



**Assinatura magnética da Província Mineral de Carajás e sua
associação com ocorrências de Ouro**

Andrew Josengler de Siqueira

Orientadora: Professora Dra. Roberta Mary Vidotti

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Lima Pinto (UFOB)

Sumário

Sumário

Sumário.....	2
Índice de Ilustrações.....	3
Introdução.....	4
Objetivo.....	4
Geologia Regional.....	5
Domínio Rio Maria.....	5
Domínio Iriri-Xingu.....	7
Cinturão Araguaia.....	7
Bacia de Carajás	7
Fundamentação teórica.....	8
Campo Magnético	8
Método Magnetométrico.....	9
Campo Geomagnético Internacional de Referência.....	9
Magnetismo remanente.....	10
Magnetismo induzido	10
Anomalia Magnética.....	11
Magnetometria	11
Levamentos aeromagnéticos.....	12
Materiais e métodos.....	12
Processamento e resultados	15
Filtro de Redução ao Equador (RTE).....	15
Derivada Vertical	16
Matched Filter (MF).....	17
Gradiente Horizontal Total (GHT).....	22
Derivada Tilt.....	23
Sinal analítico (SA)	24
Interpretação da área de estudo	26
Conclusão.....	34
Referências Bibliográficas	35

Índice de Ilustrações

Figura 1 - Geologia Regional (OLIVEIRA et al., 2020).....	6
Figura 2 - Representação do campo magnético terrestre -	9
Figura 3 - Ilustração do campo magnético induzido. (DENTITH & MUDGE, 2014).	11
Figura 4 - Localização dos levantamentos aeromagnéticos (linhas pretas) e os números correspondem aos códigos dos projetos dados pelo SGB.	13
Figura 5- Localização dos levantamentos aeromagnéticos. Mapa de anomalias magnéticas integrado reduzido ao Equador.	14
Figura 6- Anomalia Magnética (AM) aplicando RTE.....	16
Figura 7 - Mapa aplicando Derivada Vertical	17
Figura 8- Espectro de Potência.	18
Figura 9- Mapa de Anomalia Magnética aplicando o MF - 1ª profundidade (19.000m).....	19
Figura 10 - Mapa de Anomalia Magnética aplicando o MF - 2ª profundidade (5.000m).....	20
Figura 11 - Mapa de Anomalia Magnética aplicando o MF - 3ª profundidade (1.000m).....	21
Figura 12 - Mapa aplicando o GHT.....	23
Figura 13 - Mapa aplicando a Derivada Tilt.....	24
Figura 14 - Mapa do Sinal Analítico.....	26
Figura 15 - Mapa de Depósitos (Triângulos brancos), Ocorrências (Círculos brancos) e Jazidas (Martelo geológico).....	28
Figura 16 - Mapa de Veios de Quarto com Ouro (Círculos brancos), Tabular/Lenticular (Losangos brancos), Placer (Estrelas brancas) e Filoneana (Quadrados brancos).....	29
Figura 17 - Mapa da área de estudo – Alta concentração de ocorrência de Ouro próximo aos lineamentos NW, nota-se claramente alinhamento dos depósitos nesta direção.....	30
Figura 18 - Matched Filter aplicado a área de estudo (1000m de profundidade).....	31
Figura 19 - Matched Filter aplicado a área de estudo (5000m de profundidade).....	32
Figura 20 - Matched Filter aplicado a área de estudo (19000m de profundidade).....	33

Introdução

A província mineral de Carajás está localizada na parte sudeste do Cráton Amazônico, sendo esta uma das principais e maiores províncias minerais do Brasil, com importantes depósitos de Fe, Cu, Mn, Au entre outros (GALARZA e MACAMBIRA, 2002).

A complexidade geológica da região, caracterizada pela presença de diversas formações geológicas e uma grande variedade de minas, depósitos e ocorrências minerais, impõe um desafio significativo na identificação de áreas com potencial aurífero.

Diante dos desafios que a exploração mineral apresenta, os dados aeromagnéticos públicos constituem uma ferramenta barata e que pode ser muito eficiente para ampliar o conhecimento em superfície e subsuperfície (Isles & Rakin, 2018), mesmo de uma região já tão explorada e estudada. O avanço das tecnologias de aquisição, processamento e realce de dados geofísicos, permite que estes dados possam trazer contribuições importantes ao avanço do conhecimento 3D da área.

Objetivo

Considerando a complexidade geológica da região de Carajás, este trabalho visa destacar a relevância dos levantamentos aeromagnéticos como uma ferramenta eficaz na identificação de estruturas e padrões, sendo uma das primeiras e principais etapas para os processos de prospecção mineral.

A região da Província Mineral de Carajás é recoberta por 6 projetos aerogeofísicos, com as mesmas características de aquisição. A partir da integração, processamento e filtragem de dados destes levantamentos aeromagnéticos, o trabalho tem como foco identificar e caracterizar áreas de potencial interesse econômico com base nos padrões magnéticos detectados. O processamento de dados magnéticos foi realizado com técnicas avançadas, visando identificar anomalias magnéticas e feições magnéticas significativas.

Dentre os objetivos específicos destacamos:

- A primeira etapa do trabalho foi a integração de diferentes levantamentos de dados aeromagnéticos e permitiu uma visão abrangente da área de estudo, assim gerando um único produto integrado da região que ficará disponível para trabalhos futuros.
- A segunda etapa consistiu na interpretação qualitativa de lineamentos magnéticos e sua correlação com dados estruturais disponíveis em SIG do Serviço Geológico do Brasil - SGB (SGB, 2023).
- A terceira etapa foi a correlação entre os lineamentos interpretados na etapa anterior com os diferentes modelos (Veio de quartzo, Tabular/Lenticular, Placer e Filoneana) de jazidas, depósitos e ocorrências de ouro conforme disponíveis em SIG pelo SGB (SGB, 2023).

Geologia Regional

A província mineral de Carajás, no Paleoproterozóico, sofreu um evento extensivo e com isso foi acompanhado por intrusões graníticas anorogênicas e diques, sendo que a província foi gerada, reativada e tectonicamente estabilizada no Arqueano.

Durante o Mesoarqueano foi produzido um grande bloco continental constituído por uma associação TTG-greenstone belts que posteriormente, no Neoarqueano, foram formadas bacias strike-slip ou riftes (HOLDSWORTH; PINHEIRO, 2000; VASQUEZ; ROSA-COSTA, 2008). Sobre as camadas vulcano-sedimentares que preencheram essas bacias, foram depositadas sedimentações marinhas rasas de arenitos, arcóseos, siltitos e conglomerados polimíticos (NOGUEIRA, 1995).

Na porção Norte há registros da Orogênese Transamazônica, que são definidas pelas deformações geradas pela colisão do Bloco Carajás com o Bloco Bacajá. Já na porção Oeste, tem-se a ocorrência de grande volume de rochas intrusivas e piroclásticas, compondo uma Large Igneous Province (LIP). Na porção Leste, a província é limitada pela Faixa Araguaia, que possivelmente foi formada no processo colisional no neoproterozoico com o Cráton Amazônico produzindo a subducção do assoalho oceânico presente anteriormente no local (TAVARES, 2015).

Segundo Vasquez et al. (2008), a área pode ser definida por cinco domínios: Rio Maria, Carajás, Bacajá, Iriri-Xingu e Araguaia (Figura 1).

Domínio Rio Maria

Na parte sul, encontra-se o Domínio Rio Maria (Figura 1), os terrenos TTG-greenstone belts dessa parte do cráton são, em sua maioria, considerados como decorrentes de acreção continental de crosta mais nova em zonas de subducção. A crosta oceânica primitiva tinha originalmente sua composição komatítica e basáltica, com o plutonismo TTG em decorrência da fusão parcial da crosta oceânica. Apresentando em sua maioria um grau metamórfico de xisto verde, com exceção na parte de contato com os domos ácidos, formando assim fácies anfibolíticas (VASQUEZ; ROSA-COSTA, 2008).

Neste domínio, a grande maioria das concentrações auríferas estão relacionadas à veios de quartzo posicionados em zonas de cisalhamento. Sendo que, nas rochas básicas e intermediárias o ouro está essencialmente associado a paragênese quartzo-pirita com partículas menores que 20 μm e estão contidas em cristais euédricos de pirita, enquanto nas rochas ácidas o ouro ocorre livre ou na superfície dos cristais de turmalina da associação quartzo-turmalina (VASQUEZ; ROSA-COSTA, 2008).

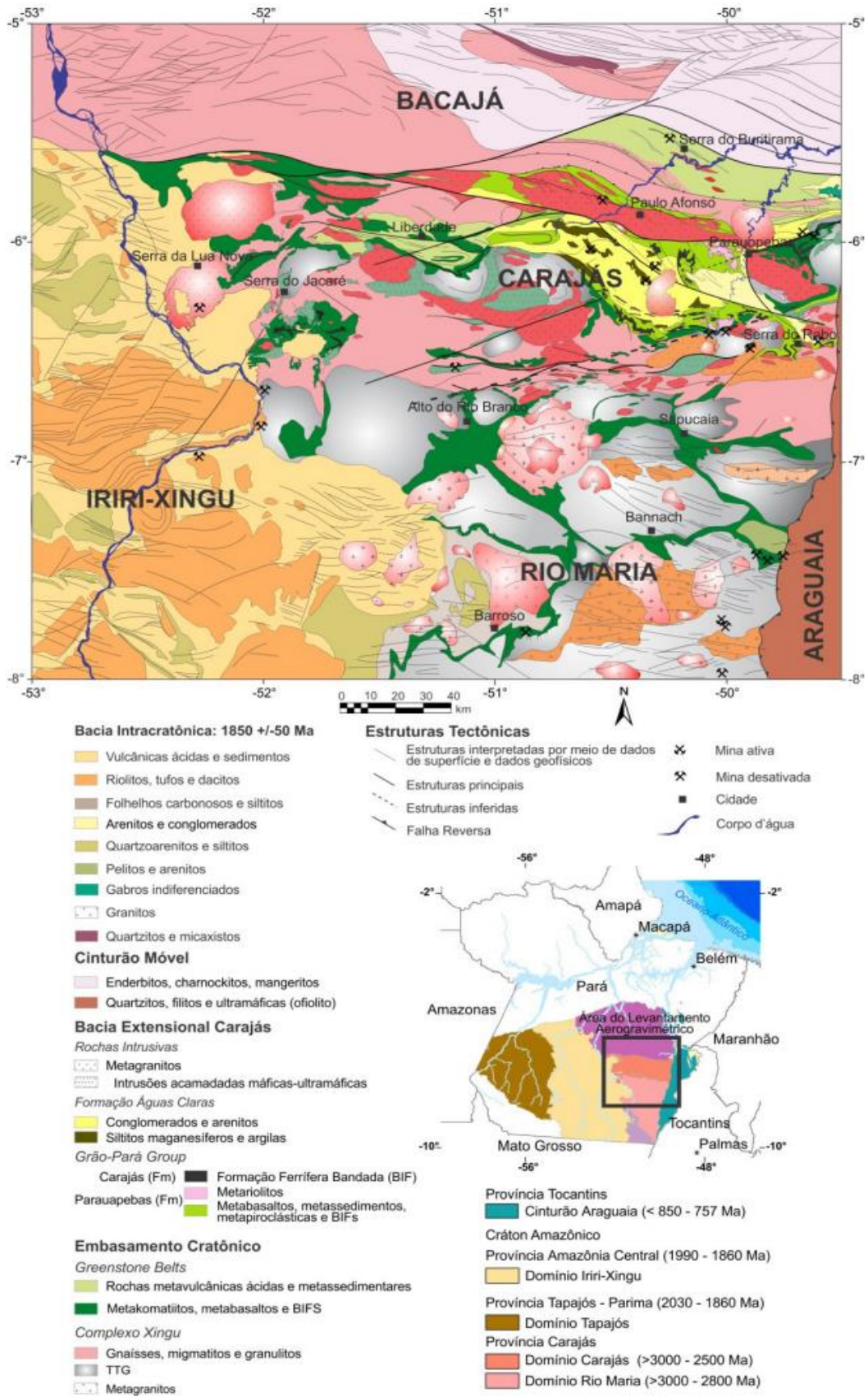


Figura 1 - Geologia Regional (OLIVEIRA et al., 2020)

O Domínio Bacajá (Figura 1), ao Norte, é composto por associações que representam fragmentos arqueanos e siderianos retrabalhados no período do Ciclo Transamazônico, com a presença de granitoides de arcos magmáticos riocioanos, granitoides e charnockitos relacionados a momentos pós colisão continental (VASQUEZ; ROSA-COSTA, 2008). Tendo um domínio tectônico transcorrente com orientação NW-SE, ressaltada por anomalias magnéticas e por relevo, de forma a contrastar com a tectônica tangencial E-W do Domínio de Carajás adjacente (KLEIN, 2014).

As jazidas auríferas presentes nessa região estão essencialmente associadas a natureza metavulcano-sedimentar e a granitoides intrusivos, localizados principalmente na porção Norte do domínio.

Domínio Iriri-Xingu

O Domínio Iriri-Xingu (Figura 1) é uma fração de um grande evento vulcano-plutônico de dimensões continentais que cobre grande parte da Amazônia Central, sendo constituído por uma associação que inclui vulcânicas félsicas e plutônicas alcalinas intercontinentais e por fim uma cobertura sedimentar do rifte continental (VASQUEZ; ROSA-COSTA, 2008).

Neste domínio podemos associar a ocorrência de ouro à quartzos monzonitos hospedados em zonas de cisalhamento (na zona noroeste), consistindo em veios de quartzo cisalhados. Já na parte sudoeste, encontra-se associado a formações compostas por quartzitos e metaconglomerados com matriz recristalizada, ocorrendo de forma livre intergranular entre os cristais de quartzo, muscovita e hematita, onde os teores mais altos são encontrados em zonas com presença de minerais magnéticos como a hematita (VASQUEZ; ROSA-COSTA, 2008).

