



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA

VICTÓRIA CAROLINA FIGUEIRA SUSIN

**INTEGRAÇÃO DOS MÉTODOS POTENCIAIS E SÍSMICO NA PROSPECÇÃO
DE DEPÓSITOS MINERAIS PROFUNDOS, UM ESTUDO DE CASO EM
OLYMPIC DAM, AUSTRÁLIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA (DOT)

Niterói, RJ

2022

VICTÓRIA CAROLINA FIGUEIRA SUSIN

**INTEGRAÇÃO DOS MÉTODOS POTENCIAIS E SÍSMICO NA PROSPECÇÃO
DE DEPÓSITOS MINERAIS PROFUNDOS, UM ESTUDO DE CASO EM
OLYMPIC DAM, AUSTRÁLIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Geologia e Geofísica.

Orientador

Prof. Dr. Leonardo Miquelutti

Coorientador

Prof. Dr. Marco Antonio Cetale Santos

Niterói, RJ

2022

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

S964i Susin, Victoria Carolina Figueira
INTEGRAÇÃO DOS MÉTODOS POTENCIAIS E SÍSMICO NA PROSPECÇÃO DE
DEPÓSITOS MINERAIS PROFUNDOS, UM ESTUDO DE CASO EM OLYMPIC
DAM, AUSTRÁLIA / Victoria Carolina Figueira Susin ; Leonardo
Miquelutti, orientador ; Marco Antonio Cetale Santos,
coorientador. Niterói, 2022.
84 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2022.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDOT.2022.m.12162557762>

1. Sísmica. 2. Inversão Geofísica. 3. IOCG. 4. Olympic
Dam. 5. Produção intelectual. I. Miquelutti, Leonardo,
orientador. II. Santos, Marco Antonio Cetale, coorientador.
III. Universidade Federal Fluminense. Instituto de
Geociências. IV. Título.

CDD -

VICTÓRIA CAROLINA FIGUEIRA SUSIN

**INTEGRAÇÃO DOS MÉTODOS POTENCIAIS E SÍSMICO NA PROSPECÇÃO
DE DEPÓSITOS MINERAIS PROFUNDOS, UM ESTUDO DE CASO EM
OLYMPIC DAM, AUSTRÁLIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Geologia e Geofísica.

Aprovada em 17/01/2022 pela banca examinadora abaixo:

Prof. Dr. Leonardo Miquelutti

UFF / DOT

Prof. Dr. Marco Antonio Cetale Santos

UFF / DOT / GISIS

Prof. Dr^a. Flora Solon

UFF / DOT

Prof. Dr. Luiz Alberto Santos

UFF / DOT / Petrobras

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Salomão

UERJ

Niterói, RJ

2022

Agradecimentos

A Deus, pela vida, pelos aprendizados, pelas bênçãos, oportunidades e pelas pessoas incríveis que fazem parte da minha vida.

Aos meus pais, que sempre me apoiam e me acompanham, me dão amor e força para seguir me desenvolvendo e buscando novos desafios.

À minha família, que me inspira e incentiva, e está sempre presente.

Aos meus amigos, que trazem leveza e novas aventuras, e dividem as alegrias e dificuldades.

À Ninoca, minha gatinha, que acompanhou de perto essa dissertação, sempre comigo enquanto escrevia.

Aos meus orientadores, Leonardo Miquelutti e Marco Cetale, pelo conhecimento, suporte e paciência, por aceitarem trabalhar comigo nesse tema pouco discutido e pelas reuniões sempre bem-humoradas.

À Luana, Jeniffer, Tone e Paulo, por serem sempre tão queridos e solícitos, pela ajuda com os softwares e conhecimento.

Aos amigos da Seequent, pela licença do software Oasis montaj e todo suporte técnico.

Ao Departamento de Minas e Energia da Austrália do Sul, por disponibilizar todos os dados utilizados neste trabalho.

À Universidade Federal Fluminense e ao Departamento de Geologia e Geofísica, que nos dá estrutura para nos desenvolvermos como profissionais e cidadãos, que nos dá a oportunidade de criar amigos e colegas de profissão e encontrar em nossos professores referências profissionais e valorosos orientadores.

Aos professores, Dr^a. Flora Solon, Dr. Luiz Alberto Santos e Dr. Marcelo Salomão, por aceitarem o convite para avaliar esta dissertação.

Muita gratidão a todos.

*...É preciso amor
Pra poder pulsar
É preciso paz pra poder sorrir
É preciso a chuva para florir...*

Almir Sater

RESUMO

SUSIN, Victória Carolina Figueira. **Integração dos Métodos Potenciais e Sísmico na Prospecção de Depósitos Minerais Profundos, um Estudo de Caso em Olympic Dam, Austrália.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2022.

Os depósitos minerais rasos têm se tornado cada vez mais escassos, exigindo o desenvolvimento de uma nova fronteira exploratória para a prospecção mineral, a busca por depósitos profundos. Estes depósitos se encontram na faixa de 500 a 2000 m de profundidade, encarecendo os antigos protocolos prospectivos, como os diversos furos de sondagem, e trazendo maiores ambiguidades às respostas geofísicas dos métodos tradicionais, gravimetria e magnetometria. Como uma ferramenta de calibração, o método sísmico foi usado neste trabalho, juntamente com inversões gravimétricas e magnéticas, para gerar uma melhor compreensão de sua aplicabilidade e eficiência no fluxo exploratório da mineração. A integração dos três métodos geofísicos apresentou uma boa correlação sobre as feições geológicas do depósito de IOCG de Olympic Dam, na Austrália do Sul, validadas através de mapas e modelos geológicos. Foi possível a identificação de estruturas através da interpretação do imageamento sísmico e suas associações com as respostas magnéticas e gravimétricas da área, sendo interpretados os modelos de susceptibilidade magnética e densidade. Embora o estudo tenha sido feito a nível regional, os resultados mostram uma boa contribuição da sísmica para o conhecimento estrutural da região e para validação da qualidade das inversões, trazendo benefícios e aplicações tanto para o controle de qualidade dos dados, como para a redução de incertezas na prospecção mineral.

PALAVRAS-CHAVE: SÍSMICA, INVERSÕES GEOFÍSICAS, IOCG, OLYMPIC DAM

ABSTRACT

SUSIN, Victória Carolina Figueira. **Integration of the Potential and Seismic Methods Applied to Deep Mineral Deposits, a Case Study at Olympic Dam, Australia**. Dissertation (Master of Science), Fluminense Federal University. Niterói, 2022.

Shallow mineral deposits have become increasingly scarce, requiring the development of a new exploratory frontier for mineral prospecting, the search for deeper deposits. These deposits are found on depth ranges of 500 to 2000 m, making the old prospective protocols more expensive, such as amounts of drillholes, and bringing greater ambiguities to the geophysical responses of traditional methods, like gravity and magnetometry. As a calibration tool, the seismic method was used in this work, together with gravity and magnetic inversions, to generate a better understanding of its applicability and efficiency in the mining exploratory flow. The integration of the three geophysical methods showed a good correlation over the geological features of the Olympic Dam IOCG deposit, in South Australia, validated through maps and geological models. It was possible to identify structures through the interpretation of seismic imaging and its associations with the magnetic and gravimetric responses over the area, by interpreting the magnetic susceptibility and density models. Although the study was carried out at a regional level, the results show a good contribution of seismic to the structural knowledge of the region and to the validation of the inversions' quality, bringing benefits and applications both for data quality control and for the reduction of uncertainties in mineral prospecting.

KEYWORDS: SEISMIC, GEOPHYSICAL INVERSIONS, IOCG, OLYMPIC DAM

Índice de Figuras

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo e depósitos da Austrália do Sul. Contorno aproximado do Cráton Gawler na imagem do canto superior direito e localização da área no mapa da Australia no canto inferior direito (Direen, N. e Lyons, P., 2007).....	15
Figura 2 - Mapa com imagem de satélite sobre a região de Olympic Dam, polígono (em vermelho) utilizado para o processamento dos dados e localização da mina de Olympic Dam (em preto). Fonte: Autor.....	16
Figura 3 - Contexto geológico do cráton Gawler na Austrália do Sul. Destaque para a Província de Cu-Au de Olympic e para a Província de Au do Gawler Central (Reid, A., 2019).....	18
Figura 4 - Geologia interpretada do embasamento cristalino do cráton Gawler, na Austrália do Sul, mostrando a localização dos principais depósitos e prospectos minerais (Hand, et al., 2007).	20
Figura 5 - a) Geologia e distribuição do depósito aproximadamente 300 m abaixo da superfície em Olympic Dam (adaptado e simplificado de Reynolds, 2000). b) Seção transversal de Olympic Dam mostrando as relações geológicas e a localização da interface bornita-calcopirita (adaptado e simplificado de Reeve et al., 1990).....	23
Figura 6 - Fluxo de processamento das linhas sísmicas.	29
Figura 7 - Localização da área de aquisição na região de Andamooka, Austrália do Sul, extraída do relatório de dados da SGL.	30
Figura 8 - Fluxo de processamento dos dados magnéticos extraído do relatório de dados da SGL.	31
Figura 9 - Mapa da Intensidade Magnética Total (TMI) com polígono em torno da anomalia de Olympic Dam, produto da base de dados de magnetometria. Fonte: Autor.	32
Figura 10 - Mapa do TMI com o corte em torno da anomalia magnética e zoom na região de Olympic Dam. Fonte: Autor.	33
Figura 11 - Mapa da Primeira Derivada Vertical com o corte em torno da anomalia magnética na região de Olympic Dam. Fonte: Autor.....	34
Figura 12 - Mapa da junção dos aerolevantamentos de gradiometria gravimétrica na região de Olympic Dam extraído do relatório de dados da CGG.....	35
Figura 13 - Fluxo de processamento do dado AGG extraído do relatório de dados da CGG.	36
Figura 14 - Mapa da gravidade vertical calculada através do método da fonte equivalente e polígono representando o corte em torno da anomalia de Olympic Dam. Fonte: Autor. 37	
Figura 15 - Mapa da gravidade vertical com corte em torno da anomalia gravimétrica e zoom na região de Olympic Dam. Fonte: Autor.....	38
Figura 16 - Ilustração de um dado sísmico sintético e de como o envelope (traço claro envolvendo o traço sísmico) ajuda a retirar as informações de side lobes, suprimindo “ruído” e diminuindo ambiguidade. Bianco (2011) apud Oliveira Neto, 2019.....	41

Figura 17 - A) Seção sísmica em amplitude e horizontes mapeados marcando topo e base de formações. B) Envelope correspondente ao dado em A). Sarhan (2017).	41
Figura 18 - Decomposição espectral para um modelo de camada fina (Partyka et al., 1999).	42
Figura 19 - Na esquerda, exemplo de reservatório com variação de espessura no dado sísmico. No centro, o dado sísmico com frequência dominante mais alta, que destaca as partes mais finas do reservatório no mapa de amplitude. E na direita, o dado com frequência dominante mais baixa, destacando partes mais espessas no mapa de amplitude (Laughlin et al., 2002).	43
Figura 20 - Comparação entre um time slice de amplitude, imagem de cima, e um time slice de similaridade, imagem de baixo. Mostrando melhor destaque de estruturas geológicas com o uso da similaridade (Kola-Ojo, 2018).	44
Figura 21 - Linhas sísmicas sobre gravimetria. Modificado de Wise et al., 2015.	46
Figura 22 - Migração final da linha 03GA-OD1, de direção N-S e extensão de 193 km. Fonte: Autor.	46
Figura 23 - Migração final da linha 03GA-OD2, de direção E-W e extensão de 57 km. Fonte: Autor.	47
Figura 24 - Resultado do cálculo do Envelope, imagem de cima, em comparação com a migração final, imagem de baixo, da linha 03GA-OD1. Lado Norte da linha à esquerda. Fonte: Autor.	48
Figura 25 - Resultado do cálculo do Envelope, imagem de cima, em comparação com a migração final, imagem de baixo, da linha 03GA-OD2. Lado Oeste da linha à esquerda. Fonte: Autor.	49
Figura 26 - Espectros de amplitude das linhas 03GA-OD1, acima, e 03GA-OD2, abaixo. Observa-se o domínio das frequências entre 20 e 55 Hz. Fonte: Autor.	50
Figura 27 - Decomposição espectral da linha 03GA-OD1, com filtragens de 25, 35 e 45 Hz. Lado Norte da linha à esquerda. Fonte: Autor.	51
Figura 28 - Decomposição espectral da linha 03GA-OD2, com filtragens de 25, 35 e 45 Hz. Lado Oeste da linha à esquerda. Fonte: Autor.	52
Figura 29 - Atributo da Similaridade na linha 03GA-OD1. A cor branca representa um alto nível de similaridade entre os traços, enquanto a cor preta representa o oposto. Fonte: Autor.	53
Figura 30 - Atributo da Similaridade na linha 03GA-OD2. Fonte: Autor.	53
Figura 31 - Sessão de amplitudes da linha 03GA-OD1 com as interpretações da base da cobertura sedimentar em verde, horizonte conformal em amarelo, possível contato com embasamento em azul e soerguimento em vermelho. Fonte: Autor.	54
Figura 32 - Interpretação da linha 03GA-OD2 exibindo amplitudes. Base da cobertura sedimentar em verde, Gawler Range Volcanics em azul, soerguimento associado ao Grupo Hutchison em amarelo, unidade do Arqueano em rosa e falhamentos em vermelho. Fonte: Autor.	55

Figura 33 - Nova interpretação dos falhamentos sobre a sessão de amplitudes da linha 03GA-OD2 com a adição da falha com mergulho para oeste, identificada com a ajuda dos atributos sísmicos. Fonte: Autor.....	56
Figura 34 - Bloco 3D da Inversão do Vetor de Magnetização da Primeira Derivada Vertical. Fonte: Autor.....	58
Figura 35 - Seções do modelo de susceptibilidade magnética sob a mina de Olympic Dam. Fonte: Autor.....	59
Figura 36 - Seções do modelo de susceptibilidade magnética nas localidades aproximadas das linhas sísmicas. Fonte: Autor.....	60
Figura 37 - Bloco 3D da inversão gravimétrica da Gravidade Vertical. Fonte: Autor.....	61
Figura 38 - Seções do modelo de densidade sob a mina de Olympic Dam. Fonte: Autor.....	62
Figura 39 - Seções do modelo de densidade com referencial nas linhas sísmicas. Fonte: Autor.....	63
Figura 40 - Análise integrativa de métodos. Exemplo de visualização 3D com o software Oasis montaj. Uso do modelo digital de elevação de terreno (DEM) para auxiliar na identificação da mina de Olympic Dam. Fonte: Autor.....	64
Figura 41 - Linha sísmica 03GA-OD2 com horizontes interpretados e sobreposição de superfícies do modelo geológico. Imagem de cima indica correlação na unidade do Arqueano e imagem de baixo no falhamento com mergulho para oeste interpretado com auxílio dos atributos sísmicos. Fonte: Autor.....	65
Figura 42 - Sobreposição do modelo de densidade com a linha sísmica 03GA-OD2. Imagens acima das seções mostram o ajuste da inversão com a posição da linha. Fonte: Autor.....	66
Figura 43 - Interpretação sísmica da linha 03GA-OD2. Modificado de Wise et al., 2015..	67
Figura 44 - Sobreposição do modelo de densidade com a linha sísmica 03GA-OD1. Imagens acima das seções mostram o ajuste da inversão com a posição da linha. Fonte: Autor.....	68
Figura 45 - Sobreposição do modelo de susceptibilidade magnética com a linha sísmica 03GA-OD2. Fonte: Autor.....	69
Figura 46 - Sobreposição do modelo de susceptibilidade magnética com a linha sísmica 03GA-OD1. Fonte: Autor.....	70
Figura 47 - Sobreposição do mapa geológico sobre o depósito de IOCG de Olympic Dam com o modelo de densidade. Fonte: Autor.....	71
Figura 48 - Sobreposição do mapa geológico sobre o depósito de IOCG de Olympic Dam com o modelo de susceptibilidade magnética. Fonte: Autor.....	72
Figura 49 - Mapa geológico sobre o Complexo de Brechas do depósito de IOCG de Olympic Dam. Modificado de Ehrig, et al. (2012).	72
Figura 50 - Sobreposição do mapa geológico, com o modelo de susceptibilidade magnética e as duas linhas sísmicas. Fonte: Autor.....	73

