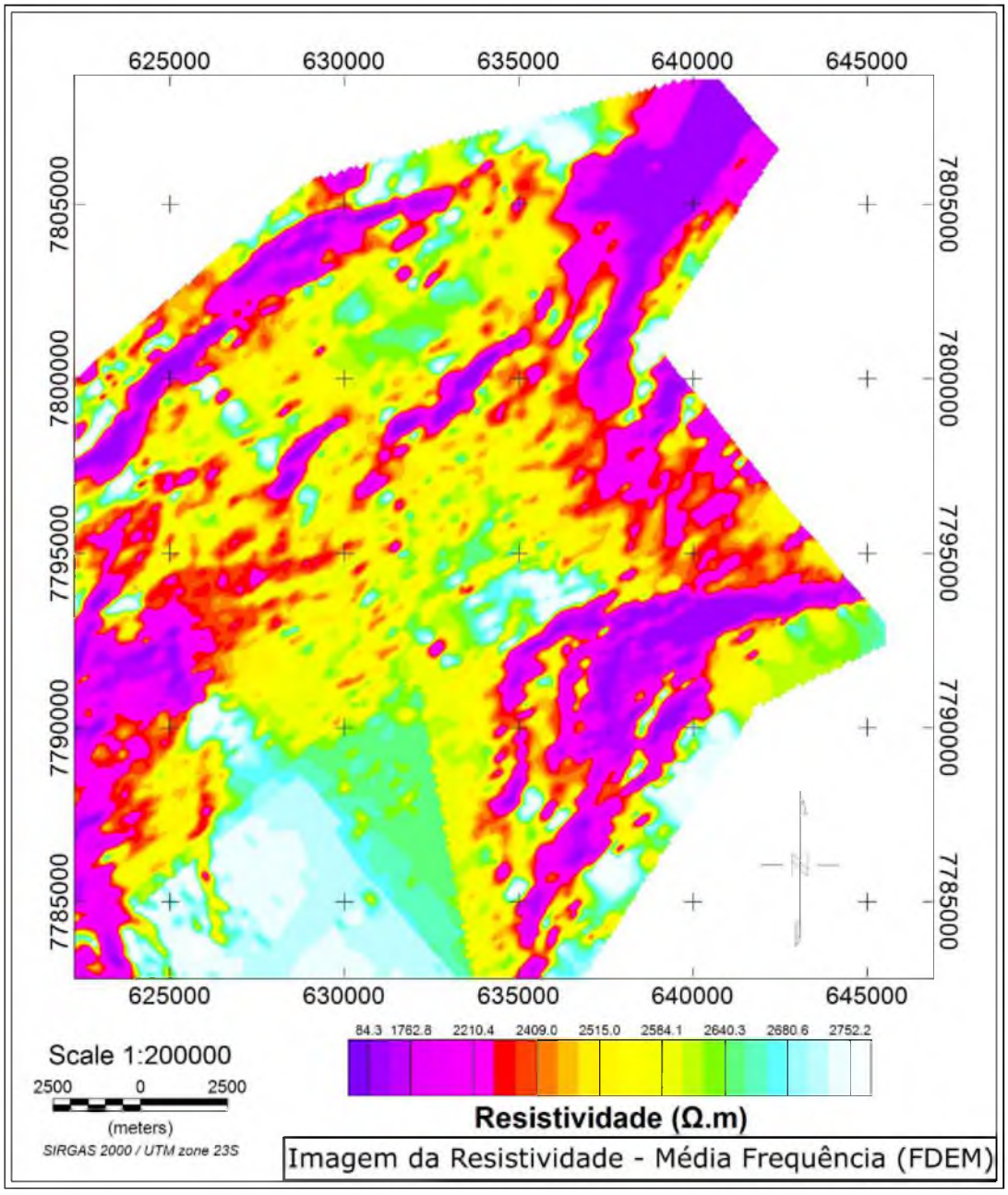
SILVA AM, CHEMALE JR F & KUYUMJIAN RM., 1995. O Ambiente tectônico dos diques máficos do Quadrilátero Ferrífero e Espinhaço Meridional e suas implicações para a evolução do Cráton São Francisco. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 5, Gramado. SBG-CPGQ-UFRGS, 1996. Boletim de Resumos Expandidos..., p. 209-210.

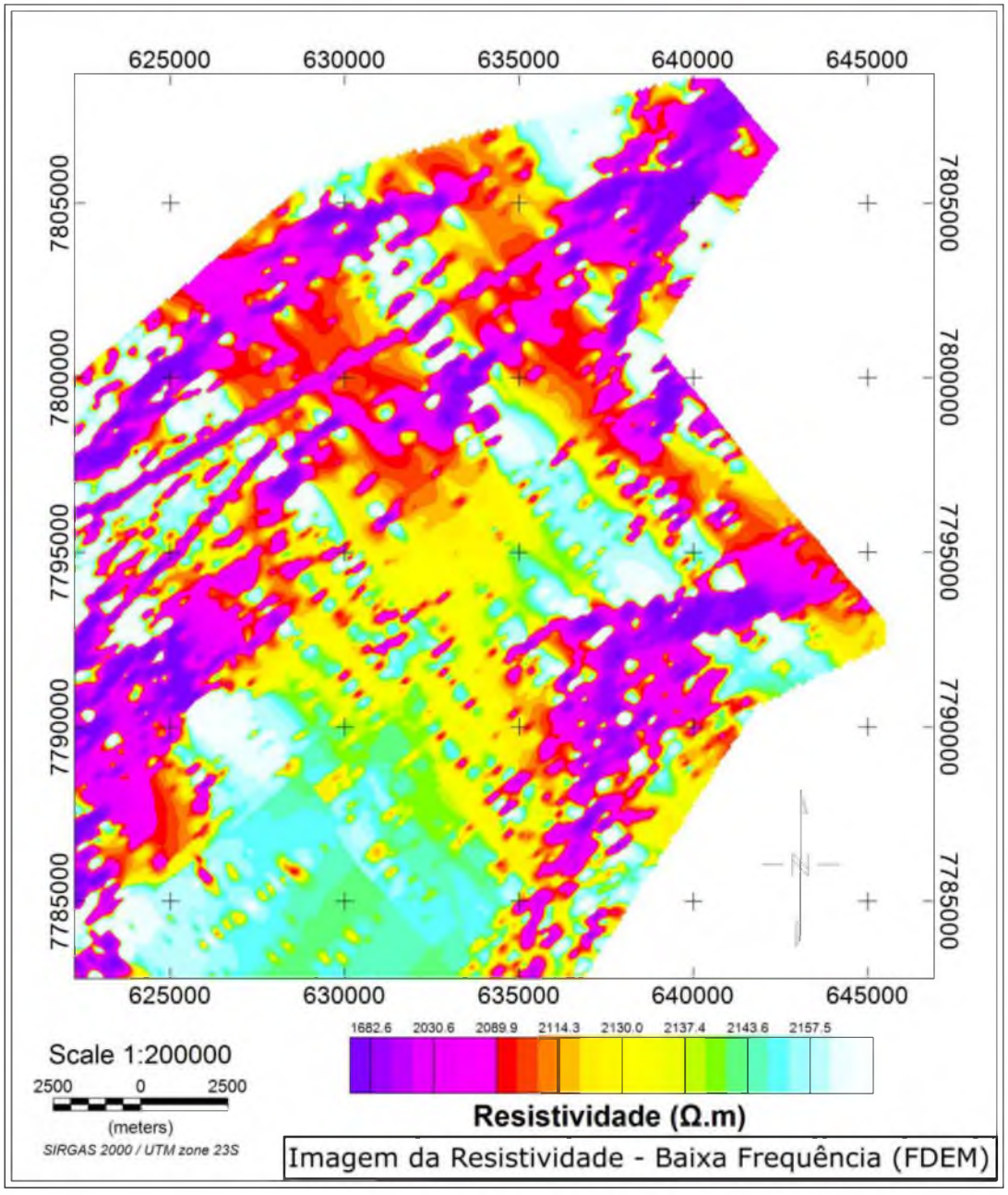
STEUER & AUKEN, 2007. A comparison of helicopter-borne electromagnetics in frequency- and time-domain at the Cuxhaven valley in Northern Germany. Applied Geophysics.

ZUCCHETTI M, BALTAZAR OF & RAPOSO FO., 1996. Estratigrafia. Projeto Rio das Velhas. Mapa Geológico Integrado. Escala: 1:100000. Texto Explicativo. Programa de Estudos Mineiros. Convênio DNPM-CPRM. DNPM-Secretaria de Minas e Energia-Ministério de Minas e Energia. Belo Horizonte, 1996, p. 13-42.