Cinturão Araguaia

Margeando a borda leste do Cráton Amazônico, está localizado o Cinturão Araguaia, tendo em sua maioria a predominância de rochas meta-sedimentares da Formação Couto Magalhães, com um arcabouço estrutural marcado por uma séria de cavalgamentos regionais de direção N-S (VASQUEZ; ROSA-COSTA, 2008).

Bacia de Carajás

A Bacia de Carajás (Figura 1) tem a forma de um sigmoide, caracterizada por uma evolução intracratônica, sobrepondo terrenos TTG-greenstone belt da porção sudeste do Cráton Amazônico, possui compartimentos vulcano-sedimentares metamorfozados, com a predominância de fácies xisto-verde e limitado por zonas de cisalhamento associadas a um sistema transpressivo sinistral (HOLDSWORTH; PINHEIRO, 2000).

Nesta região, o ouro está comumente associado a rochas encaixantes de sequência metavulcano-sedimentar, caracterizada pelas fácies de xisto-verde. O minério manifesta-se de forma disseminada nos hidrotermalitos e na matriz das brechas ou rochas fragmentárias, além de ocorrer em configurações como lentes de sulfetos maciços. Tipos distintos de minérios são encontrados nos corpos da região, mas de forma geral são classificados como minério magnético sulfetado (VASQUEZ; ROSA-COSTA, 2008).

Fundamentação teórica

Campo Magnético

O método magnetométrico está relacionado com o campo geomagnético da Terra, e devido a ocorrência de lentas mudanças no processo de fluxo do núcleo externo (líquido), que é responsável pela geração do Campo Magnético, é necessário atualizar os mapas geomagnéticos ao longo dos anos. Essas mudanças ocorrem de forma gradual, sendo possível prever certas mudanças em um curto período (CAMPBELL, 2003). Para melhor entendermos como ele funciona, precisamos destrinchar um pouco o comportamento do campo geomagnético, para isso é necessário compreender a Teoria do Potencial, fundamental para os métodos potenciais (magnetométrico e gravimetria).

Esta Teoria tem uma forte relação com a Equação de Laplace e Funções Harmônicas, sendo que nas Funções Harmônicas temos que um campo conservativo \vec{F} tem um potencial escalar ϕ definido por $\vec{F} = \vec{\nabla}\phi$ ou $\vec{F} = -\vec{\nabla}\phi$. Onde $\vec{\nabla} = i\frac{\partial}{\partial x} + j\frac{\partial}{\partial y} + k\frac{\partial}{\partial z}$, sendo $\vec{F} = \vec{\nabla}\phi$, logo \vec{F} é conservativo e um campo potencial (BLAKELY, 1995).

Uma outra propriedade dos campos potenciais é que o potencial ϕ do campo \vec{F} em certas condições satisfazem a equação diferencial de segunda ordem em pontos que não são ocupados por fontes de \vec{F} , chamada de Equação de Laplace:

$$\nabla\phi^2 = 0$$

Definindo como função harmônica qualquer função que satisfaça a Equação de Laplace, tenha derivadas contínuas e com valores únicos e tenha derivadas de segunda ordem (BLAKELY, 1995).

Os campos geomagnéticos podem ser descritos em três componentes: B_x , B_y e B_z , onde cada um desses componentes demonstra a intensidade nos eixos X, Y e Z, respectivamente.

Sendo a intensidade total do campo dada por:

$$T = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$$

Outras características importantes do campo geomagnético são: a inclinação (I) e a declinação (D). Sendo a inclinação o ângulo entre o vetor do campo e o plano horizontal e a declinação sendo o azimute do meridiano magnético, com essas duas características dadas por:

$$I = \arctan \frac{B_z}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}}$$
$$D = \arcsen \frac{B_y}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}}$$

Por convenção, a inclinação é positiva quando é inclinado abaixo do plano horizontal (negativa acima) e a declinação é positiva para leste (negativa para oeste). Sendo que o plano vertical que contém o vetor é chamado de meridiano magnético (BLAKELY, 1995).

Tendo em vista essas informações, é possível elaborar mapas de contorno que descrevem a variação desses elementos do campo geomagnético, chamados de mapas isomagnéticos. Podendo ser classificados em 3 tipos: isodinâmico, que indica linhas de contorno com a mesma

intensidade de campo, isoclinal para linhas com a mesma inclinação e isogênico para declinação (BLAKELY, 1995).

Método Magnetométrico

A intensidade do campo geomagnético sofre variações de acordo com a posição em relação à latitude, isso ocorre devido a mudança de orientação e intensidade nessa direção, onde os polos magnéticos têm um excesso de carga magnética, visualmente representado por uma maior densidade de linhas nos polos e menor nas partes mais próximas ao Equador. Grande parte do campo geomagnético da Terra pode ser representado por um dipolo magnético teórico no centro da Terra, inclinado $10,7^\circ$ em relação ao eixo de rotação (CAMPBELL, 2003) (Figura 02).

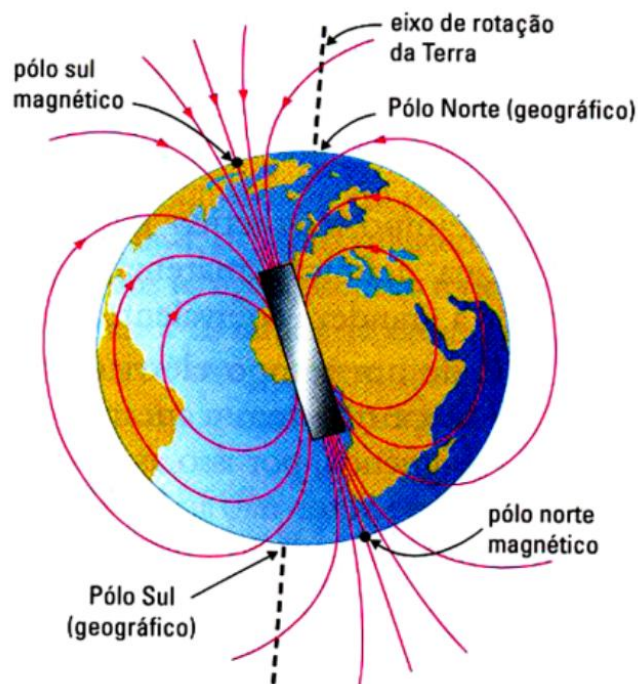


Figura 2 - Representação do campo magnético terrestre - Imagem disponível em: <https://www.mundoedu.com.br/uploads/pdf/58d284ca564c9.pdf>

O momento magnético desse dipolo geocêntrico pode ser calculado utilizando o campo observado. Ao subtrair o campo do dipolo com o observado a diferença resultante pode ser aproximada por um segundo dipolo menor, se esse processo for repetido inúmeras vezes é possível, ao ponto que o campo geomagnético observado possa ser emulado segundo o grau de precisão necessário, esse método foi utilizado para calcular o Campo Geomagnético de Referência Internacional (IGRF) que é o campo magnético não perturbado em qualquer lugar da superfície terrestre (CAMPBELL, 2003).

Campo Geomagnético Internacional de Referência

O International Geomagnetic Reference Field (IGRF) é representado conjunto de coeficientes harmônicos esféricos que permite ser inseridos em um modelo matemático para descrever em larga escala o campo magnético interno da Terra e sua variação no tempo. O IGRF é produzido e mantido por um grupo internacional de cientistas da Associação Internacional de

Geomagnetismo e Aeronomia (IAGA). O IGRF mais recente, de décima terceira geração, foi derivado de observações registradas por satélites, observatórios terrestres e levantamentos magnéticos e publicado no ano de 2019. (ALKEN et al., 2021)

O IGRF é rotineiramente utilizado pela comunidade científica para estudar o campo do núcleo da Terra, a indução eletromagnética e anomalias magnéticas locais na litosfera. Também é amplamente utilizado em sistemas de orientação de satélites e outros equipamentos. O campo do núcleo da Terra é dinâmico e está em constante mudança, sendo que algumas dessas mudanças ocorrem de forma imprevisível em escalas de tempo que variam de meses a milhões de anos. Para levar em conta as mudanças temporais em escalas de tempo de alguns anos, o IGRF é regularmente revisado, geralmente, a cada 5 anos. (ALKEN et al., 2021)

Infelizmente as mudanças no campo geomagnético não são inteiramente possíveis de serem previstas, e diferenças acabam ocorrendo entre o modelo IGRF previsto com o campo geomagnético verdadeiro (BLAKELY, 1995).

Magnetismo remanente

O magnetismo remanente em rochas e minerais está intimamente relacionado à temperatura de Curie desses materiais. A temperatura de Curie é a temperatura na qual um material ferromagnético ou ferrimagnético perde suas propriedades magnéticas permanentes. Acima dessa temperatura, o material se torna paramagnético e não exibe magnetismo remanente.

Quando uma rocha ou mineral é formado, ele pode conter minerais que possuem propriedades magnéticas permanentes devido ao alinhamento dos seus domínios magnéticos. Esses minerais, ferromagnéticos ou ferrimagnéticos, possuem um magnetismo remanente característico. No entanto, quando a rocha ou o mineral é submetido a altas temperaturas, próximo ou acima da temperatura de Curie desses minerais, o magnetismo remanente é perdido à medida que o alinhamento dos domínios é desfeito (DUNLOP; ÖZDEMIR, 1997).

Durante a existência da rocha, ela pode ser completamente ou parcialmente remagnetizada, e toda, ou parte, de um magnetismo remanente pode ser destruído. Por consequência, várias fases do magnetismo remanente podem coexistir em uma rocha, porém o magnetismo resultante da rocha se dá pela soma de todos os vetores de magnetismo presentes e é chamado de magnetismo remanente natural (NRM) (DENTITH; MUDGE, 2014).

Magnetismo induzido

O magnetismo induzido em rochas pode ser adquirido quando rochas são expostas a um campo magnético externo. Ao contrário do magnetismo remanente, que é permanente, o magnetismo induzido pode ser revertido ou perdido quando o campo magnético externo é removido. Isso se dá pelo fato de os minerais magnéticos presentes alinharem seus domínios magnéticos de acordo com a direção do campo aplicado (DUNLOP; ÖZDEMIR, 1997).

É importante ressaltar que o magnetismo induzido em rochas pode ser temporário e perder sua orientação magnética ao longo dos anos. Isso acontece devido a influência de processos geológicos, como deformações, aquecimento, resfriamento ou a presença de campos magnéticos secundários. (DUNLOP; ÖZDEMIR, 1997).

O magnetismo induzido em rochas é amplamente utilizado em estudos geofísicos e geológicos. Sendo ele responsável pelas anomalias referentes a processos geológicos, possibilitando inferir informações sobre a geologia subsuperficial, como a presença de estruturas tectônicas, intrusões magmáticas e depósitos minerais.

Anomalia Magnética

A força do campo magnético terrestre, o qual inclui o campo geomagnético principal (associado ao núcleo da Terra) e os campos associados com o magnetismo das rochas locais, é medido por levantamentos magnéticos. Os instrumentos modernos medem a força do campo total, normalmente se referindo a Intensidade Magnética Total (do inglês, TMI), que é resultante da componente vertical e das duas horizontais.

A Figura 3 ilustra a variação do TMI ao longo de uma transversal no centro da fonte da anomalia. Em alguns locais, o campo, devido a esfera, está aproximadamente na mesma direção do campo terrestre, então a força do campo resultante (TMI) é maior que do campo terrestre por si só. Em contrapartida, quando os dois campos estão em direções opostas a resultante do campo é mais fraca que o campo da Terra. Para os casos em que o campo terrestre está inclinado e o magnetismo do corpo também está, a anomalia é assimétrica e dipolar. Nos locais em que o campo terrestre é horizontal a resposta mais comum é que o TMI diminua acima do corpo, mesmo sendo mais magnético do que o meio. Isso ocorre devido os dois campos serem opostos logo acima do corpo, onde o TMI é medido (DENTITH & MUDGE, 2014).

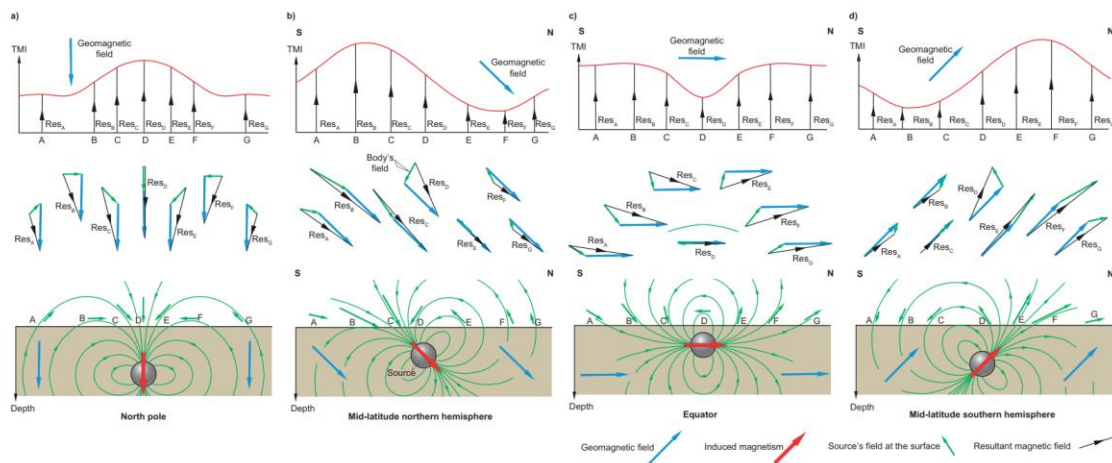


Figura 3 - Ilustração do campo magnético induzido. (a) No polo norte, (b) latitude intermediária no hemisfério norte, (c) equador magnético e (d) latitude intermediária no hemisfério sul (DENTITH & MUDGE, 2014).