Figura 51 - Seções em profundidade na localização do mapa geológico com a sobreposição do modelo de susceptibilidade magnética com as linhas 03GA-OD2, acima, e 03GA-OD1, embaixo. Fonte: Autor..... 74

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Parâmetros de aquisição das linhas 03GA-OD1 e 03GA-OD2.....	27
--	----

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1.	Apresentação.....	12
1.2.	Os Desafios da Exploração Sísmica em Rocha Dura	13
1.3.	Objetivos da Pesquisa.....	14
1.4.	Área de Estudo.....	14
1.5.	Metodologia da Pesquisa	16
2.	CONTEXTO GEOLÓGICO	18
2.1.	Apresentação.....	18
2.2.	Depósito de IOCG de Olympic Dam	21
3.	PROPRIEDADES FÍSICAS DAS ROCHAS.....	24
3.1.	Propriedades Elásticas.....	24
3.2.	Susceptibilidade Magnética	25
3.3.	Densidade	25
4.	METODOLOGIA	26
4.1.	Apresentação.....	26
4.2.	Linhas Sísmicas.....	26
4.3.	Dados Magnéticos	29
4.4.	Dados Gravimétricos	34
4.5.	Algoritmo de Inversão	38
4.6.	Atributos Sísmicos	39
4.6.1.	Amplitude Instantânea	40
4.6.2.	Decomposição Espectral	42
4.6.3.	Similaridade.....	43
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
5.1.	Apresentação.....	44
5.2.	Atributos e Interpretação Sísmica.....	45
5.2.1.	Amplitude Instantânea.....	47
5.2.2.	Decomposição Espectral	49
5.2.3.	Similaridade.....	52
5.2.4.	Interpretações Sísmicas.....	54
5.3.	Inversão e Interpretação dos Dados Magnéticos.....	56
5.3.1.	Inversão do Vetor de Magnetização	57

5.3.2. Interpretação dos Dados Magnéticos	58
5.4. Inversão e Interpretação dos Dados Gravimétricos	60
5.5. Integração de Métodos	63
6. CONCLUSÃO	75
7. REFERÊNCIAS	76

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

Os recursos minerais são a base material do progresso científico e tecnológico da humanidade, e, também, de seu desenvolvimento socioeconômico. Com o avanço da tecnologia, o desequilíbrio entre a oferta e demanda desses recursos tem se tornado cada vez mais proeminente devido à escassez de minérios.

Nos últimos anos, a maioria dos depósitos minerais foi encontrada a poucas centenas de metros abaixo da superfície, onde boa parte deles estavam a aproximadamente 50 m de profundidade. Agora, uma nova fronteira precisa ser explorada, que são os depósitos localizados na faixa de 500 a 1500 m, o grande desafio da exploração de depósitos minerais profundos (Witherly, 2012).

O depósito de óxido de Ferro Cu-U-Au-Ag-REE (conhecido como “IOCG”) de Olympic Dam, localizado a 520 km a noroeste de Adelaide, na porção central da Austrália do Sul, apresenta reservas minerais estimadas em mais de 2300 Mt contendo aproximadamente 30 Mt de Cu, 930 mil t de U_3O_8 , 1200 t de Au e 6700 t de Ag. O depósito também contém aproximadamente 10 Mt de Elementos Terras Raras, com 26% de Fe (Reynolds, L., 2001).

Olympic Dam se encontra na margem oriental do cráton Gawler, soterrado por uma camada de aproximadamente 300 m de rochas sedimentares plano-paralelas de idade do Neoproterozóico ao Cambriano, gerando um grande desafio para sua exploração, que depende de dados geofísicos e furos de sondagem para uma melhor compreensão da geologia.

No entanto, abaixo de algumas centenas de metros de profundidade, o depósito de IOCG se torna um alvo de difícil prospecção, devido tanto ao baixo contraste de velocidades sísmicas entre a formação e a rocha encaixante, como a assinatura sutil produzida pelas respostas geofísicas da gravimetria e magnetometria (Okan, 2018).

Ainda assim, o método sísmico pode ser indicado para o imageamento efetivo de depósitos profundos, tendo sido previamente usado na província de IOCG de Olympic como uma forma de entender melhor o contexto geológico no qual o depósito está inserido, devido à ambiguidade em relação aos processos

tectônicos que o formaram e a incerteza associada ao uso exclusivo de dados de métodos potenciais (referências em “The 2003 Gawler Craton Seismic Survey”).

Para isto, foram adquiridas duas linhas ortogonais sísmicas de reflexão centradas no depósito e gravadas até 18 s TWT. A linha de direção N-S, de 193 km de extensão, registrou unidades do Arqueano ao Proterozóico do cráton Gawler. E a linha E-W, mais curta, com 57 km de extensão, foi usada como um controle para a geometria tridimensional das principais estruturas, e dá informação fora do plano sobre algumas estruturas imageadas pela linha N-S.

Estas serão usadas no presente estudo, assim como dados de magnetometria e gravimetria e seções e modelos geológicos, para auxiliar no melhor entendimento sobre a integração de métodos potenciais à sísmica como uma forma de identificação de depósitos profundos.

1.2. Os Desafios da Exploração Sísmica em Rocha Dura

Apesar do sucesso relativo do uso da sísmica de reflexão em contextos de rocha cristalina, o método ainda não se popularizou na exploração de depósitos minerais. Os desafios estão ligados aos ambientes alvos, que comumente são caracterizados por altas velocidades e densidades, estruturas com mergulhos acentuados e baixa razão sinal-ruído. Segundo Urosevic (2005), o alto contraste de velocidade entre os sedimentos e o embasamento cristalino gera conversão de onda e reverberações, que afetam a qualidade das imagens sísmicas na janela exploratória para mineração, situada entre 200 e 1000 m de profundidade.

Outro desafio está relacionado à espessa e complexa cobertura sedimentar, que causa atrasos no tempo de trânsito, e se o dado não for processado corretamente, pode causar grandes problemas na imagem (Okan, 2018).

A interpretação da sísmica também é bastante complexa e leva mais tempo que as interpretações de dados dos métodos potenciais, por exemplo, já que tem maior resolução e diferencia melhor as estruturas. No entanto, com o aumento da dificuldade prospectiva em relação aos depósitos profundos, espera-se que a indústria explore cada vez mais o potencial da sísmica na exploração mineral e o sucesso que a integração de métodos pode trazer ao processo.

1.3. Objetivos da Pesquisa

Para uma análise mais confiável das respostas que refletem a geologia em subsuperfície, é necessária a integração de dados geofísicos. A diversidade de propriedades físicas auxilia o intérprete a reduzir as ambiguidades em relação ao conteúdo de rochas e estruturas em profundidade.

Sendo assim, esta pesquisa tem a intenção de desenvolver uma melhor compreensão em relação ao uso do método sísmico terrestre como uma ferramenta de imageamento de depósitos minerais profundos, soterrados por extensos pacotes sedimentares, usando inversões geofísicas como métodos auxiliares de validação e adição de informação.

Através da integração de inversões de gravimetria e magnetometria com as linhas sísmicas, espera-se encontrar uma boa correlação de estruturas identificadas pela interpretação, tanto dos eventos na imagem sísmica, quanto nas anomalias previstas pelas inversões. Assim, espera-se ser possível compreender e averiguar a confiabilidade e aplicabilidade da sísmica para a prospecção mineral.

Este estudo será feito a nível regional e não se pretende enxergar em detalhes o depósito de Olympic Dam, apenas distinguir as principais feições geológicas características da região. E através das informações geológicas disponíveis, calibrar e conferir maior legitimidade sobre as interpretações e correlações da integração geofísica.

1.4. Área de Estudo

O estado da Austrália do Sul abriga diversos recursos minerais e contém aproximadamente 69% das reservas economicamente lavráveis de cobre da Austrália, com uma produção de 2.2 milhões de toneladas nos últimos dez anos (Geoscience Australia & ABERE, 2010).

Nela, se encontra o grande depósito de IOCG de Olympic Dam, área alvo da pesquisa, localizado à 520 km N-NW de Adelaide, no centro da Austrália do Sul (Fig. 1).

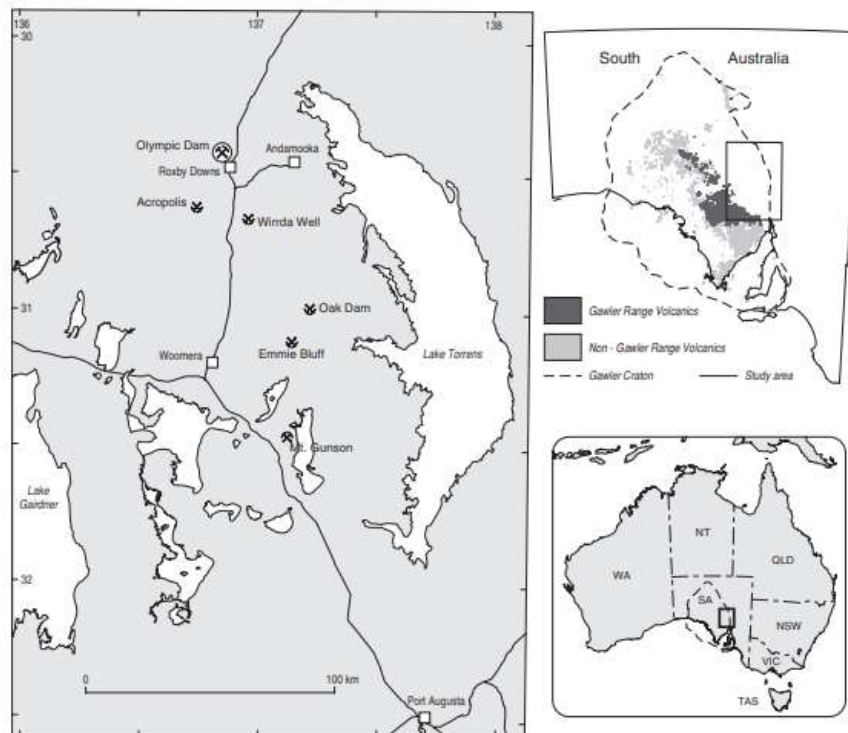


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo e depósitos da Austrália do Sul. Contorno aproximado do Cráton Gawler na imagem do canto superior direito e localização da área no mapa da Austrália no canto inferior direito (Direen, N. e Lyons, P., 2007).

Devido ao foco na região do depósito e aos dados disponíveis abrangerem uma área bastante extensa, foi delimitado um polígono retangular (figura 2), com limites coerentes com as anomalias observadas nos métodos potenciais geradas por Olympic Dam, para a manipulação dos dados ao longo da pesquisa.

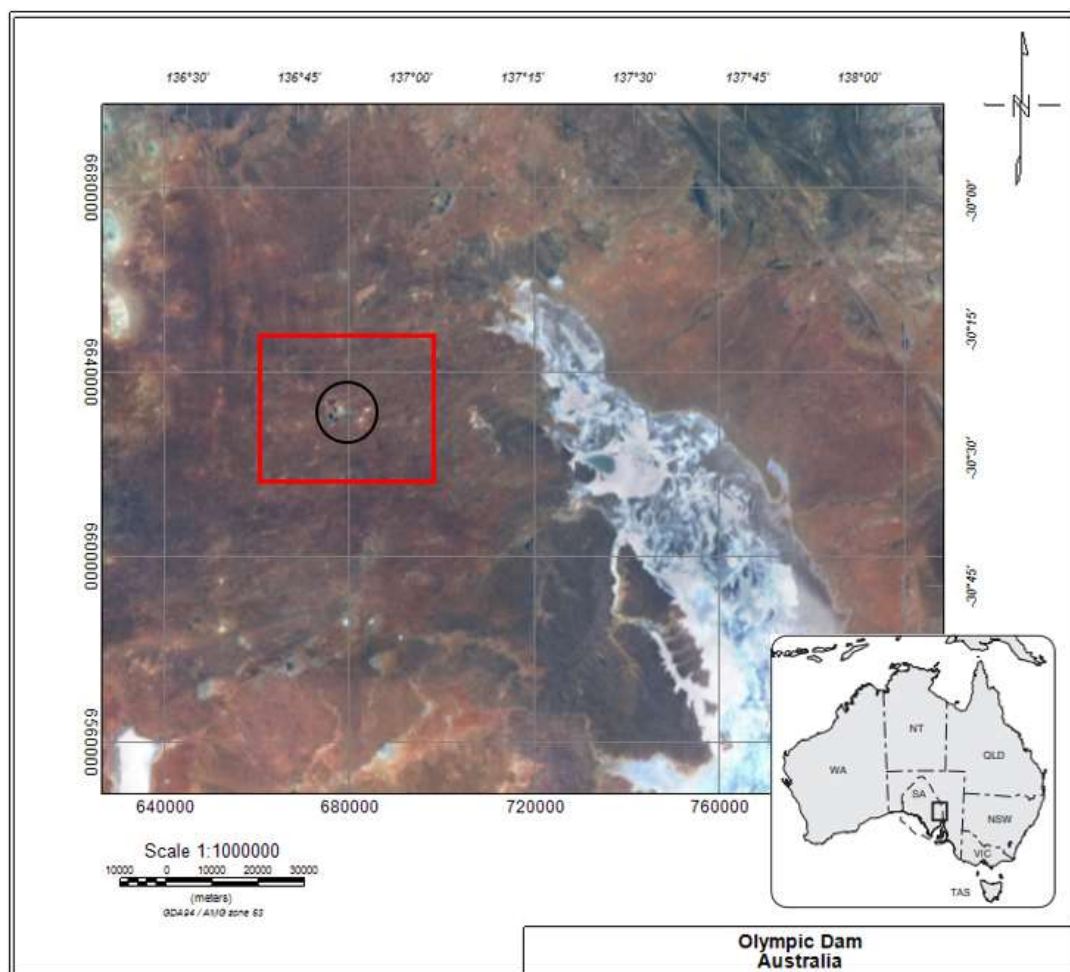


Figura 2 - Mapa com imagem de satélite sobre a região de Olympic Dam, polígono (em vermelho) utilizado para o processamento dos dados e localização da mina de Olympic Dam (em preto).
Fonte: Autor.

A mina de Olympic Dam, identificada na figura 2, é explorada desde 2005 pela empresa de mineração BHP, que opera tanto em superfície como em subsuperfície, processando desde o minério até o metal e produzindo aproximadamente 0,2 Mt de cobre por ano.

1.5. Metodologia da Pesquisa

Para alcançar os objetivos da pesquisa, foram usados dados de aerolevantamentos de gravimetria e magnetometria, duas linhas sísmicas ortogonais entre si e modelos geológicos disponibilizados pelo governo australiano numa base de dados pública intitulada SARIG.