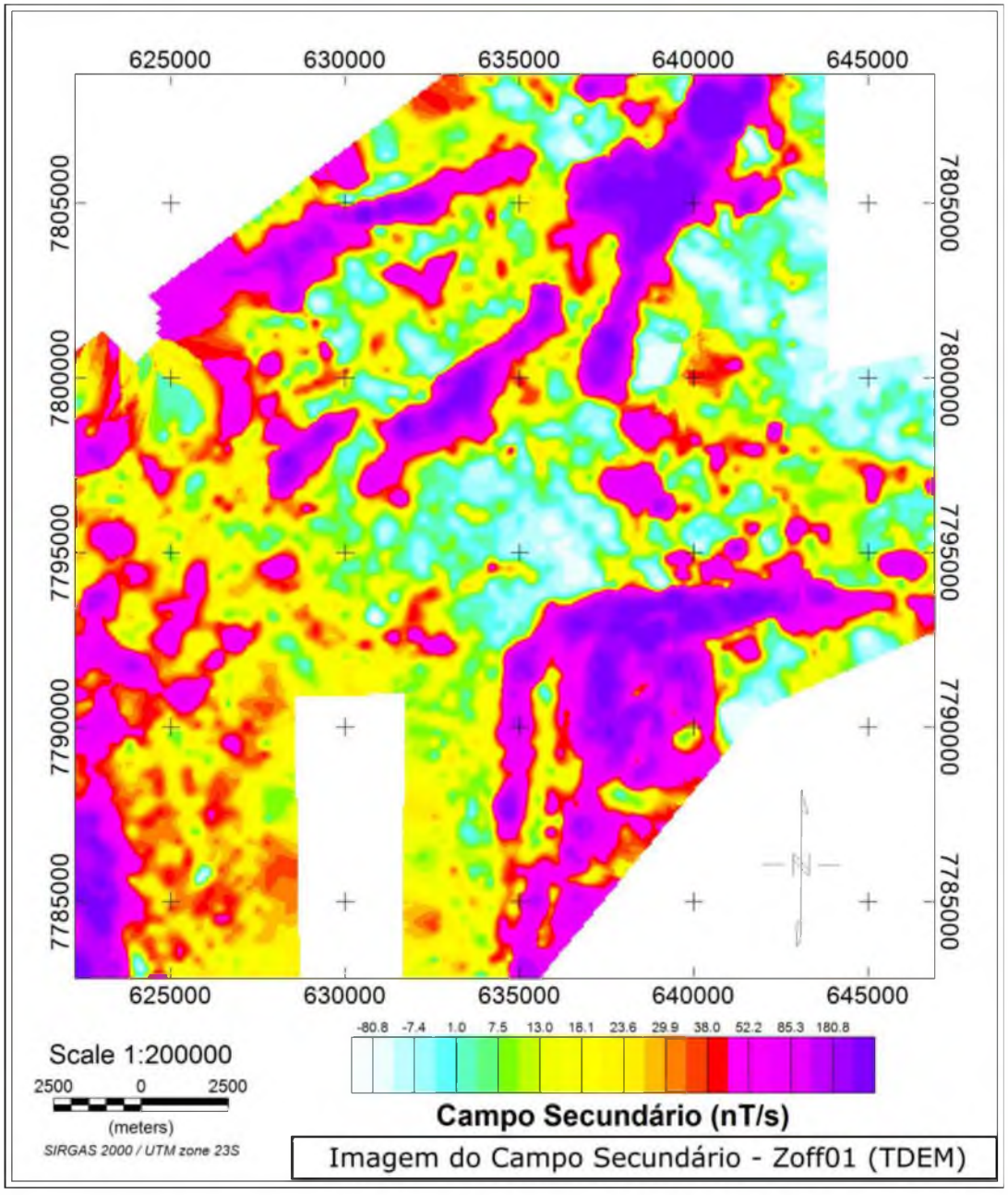
Anexo 1

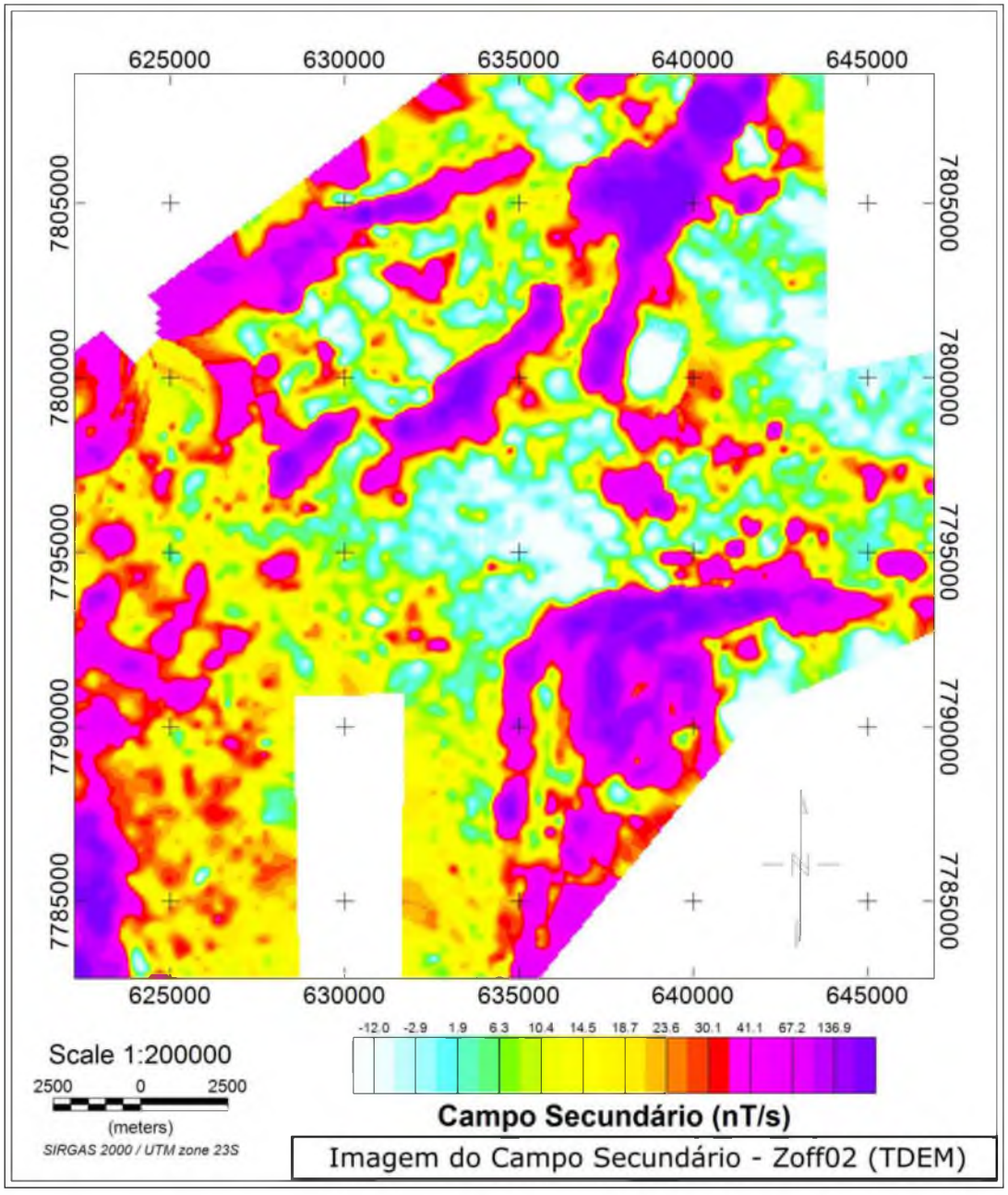

625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
1723.3
1932.9
2091.2
2243.8
2420.7
2652.5
2918.4
Scale 1:200000
2500
0
2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Resistividade (Ω.m)
Imagem da resistividade - Alta Frequência (FDEM)