Magnetometria

A magnetometria mede a intensidade do campo magnético total da Terra, que é a composição do campo gerado pelo núcleo do planeta e pelo campo induzido das rochas. O principal fator para a geração do campo induzido é a susceptibilidade magnética e, assim, permitindo que as rochas se magnetizem (indução magnética). Como cada material, e rochas, tem composições diferentes eles podem ter susceptibilidades diferentes, assim gerando respostas diferentes quando inseridos no mesmo campo magnético. Essas diferenças são chamadas de anomalias e,

normalmente, os materiais que têm algum valor agregado estão associados a elas. Em média, o campo magnético terrestre está na casa dos 50.000 nT e as variações mais comumente encontradas, devido a geologias locais, estão entre dezenas ou centenas de nT (DENTITH; MUDGE, 2014).

Levamentos aeromagnéticos

Um das metodologias mais comuns para aquisições de dados magnéticos é a utilização de um magnetômetro acoplado a um avião, conhecido como levantamento aeromagnético. A utilização desse método é viável para grandes projetos, reduzindo consideravelmente o tempo necessário para cobrir uma grande área (WALTER; BRAUN; FOTOPOULOS, 2020). No caso desse trabalho, os dados utilizados foram adquiridos em várias campanhas de levantamentos aeromagnéticos.

Usualmente os levantamentos são feitos com uma série de linhas paralelas e algumas perpendiculares, chamadas de linhas de controle. As principais características de um levantamento aéreo são a altura, direção de voo e o espaçamento entre as linhas.

Uma das principais premissas para o levantamento é manutenção constante da velocidade e altura da aeronave. Para aviões é tipicamente utilizado uma velocidade média de 250 km/h. No caso dos dados utilizados neste estudo, a velocidade de voo variou entre 230 km/h e 280 km/h e uma altura nominal de 100 m em relação ao terreno.

Com os dados adquiridos, de maneira geral, é necessário realizar uma série de correções relativas à erros durante a aquisição de dados, dentre tantos, citamos a correção do IGRF que é utilizada para remover dos dados as variações magnéticas atribuíveis ao campo magnético teórico, outra importante correção é a correção da variação diurna que tem como objetivo retirar os efeitos magnéticos de origem externa, principalmente do Sol (CAMPBELL, 2003).

Materiais e métodos

Este trabalho pode ser separado em três grandes partes. A primeira consiste na integração dos dados dos seis (Figura 4) levantamentos aeromagnéticos sobre a Província Mineral de Carajás, regiões adjacentes e a geração de mapas de realce de anomalias magnéticas. A segunda etapa consiste na definição dos principais lineamentos (estruturais e magnéticos). E a terceira etapa, a interpretação dos produtos gerados e a integração dos dados geofísicos e geológicos públicos.

Todos os levantamentos utilizados seguem o mesmo padrão de aquisição, sendo eles: espaçamento entre as linhas de voo de 0,5 km e 10 km entre as linhas de controle, orientadas nas direções N-S e E-W, respectivamente. A altura nominal de todos os voos foi de 100 m sobre o terreno. Após a verificação das informações citadas anteriormente, foi gerado o banco de dados (GDB) no software *Oasis montaj* e feita a padronização do sistema de coordenadas geográficas do banco de dados para a projeção UTM zone 22S datum WGS 84, para cada um dos oito levantamentos.

Com os bancos de dados prontos e padronizados, foi realizada a interpolação em malha regular de 125 m para a anomalia magnética de cada um dos bancos de dados. Após a interpolação foi aplicado o filtro de Redução ao Equador, devido os levantamentos terem sido realizado em região de baixas latitudes (BLAKELY, 1995). Esse filtro foi aplicado antes e, especificamente, para cada levantamento, levando em consideração os dados relativos à cada projeto, como data de aquisição dos dados.

Com os dados devidamente filtrados, foram realizadas as integrações dos projetos por meio da ferramenta *Grid Knitting* do *Oasis Montaj*® (Figura 5). Esta ferramenta utiliza o método de sutura para a junção dos *grids*, com exceção entre os grids dos levantamentos 1097 e 1130, que foi utilizado o método de *blend* já que possuem uma grande área de sobreposição.

O método de *blend* usa uma função sobre a área de sobreposição, onde deixa a transição entre os dois *grids* mais suave. A função determina qual *grid* tem mais peso na área de sobreposição, levando em consideração a distância da borda de cada *grid* para cada ponto. Caso a distância entre o ponto e a borda dos dois *grids* seja equidistante, é utilizada a média do valor daquele ponto. Para os pontos que não tem sobreposição, é utilizado o valor do *grid* de origem.

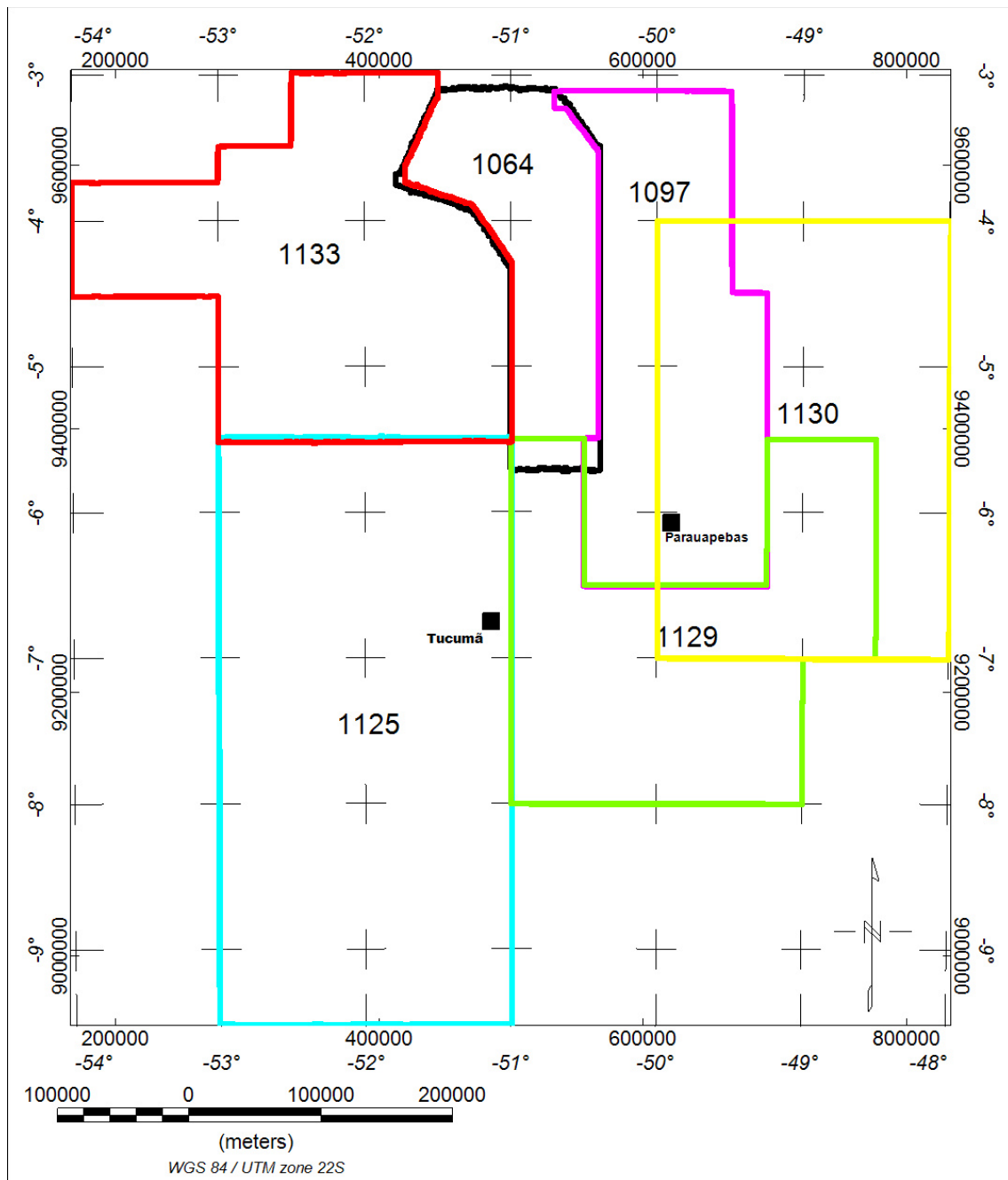


Figura 4 - Localização dos levantamentos aeromagnéticos e os números correspondem aos códigos dos projetos dados pelo SGB. Onde o projeto 1133 está representado pela cor Vermelha, 1064 – Preto, 1097 – Rosa, 1125 – Azul, 1129 – Verde e 1130 - Amarelo

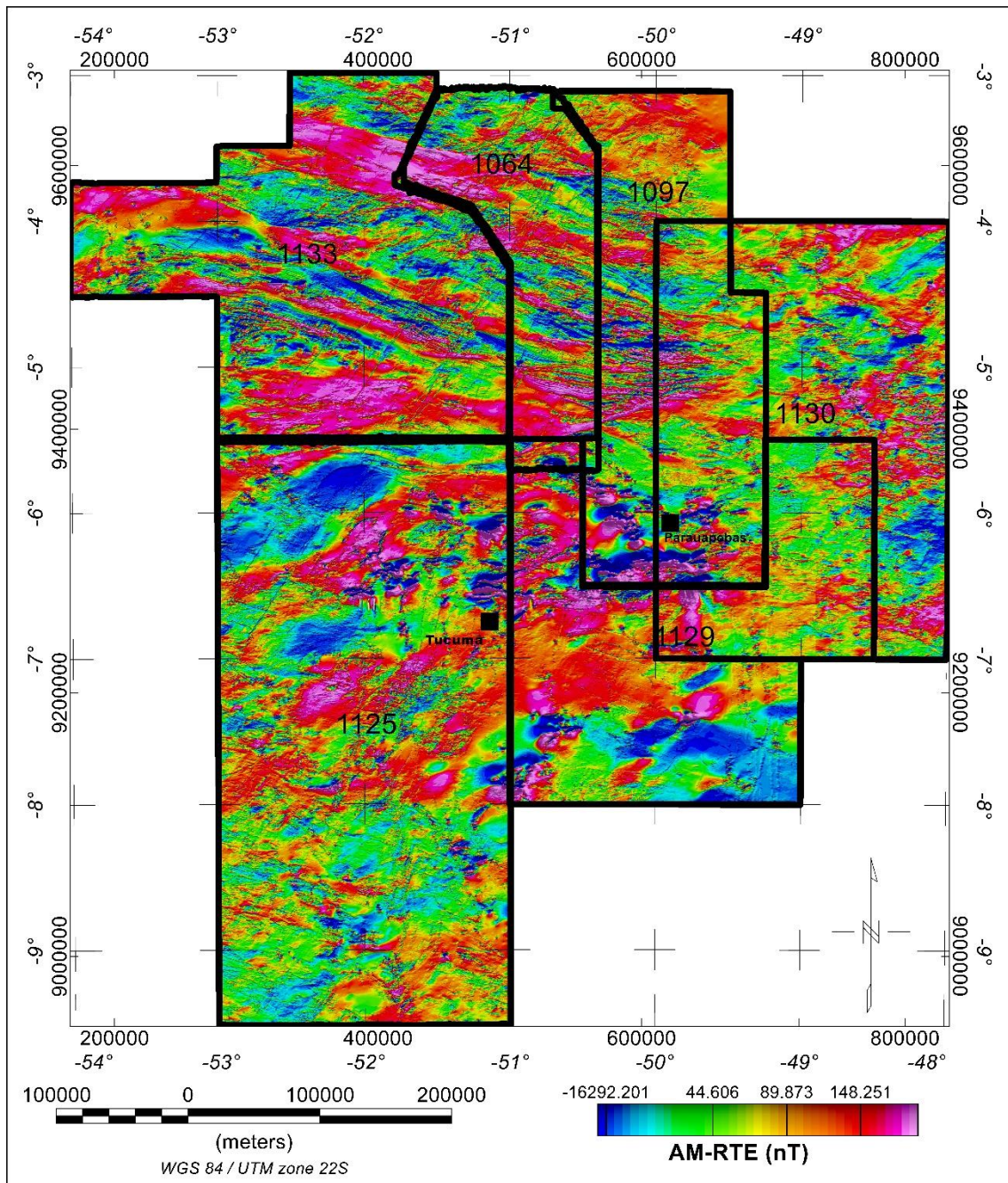


Figura 5- Localização dos levantamentos aeromagnéticos (linhas pretas) e os números correspondem aos códigos dos projetos dados pelo SGB. Mapa de anomalias magnéticas integrado reduzido ao Equador.

Processamento e resultados

Filtro de Redução ao Equador (RTE)

Ao obter dados magnéticos em locais onde a magnetização e o campo magnético não são verticais, é gerado um efeito de distorção com caráter dipolar na anomalia medida, ocasionando um deslocamento lateral na anomalia, alterando seu formato. Para corrigir esse efeito, é utilizado o Filtro de Redução ao Polo (FRP), objetivando transformar a anomalia medida em uma componente vertical do campo, considerando uma mesma fonte e como se tivesse sido medida no Norte magnético (BLAKELY, 1995).

O filtro de Redução ao Equador tem como base resolver os problemas que o FRP apresenta em Baixas Latitudes (em inclinações geomagnéticas menor de 30°), como por exemplo, o aparecimento de feições lineares falsas devido a instabilidades numéricas. Então, com o mesmo objetivo do FRP de transformar uma anomalia magnética medida na direção do campo geomagnético local em uma anomalia magnética medida no polo geomagnético, o RTE faz isso para latitudes baixas sem apresentar quaisquer instabilidades numéricas (Figura 6). Assim, permite uma interpretação qualitativa mais simples (BLAKELY, 1995).