Os dados de gravimetria e magnetometria foram invertidos e posteriormente interpretados para melhor entendimento das anomalias em profundidade. As linhas

sísmicas, inicialmente em tempo, foram convertidas para profundidade e, também, interpretadas. As interpretações foram comparadas e avaliadas através dos modelos geológicos e da integração de métodos, confrontando as respostas geofísicas com as informações geológicas e checando a coerência dos dados em áreas comuns.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1. Apresentação

O Cráton Gawler na Austrália do Sul (Fig. 3) hospeda o grande depósito de óxido de ferro Cu-Au-U-REE de Olympic Dam, que contém aproximadamente 40% das reservas mundiais conhecidas de urânio, assim como reservas de classe mundial de Cu e Au. Sua prospectividade foi também realçada pela descoberta do depósito de óxido de Fe Cu-Au (IOCG) de Prominent Hill (Heithersay, 2002 apud Hand *et al.*, 2007), do prospecto de IOCG de Carrapateena (Fairclough, 2005 apud Hand *et al.*, 2007) e dos diversos prospectos de Au mesoproterozóicos na província de ouro do Gawler central (Ferris e Schwarz, 2003 apud Hand *et al.*, 2007).

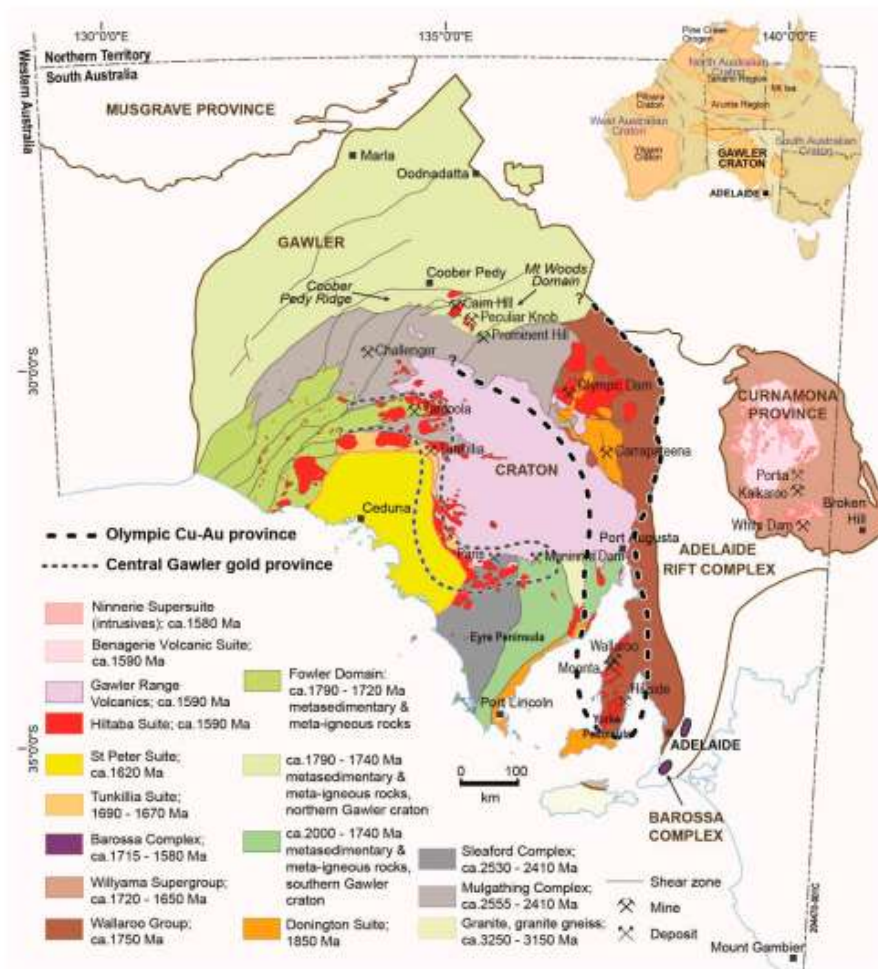


Figura 3 - Contexto geológico do cráton Gawler na Austrália do Sul. Destaque para a Província de Cu-Au de Olympic e para a Província de Au do Gawler Central (Reid, A., 2019).

O entendimento da geologia do cráton, no entanto, é marcado por ambiguidades que abrangem 1.300 milhões de anos, desde o neoarqueano até o meio do mesoproterozóico (Daly *et al.*, 1998; Ferris *et al.*, 2002; Skirrow *et al.*, 2002 apud Hand *et al.*, 2007). Estas ambiguidades estão principalmente ligadas à distribuição espacial e temporal de eventos tectônicos, sistemas magmáticos e evolução crosta-manto do cráton.

Seu desenvolvimento pode ser separado em duas fases principais, a primeira num intervalo mais curto durante o neoarqueano (2550-2500 m.a.) e a segunda entre o paleoproterozóico tardio e o início do mesoproterozóico (1900-1450 m.a.). Entre estes dois períodos de atividade, entende-se que houve um sistema cratônico estável (2400-2000 m.a. aproximadamente), no qual não foi registrada atividade tectônica significativa.

As rochas Neoarqueanas do cráton Gawler foram divididas pelo Complexo Sleaford ao sul do cráton e o Complexo Mulgathing no centro-oeste, e são predominantemente sequências metassedimentares incluindo metassedimentos aluminosos intercalados com formações ferríferas bandadas, carbonatos, rochas silicáticas e vulcanismo bimodal.

Rochas vulcanossedimentares foram intrudidas por uma série magmática de composição félsica a intermediária. Swain *et al.* (2005a) atribui anomalias de esgotamento de Nb e Ti e assinaturas de isótopos de Sm-Nd em granodioritos do Neoarqueano à derivação de fontes mantélicas contaminadas em um ambiente de arco magmático. Estas unidades de rochas foram posteriormente deformadas e metamorfizadas na orogenia Sleafordiana do início do Paleoproterozóico (Daly *et al.*, 1998 apud Hand *et al.*, 2007).

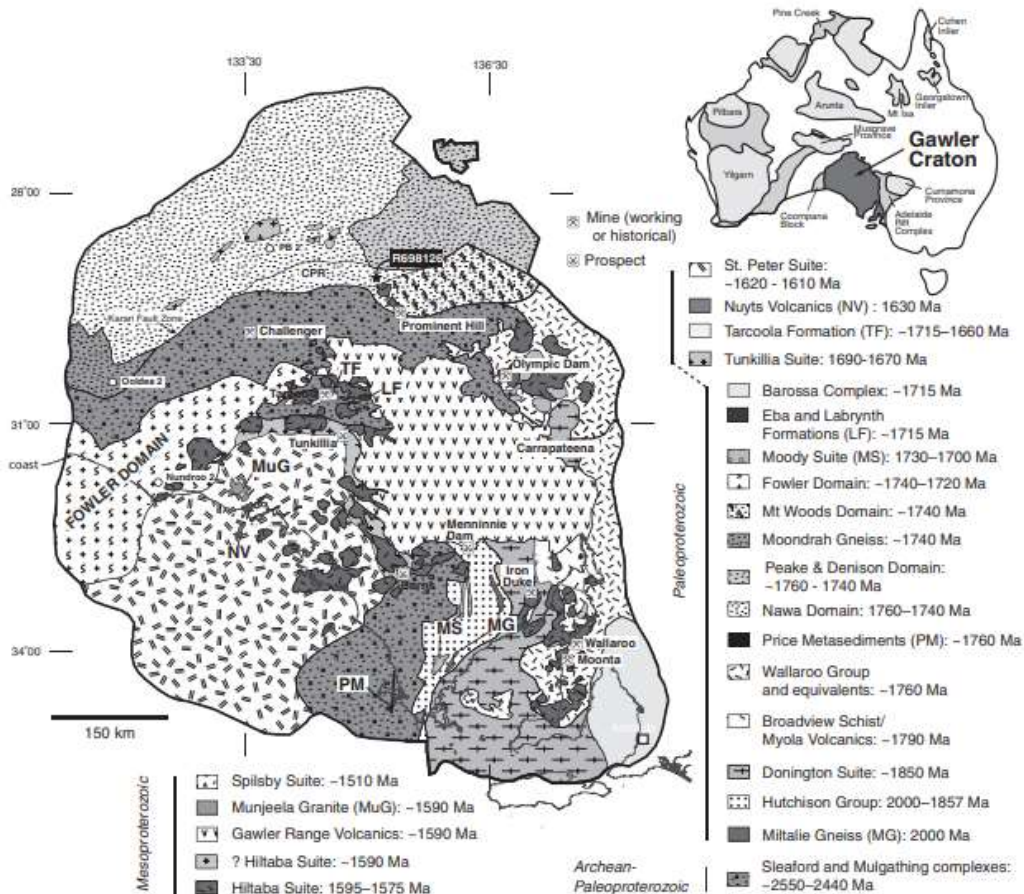


Figura 4 - Geologia interpretada do embasamento cristalino do cráton Gawler, na Austrália do Sul, mostrando a localização dos principais depósitos e prospectos minerais (Hand, et al., 2007).

A maior parte do cráton Gawler é composta por rochas paleo a mesoproterozóicas (2000-1580 m.a.) que cercam o núcleo Neoarqueano (figura 4). Esta fase proterozóica pode ser dividida em dois intervalos, de 2000-1690 m.a. onde houve o desenvolvimento de rifte, terminado pela orogenia Kimban entre 1730-1690 m.a., e de 1690-1500 m.a., quando houve o último período de formação de rochas na evolução do cráton. A orogenia Kimban é usada para separar estes dois intervalos, já que antes desta a sedimentação dominou o registro geológico, e posteriormente, houve predomínio de magmatismo.

Durante o primeiro intervalo, uma série de bacias rifte se desenvolveram dentro e nas margens do cráton, assim como a intrusão de um batólito granítico no Gawler oriental por volta de 1850 m.a. Rochas sedimentares e vulcânicas deste intervalo formam uma porção significativa do cráton.

Já no segundo intervalo, houve o predomínio de eventos ígneos, formando pacotes sedimentares somente nas regiões central e norte do cráton. Após a

orogenia Kimban, são registradas suítes de rochas plutônicas e vulcânicas, sendo a mais antiga a suíte de intrusivas Tunkillia. Outros eventos magmáticos deste período, de relevância para o presente estudo, são o *Gawler Range Volcanics* e a suíte Hiltaba (1595-1575 m.a.), associados a episódios tectônicos-tectonotermiais e metalogenéticos que afetaram boa parte do cráton Gawler.

Na porção oriental, a suíte Hiltaba é associada temporária e espacialmente às significantes alterações de Fe e Na-Ca de escala regional, e, também, às mineralizações de Cu-Au-U-REE (Skirrow *et al.*, 2002), presentes na província de IOCG de Olympic Dam.

2.2. Depósito de IOCG de Olympic Dam

O grande depósito de Cu-Au-U de Olympic Dam ocorre sob aproximadamente 300 m de rochas sedimentares do Neoproterozóico ao Cambriano, próximo à margem nordeste do cráton. O embasamento é dominado pelas associações de rochas cratônicas (sedimentares e vulcânicas) mais jovens, representadas pela *Gawler Range Volcanics* (1590 m.a.), os granitóides da Suíte Hiltaba e as sequências siliciclásticas terrestres da Fm. Pandurra, ligeiramente mais jovens. É uma associação distinta, no contexto australiano, na qual os depósitos de IOCG são similares em idade à rocha encaixante e se encontram em níveis crustais mais rasos (Williams e Pollard, 2003 apud Williams *et al.*, 2005). Os depósitos de IOCG também ocorrem em outras partes do cráton onde os granitóides da suíte Hiltaba intrudiram, deformaram e metamorfizaram as sequências paleoproterozóicas (Skirrow *et al.*, 2002).

Olympic Dam ocorre em uma zona de aproximadamente 35 km² de rocha alterada e brechada desenvolvida inteiramente dentro do granito Roxby Downs da suíte Hiltaba, que foi datado de 1588 ± 4 m.a. (Johnson e Cross, 1995). As brechas contêm grandes blocos de rochas sedimentares e foram interpretadas como formadas a poucas centenas de metros abaixo da superfície (Oreskes e Einaudi, 1990; Reeve *et al.*, 1990). São intrudidas por diques ultramáficos, máficos e félsicos, que são temporalmente relacionados à atividade hidrotermal. A associação vem sendo interpretada como um contexto de diatrema vulcânica, uma espécie de chaminé vulcânica preenchida por brechas, originada de vulcanismo explosivo (Haynes *et al.*, 1995). Os diques são datados de 1592 m.a. (Johnson e Cross,

1995), indicando que os depósitos se formaram logo depois da intrusão do granito Roxby Downs (Williams *et al.*, 2005).

O sistema possui em seu núcleo um corpo de forma tubular de brecha hematita-quartzo estéril, envolto progressivamente por uma zona complexa de brechas heterogêneas e por uma zona externa de brecha rica em granito e granito hematizado (figura 5; Reeve *et al.*, 1990; Reynolds *et al.*, 2000). Os clastos incluem granito alterado, rochas dominadas por diferentes tipos de textura de hematita, e uma variedade de litologias subordinadas, incluindo rochas vulcânicas porfíricas, rochas sedimentares, vários tipos de diques e fragmentos de veios mineralizados. As brechas ricas em hematita que hospedam grande parte do minério são geralmente matriz suportadas, com tamanhos de clastos menores que 20 cm, mas variando até dezenas de metros (Reeve *et al.*, 1990; Reynolds *et al.*, 2000).

O minério ocorre em zonas ricas em hematita próximas ao centro do complexo. O urânio é associado ao cobre e ocorre principalmente como uraninita de granulometria fina ou amorfa (Reeve *et al.*, 1990). A mineralização foi síncrona aos eventos de brechação e produziu um zoneamento hipogênico de hematita estéril no topo e, no núcleo do depósito, cobre nativo, calcocita, bornita e calcopirita (Reeve *et al.*, 1990; Haynes *et al.*, 1995; Reynolds *et al.*, 2000). Quantidades de interesse econômico ocorrem próximas à interface bornita-calcopirita (figura 5).