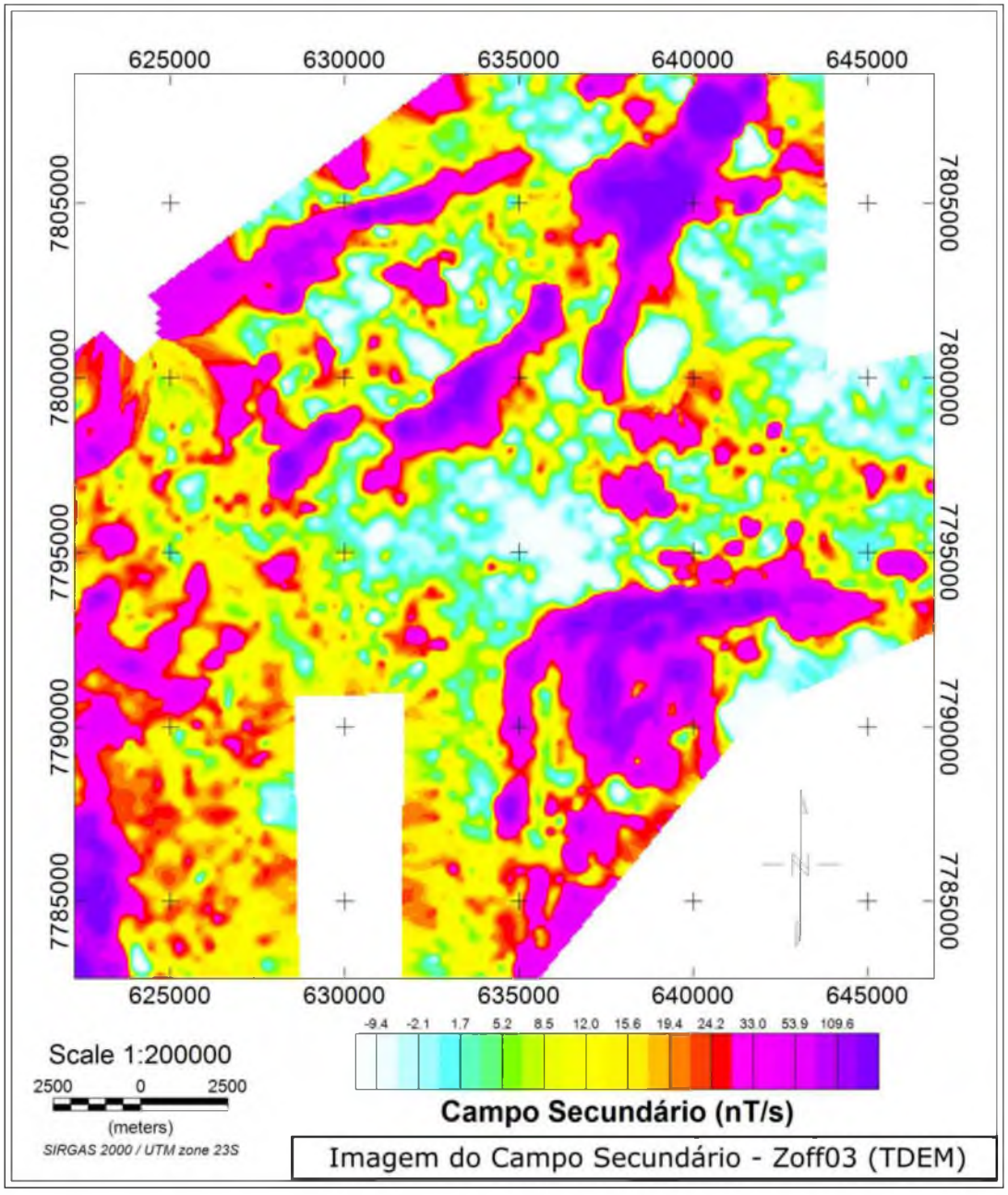

625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
84.3 1762.8 2210.4 2409.0 2515.0 2584.1 2640.3 2680.6 2752.2
Resistividade (Ω.m)
Scale 1:200000
2500 0 2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Imagem da Resistividade - Média Frequência (FDEM)

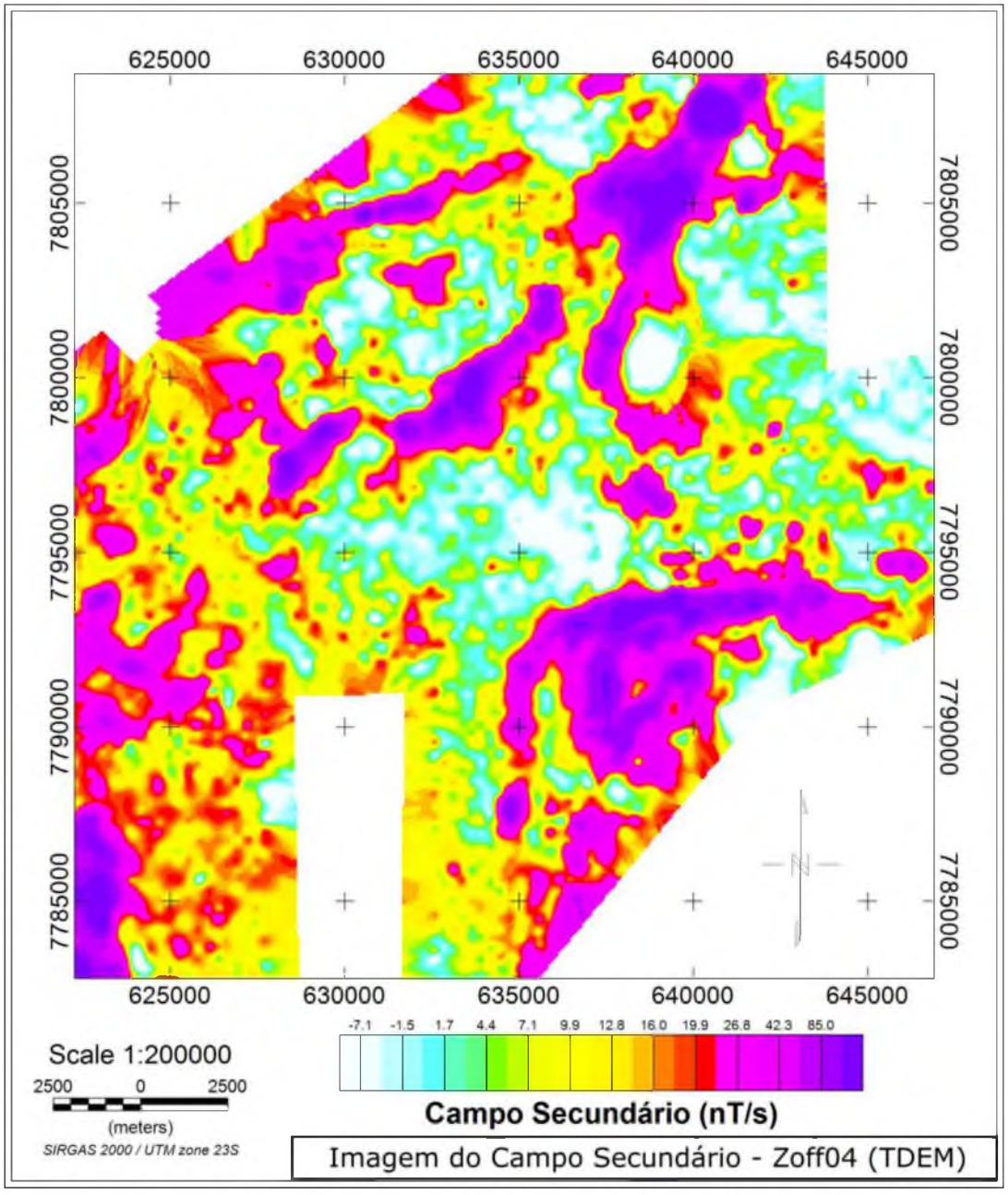

625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
1682.6
2030.6
2089.9
2114.3
2130.0
2137.4
2143.6
2157.5
Scale 1:200000
2500
0
2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Resistividade (Ω.m)
Imagem da Resistividade - Baixa Frequência (FDEM)