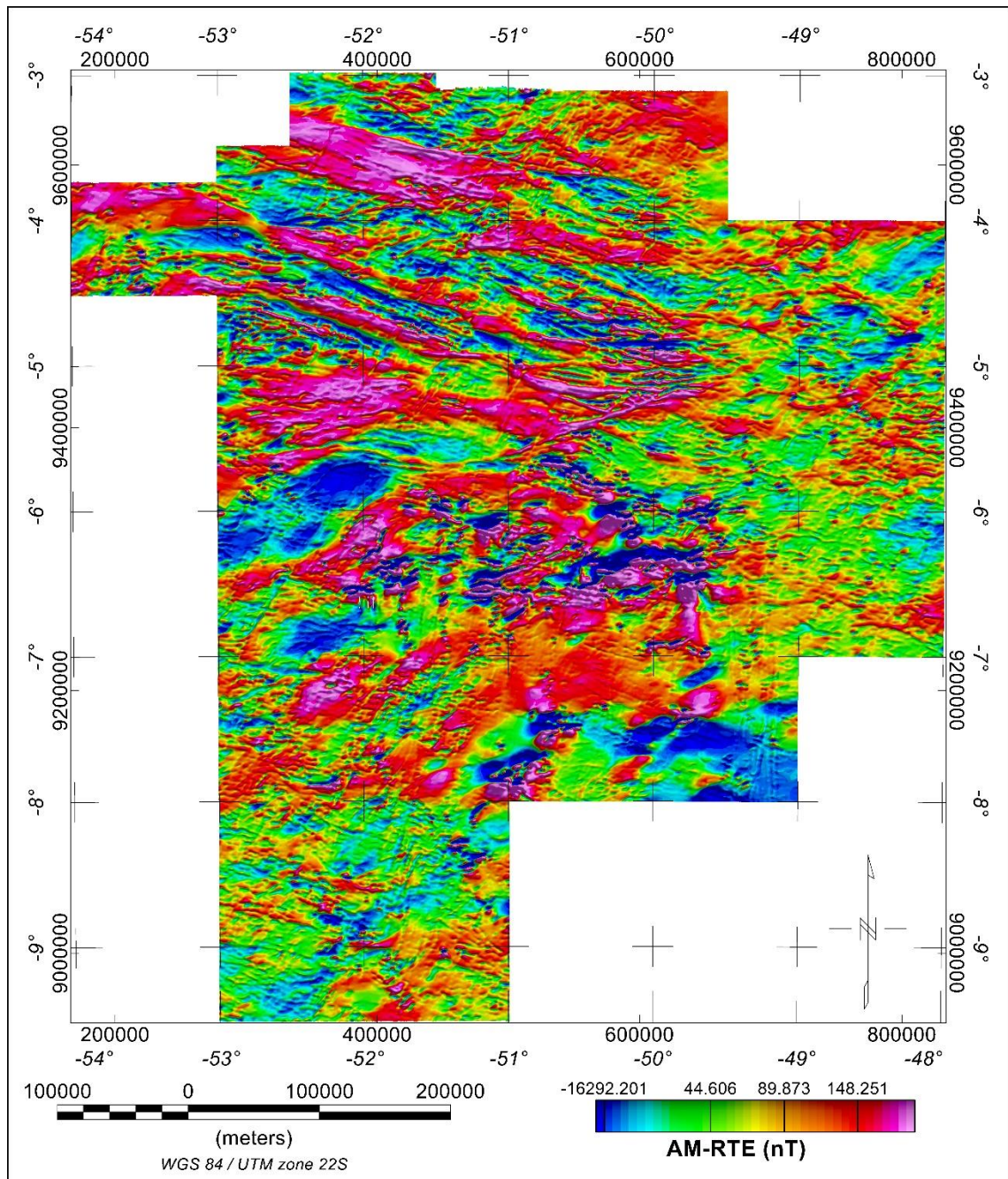


Figura 6- Anomalia Magnética (AM) aplicando RTE

Derivada Vertical

A Derivada Vertical (DZ) ressalta o efeito das altas frequências geradas por anomalias mais superficiais, permitindo analisar a taxa de variação da intensidade magnética ao longo do perfil vertical. Quando aplicada (Figura 7), são destacados apenas as variações abruptas e locais associadas a fontes magnéticas mais superficiais, auxiliando na identificação de estruturas geológicas como falhas, bordas de intrusões e qualquer outra mudança brusca nas propriedades magnéticas do subsolo (NABIGHIAN et al., 2005).

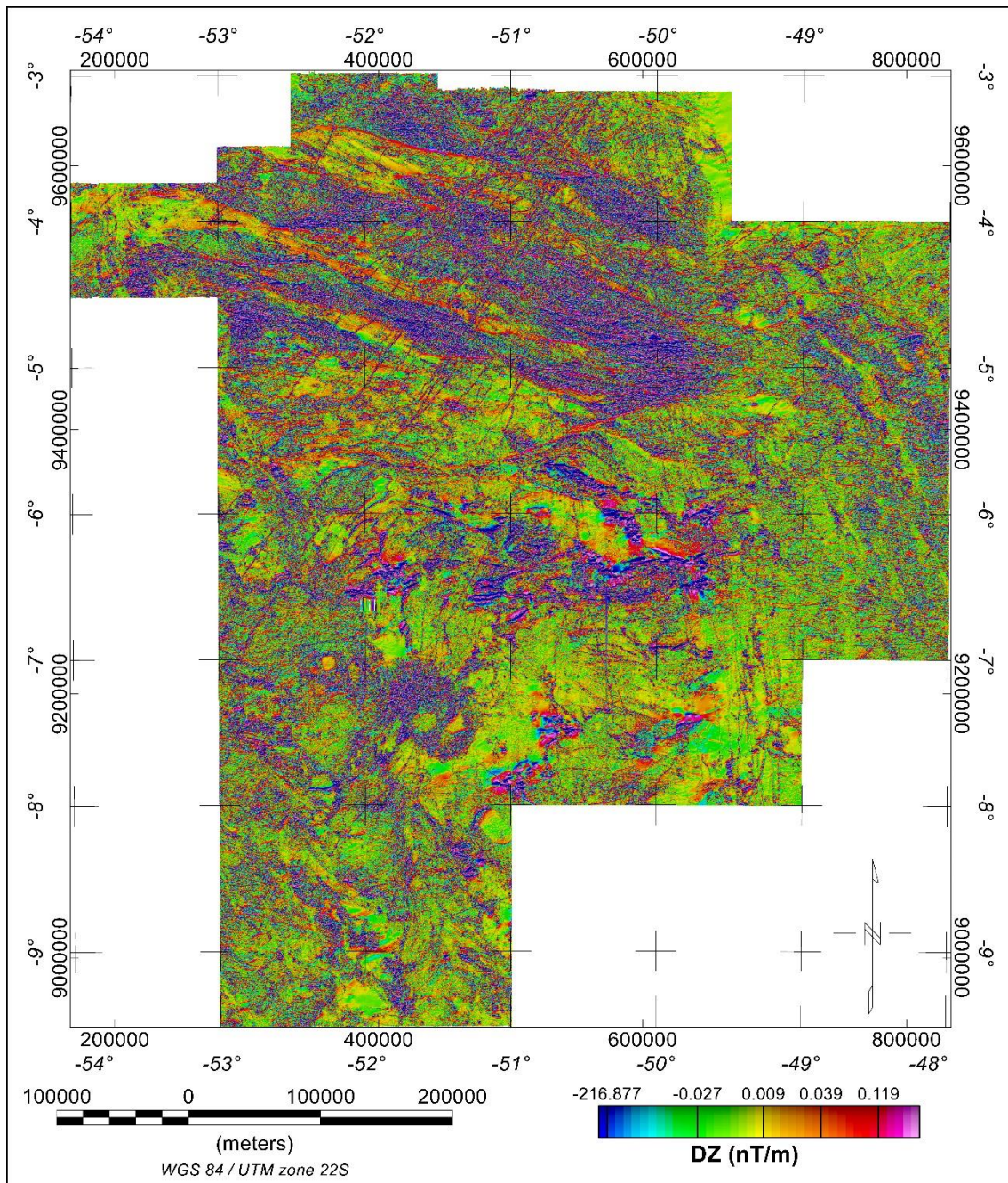


Figura 7 - Mapa aplicando Derivada Vertical

Podemos interpretar essa derivada como uma transformação linear de campos potenciais com respostas de alta frequência, de modo que se sobressaiam sobre os sinais de baixa frequência (BLAKELY, 1995).

Matched Filter (MF)

O Matched Filter consiste em um filtro passa-banda com o intuito de separar o campo potencial em componentes anômalas representando diferentes profundidades, de forma a proporcionar um ajuste melhor ao espectro observado através da separação em duas ou mais camadas. Neste caso, foi separado em 3 camadas (Figura 8). Ele depende fundamentalmente da ideia de uma distribuição randômica de fontes em um intervalo discreto de camadas e tem como premissa que não tem diferença estatística na resposta ao longo de cada camada e, também, que não existe correlação entre as distribuições de cada camada (COWAN; COWAN, 1993).

O Matched Filter tem como princípio a interpretação do espectro para identificar a inclinação e separar as diferentes curvas. Cada curva dessa corresponde a fontes em diferentes profundidades (Figuras 9, 10 e 11), tornando o filtro útil para interpretações qualitativas e para realce de dados, porém não é aconselhado a usar seu resultado para análises quantitativas.

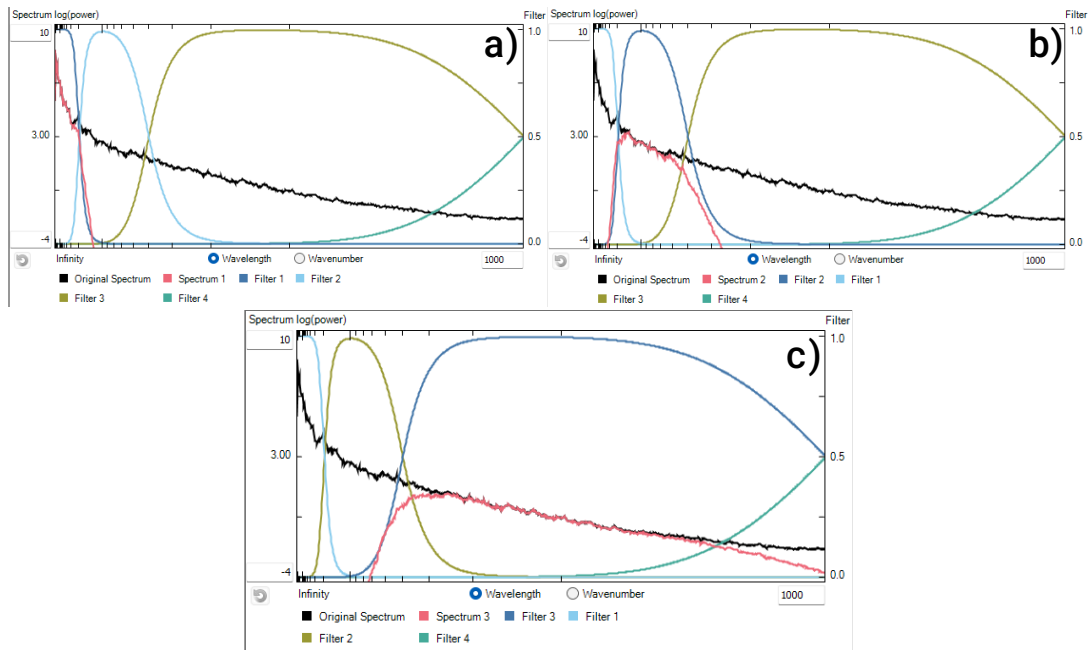


Figura 8- Espectro de Potência. Onde temos o espectro das seguintes profundidades: 19.000m (a), 5.000m (b) e 1.000m (c)

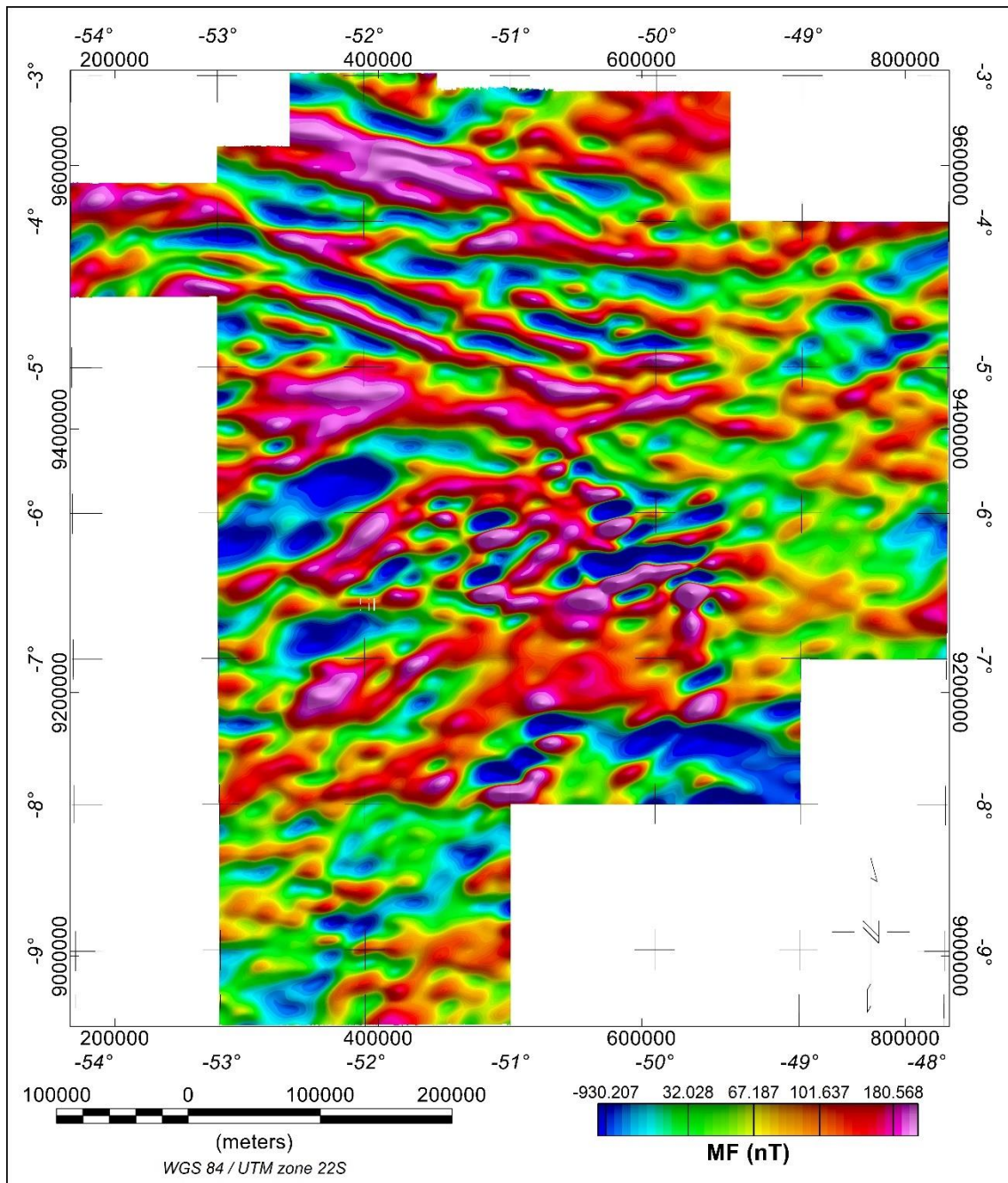


Figura 9- Mapa de Anomalia Magnética aplicando o MF - 1ª profundidade (19.000m)