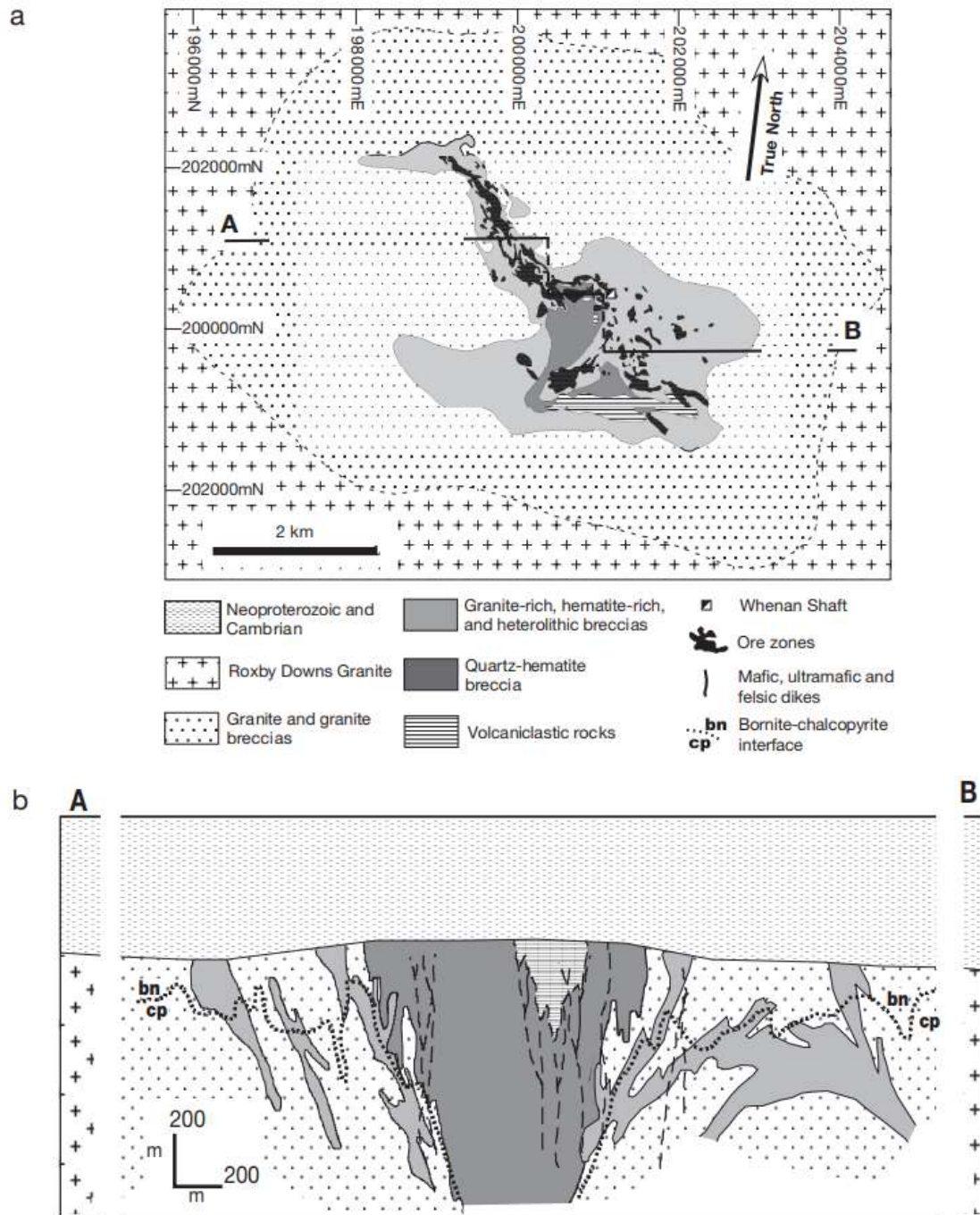


Figura 5 - a) Geologia e distribuição do depósito aproximadamente 300 m abaixo da superfície em Olympic Dam (adaptado e simplificado de Reynolds, 2000). b) Seção transversal de Olympic Dam mostrando as relações geológicas e a localização da interface bornita-calcopirita (adaptado e simplificado de Reeve et al., 1990).

3. PROPRIEDADES FÍSICAS DAS ROCHAS

3.1. Propriedades Elásticas

A alteração na rocha é definida pelas mudanças na mineralogia devido às variações de temperatura e pressão. Mudanças significativas na mineralogia ocorrem por contato com fluidos de alta temperatura provenientes de intrusões próximas (Smith, 2010). Tal contato causa a alteração dos minerais, mudando as características físicas da rocha.

A sísmica de reflexão, como uma ferramenta de exploração, evidencia essas mudanças físicas da rocha através das variações na impedância acústica (produto da velocidade e densidade). Além disso, os depósitos de IOCG são definidos por minerais distintos e dominados por hematita e magnetita, que tendem a ter impedâncias maiores que as demais rochas encaixantes, portanto, tornam o depósito passível de detecção pela sísmica.

Variações nestas propriedades elásticas são fundamentais para o entendimento da resposta sísmica do depósito. Velocidade e densidade são propriedades controladas pelo conteúdo mineralógico, fraturas, pressão e saturação de fluidos. Estudos anteriores mostram que a velocidade P e a densidade são, respectivamente:

- 8.0 km/s, 5.0 g/cm³ para a pirita (consideradas altas);
- velocidades mais lentas e alta densidade (4.7 km/s, 4.6 g/cm³) para a pirrotita;
- valores intermediários de ambas (~5.5km/s, 4.1 g/cm³) para a calcopirita.

(Salisbury, *et al.*, 1996, 2000; Malehmir, 2012).

No entanto, estes valores estão relacionados às mineralizações de sulfetos maciços, enquanto nos depósitos de IOCG estes ocorrem de forma disseminada nas brechas ou em forma de enxame de veios. Mas em geral, as rochas contendo sulfetos têm maior densidade, e, por consequência, maior impedância, que gera contraste na imagem sísmica em relação à rocha encaixante (Okan, 2018).

3.2. Susceptibilidade Magnética

A susceptibilidade magnética mede a habilidade de uma substância de se magnetizar, quando exposta a um campo magnético. É uma propriedade usada para identificar a presença de minerais ferromagnéticos nas rochas, como magnetita e pirrotita.

Como os depósitos de IOCG são dominados por magnetita, estes se tornam bons alvos para o método geofísico magnético. De acordo com Schön (1996), a susceptibilidade decresce com a diminuição do tamanho do grão de magnetita. Como a composição da rocha varia dentro do depósito, e sabendo-se que a zona mineralizada normalmente está associada às regiões com menores conteúdos de magnetita, as variações na susceptibilidade podem desempenhar um papel importante na caracterização do depósito.

Segundo Okan (2018), que estudou as medidas de laboratório das amostras dos furos de sondagem na região de Olympic Dam, a susceptibilidade magnética na área varia de 0.000087 a 0.721 SI. Onde os valores baixos representam zonas bastante alteradas e com fraturas, e os valores mais altos, zonas não-alteradas e não fraturadas.

3.3. Densidade

Em um estudo conduzido na mina de Hillside, algumas medidas de densidade foram coletadas de amostras de furos de sondagem, mostrando valores característicos de rochas do depósito de IOCG. Em gabros os valores ficam numa média de 2,91 g/cm³, em granitos, 2,72 g/cm³, em metassedimentos, 2,78 g/cm³, e na rocha mineralizada, 3,02 g/cm³ (Okan, 2018).

As baixas e altas densidades estão relacionadas às zonas de alteração e mineralização, respectivamente. As análises petrofísicas confirmam que a maior parte da mineralização está compreendida em brechas graníticas ou gabros no depósito de Cu-Au de Olympic Dam.

4. METODOLOGIA

4.1. Apresentação

Esta pesquisa trabalha com três frentes principais de dados: as linhas sísmicas, os dados magnéticos e os gravimétricos. Os dados geológicos são usados para validação das interpretações geofísicas. Os dados dos métodos potenciais e os geológicos utilizados foram obtidos e estão disponíveis para download livre através da SARIG (*South Australia Resources Information Gateway*), uma grande base de dados pública que contém informações geofísicas, geológicas, geoquímicas e exploratórias sobre os principais depósitos minerais da Austrália do Sul.

Já as linhas sísmicas, foram solicitadas diretamente ao departamento responsável do governo sul australiano, que enviou os dados brutos, as migrações finais, modelos de velocidade e todas as informações necessárias ao estudo.

Olympic Dam foi escolhida como área alvo da pesquisa não somente pelo conteúdo de dados disponíveis para o trabalho, mas também por ser uma região estudada em detalhes, o que oferece uma grande base de informações que corroboram para os objetivos finais e resultados do presente trabalho.

A seguir, serão detalhadas as informações sobre aquisição, processamento e filtragem dos dados, e, também, as técnicas utilizadas para inversão dos dados magnético e gravimétrico através do software Oasis montaj e uso de atributos sísmicos no software OpendTect.

4.2. Linhas Sísmicas

As duas linhas sísmicas utilizadas neste trabalho, 03GA-OD1 e 03GA-OD2, fazem parte de um programa de aquisição sísmica na Austrália do Sul, que foi desenvolvido com a intenção de gerar melhor entendimento sobre o contexto tectônico no cráton Gawler e arredores.

A aquisição foi feita em 2003 pelo ANSIR (*Australian National Seismic Imaging Resource*), que usou um arranjo *split-spread*, com a fonte no centro da geometria. Grupos de receptores foram centrados entre as estações e as fontes foram centradas nas estações. As fontes eram vibrosseisIVI Hemi-60. Os

parâmetros de aquisição estão na tabela 1 abaixo. O fluxo de processamento foi programado para realçar as reflexões, e evitar processos que pudessem degradar o dado, principalmente na parte rasa.

Tabela 1 - Parâmetros de aquisição das linhas 03GA-OD1 e 03GA-OD2.

LINE	03GA-OD1	03GA-OD2
AREA	Roxby Downs – Olympic Dam (SA)	Roxby Downs – Olympic Dam (SA)
DIRECTION	N to S	W to E
LENGTH	193.36 km	57.44 km
STATIONS	1000 – 5834	1000 – 2436
CDP RANGE	2000 – 11546	2001 – 4658
GROUP INTERVAL	40 m	40 m
GROUP PATTERN	12 in-line @ 3.33 m	12 in-line @ 3.33 m
# VIBRATION POINTS	2446	718
VP INTERVAL	80 m	80 m
SOURCE TYPE	3 x IVI Hemi-60	3 x IVI Hemi-60
SWEEP TYPE	3 x 12 s: 7-56, 12-80, & 8-72 Hz	3 x 12 s: 7-56, 12-80, & 8-72 Hz
SOURCE PAD-PAD	15 m	15 m
SOURCE MOVE-UP	15 m	15 m
# CHANNELS	240 (<240 on roll off)	240 (351 on roll off)
FOLD (NOMINAL)	60	60
RECORD LENGTH	18 s @ 2 ms	18 s @ 2 ms

Para ambas as linhas foi usado o processamento em *crooked-lines*, onde os *midpoints* não necessariamente são equivalentes à linha definida pelas estações. A linha de CDPs é definida como uma representação mais suave que segue a maior densidade de *midpoints*, mas se mantendo o mais próximo da linha original. Após a escolha da melhor linha, o dado foi ordenado em CDPs.

Algumas edições foram feitas no dado, como a remoção de traços afetados por problemas da aquisição e dos traços de *offset* mais curto, devido à contaminação por ruído gerado pela proximidade da fonte. Um primeiro *de-noise* também foi aplicado para remover ruídos gerados pelo trânsito de veículos, dado que a aquisição foi feita ao longo de uma rodovia.

Fora as edições e correção de amplitude, não foi feito pré-processamento no dado. Foi aplicada uma correção de estática das refrações utilizando o método de Taner, *et al.* (1998), resultando na melhor definição dos refletores nas partes rasas.

Um balanceamento espectral foi feito a fim de minimizar a contaminação do dado pelos ruídos de baixa frequência relacionados à fonte, como o *ground roll* e as ondas diretas. Este passo do processamento é muito importante, principalmente

para a parte rasa, onde a sobreposição de traços é menor e os ruídos da fonte interferem com as reflexões. Para o balanceamento foi aplicado um operador de deconvolução fase-zero ao longo de toda a banda do sinal.

O passo citado acima é primordial para a análise de velocidade de empilhamento, que depende de um empilhamento de melhor qualidade. Sendo assim, o próximo passo foi a correção de *Normal Moveout* (NMO), dependente da velocidade de empilhamento e do tempo de trânsito duplo.

Quando a velocidade correta é aplicada para a correção, o evento soma construtivamente ao empilhar os traços de um CMP *gather*. Refletores com mergulhos, no entanto, causam complicações, já que não vão se empilhar com a mesma velocidade que os refletores horizontais. Para isto, foi feita a correção de *Dip Moveout* (DMO).

Após estas correções, foram feitos um *mute*, zerando as partes dos traços distorcidas pelo processo da correção de NMO, e *Automatic Residual Statics*, que calcula os deslocamentos de tempo adicionais necessários para maximizar a correlação no CDP *gather* numa determinada janela de tempo.

Para a migração em tempo foi usado um algoritmo $f - x$, usando a aproximação de diferenças finitas para equação da onda, que permitiu o uso de uma função de velocidade variável espacialmente e lidou melhor com os refletores de mergulho acentuado. Um modelo de velocidade de referência para a migração foi construído usando as velocidades de empilhamento com a correção de DMO como modelo inicial, e foi aplicado para testes de migração com o uso de diferentes porcentagens dele. Ao final, as velocidades usadas para a migração foram de 90% do modelo de referência.

Um realce de sinal foi aplicado no dado final migrado, realçando eventos coerentes ao longo dos traços e destacando as reflexões em relação ao ruído de fundo. Um resumo do fluxo de processamento se encontra na figura 6.

1. Definição da geometria da linha e da *crooked-line* (CDP com intervalo fixo);
2. Conversão dos dados *segy*; reamostragem para 8 s com frequência de 4 ms;
3. Visualizações de controle de qualidade e edição de traços;
4. Equalização de espectro (1000 ms gate AGC);
5. Conversão para CMP;
6. Recuperação de ganho (uso da divergência esférica);
7. Aplicação de estática de refração, datum 0 m (AHD);
8. Aplicação de estática residual automática;
9. Filtro passabanda;
10. Análise da velocidade de empilhamento usando *velex*, primeira passagem depois da estática de refração, segunda depois da estática residual e terceira depois da correção de DMO;
11. Correção de NMO;
12. *Stretch mute* usado como *mute do front end*;
13. Correção de DMO;
14. Empilhamento em CMP;
15. Balanço das amplitudes dos traços;
16. Migração F-X com velocidades de migração;
17. Ganho de sinal (*digistack 0.8*);
18. Run mix, dimensionamento da amplitude do traço e reamostragem para 6 s.

Figura 6 - Fluxo de processamento das linhas sísmicas.

A combinação destes passos do processamento gerou duas imagens que são capazes de mapear a crosta, da base do regolito até a descontinuidade de Mohorovicic, facilitando a interpretação das principais estruturas geológicas regionais na região do depósito de Olympic Dam.

4.3. Dados Magnéticos

A aquisição dos dados magnéticos foi feita pela *Sander Geophysics Limited* (SGL), que conduziu um levantamento aéreo de dados de alto detalhamento na região de Andamooka, na Austrália do Sul, para a *Geoscience Australia* em 2017.

Foi usado um sistema de aquisição que grava os dados, a localização e dados auxiliares, apresentando-os numa tela em tempo real para controle de qualidade. Os dados magnéticos foram adquiridos por um magnetômetro com sensor de césio e precisão de 0,005 nT.

Partindo da pista de pouso, a aeronave cobriu 80.820 km na área de levantamento como visto na figura 7, adquirindo as linhas de produção de leste a

oeste, com espaçamento de 200 m e altitude de 60 m. As linhas de controle foram adquiridas de norte a sul, com espaçamento de 2.000 m.