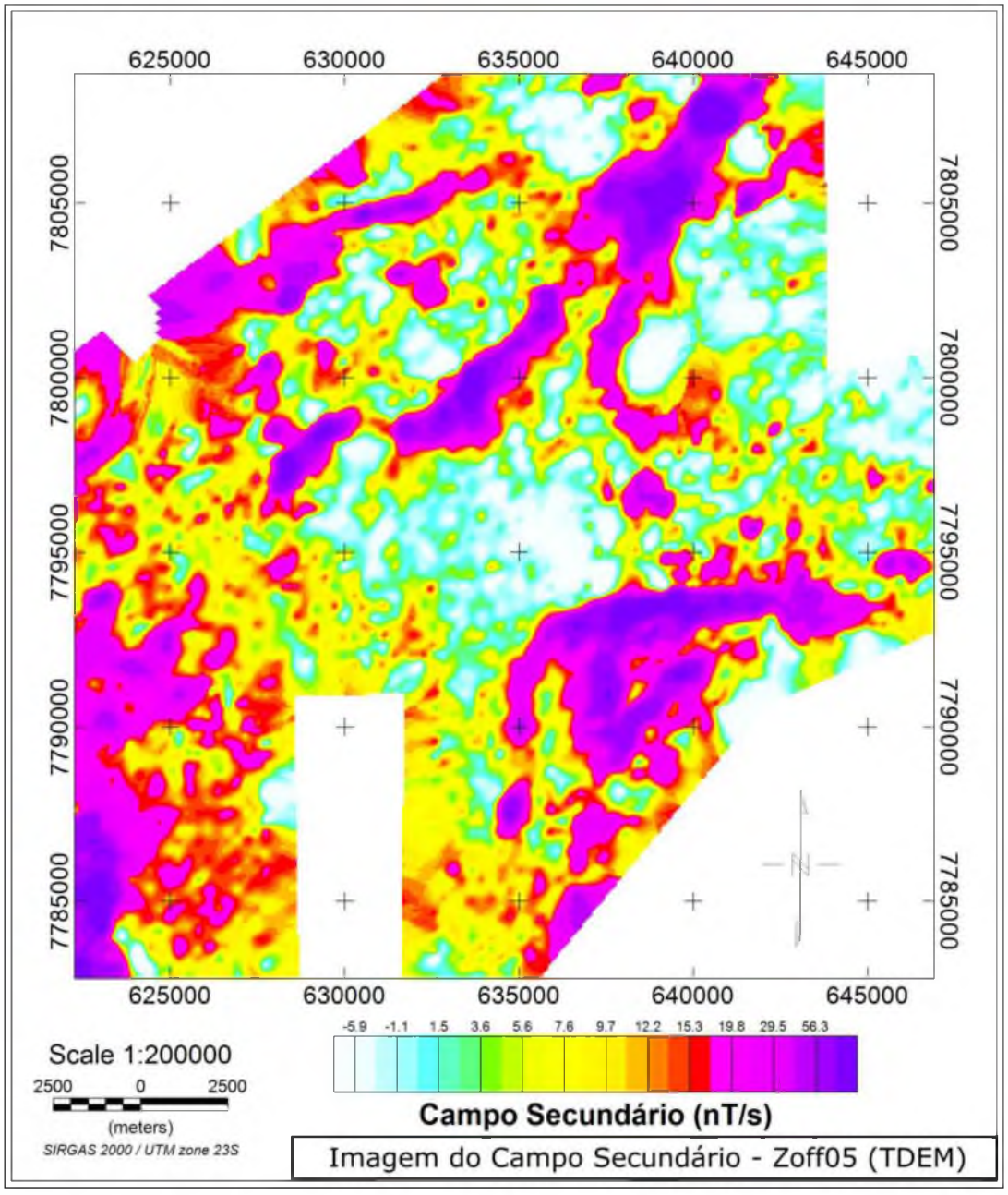
Anexo 2

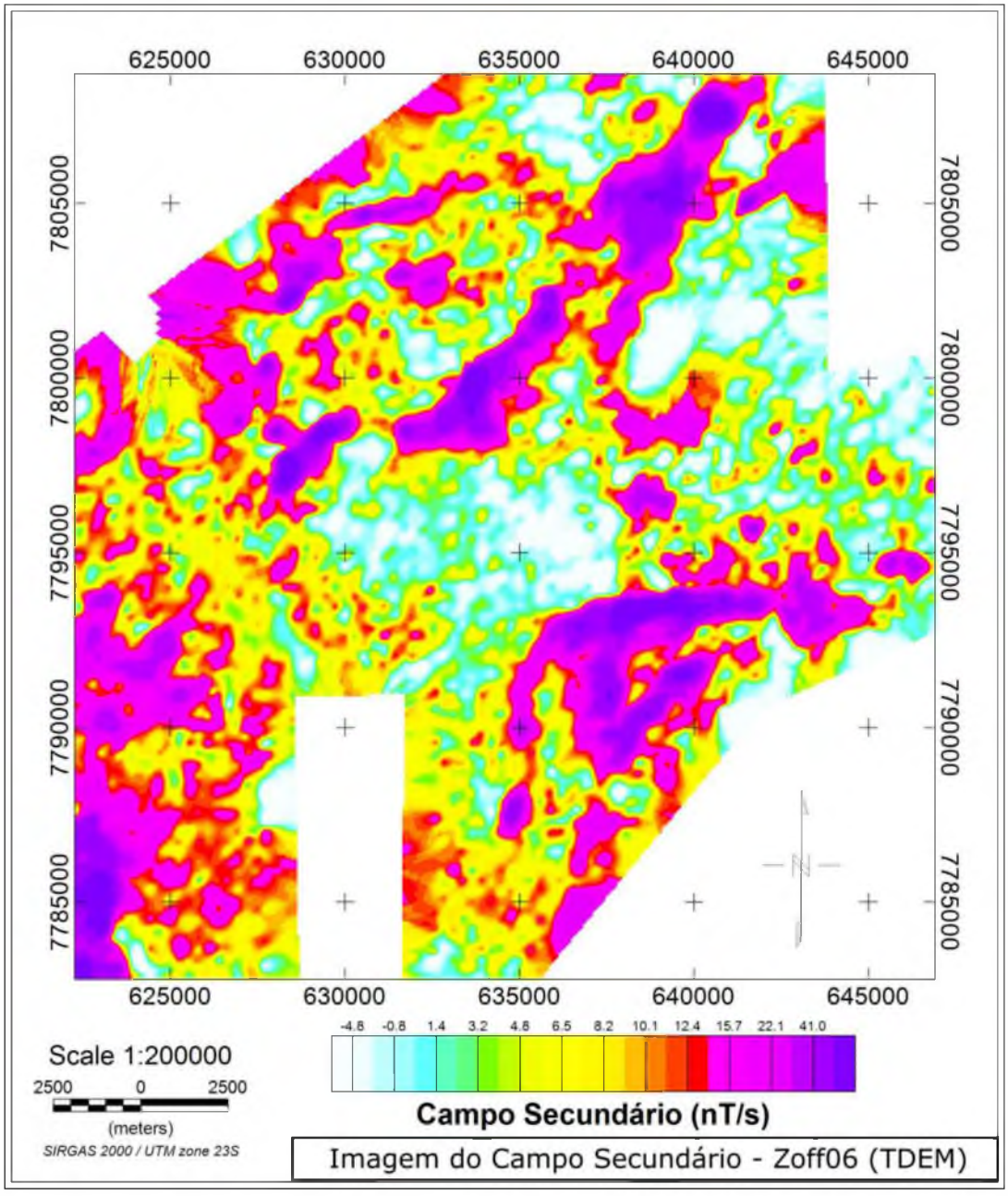

625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-80.8 -7.4 1.0 7.5 13.0 18.1 23.6 29.9 38.0 52.2 85.3 180.8
Scale 1:200000
2500 0 2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Campo Secundário (nT/s)
Imagem do Campo Secundário - Zoff01 (TDEM)

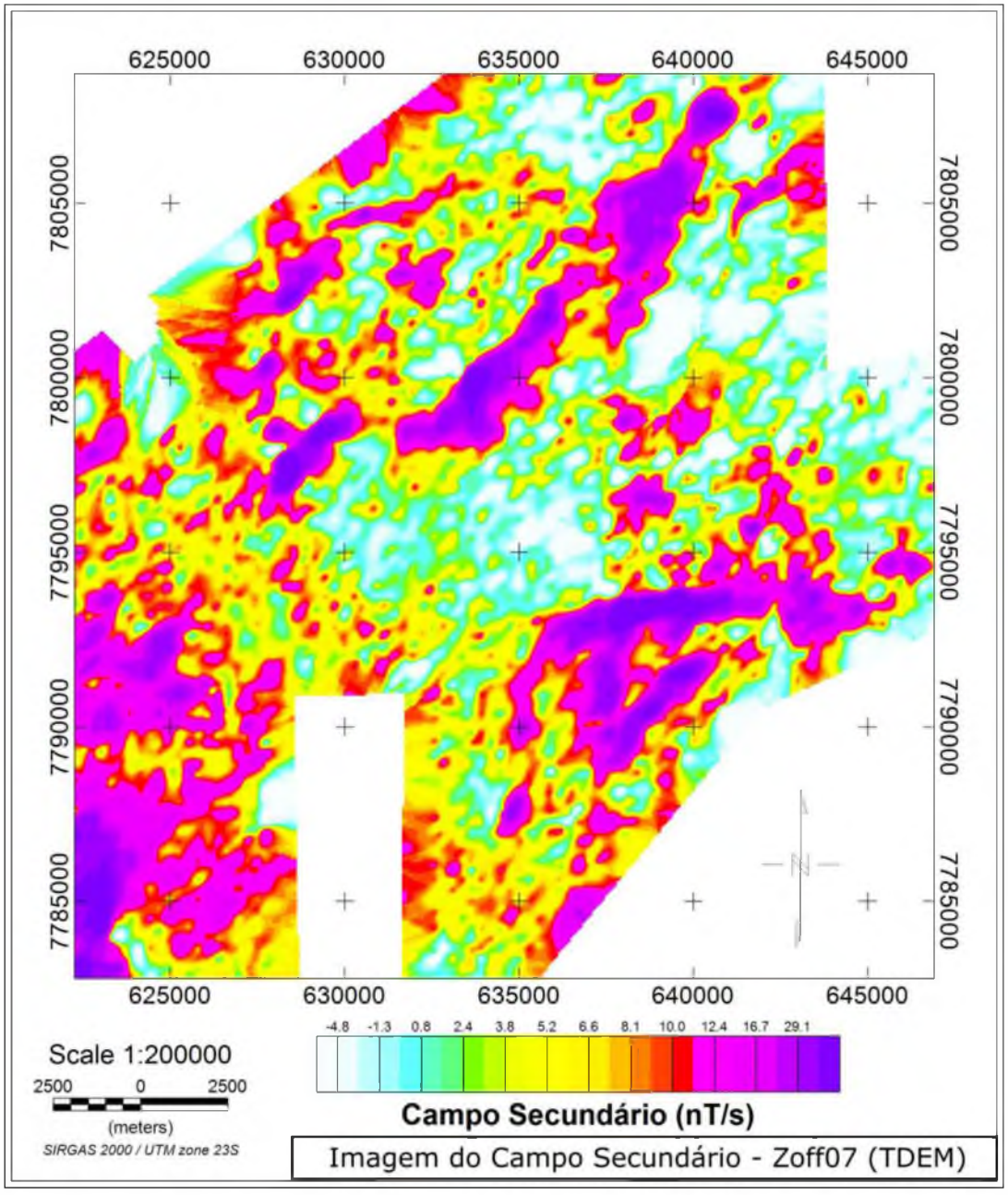

625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-12.0 -2.9 1.9 6.3 10.4 14.5 18.7 23.6 30.1 41.1 67.2 136.9
Campo Secundário (nT/s)
Scale 1:200000
2500 0 2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Imagem do Campo Secundário - Zoff02 (TDEM)