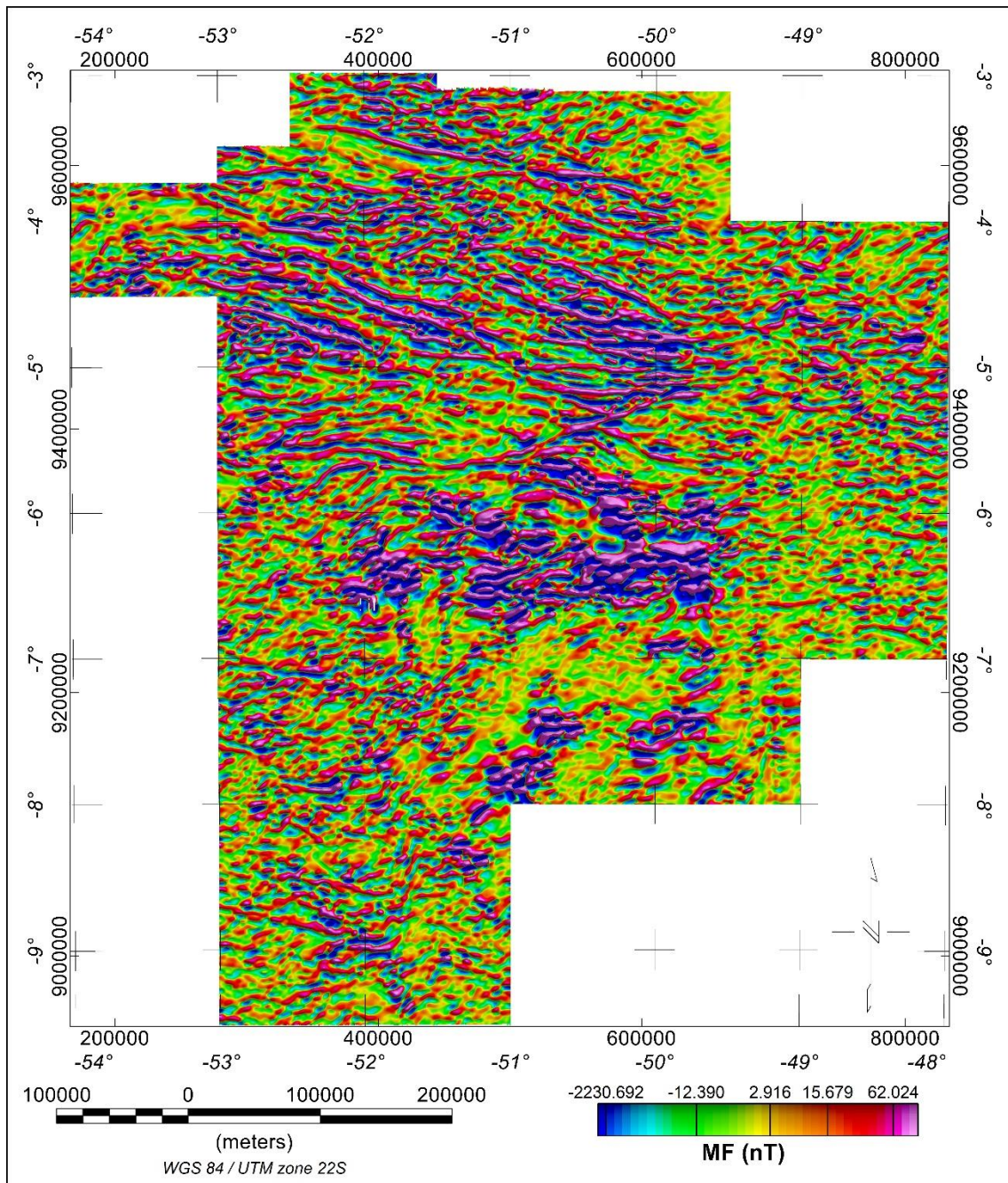


Figura 10 - Mapa de Anomalia Magnética aplicando o MF - 2ª profundidade (5.000m)

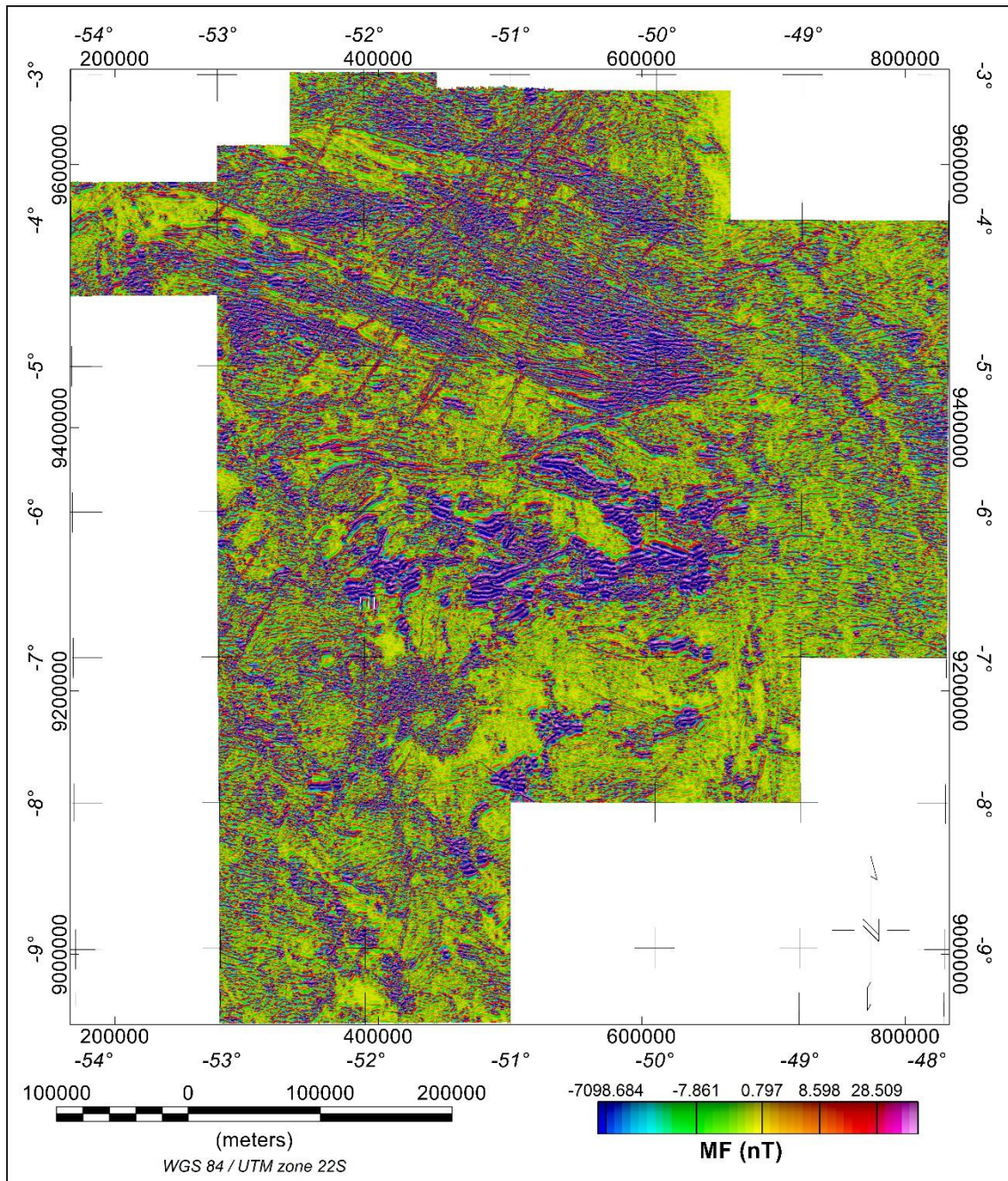


Figura 11 - Mapa de Anomalia Magnética aplicando o MF - 3ª profundidade (1.000m)

Gradiente Horizontal Total (GHT)

O filtro de Gradiente Horizontal Total é comumente utilizado para realçar a detecção de bordas de anomalias, considerando grandes mudanças laterais das propriedades físicas. Assim, consegue realçar as altas frequências, posicionar os picos da anomalia seguindo a borda do corpo com um baixo na parte central do mesmo, porém com ao aumentar a profundidade o sinal dos picos na borda do corpo vão perdendo força (FERREIRA et al., 2013)

O Gradiente horizontal total pode ser calculado por (BLAKELY, 1995):

$$GHT = \sqrt{[(\partial B_z / \partial x)^2 + (\partial B_z / \partial y)^2]}$$

Onde, $\partial B_z / \partial x$ é a derivada parcial do componente vertical do campo magnético (B_z) em relação a coordenada x e $\partial B_z / \partial y$ em relação a coordenada y .

Aplicando o GHT (Figura 12):

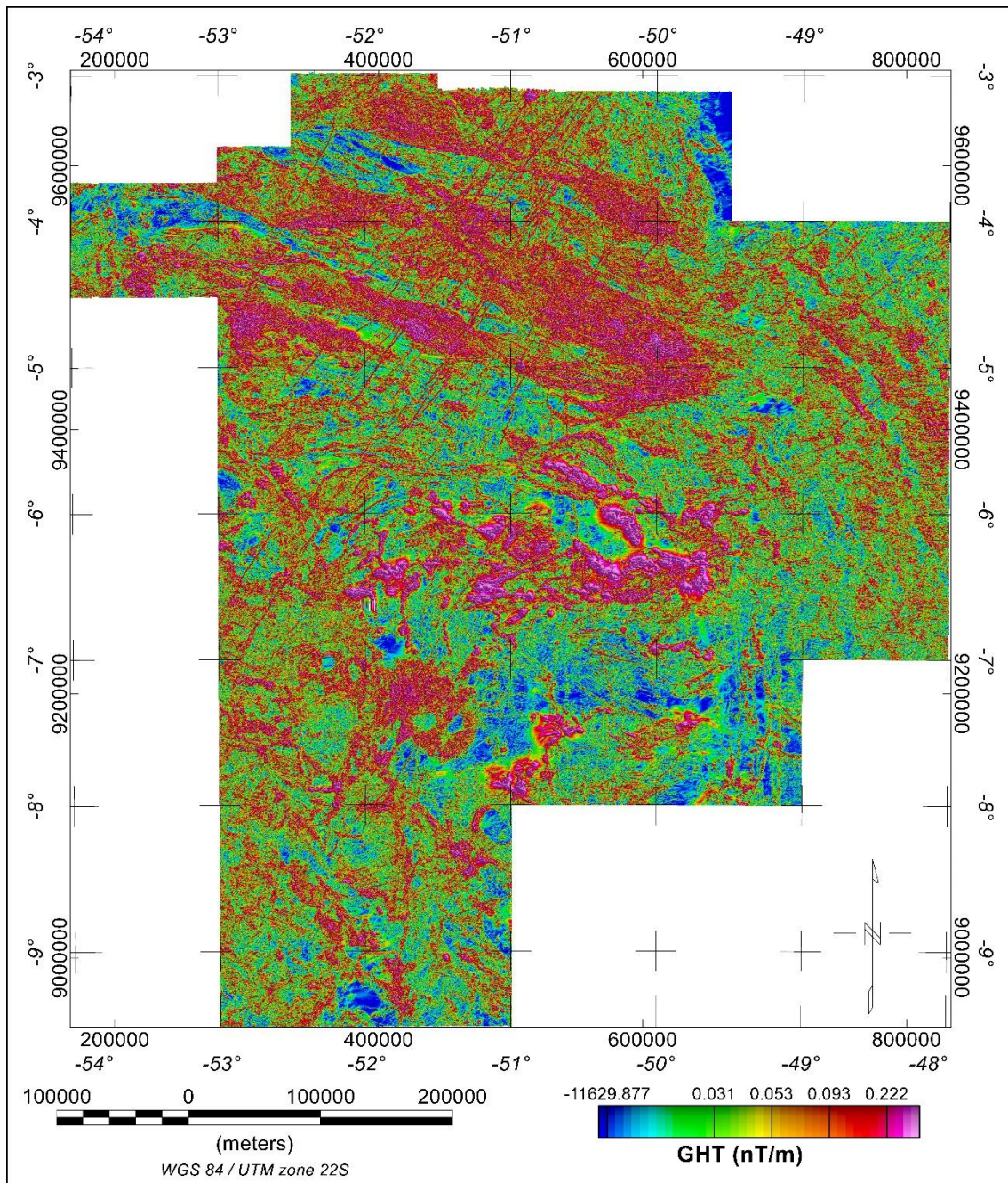


Figura 12 - Mapa aplicando o GHT

Derivada Tilt

A Derivada Tilt (TDR) se dá pelo arco tangente da razão entre a primeira derivada vertical e o Gradiente Horizontal Total (MILLER; SINGH, 1994).

$$TDR = \arctan (VDR/GHT)$$

Devido à natureza da função do arco tangente, os valores do resultado da Derivada Tilt se restringem dentro do intervalo de $-\pi / 2$ e $\pi / 2$, independentemente do valor absoluto do GHT ou da amplitude da Derivada Vertical (Cooper & Cowan, 2006).