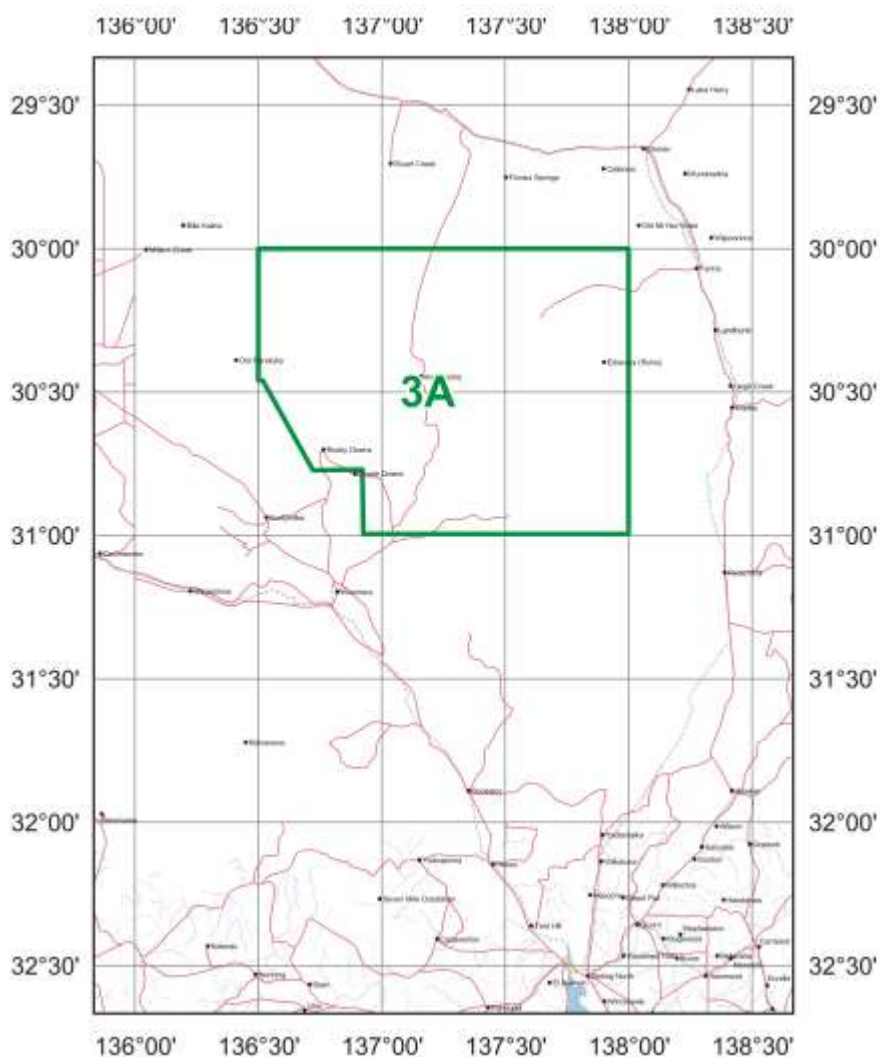


Figura 7 - Localização da área de aquisição na região de Andamooka, Austrália do Sul, extraída do relatório de dados da SGL.

Para o processamento dos dados (figura 8), feito pela própria SGL após a aquisição, o primeiro passo foi fazer uma reamostragem, onde os dados adquiridos em 160 Hz, foram reduzidos para uma frequência de 10 Hz. Estes dados foram plotados para um controle de qualidade em relação a ruídos e *spikes* e, posteriormente, foi feita a correção de paralaxe. Foi aplicada também a correção de variação magnética diurna. A correção do *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), utilizou o modelo de 2015 e foi feita usando a localização, altitude e data de cada ponto. O valor médio residual da estação de referência foi calculado e subtraído para remover quaisquer *bias* do campo magnético anômalo local.

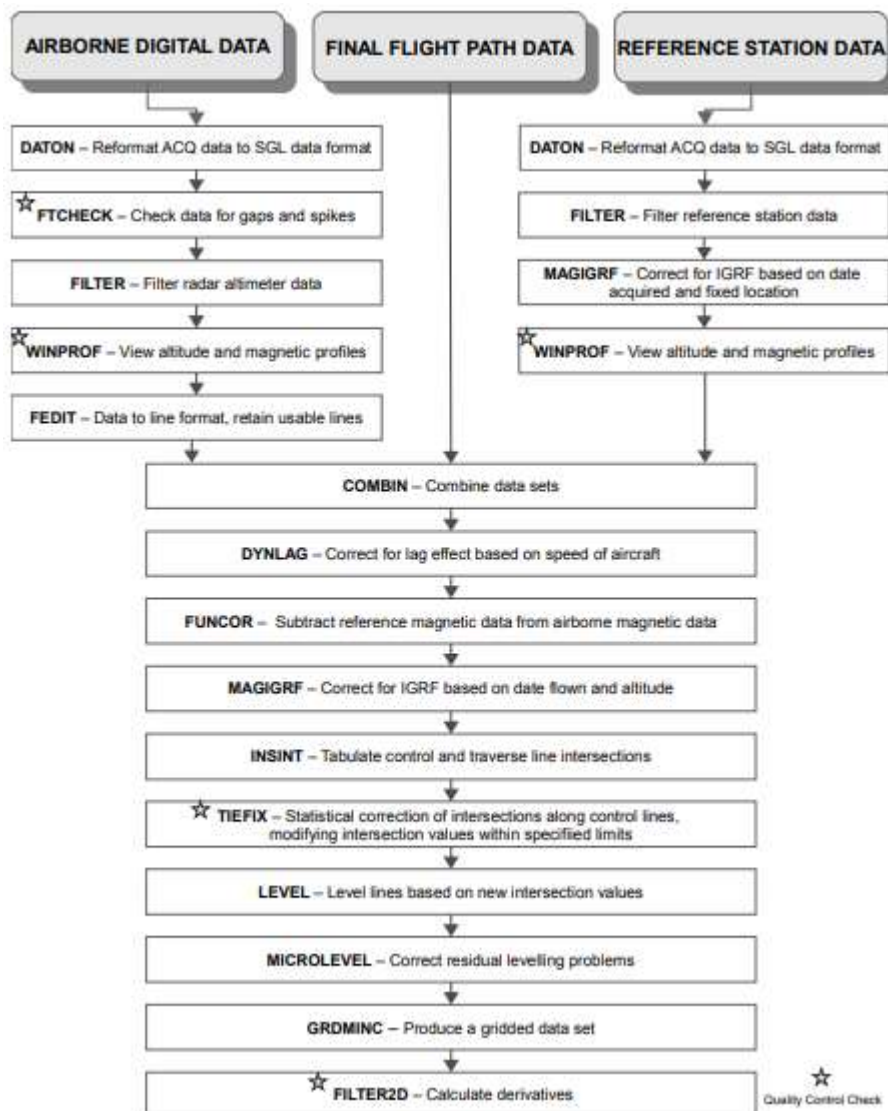


Figura 8 - Fluxo de processamento dos dados magnéticos extraído do relatório de dados da SGL.

No último passo do processamento foi aplicado um controle de linha e um micro nivelamento para remover qualquer problema de nivelamento no dado, com cuidados para não serem removidos sinais de origem geológica.

Nesta base de dados de magnetometria, disponível para download, vieram produtos como a Intensidade Magnética Total (TMI), e algumas filtragens, como Redução ao Polo (RTP) e Primeira Derivada Vertical (1VD), em formato ERS. Assim como dados auxiliares, Modelo Digital de Elevação de Terreno (MDT) e complementares, canais de Th, U e K, de radiometria, que não foram utilizados no estudo.

Este formato ERS foi lido como *grid* no software Oasis montaj, e posteriormente foi transformado para banco de dados para que fosse possível um segundo controle de qualidade e manipulação dos dados para a inversão.

Da manipulação destes dados, foi feita uma transformação do sistema de coordenadas, que originalmente estava em coordenadas geográficas, mas que devido ao algoritmo de inversão precisava ser passada para projetadas. Portanto, o dado foi projetado para o sistema *Australian Map Grid (AMG)*, zona 53, que inclui a localização de Olympic Dam, e utilizado o datum GDA 94.

Também foi feito um corte no dado, que abrange uma área muito extensa (figura 9). Foi então escolhido um polígono em torno da principal anomalia de Olympic Dam (figura 10), para que fosse obtido um resultado melhor na inversão, sendo possível escolher células menores, para um modelo de maior resolução.

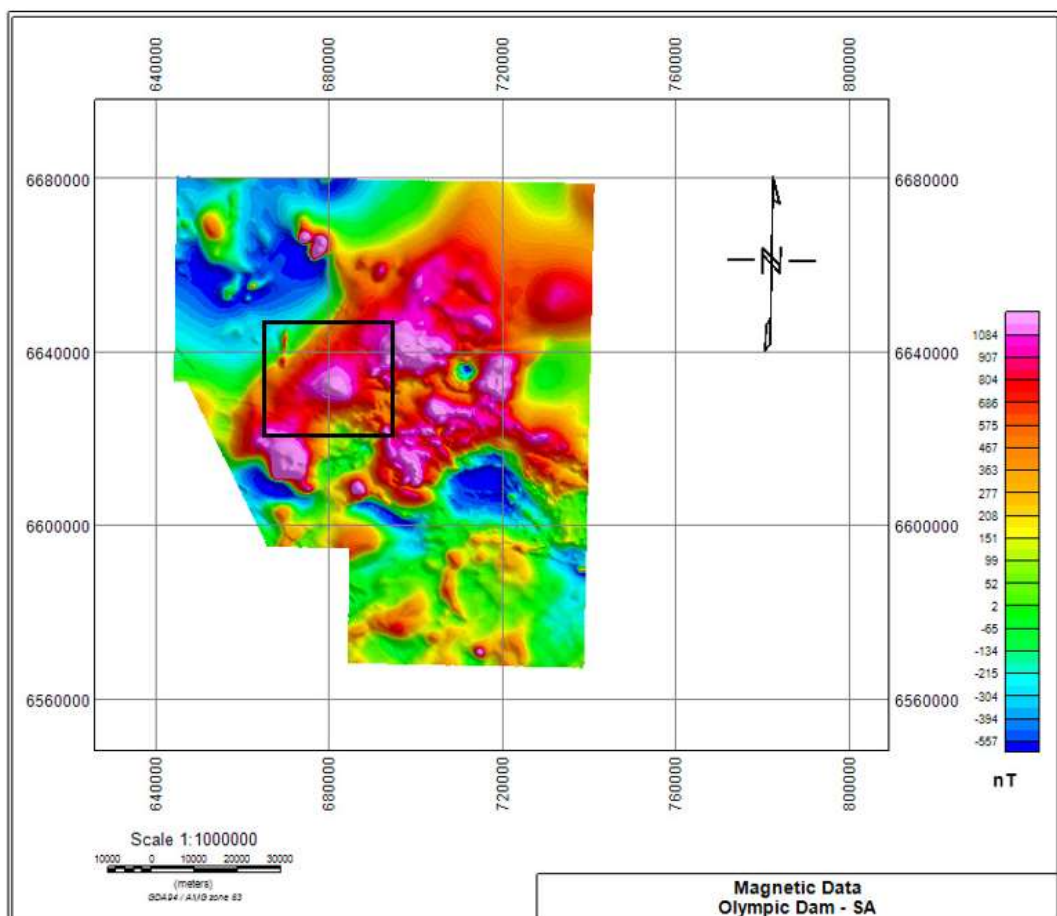


Figura 9 - Mapa da Intensidade Magnética Total (TMI) com polígono em torno da anomalia de Olympic Dam, produto da base de dados de magnetometria. Fonte: Autor.

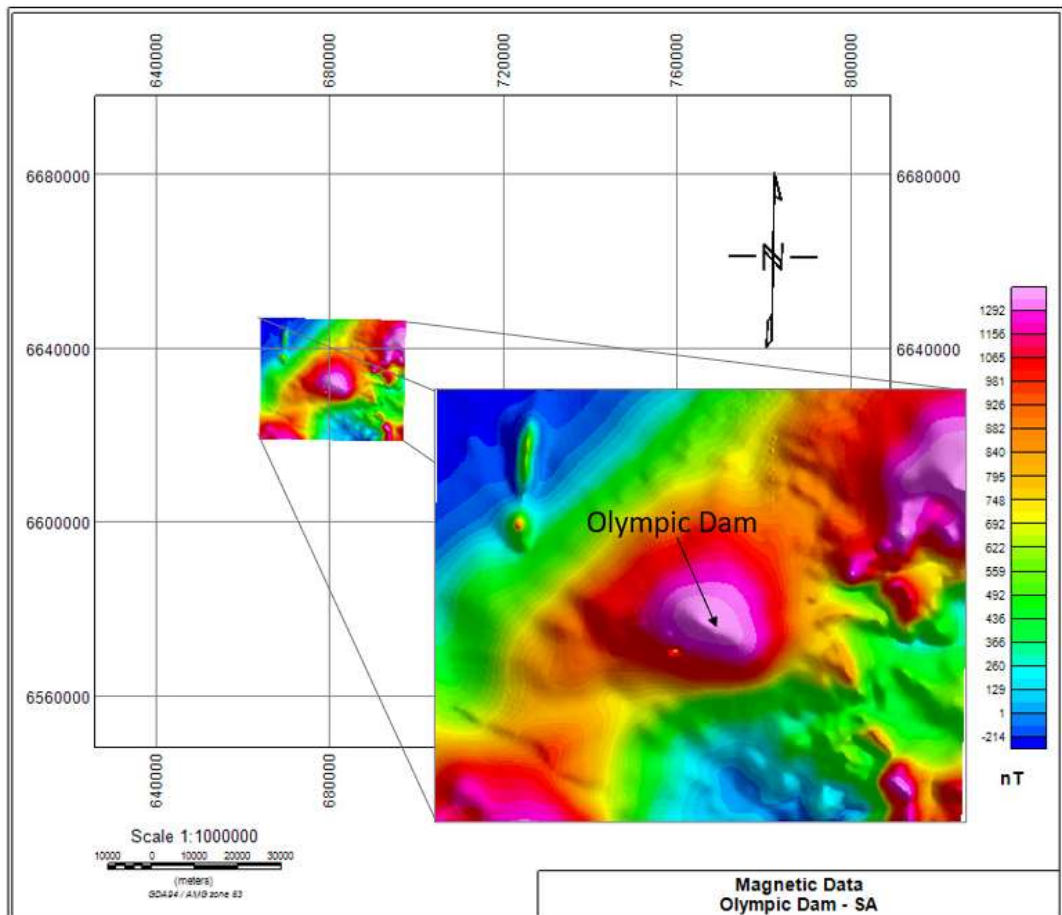


Figura 10 - Mapa do TMI com o corte em torno da anomalia magnética e zoom na região de Olympic Dam. Fonte: Autor.

Considerando que o TMI é um produto com características mais regionais e na intenção de ressaltar fontes mais rasas, sabendo-se que o depósito está entre profundidades de 300 m e 2000 m, foi usado o dado da primeira derivada vertical como entrada da inversão para gerar um modelo de maior detalhamento, dentro da possibilidade dos dados em uso.

A primeira derivada vertical é utilizada para ressaltar corpos na direção vertical. Este filtro é aplicado através do domínio da frequência no qual as derivadas das anomalias são calculadas em relação à direção vertical (Z). A partir disto, é possível definir os limites das anomalias magnéticas e destacar as altas frequências, evidenciando as fontes mais rasas em detrimento das fontes mais profundas.