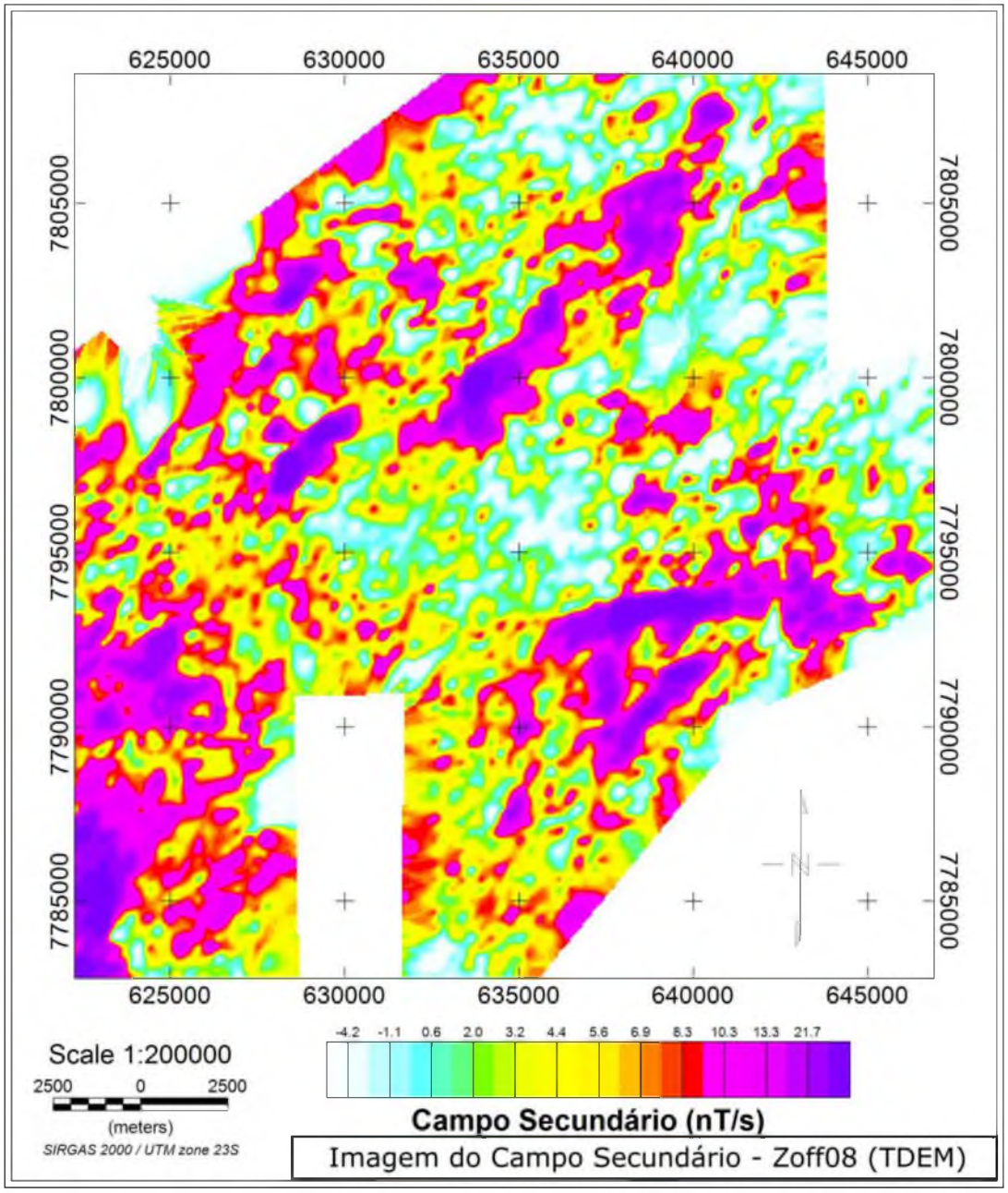

625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-9.4 -2.1 1.7 5.2 8.5 12.0 15.6 19.4 24.2 33.0 53.9 109.6
Campo Secundário (nT/s)
Scale 1:200000
2500 0 2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Imagem do Campo Secundário - Zoff03 (TDEM)

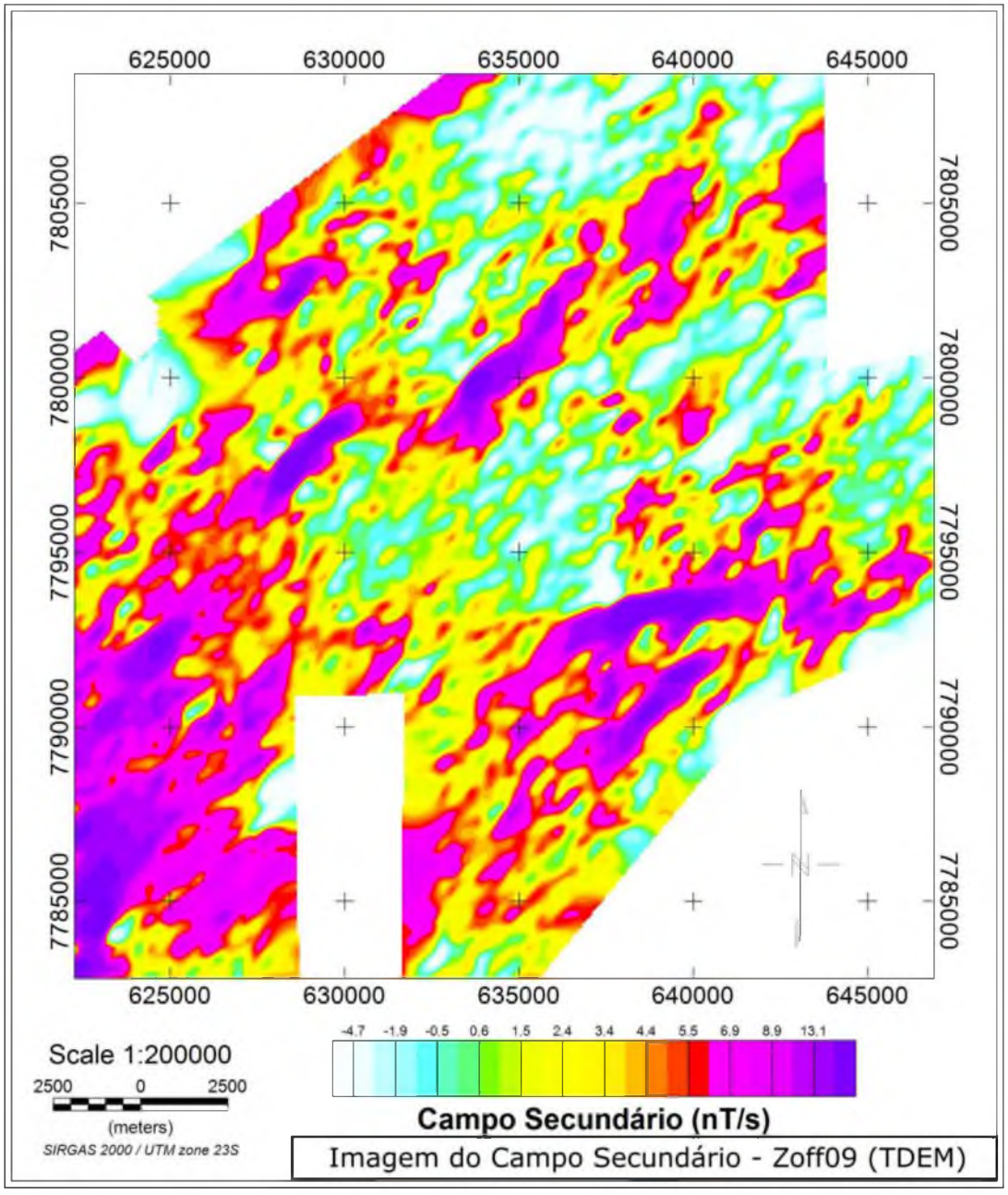

625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-7.1 -1.5 1.7 4.4 7.1 9.9 12.8 16.0 19.9 26.8 42.3 85.0
Campo Secundário (nT/s)
Scale 1:200000
2500 0 2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Imagem do Campo Secundário - Zoff04 (TDEM)