Esse filtro tem como objetivo a detecção de bordas, onde sua principal característica é representar uma anomalia positiva sobre a fonte, cruzar o zero na borda e ser negativo fora da área da fonte. A Derivada Tilt (Figura 13) tem uma vantagem em relação a outros métodos de

deteção de borda, já que ela apresenta boas respostas tanto para fontes profundas quanto para fontes rasas, o que evita que fontes rasas sobreponham por completo as respostas de corpos mais profundos (MILLER; SINGH, 1994).

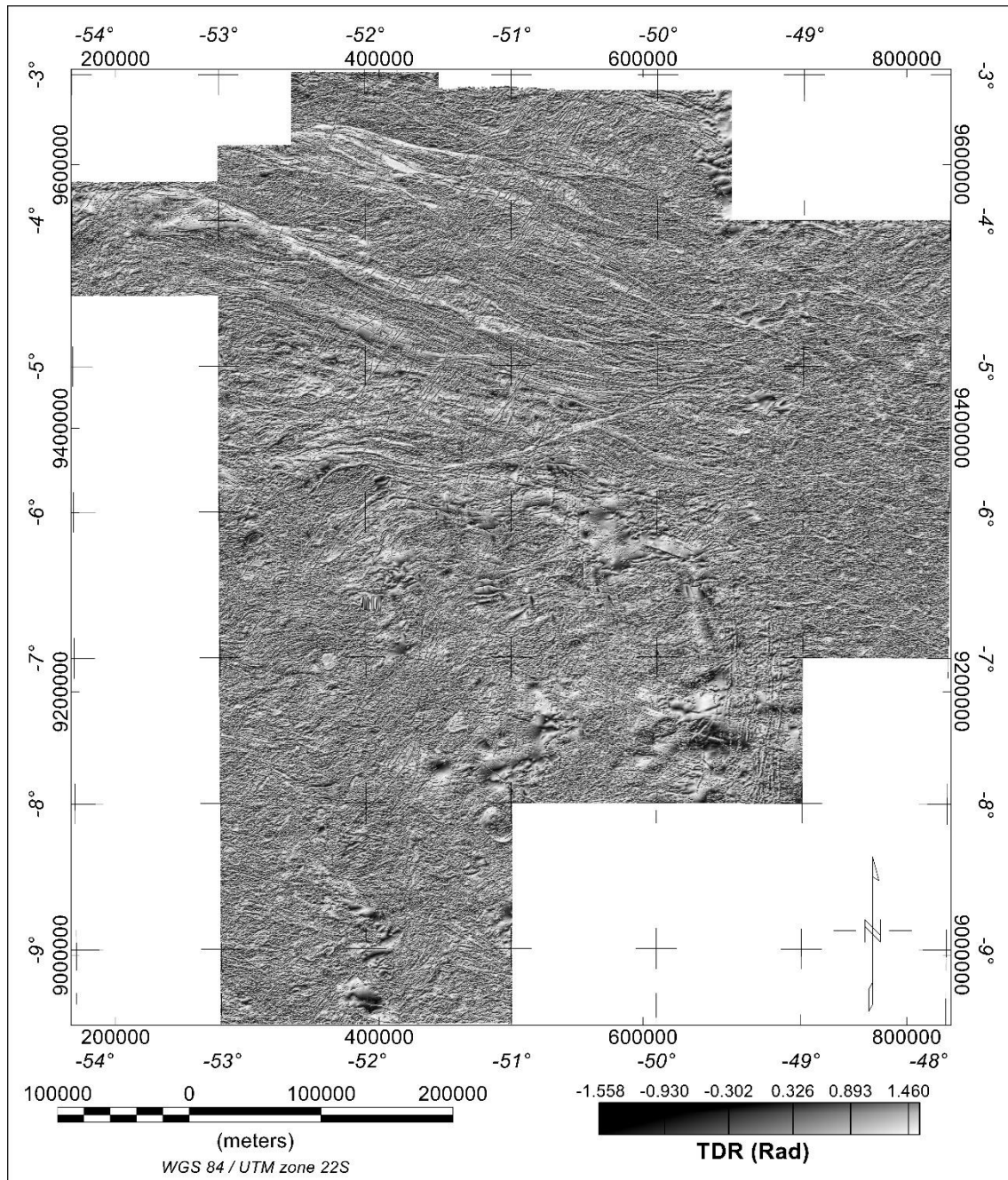


Figura 13 - Mapa aplicando a Derivada Tilt

Sinal analítico (SA)

O resultado desse processamento centraliza a anomalia produzida pelo corpo de forma independente da orientação da magnetização do corpo. O Sinal Analítico 2D é bastante eficaz para o mapeamento de corpos em baixas inclinações magnéticas ou para aqueles com presença de magnetização remanente, porém para o Sinal Analítico 3D isso não é verdade (LI, 2006).

No 3D o resultado depende da profundidade, extensão, ângulo de mergulho e direção de magnetização do corpo e do campo magnético terrestre. Comumente o resultado dos gradientes totais não coincidentes com as localizações dos corpos, estando fora de seus limites reais, apresentando melhores resultados para corpos verticais, como diques verticais de baixa espessura (LI, 2006).

O Sinal analítico (SA) é dado por (ROEST et al 1992):

$$AS = \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial z}\right)^2}$$

Sendo $\partial B / \partial x$ a derivada de primeira ordem do campo magnético em relação a coordenada x e $\partial B / \partial y$ e $\partial B / \partial z$ nas coordenadas y e z , respectivamente (Figura 14).

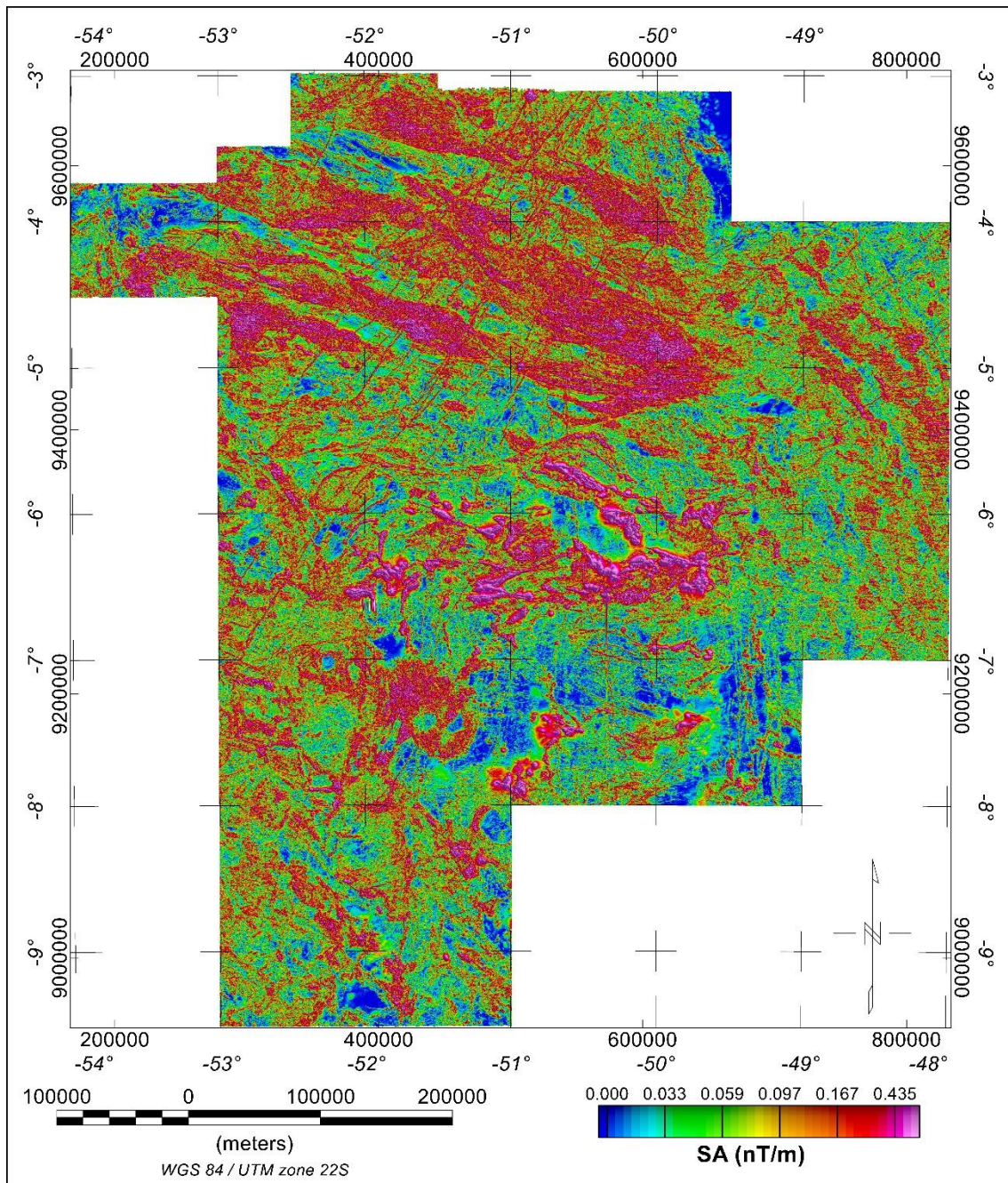


Figura 14 - Mapa do Sinal Analítico

Interpretação da área de estudo

Com os resultados apresentados, foi interpretado utilizando do traçado das anomalias magnéticas e de dados de mapeamentos geológicos já realizados na área (SGB, 2023), onde pode-se notar a predominância de lineamentos NW-SE e, secundariamente, um conjunto NE-SW.

Na direção NW-SE, é encontrado a maior quantidade de lineamentos, com uma média de 50 km de extensão, enquanto na direção N-S tem-se lineamentos com mais de 85 km de extensão (Figuras 15 e 16).

Ao sobrepor os lineamentos e o mapa do Sinal Analítico, é possível notar uma relação entre os lineamentos NW-SE apresentados, como anomalias de alta intensidade e o mapeamento de veios de quartzo com presença de Ouro, onde a maioria desses veios já são depósitos conhecidos e explorados.

Com as informações dos levantamentos de campo utilizadas, foi constatado que o metamorfismo da região ocorreu devido a processos hidrotermais. O que pode levar a um enriquecimento da rocha encaixante, assim justificando a alta resposta magnética dos veios de quartzo.

Próximo às bordas das anomalias onde se encontram esses veios de quartzo, é notável uma predisposição para a ocorrência de depósitos de ouro do tipo *Placer*. Nesta mesma região também podemos encontrar ocorrências de ouro de modo tabular ou lenticular, porém não de maneira significativa para definirmos uma relação importante.

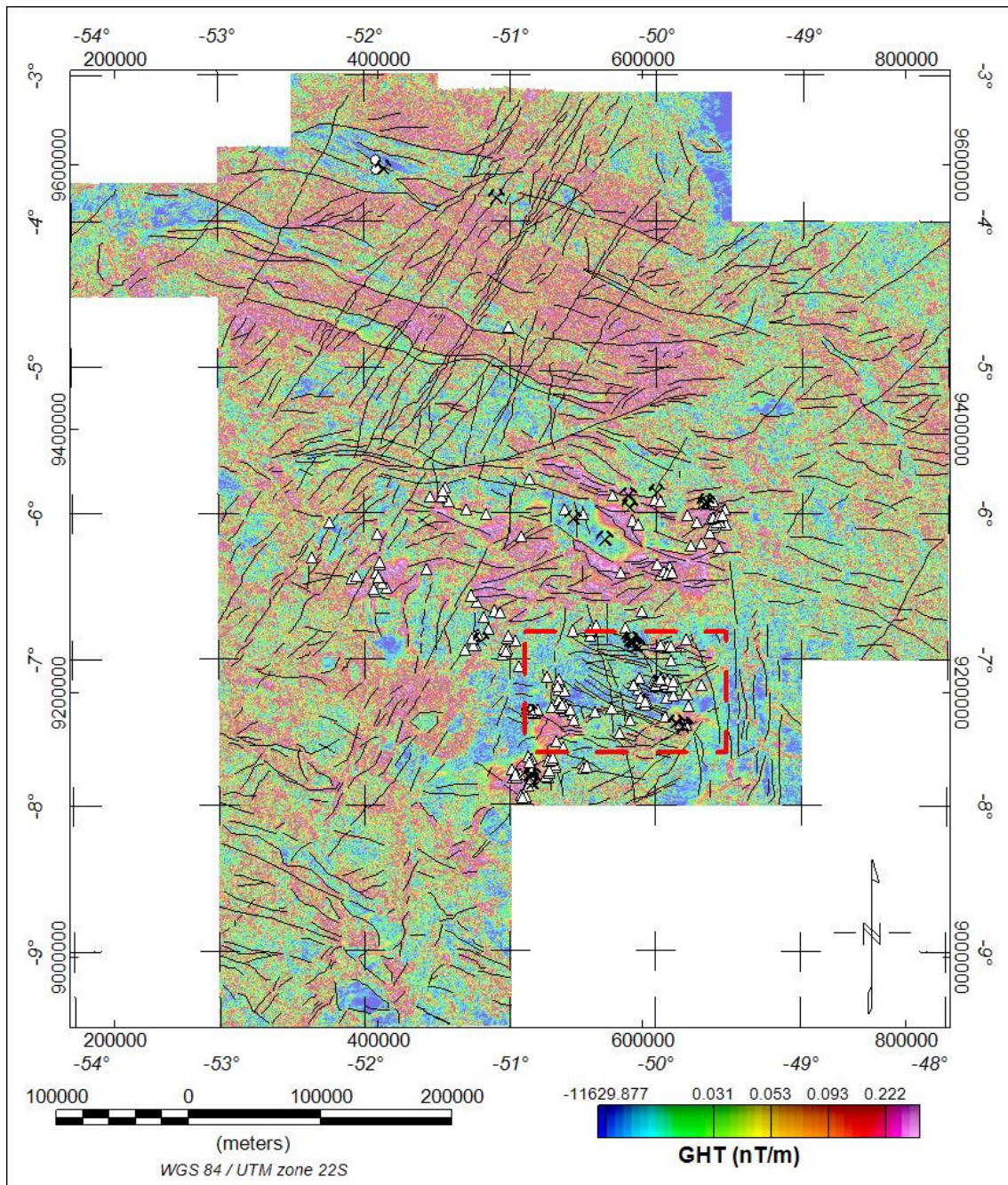


Figura 15 - Mapa de Depósitos (Triângulos brancos), Ocorrências (Círculos brancos) e Jazidas (Martelo geológico) – Sendo o polígono tracejado vermelho a área onde será o foco para estudo