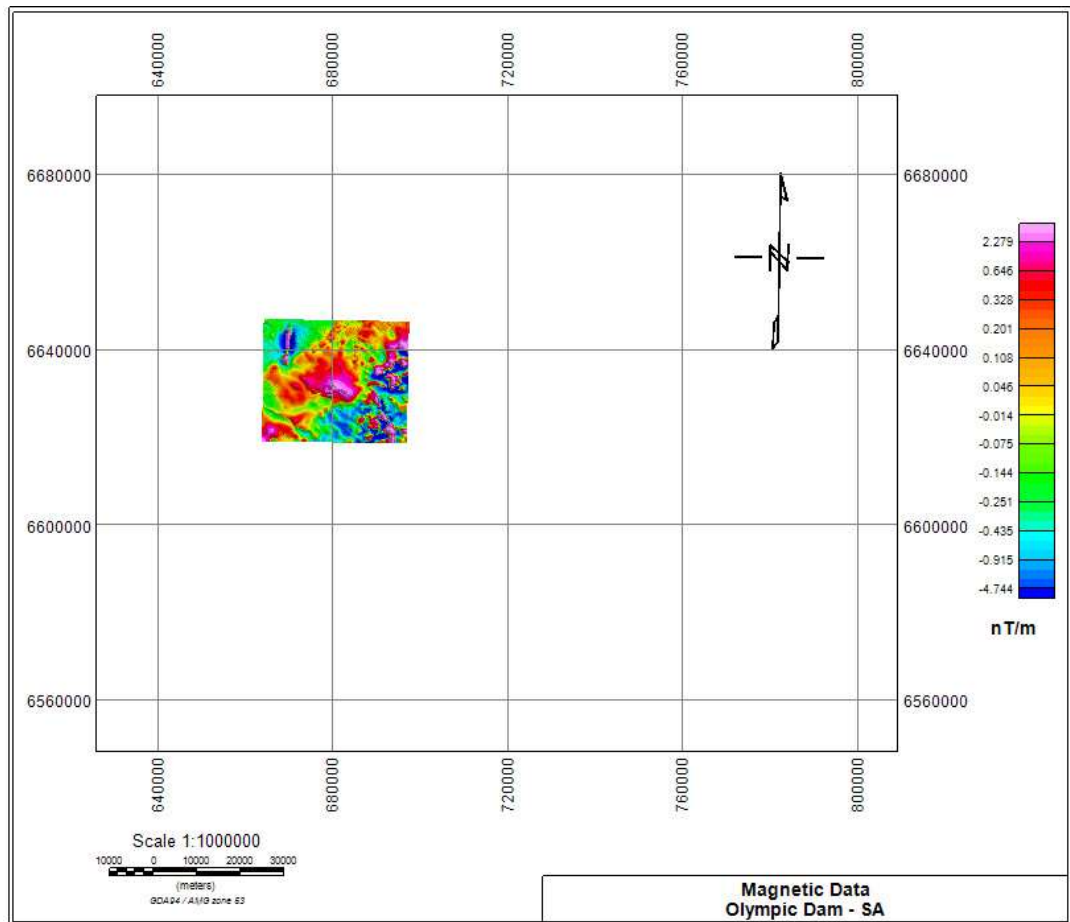


Figura 11 - Mapa da Primeira Derivada Vertical com o corte em torno da anomalia magnética na região de Olympic Dam. Fonte: Autor.

Os resultados gerados a partir destes dados serão discutidos na seção de Resultados e Discussões, onde serão mostrados o modelo extraído da inversão e as interpretações magnéticas na região de Olympic Dam e das linhas sísmicas.

4.4. Dados Gravimétricos

A base de dados de aero gradiometria gravimétrica (AGG) utilizada para o estudo consta da junção de dados (figura 12) adquiridos em 2014 pela CGG ao longo da região de Woomera, na Austrália do Sul, que inclui a mina de Olympic Dam, sob contrato da *BHPB Olympic Dam Corporation*. E de dados adquiridos pela Fugro, em 2006, na região da *Stuart Shelf*, também sobrevoando a região de Olympic Dam e sob contrato da *BHP*.

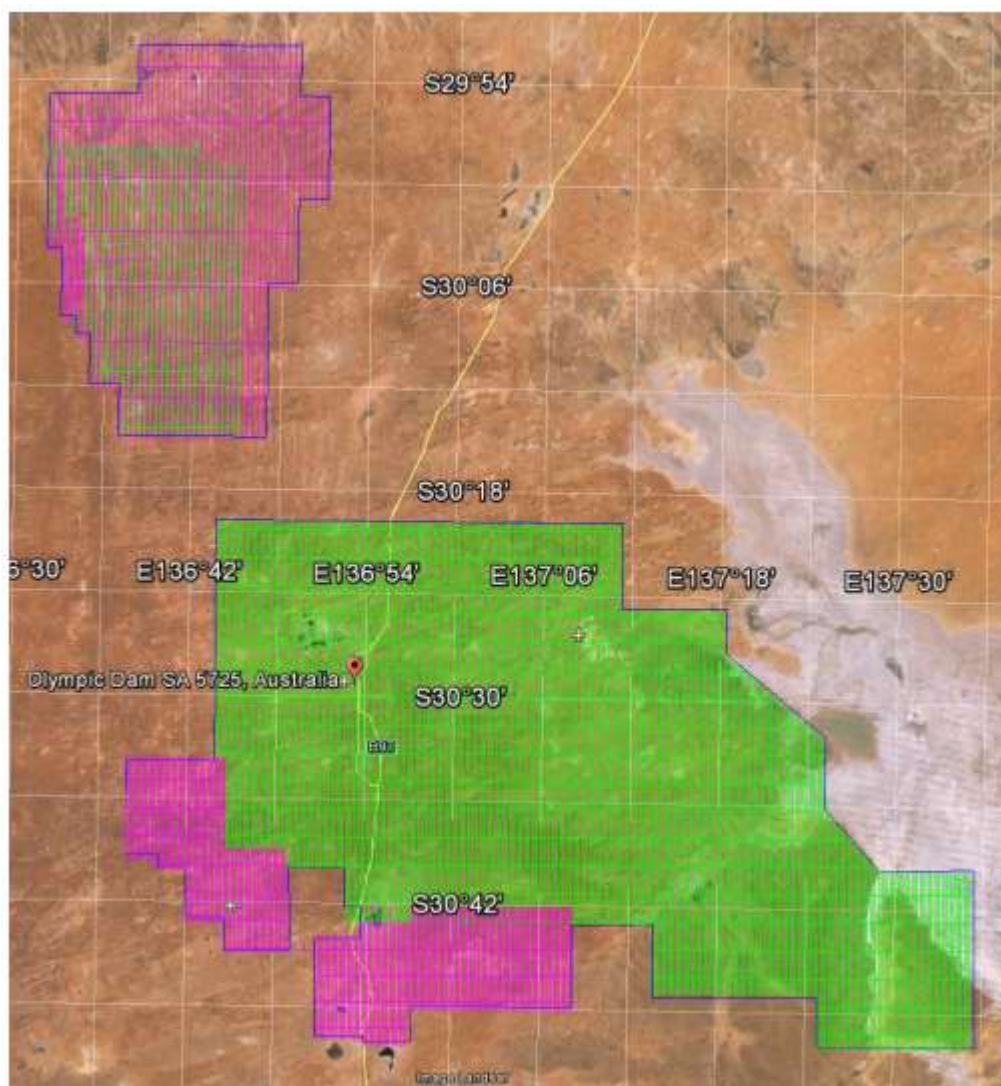


Figura 12 - Mapa da junção dos aerolevantamentos de gradiometria gravimétrica na região de Olympic Dam extraído do relatório de dados da CGG.

A área que contém os dados utilizados está exposta pelas linhas verdes na figura 12 e compõe o aerolevantamento da Fugro, que cobriu uma área total de 10.968 km, adquirindo as linhas de produção de norte a sul, com espaçamento de 300 m e as linhas de controle de leste a oeste, com espaçamento de 3000 m, mantendo uma altura de voo de 80 m.

O processamento (figura 13) foi feito pela CGG com os bancos de dados já unificados, reunindo os dados adquiridos por ela, já corrigidos em relação aos problemas ligados ao levantamento e possíveis *spikes*, e os da Fugro com o mesmo fluxo de processamento. Com um banco único, foi aplicada a correção de terreno, derivada do modelo digital de elevação de terreno (MDT), e usando 2,67 g/cm³

como densidade de correção por ser mais próxima da densidade do terreno na área. Correções nas linhas de controle e micro nivelamento também foram feitas.

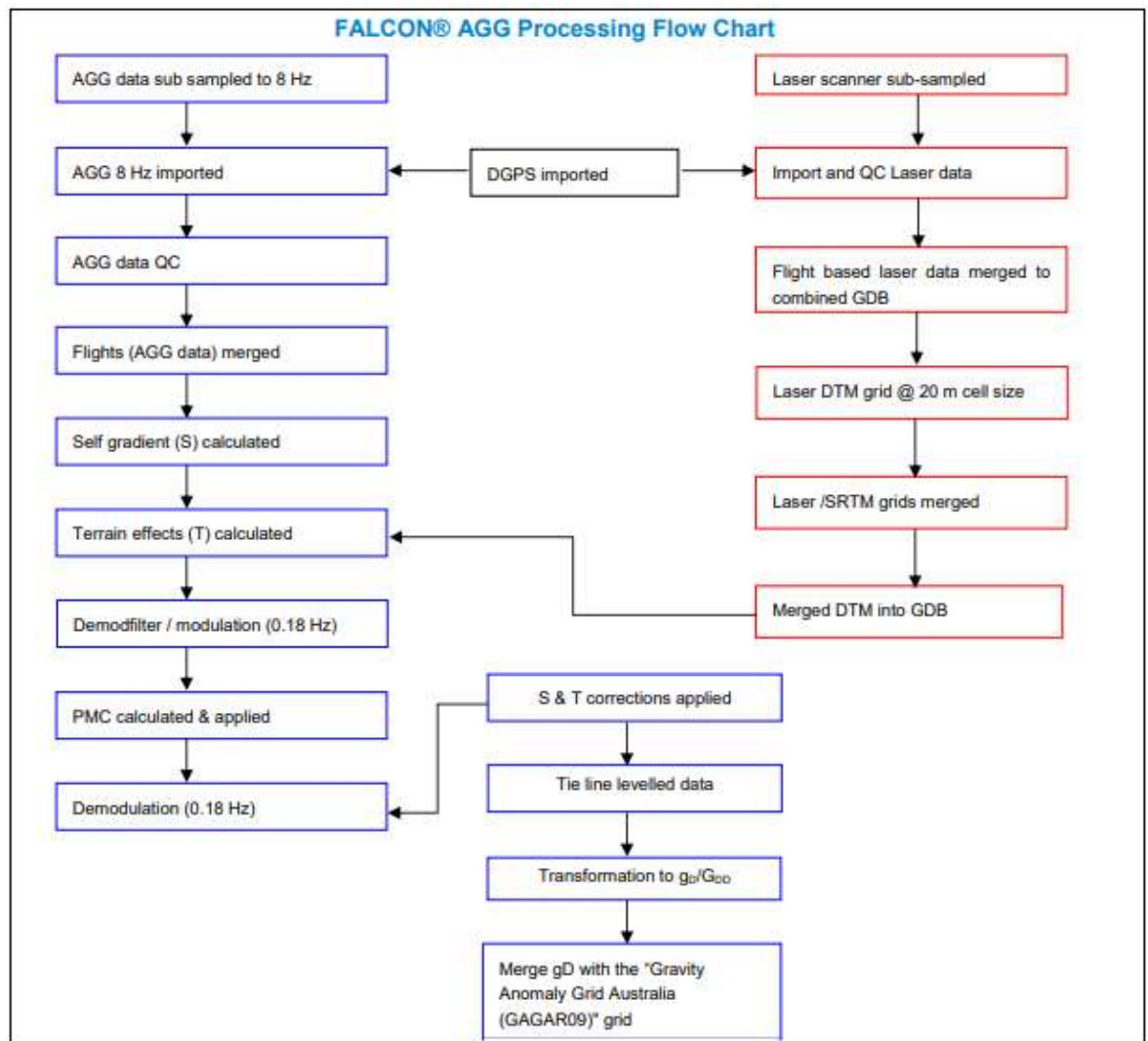


Figura 13 - Fluxo de processamento do dado AGG extraído do relatório de dados da CGG.

Posteriormente, os dados foram transformados para gravidade vertical (g_D) e gradiente da gravidade vertical (G_{DD}) utilizando dois métodos, Fourier e o método da fonte equivalente. Segundo o relatório de dados da CGG, a Transformada de Fourier é usada para gerar a continuação ascendente do dado, onde a transformação para g_D e G_{DD} vai acontecer, e depois voltar a superfície original, utilizando um filtro passa-baixa para remoção de possíveis ruídos gerados no processo. E o método da fonte equivalente utiliza uma inversão com modelo suave

para calcular a densidade de uma superfície de fontes, seguido pelo cálculo de g_D e G_{DD} . Ambos os métodos tiveram resultados coerentes entre si.

A inversão foi feita com o dado da gravidade vertical calculado pelo método da fonte equivalente tanto pela melhor compatibilidade com o resultado do modelo de densidade, como também devido à melhor qualidade, haja vista o método da fonte equivalente gerar menos ruídos que a Transformada de Fourier.

Assim como nos dados magnéticos, foi necessária a projeção dos dados para o sistema *Australian Map Grid* (AMG), zona 53, e datum GDA 94. Também foi feito o corte do dado utilizando o polígono em torno da anomalia gravimétrica para um resultado de melhor resolução na inversão (figuras 14 e 15).

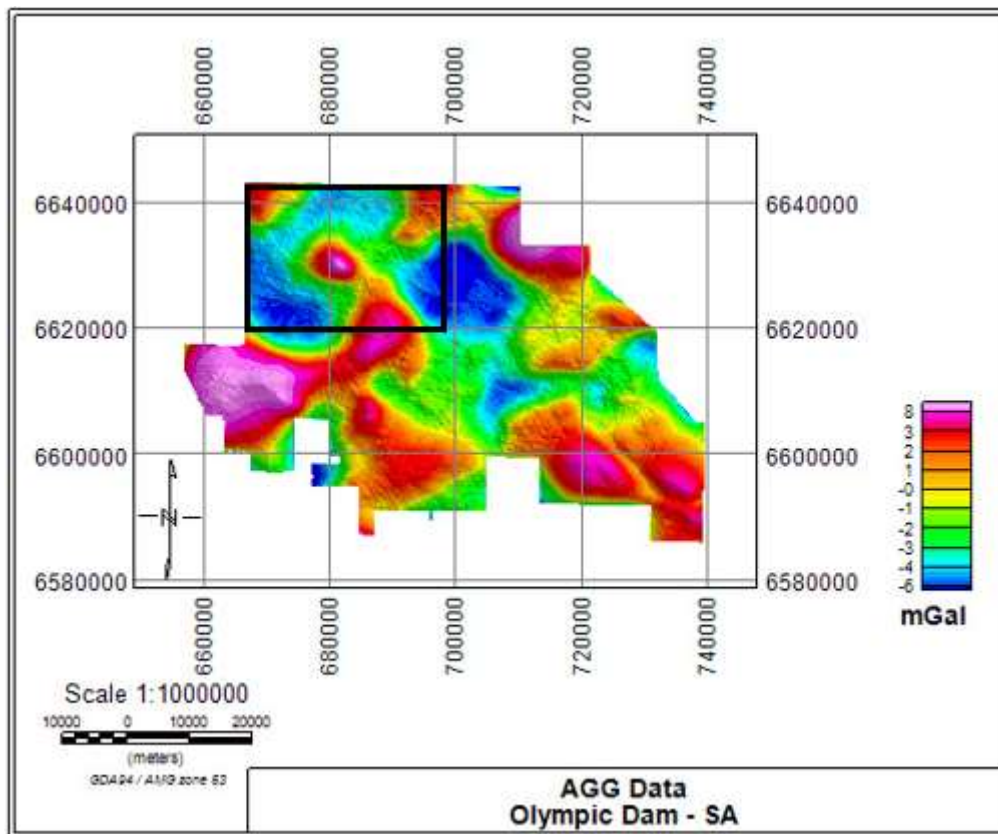


Figura 14 - Mapa da gravidade vertical calculada através do método da fonte equivalente e polígono representando o corte em torno da anomalia de Olympic Dam. Fonte: Autor.