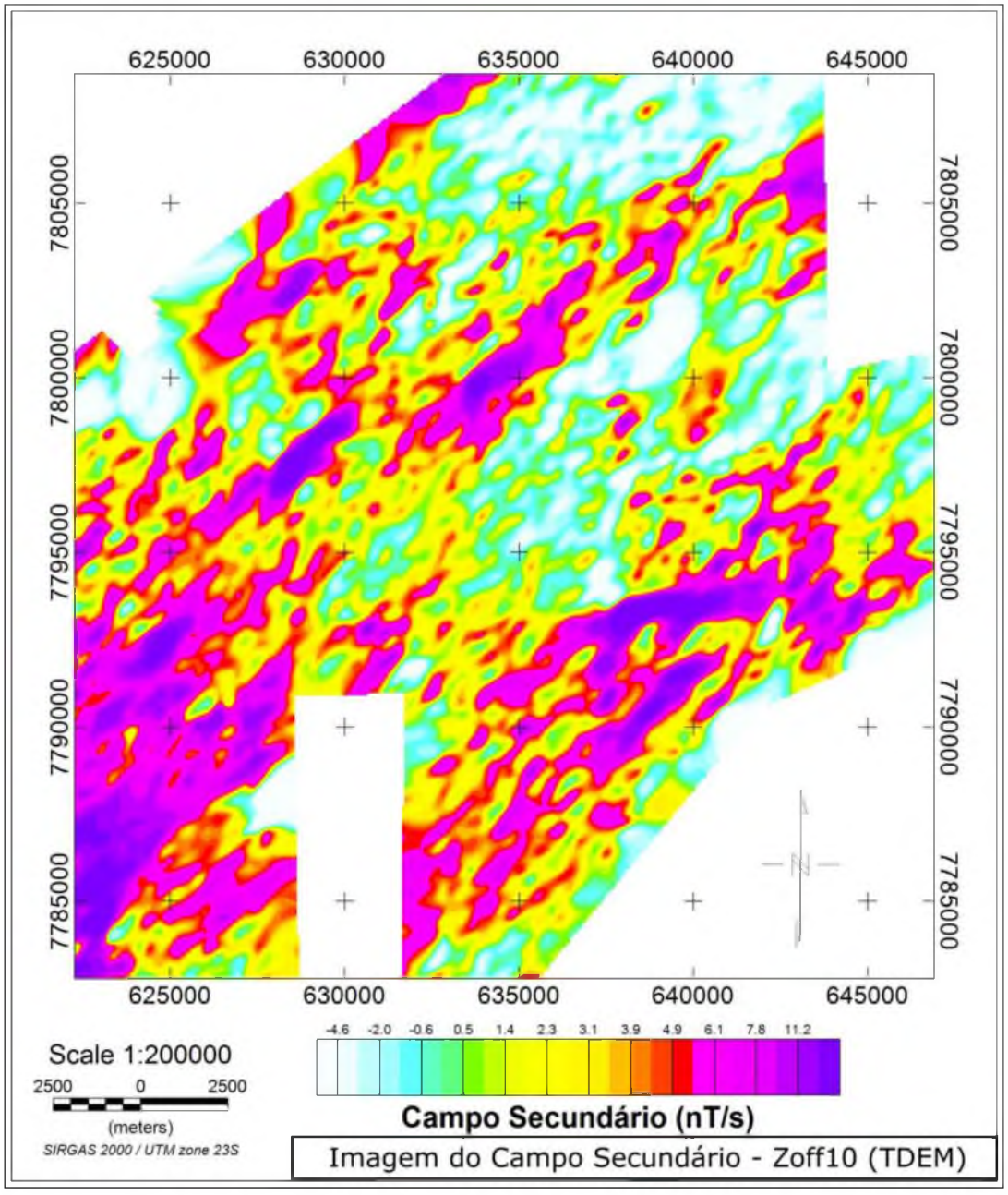

625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-5.9 -1.1 1.5 3.6 5.6 7.6 9.7 12.2 15.3 19.8 29.5 56.3
Scale 1:200000
2500 0 2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Campo Secundário (nT/s)
Imagem do Campo Secundário - Zoff05 (TDEM)

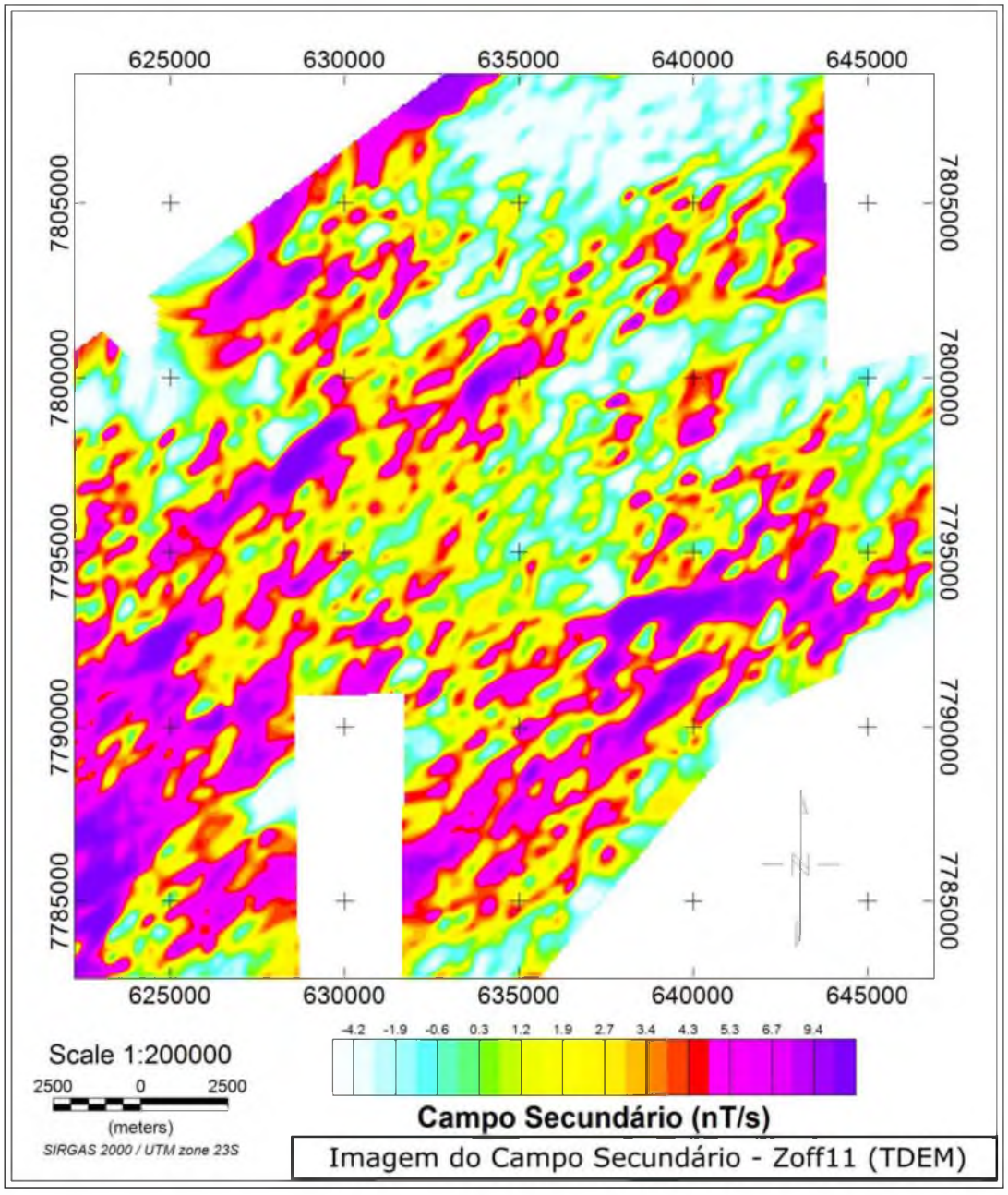

625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-4.8 -0.8 1.4 3.2 4.8 6.5 8.2 10.1 12.4 15.7 22.1 41.0
Campo Secundário (nT/s)
Scale 1:200000
2500 0 2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Imagem do Campo Secundário - Zoff06 (TDEM)

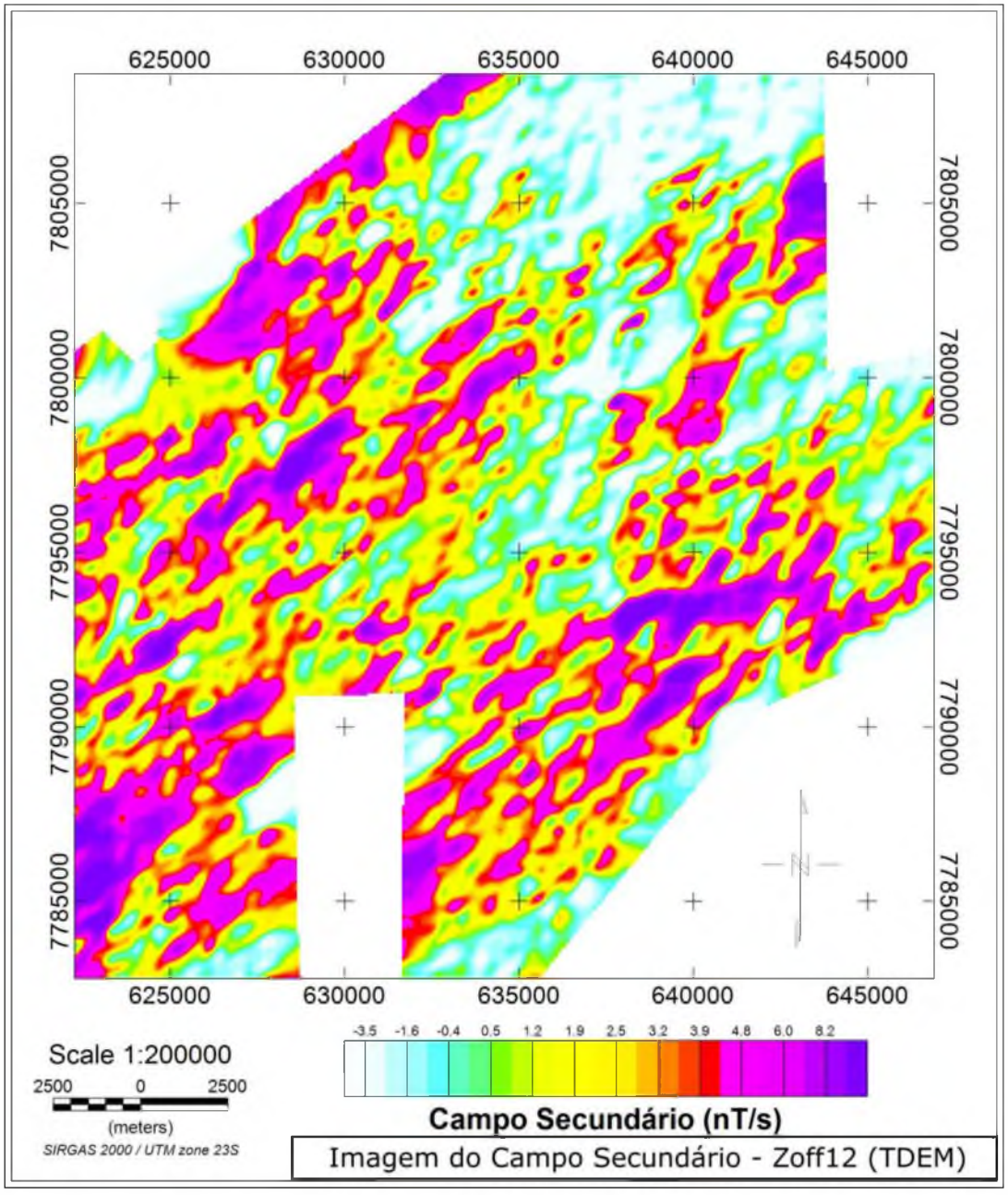

625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-4.8 -1.3 0.8 2.4 3.8 5.2 6.6 8.1 10.0 12.4 16.7 29.1
Scale 1:200000
2500 0 2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Campo Secundário (nT/s)
Imagem do Campo Secundário - Zoff07 (TDEM)