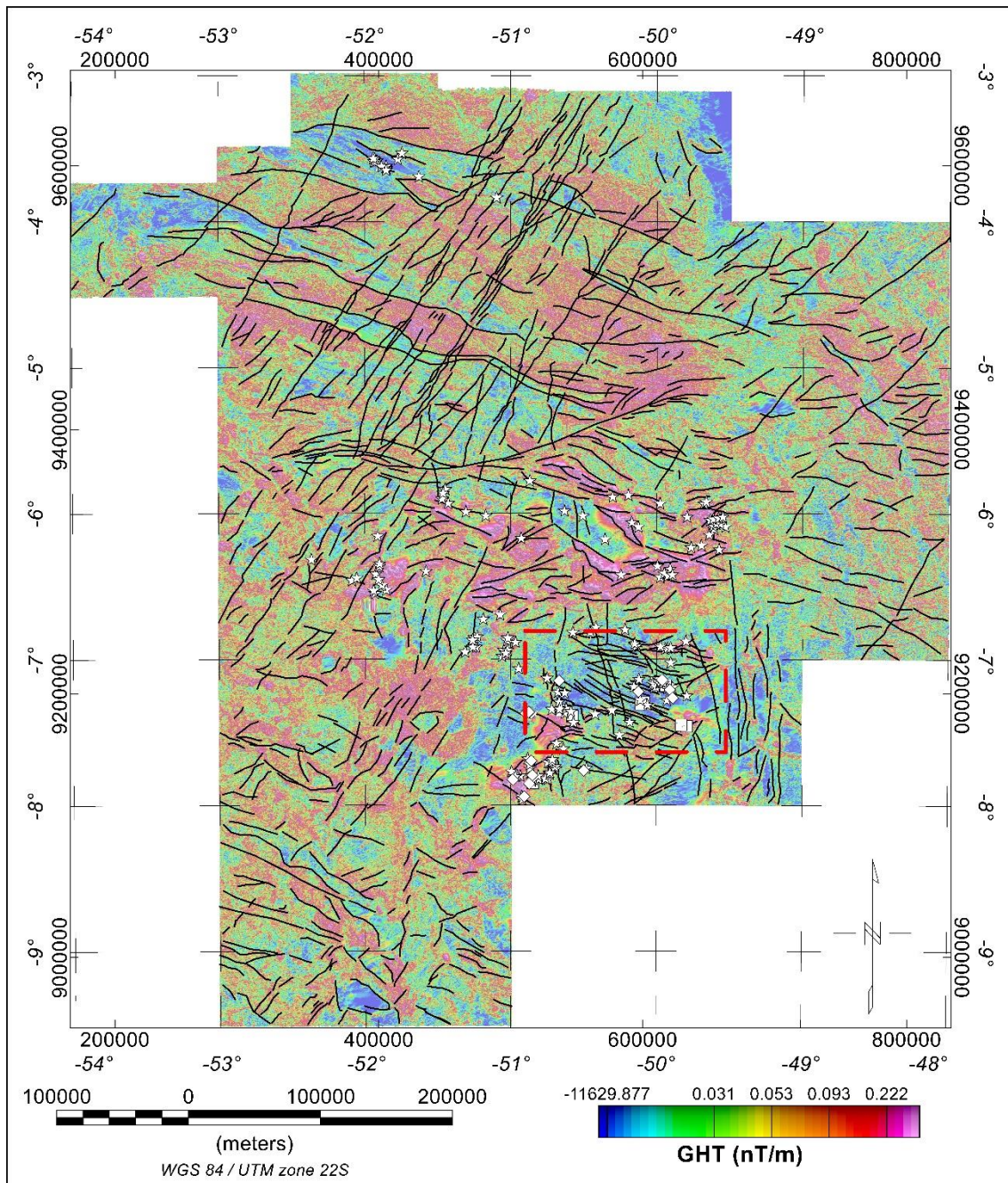


Figura 16 - Mapa de Veios de Quarto com Ouro (Círculos brancos), Tabular/Lenticular (Losangos brancos), Placer (Estrelas brancas) e Filoneana (Quadrados brancos) – Sendo o polígono tracejado vermelho a área onde será o foco estudo

Na porção Leste-Central da área em questão podemos identificar uma área onde é visível a presença de lineamentos forte na direção NW-SE (área destacada em vermelho nas Figuras 15 e 16), seguindo uma anomalia positiva e com pontos mapeados como veios de quartzo com presença de Ouro. Ao entorno desses pontos e anomalias, é destacado uma grande concentração de ocorrências de ouro em *Placer*, levando a acreditar que esses veios/anomalias sejam a fonte primária do material dos *Placers* (Figura 17).

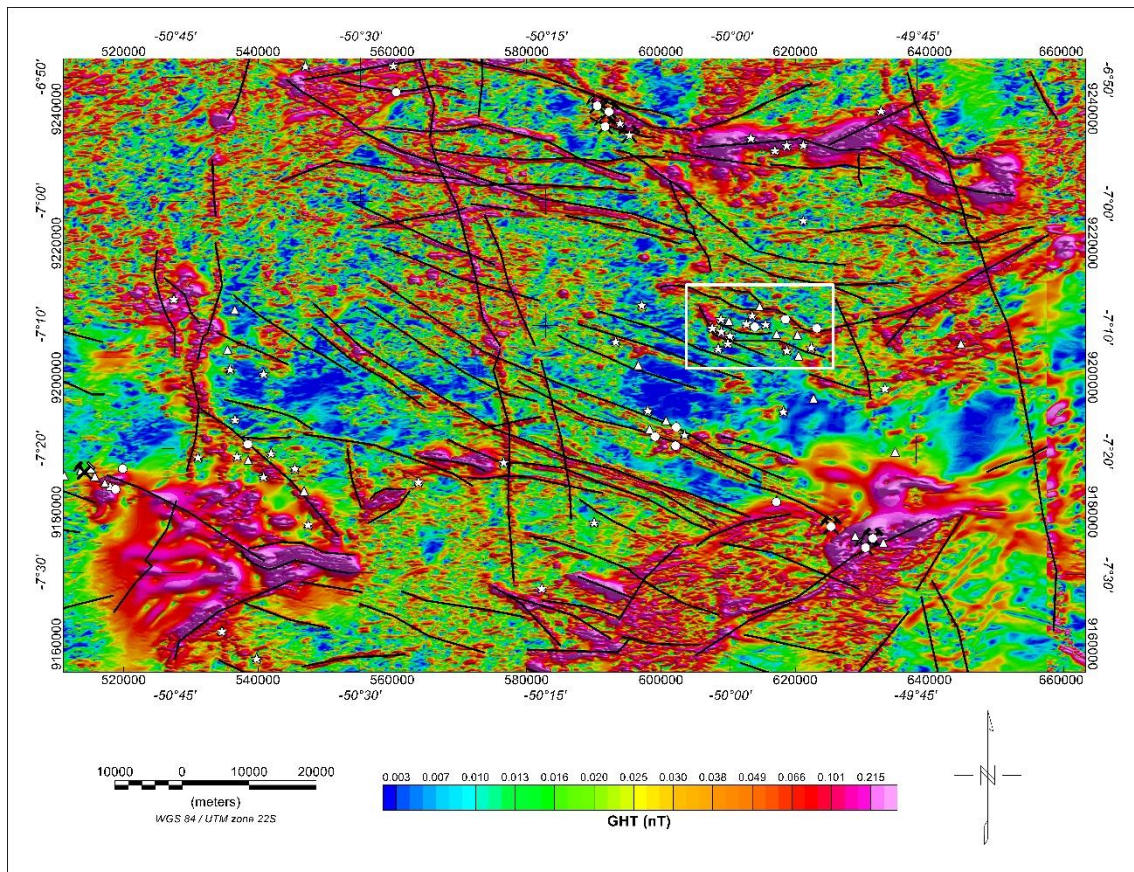


Figura 17 - Mapa da área de estudo – Alta concentração de ocorrência de Ouro próximo aos lineamentos NW, nota-se claramente alinhamento dos depósitos nesta direção – Polígono branco sendo a área de interesse

Considerando todos esses fatos ocorrendo simultaneamente, além da grande presença de ocorrências de Ouro em *Placers* em uma mesma região (área destacada em branco (Figura 18), é esperado que a fonte primária (veio de quartzo) seja de um tamanho/importância considerável. O que torna um alvo promissor para o seguimento de estudos futuros mais detalhados, com uma possível viabilidade econômica.

Porém, ao analisarmos as Figuras 18, 19 e 20, é possível observar que esses lineamentos não continuam de forma expressiva em profundidade. Na Figura 19 já quase não é mais possível ver anomalias significativas desses lineamentos, levando a crer que elas não se estendam mais do que 5km de profundidade.

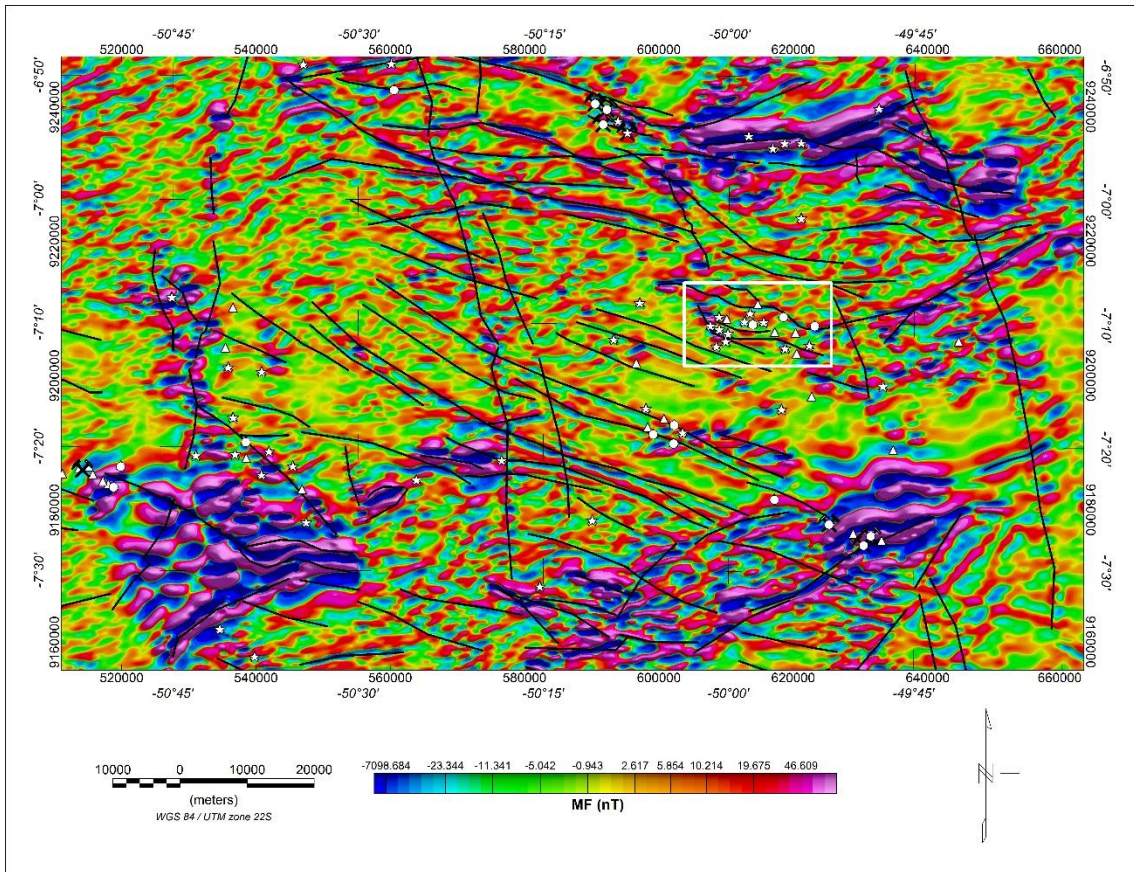


Figura 18 - Matched Filter aplicado a área de estudo (1000m de profundidade) – Polígono branco sendo a área de interesse