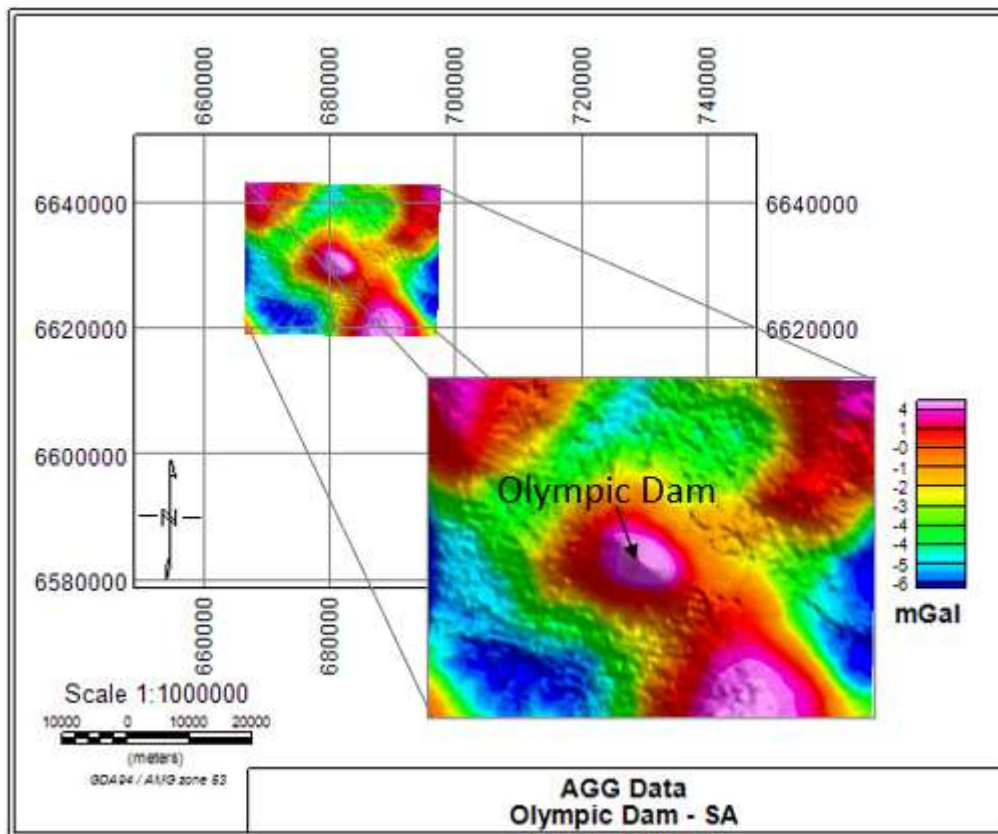


Figura 15 - Mapa da gravidade vertical com corte em torno da anomalia gravimétrica e zoom na região de Olympic Dam. Fonte: Autor.

4.5. Algoritmo de Inversão

As inversões magnética e gravimétrica foram feitas através do software Oasis montaj, que executa a inversão baseada em *voxel*, uma ferramenta que se tornou bastante popular nos últimos anos, devido à grande redução do custo computacional, e à necessidade da indústria em interpretar dados geofísicos cada vez mais complexos associados a alvos mais profundos.

Os modelos baseados em *voxel* são facilmente programados, compreendidos e visualizados. No entanto, têm certa dificuldade para representar algumas feições geológicas, que precisam ser representadas através de superfícies (Ellis e MacLeod, 2013).

O *VOXI Earth Modelling* é o módulo do Oasis montaj para inversão de dados geofísicos de gravimetria e magnetometria em 3D, usando um algoritmo de inversão nomeado *Cartesian Cut Cell (CCC)*, que posteriormente foi simplificado por Ellis e MacLeod (2013), com a intenção de representar as superfícies

geológicas com maior acurácia. Estas inversões podem ser feitas sem vínculos, como no caso do presente estudo.

A fonte de dados usada para a inversão pode ser tanto um banco de dados quanto um grid. No caso desta pesquisa, foram usados grids para ambas as inversões. Sendo assim, foi necessário identificar um grid adicional para representar a elevação do sensor, onde foi usado o modelo de elevação de terreno somado à altura de voo, e escolher o tamanho de célula do modelo, que foi de 250x250 m. A sensibilidade do modelo foi fixada para o ajuste de dado até que a diferença entre o dado observado e o dado calculado seja menor que um valor previamente determinado. Aumentando o valor de sensibilidade, aumenta-se a suavização dos resultados da inversão. Para isto, era possível utilizar diferentes métodos, como o valor absoluto, o valor relativo e a fração do desvio padrão. Para as inversões foi utilizado o valor padrão, igual a 5% do desvio padrão do dado.

4.6. Atributos Sísmicos

Segundo Taner (2001), os atributos sísmicos podem ser definidos como toda informação extraída do dado sísmico, seja por medições diretas, lógicas ou por análise empírica baseada em experiência. Desde sua introdução, nos anos 70, os atributos sísmicos percorreram um longo caminho e se tornaram ferramentas muito úteis para os geocientistas, utilizados desde o controle de qualidade da sísmica até a caracterização de reservatórios na indústria de Óleo e Gás.

O surgimento da sísmica 3D e tecnologias associadas, e a introdução de atributos sísmicos como, coerência e decomposição espectral nos anos 90, mudaram as técnicas de interpretação sísmica e forneceram ferramentas essenciais que antes não estavam disponíveis aos intérpretes. O desenvolvimento de uma grande variedade de atributos sísmicos fez surgir um sistema de classificação e diversos estudos para o melhor entendimento do uso de cada atributo e suas limitações de acordo com as diferentes necessidades de aplicação.

Em Barnes (2016), os atributos sísmicos foram classificados em função de seu significado, sendo definidos como geológicos, geofísicos ou matemáticos. Ainda segundo o autor, os atributos geológicos são os que tem a maior utilidade nos estudos de interpretação sísmica para exploração de hidrocarbonetos e

caracterização de reservatórios, atributos matemáticos a menor utilidade e os atributos geofísicos uma utilidade intermediária.

Neste estudo, foram usados atributos geofísicos para medir algumas propriedades físicas como a amplitude (Envelope), a frequência (Decomposição Espectral) e a coerência entre a forma da onda sísmica (Similaridade) do dado. A seguir serão descritos em detalhes cada um dos atributos citados acima.

4.6.1. Amplitude Instantânea

A amplitude instantânea é uma medição de amplitude independente da polaridade ou fase do sinal. Mais comumente chamada de envelope do traço ou *Reflection Strength* (força de reflexão). Em um dado instante de tempo, representa a magnitude da senóide que melhor representa o traço sísmico, como representado na Equação 1 abaixo, onde $f(t)$ é o traço sísmico e $q(t)$ é o traço rotacionado.

$$A(t) = (f(t)^2 + q(t)^2)^{1/2} \quad (1)$$

Segundo Barnes (2016), este atributo é definido mais precisamente como o equivalente do valor máximo que o traço pode obter através de uma rotação de fase constante. Consequentemente, a amplitude instantânea é invariante com relação à rotação de fase do traço e delimita todas as rotações de fases constantes (figura 16). Como todos os atributos relacionados à amplitude, ele ajuda a destacar anomalias de amplitude em geral. Desta forma é útil para identificar mudanças na litologia, variação deposicional (mudança de fácies geológicas), efeito *tuning* e limite de sequências (Figura 17).

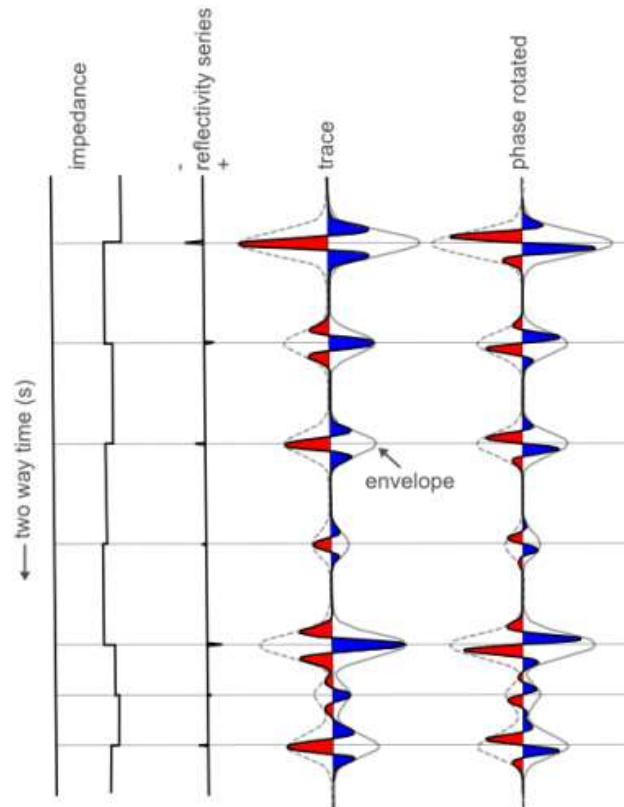


Figura 16 - Ilustração de um dado sísmico sintético e de como o envelope (traço claro envolvendo o traço sísmico) ajuda a retirar as informações de side lobes, suprimindo “ruído” e diminuindo ambiguidade. Bianco (2011) apud Oliveira Neto, 2019.

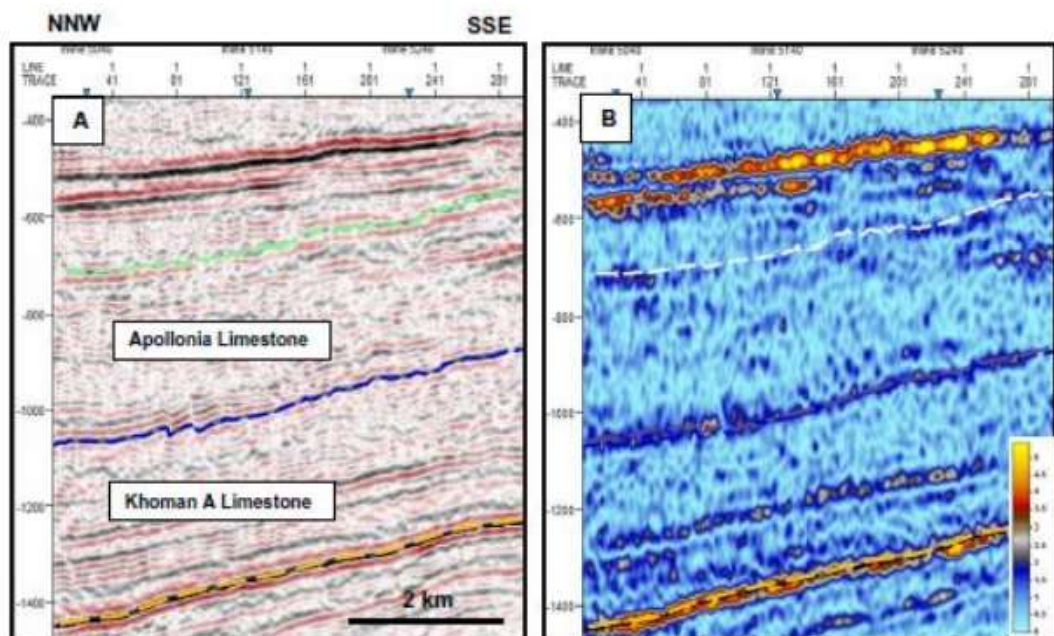


Figura 17 - A) Seção sísmica em amplitude e horizontes mapeados marcando topo e base de formações. B) Envelope correspondente ao dado em A). Sarhan (2017).

4.6.2. Decomposição Espectral

A decomposição espectral consiste na transformação do dado sísmico para o domínio da frequência (Partyka *et al.*, 1999). Este processo pode ser feito através de diversas técnicas, mas mais comumente usando a Transformada de Fourier. O dado sísmico deve estar preferencialmente em tempo, para que as componentes espectrais sejam medidas em ciclos/s ou Hertz.

Como este atributo é baseado em Fourier, a forma de onda pode ser decomposta em uma série de senóides, onde as frequências são múltiplos inteiros da frequência de repetição $1/T$ (figura 18). A forma de onda periódica pode ser expressa tanto no domínio do tempo, quanto no domínio da frequência. No domínio do tempo, a amplitude da onda é expressa como uma função do tempo, e, no domínio da frequência, a amplitude e fase são funções da frequência.

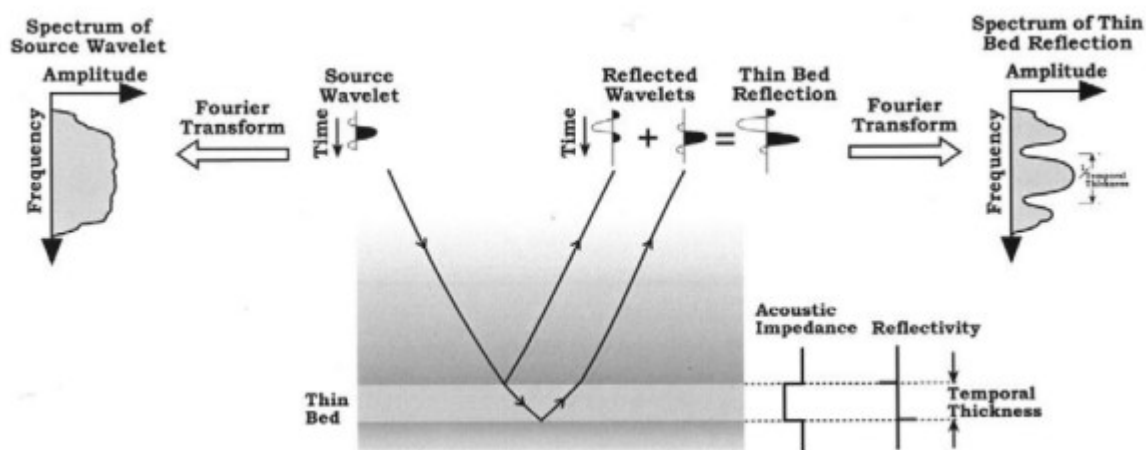


Figura 18 - Decomposição espectral para um modelo de camada fina (Partyka *et al.*, 1999).

O espectro contém valores discretos de amplitude e componentes de fase da onda para cada frequência, que vai até a frequência de Nyquist (Kearey, 2002). Portanto, este atributo é útil para extrair padrões estratigráficos com espessuras relacionadas às frequências dominantes (figura 19; Laughlin *et al.*, 2002). De acordo com a frequência escolhida para a filtragem, é possível destacar refletos mais finos ou mais espessos.

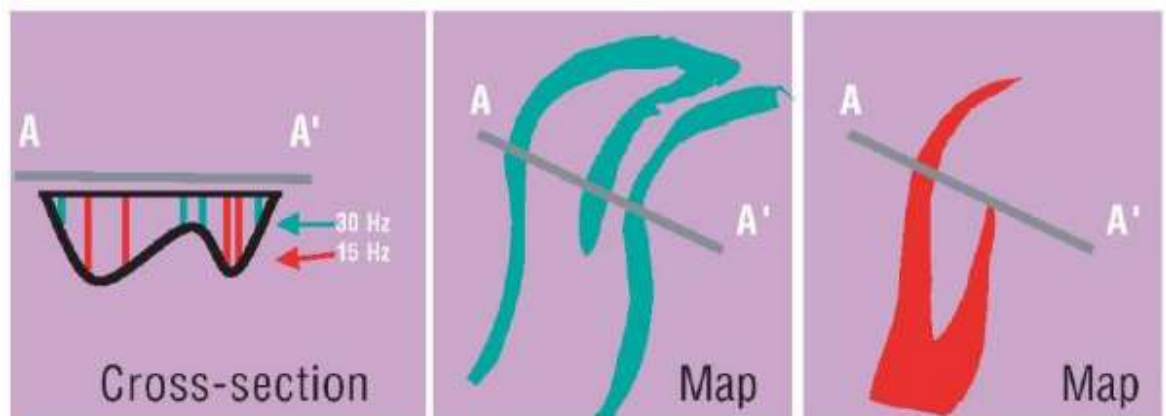


Figura 19 - Na esquerda, exemplo de reservatório com variação de espessura no dado sísmico. No centro, o dado sísmico com frequência dominante mais alta, que destaca as partes mais finas do reservatório no mapa de amplitude. E na direita, o dado com frequência dominante mais baixa, destacando partes mais espessas no mapa de amplitude (Laughlin et al., 2002).