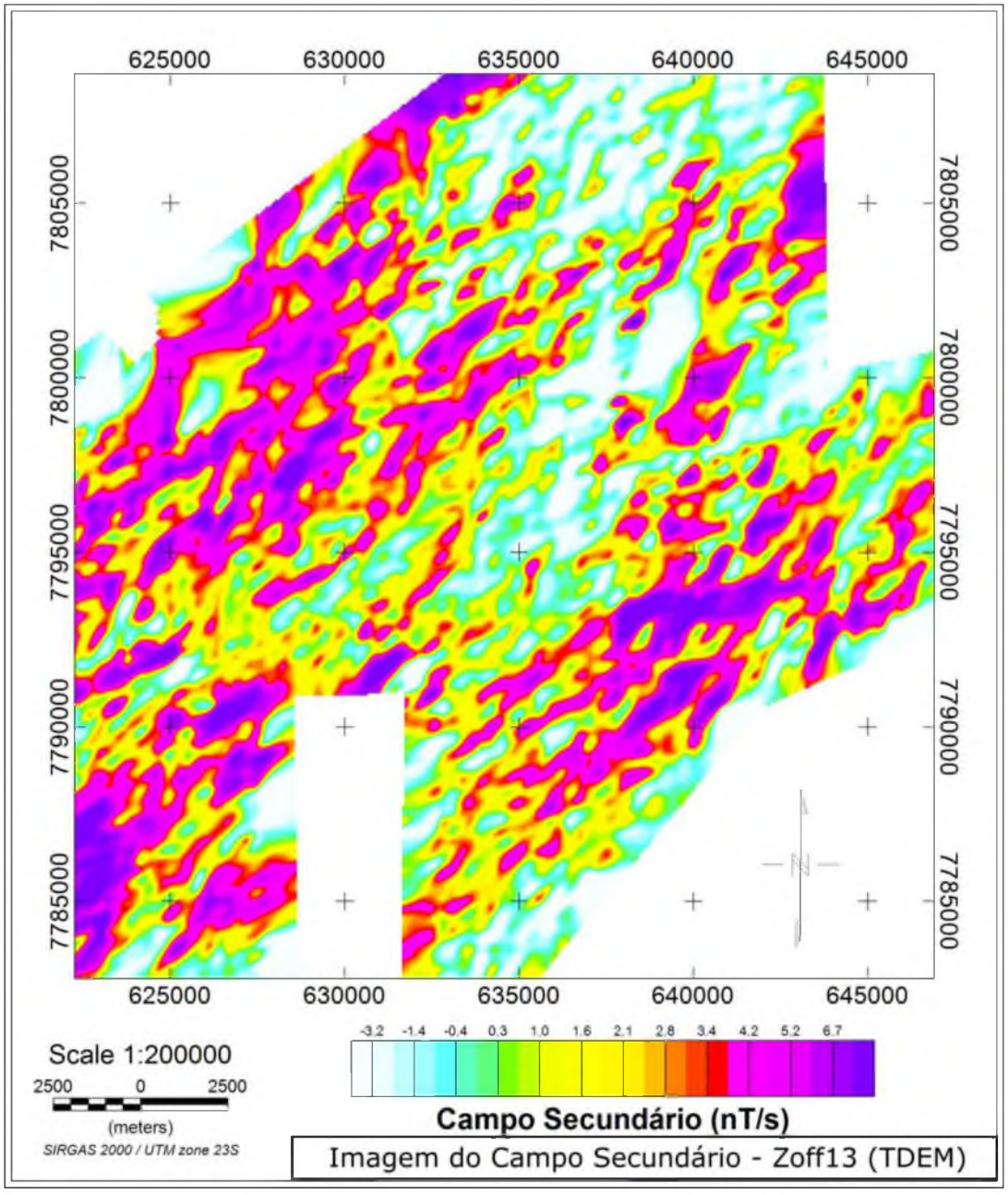

625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-4.2
-1.1
0.6
2.0
3.2
4.4
5.6
6.9
8.3
10.3
13.3
21.7
Scale 1:200000
2500
0
2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Campo Secundário (nT/s)
Imagem do Campo Secundário - Zoff08 (TDEM)

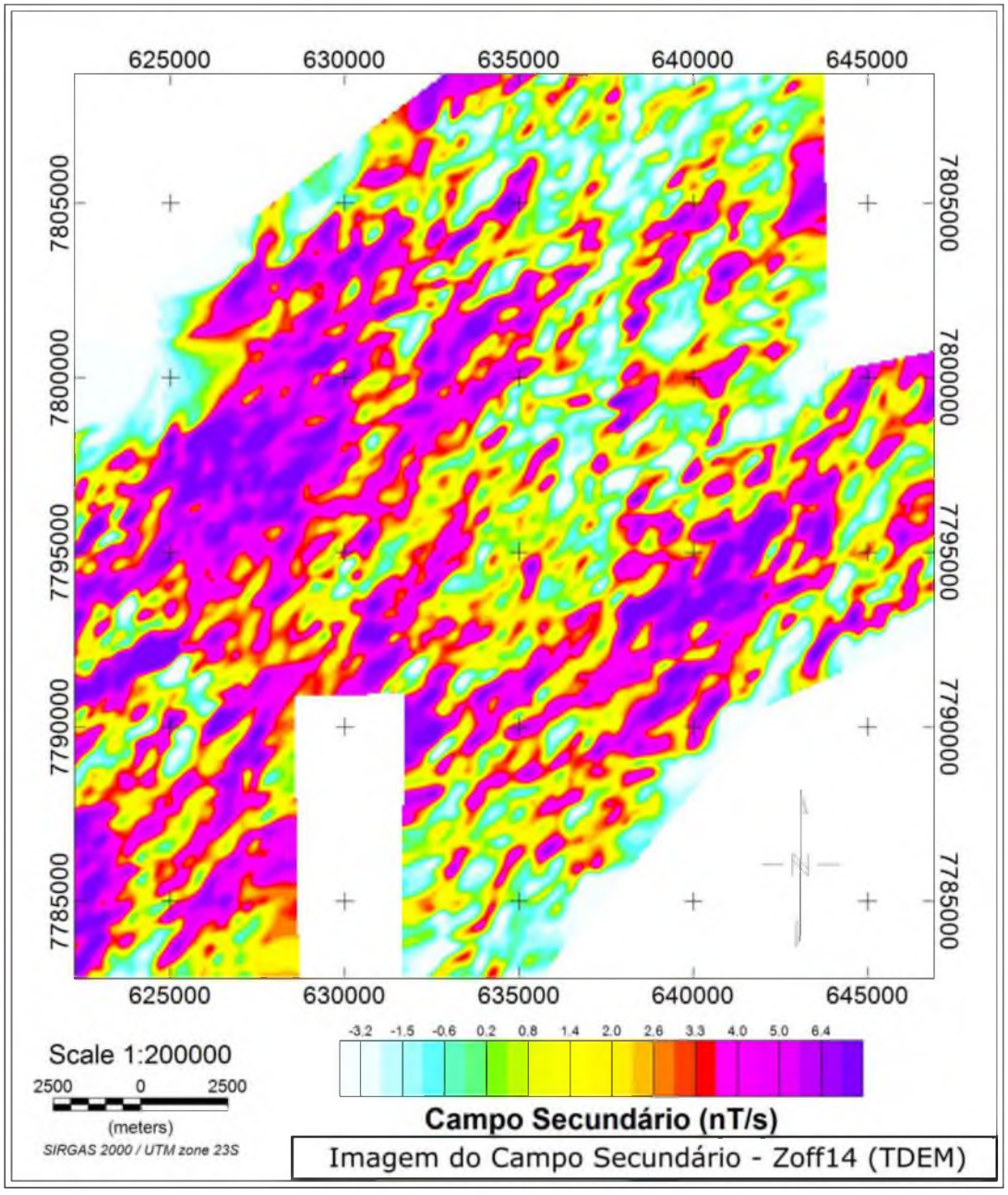

625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-4.7
-1.9
-0.5
0.6
1.5
2.4
3.4
4.4
5.5
6.9
8.9
13.1
Scale 1:200000
2500
0
2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Campo Secundário (nT/s)
Imagem do Campo Secundário - Zoff09 (TDEM)