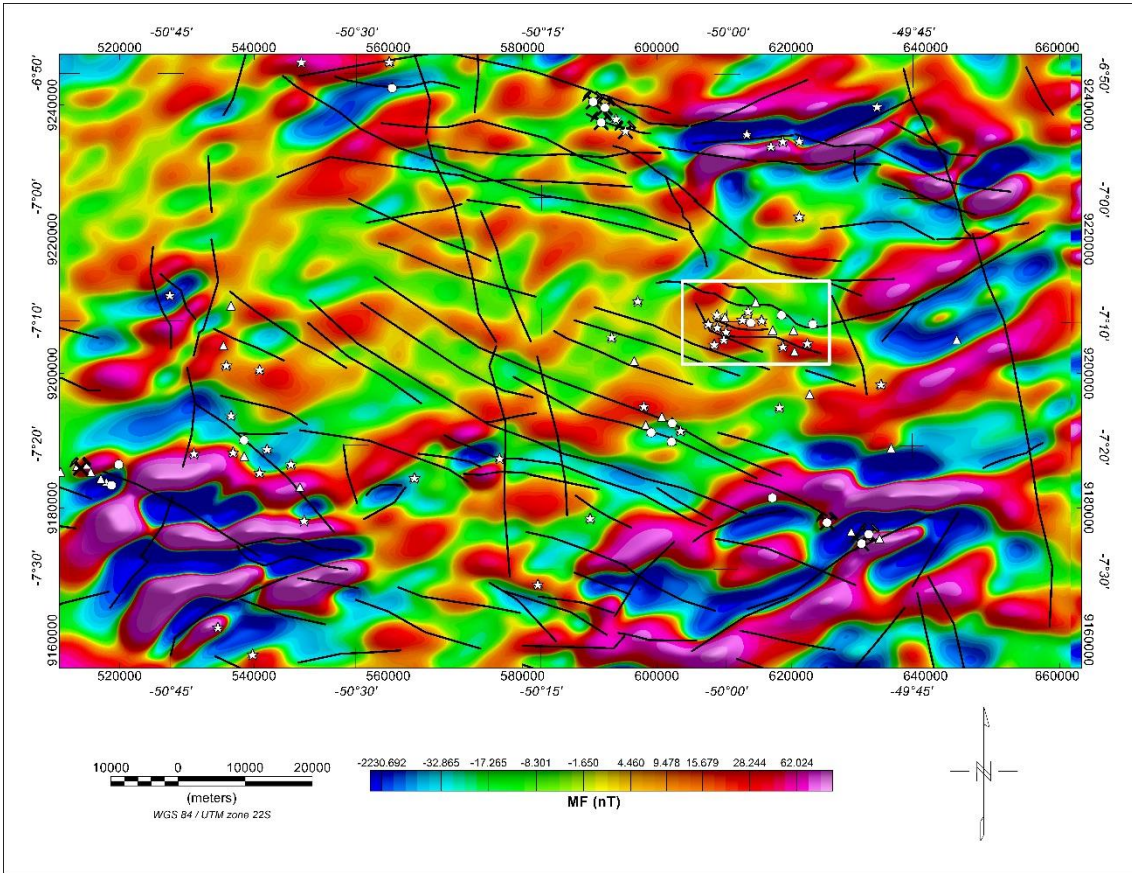


Figura 19 - Matched Filter aplicado a área de estudo (5000m de profundidade) – Polígono branco sendo a área de interesse

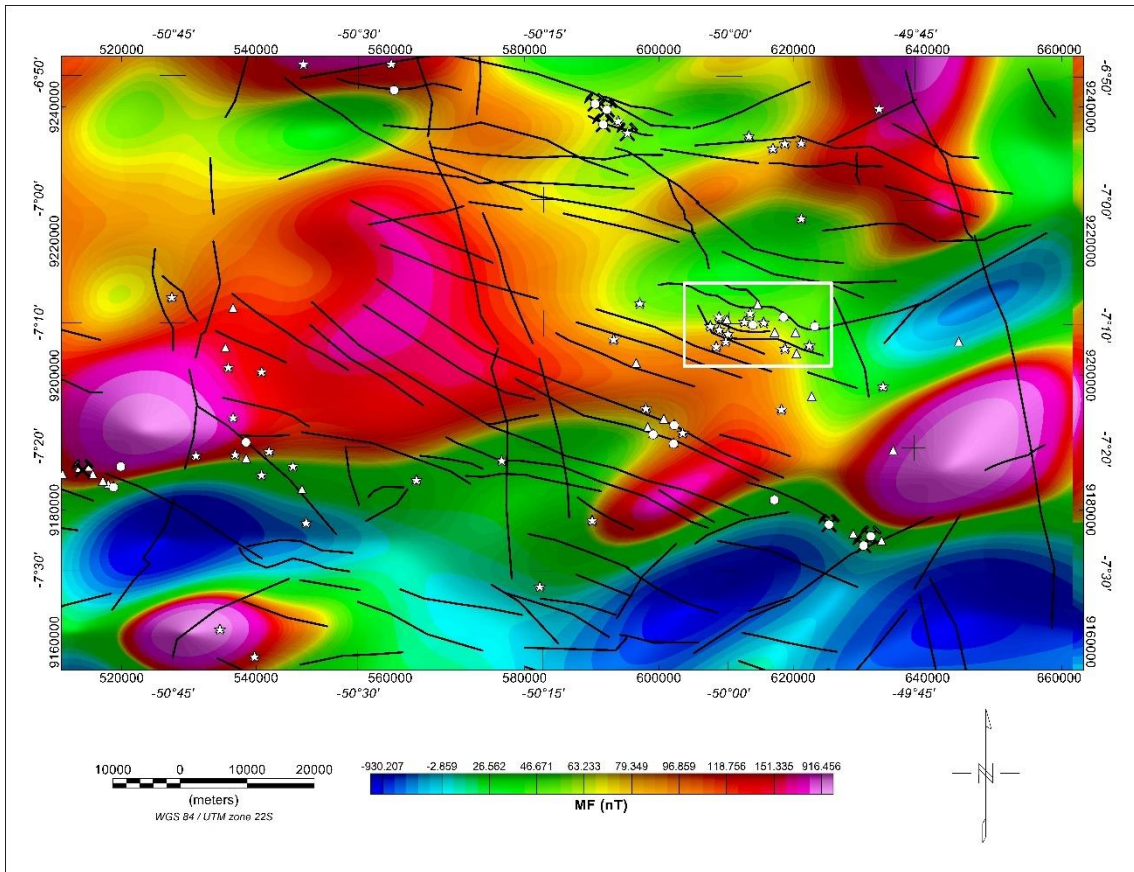


Figura 20 - Matched Filter aplicado a área de estudo (19000m de profundidade) – Polígono branco sendo a área de interesse

Conclusão

Com a utilização de técnicas de processamento de dados aeromagnéticos, como as demonstradas anteriormente, é possível ter um maior entendimento do arcabouço magnético da região, identificando diferentes feições e domínios geológicos, assim como anomalias que são relacionadas as fontes mais profundas.

Com a integração dos diversos levantamentos aeromagnéticos da região foi possível identificar, em um único mapa, que a região é dominada por feições magnéticas diferentes ao longo de toda sua extensão, evidenciado ainda mais quando comparado com Domínios diferentes, como podemos ver pelos lineamentos e anomalias destacadas nos mapas. Assim, possibilitou um maior entendimento do arcabouço magnético do Depósito Mineral de Carajás, tornando essa informação muito útil para servir como base para futuros estudos na área.

Utilizando dos produtos feitos durante a etapa de processamento, foi definido os principais lineamentos magnéticos da região e os associando com os dados estruturais da região. Com eles foi possível determinar onde estão as principais discontinuidades, falhas, contatos litológicos e como essas feições estão dispostas dentro de todo o Depósito Mineral.

Considerando os pontos levantados na interpretação dos resultados, foi definido uma área (Figura 17) promissora para futuras investigações visando uma viabilidade econômica, tendo em vista a grande quantidade de informações de ocorrência de ouro e sua associação com anomalias geofísicas características. Foi observado por meio de levantamento de geológicos um Veio de Quartzo com grande presença de ouro, porém esse corpo não se estende em grandes profundidades, o que nos permite levantar a hipótese de esse depósito ter sido formado por processos hidrotermais rasos ou pela percolação e alocação de fluídos hidrotermais em brechas superficiais.

Além disso, com a associação dos dados geofísicos com os dados dos levantamentos de campo realizados na região, nos permite aplicar metodologias de planejamento de campo de uma forma mais assertiva, priorizando e definindo áreas mais favoráveis para estudos mais detalhados e complexos que, por consequência, precisam de um maior investimento.

Referências Bibliográficas

- ALKEN, P.; THÉBAULT, E.; BEGGAN, C. D.; AMIT, H.; AUBERT, J.; BAERENZUNG, J.; BONDAR, T. N.; BROWN, W. J.; CALIFF, S.; CHAMBODUT, A.; CHULLIAT, A.; COX, G. A.; FINLAY, C. C.; FOURNIER, A.; GILLET, N.; GRAYVER, A.; HAMMER, M. D.; HOLSCHNEIDER, M.; HUDER, L.; ... ZHOU, B. **International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation**. Earth, Planets and Space, vol. 73, n° 1, 1 dez. 2021. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>.
- BLAKELY, R. J. **Potential theory in gravity and magnetic applications**. 1° ed. Cambridge: Cambridge university press, 1995. vol. 1. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511549816>.
- CAMPBELL, W. H. **Introduction to Geomagnetic Fields**. 2° ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. vol. 2. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139165136>.
- COWAN, D. R.; COWAN, S. **Separation Filtering Applied to Aeromagnetic Data**. Exploration Geophysics, vol. 24, p. 429–436, 1993.
- CRISTINA DE MELO, A.; SANTOS, R. B.; CARLOS, U.; NETO, F. P.; BARBOSA, V. C. F. **Filtro de Redução ao Pólo: Potencialidades e Limitações**. Rio de Janeiro, 15 ago. 2011.
- DENTITH, M. & MUDGE, S. T. **Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist**. Cambridge University Press, 2014. 438 pp. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0557-9>
- DUNLOP, D. J.; ÖZDEMİR, Ö. **Rock magnetism: fundamentals and frontiers**. 2° ed. Cambridge: Cambridge university press, 1997. vol. 2.
- FERREIRA, F. J. F.; DE SOUZA, J.; BONGIOLO, A. de B. e. S.; DE CASTRO, L. G. **Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle**. GEOPHYSICS, vol. 78, n° 3, p. J33–J41, 1 maio 2013. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0441.1>.
- GALARZA, M. A.; MACAMBIRA, M. J. B. **Geocronologia e evolução crustal da área do depósito de Cu-Au Gameleira, Província Mineral de Carajás (Pará), Brasil**. Geologia USP. Série Científica, vol. 2, n° 0, p. 143–159, 1 dez. 2002. DOI 10.5327/S1519-874X2002000100012.
- GUSMÃO DE OLIVEIRA, R. **Insights on the framework of the Carajás Province, Amazonian Craton, Brazil, and on the three-dimensional shape of the Carajás Basin, based on gravity data**. Journal of the Geological Survey of Brazil, vol. 1, n° 3, p. 101–112, 24 dez. 2018.
- HOLDSWORTH, R. E.; PINHEIRO, R. V. L. **The anatomy of shallow-crustal transpressional structures: insights from the Archaean Carajás fault zone, Amazon, Brazil**. Journal of Structural Geology, vol. 22, n° 8, p. 1105–1123, 1 ago. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00036-5).
- ISLES, D.J. and RANKIN, L.R., 2013. **Geological interpretation of aeromagnetic data**. Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists. Disponível em: <http://library.seg.org/>.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**, 3rd ed. lx, 262 pp. Oxford: Blackwell Science. ISBN 0 632 04929 4.

- Tarney J. PE-PIPER, G. & PIPER, D. J. W. 2002. **The Igneous Rocks of Greece. The Anatomy of an Orogen.** Beiträge zur Regionalen Geologie der Erde (Series). xvi 573 pp. Stuttgart: Gebrüder Borntraeger. ISBN 3 443 11030 4. Geological Magazine. 2003. doi:10.1017/S0016756803218021
- KLEIN, E.L., ROSA-COSTA, L.T., VASQUEZ, M.L., 2014. **Metalogênese da borda oriental do Cráton Amazônico.** Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras. Belo Horizonte, CPRM, pp.171-194.
- VASQUEZ, M.L.; ROSA-COSTA, L.T. **Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Pará: escala 1:1.000.000.** Belém: CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 2008.
- LI, X. **Understanding 3D analytic signal amplitude.** Geophysics, vol. 71, nº 2, 2006. <https://doi.org/10.1190/1.2184367>.
- MILLER, H. G.; SINGH, V. **Potential field tilt a new concept for location of potential field sources.** Journal of Applied Geophysics, vol. 32, p. 213–217, 1994.
- NABIGHIAN, M. N.; GRAUCH, V. J. S.; HANSEN, R. O.; LAFEHR, T. R.; LI, Y.; PEIRCE, J. W.; PHILLIPS, J. D.; RUDER, M. E. **The historical development of the magnetic method in exploration.** Geophysics, vol. 70, nº 6, 2005. <https://doi.org/10.1190/1.2133784>.
- NOGUEIRA, A. C. R. **Análise Faciológica e Aspectos Estruturais da Formação Águas Claras, Região Central da Serra dos Carajás-PA.** 1995. Universidade Federal do Pará, Belém, 1995.
- OLIVEIRA, R.G.D., Teixeira, N.A., Costa, I.S.L., Tavares, F.M. and DOMINGOS, N.R.R., 2020. **Levantamento aerogravimétrico Carajás: contribuição à geotectônica e metalogenia da porção leste do cráton Amazônico.** Recife. Informe de Geofísica Aplicada Nº2.
- ROEST, W. R.; VERHOETT, J.; PILKINGTON, M. **Magnetic interpretation using the 3-0 analytic signal.** GEOPHYSICS, vol. 57, nº I, 1992. Disponível em: <http://library.seg.org/>.
- SGB.** Sistema de Informações Georreferenciadas (SIG) dos Projetos Aeromagnéticos. Disponível em: <https://geosgb.sgb.gov.br/geosgb/downloads.html>. Consultado em: 15 de novembro de 2021.
- SGB.** Sistema de Informações Georreferenciadas (SIG) dos Dados Estruturais e Mapeamento Geológico. Disponível em: <https://geosgb.sgb.gov.br/geosgb/downloads.html>. Consultado em: 29 de novembro de 2023.
- TAVARES, F. M. 20215. **EVOLUÇÃO GEOTECTÔNICA DO NORDESTE DA PROVÍNCIA CARAJÁS.** RJ. Tese de Doutorado. Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M. and MacKenzie, C., 2004. **New insights into magnetic derivatives for structural mapping.** The leading edge, 23(2), pp.116-119. <https://doi.org/10.1190/1.1651454>

WALTER, C.; BRAUN, A.; FOTOPOULOS, G. **High-resolution unmanned aerial vehicle aeromagnetic surveys for mineral exploration targets**. *Geophysical Prospecting*, vol. 68, n° 1, p. 334–349, 1 jan. 2020. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12914>.