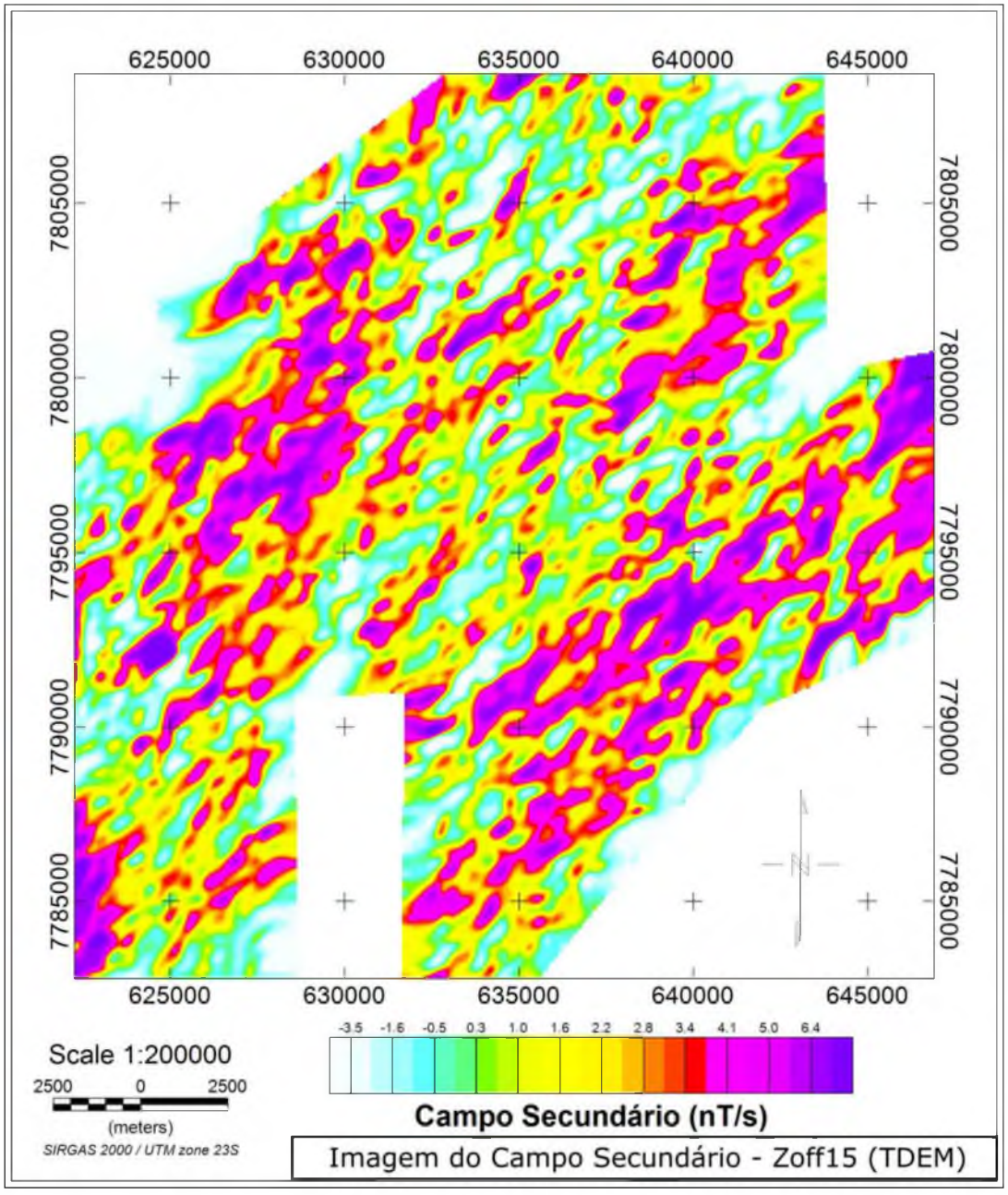

625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-4.6 -2.0 -0.6 0.5 1.4 2.3 3.1 3.9 4.9 6.1 7.8 11.2
Scale 1:200000
2500 0 2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Campo Secundário (nT/s)
Imagem do Campo Secundário - Zoff10 (TDEM)

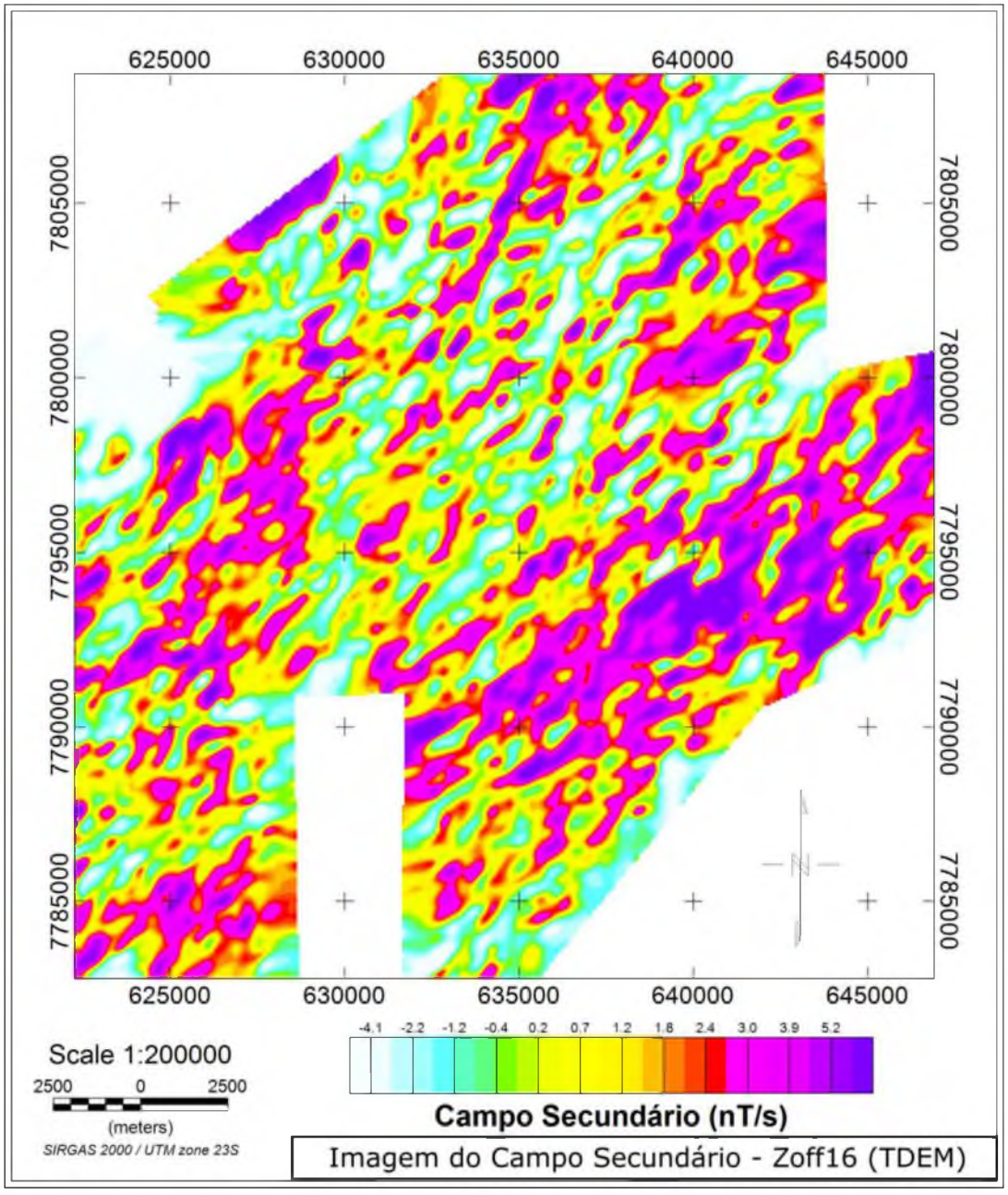

625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-4.2 -1.9 -0.6 0.3 1.2 1.9 2.7 3.4 4.3 5.3 6.7 9.4
Scale 1:200000
2500 0 2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Campo Secundário (nT/s)
Imagem do Campo Secundário - Zoff11 (TDEM)


625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-3.5 -1.6 -0.4 0.5 1.2 1.9 2.5 3.2 3.9 4.8 6.0 8.2
Scale 1:200000
2500 0 2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Campo Secundário (nT/s)
Imagem do Campo Secundário - Zoff12 (TDEM)


625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-3.2
-1.4
-0.4
0.3
1.0
1.6
2.1
2.8
3.4
4.2
5.2
6.7
Scale 1:200000
2500
0
2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Campo Secundário (nT/s)
Imagem do Campo Secundário - Zoff13 (TDEM)


625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-3.2 -1.5 -0.6 0.2 0.8 1.4 2.0 2.6 3.3 4.0 5.0 6.4
Campo Secundário (nT/s)
Scale 1:200000
2500 0 2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Imagem do Campo Secundário - Zoff14 (TDEM)


625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-3.5 -1.6 -0.5 0.3 1.0 1.6 2.2 2.8 3.4 4.1 5.0 6.4
Campo Secundário (nT/s)
Scale 1:200000
2500 0 2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Imagem do Campo Secundário - Zoff15 (TDEM)


625000
630000
635000
640000
645000
7805000
7800000
7795000
7790000
7785000
-4.1 -2.2 -1.2 -0.4 0.2 0.7 1.2 1.8 2.4 3.0 3.9 5.2
Campo Secundário (nT/s)
Scale 1:200000
2500 0 2500
(meters)
SIRGAS 2000 / UTM zone 23S
Imagem do Campo Secundário - Zoff16 (TDEM)