4.6.3. Similaridade

A similaridade é uma medida de coerência da forma de onda sísmica e gera uma análise quantitativa das mudanças nas reflexões que indicam diferenças estratigráficas e estruturais em subsuperfície. Um alto nível de similaridade indica uma geologia contínua lateralmente, como em canais, e baixos níveis de similaridade indicam estruturas descontínuas, como falhas e fraturas (Kola-Ojo, 2018).

Para calcular a similaridade, as amostras dos segmentos dos traços são consideradas vetores no espaço. Sendo assim, a similaridade é definida como a distância Euclidiana entre os vetores normalizados sobre seus comprimentos (Tingdahl e De Groot, 2003). A similaridade varia entre zero e um, indicando que os traços são idênticos e não-idênticos, respectivamente.

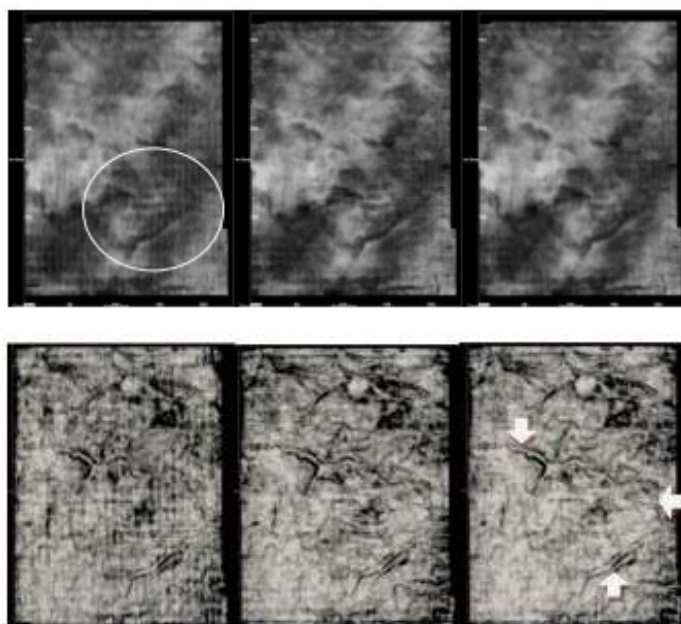


Figura 20 - Comparação entre um time slice de amplitude, imagem de cima, e um time slice de similaridade, imagem de baixo. Mostrando melhor destaque de estruturas geológicas com o uso da similaridade (Kola-Ojo, 2018).

Portanto, o atributo sísmico da similaridade permite que o intérprete faça uma rápida análise geológica do dado sísmico e auxilia na interpretação, já que revela tendências estruturais e enfatiza mudanças laterais sutis na geologia.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Apresentação

Através da manipulação dos dados apresentados anteriormente, e a fim de alcançar os objetivos deste trabalho, foram feitas inversões dos dados magnético e de aero gradiometria gravimétrica utilizando o software Oasis montaj. Os resultados destas inversões e suas interpretações, assim como a interpretação das duas linhas sísmicas, OD1 e OD2, serão mostrados nesta seção.

Como mencionado, a intenção deste estudo é entender a aplicabilidade do método sísmico na prospecção de depósitos profundos e sua integração com os métodos clássicos da exploração mineral, os métodos potenciais. Para isto, os

dados foram interpretados individualmente, e calibrados com as informações geológicas disponíveis na base de dados SARIG.

Posteriormente, foi feita uma análise integrativa dos resultados de cada método, buscando a validação e correlação das respostas geofísicas às estruturas regionais observadas na região do depósito de IOCG de Olympic Dam.

5.2. Atributos e Interpretação Sísmica

As linhas sísmicas 03GA-OD1 e 03GA-OD2 (figuras 21, 22 e 23) foram utilizadas puramente para interpretação e aplicação de atributos que auxiliassem a interpretação. Para isto, foram usados os dados da migração final, descritos em detalhes anteriormente. Apenas uma conversão foi necessária previamente ao início da interpretação, que foi a transformação do dado de tempo para profundidade, pela praticidade para a posterior integração com os demais métodos geofísicos.

Todo o trabalho com o dado sísmico foi feito utilizando o software livre OpendTect da *dGB Earth Sciences*, que oferece diversas ferramentas para interpretação sísmica, incluindo cálculo de vários tipos de atributos.

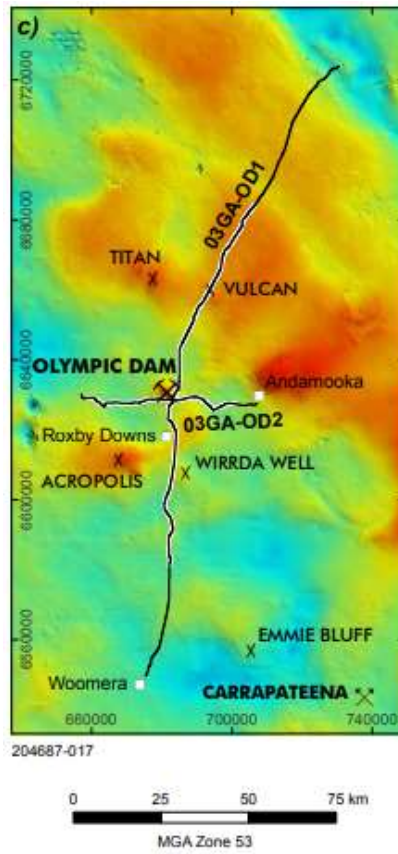


Figura 21 - Linhas sísmicas sobre gravimetria. Modificado de Wise et al., 2015.

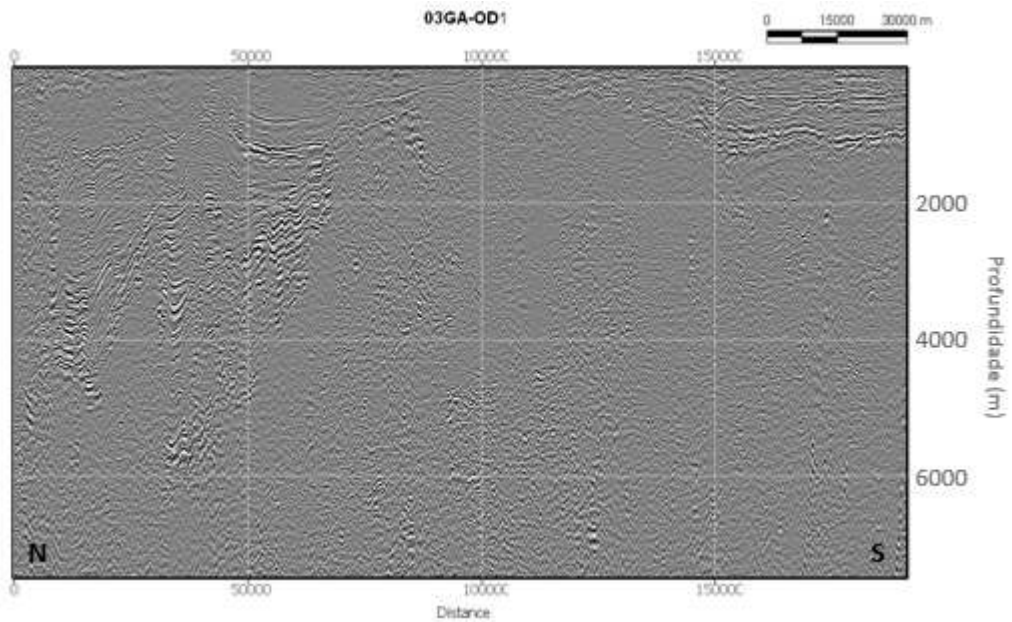


Figura 22 - Migração final da linha 03GA-OD1, de direção N-S e extensão de 193 km. Fonte: Autor.

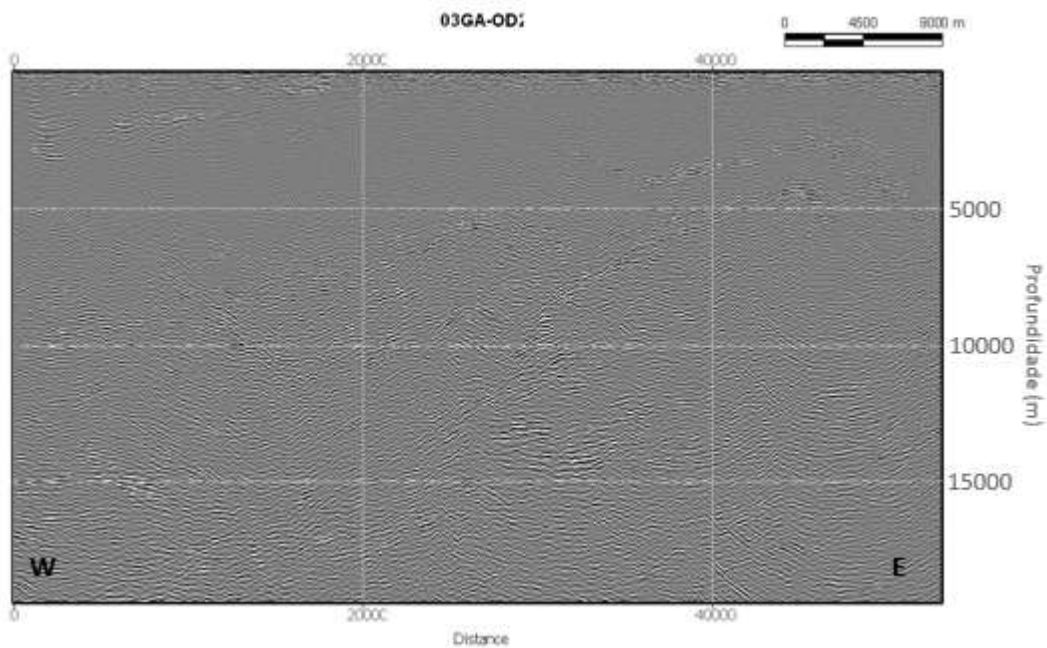


Figura 23 - Migração final da linha 03GA-OD2, de direção E-W e extensão de 57 km. Fonte: Autor.

Como mostrado na figura 21, ambas as linhas passam nas proximidades da mina de Olympic Dam, cortando a geologia em direções ortogonais entre si e mantendo a direção do depósito central às imagens. Como se trata de sísmica terrestre, com processamento do ano de 2005, observam-se imagens bastante ruidosas (figuras 22 e 23), mas que ainda assim, revelam fortes refletores, possibilitando a identificação de estruturas regionais.

A seguir, serão mostrados os resultados dos atributos calculados e suas contribuições para a análise de ambas as linhas, assim como as interpretações dos principais refletores.

5.2.1. Amplitude Instantânea

O atributo da amplitude instantânea, ou envelope do traço, foi usado para analisar as anomalias de amplitude na imagem sísmica, na intenção de observar contatos como a base da cobertura sedimentar com o granito *Roxby Downs*, encaixante do depósito de Olympic Dam, e, também, falhamentos e fortes contrastes de impedância que indiquem mudanças litológicas.

Com o envelope da linha 03GA-OD1 (linha N-S, figura 24), é possível observar o realce dos limites de seqüências estratigráficas de ambos os lados da região central de baixa refletividade, e um forte contraste entre a base da cobertura

sedimentar e a zona de baixa refletividade, entre 300 e 400 m de profundidade, sendo o primeiro indício da coerência do imageamento sísmico em relação às informações geológicas extraídas de furos de sondagem.

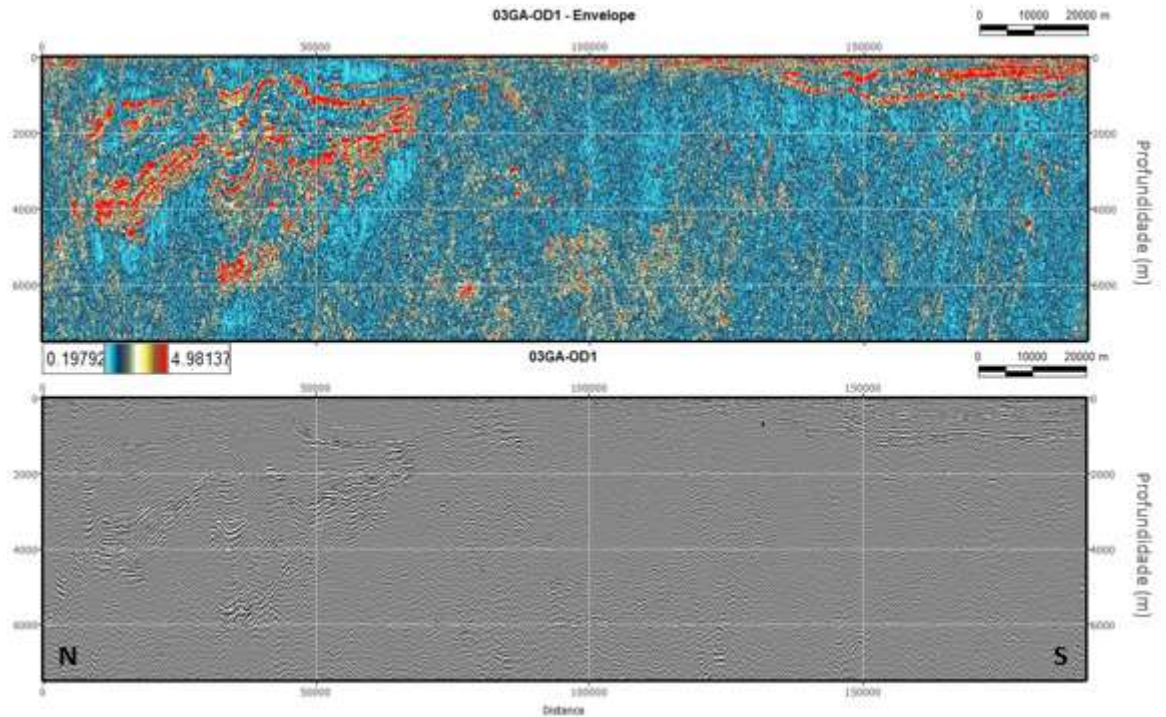


Figura 24 - Resultado do cálculo do Envelope, imagem de cima, em comparação com a migração final, imagem de baixo, da linha 03GA-OD1. Lado Norte da linha à esquerda. Fonte: Autor.

O envelope da linha 03GA-OD2 (figura 25) também apresenta boa contribuição para a análise sísmica, destacando diversos refletores. Dentre as principais observações, é possível destacar os limites das sequências estratigráficas, como visto na linha N-S; o forte contraste da base da cobertura sedimentar com a zona de baixa refletividade, entre 300 e 400 m; estruturas com mergulho para oeste sendo interpretadas como indícios de falhas; e uma estrutura anticlinal na região central da imagem, à aproximadamente 5 km de profundidade.

Esta estrutura anticlinal se encontra abaixo da zona de baixa refletividade, associada ao depósito de Olympic Dam, e, também, é observada na linha 03GA-OD1, na mesma profundidade. Segundo Wise (2015), este domo aparente pode estar relacionado à mineralização do depósito, indicando um controle estrutural sobre o fluxo dos fluidos hidrotermais.

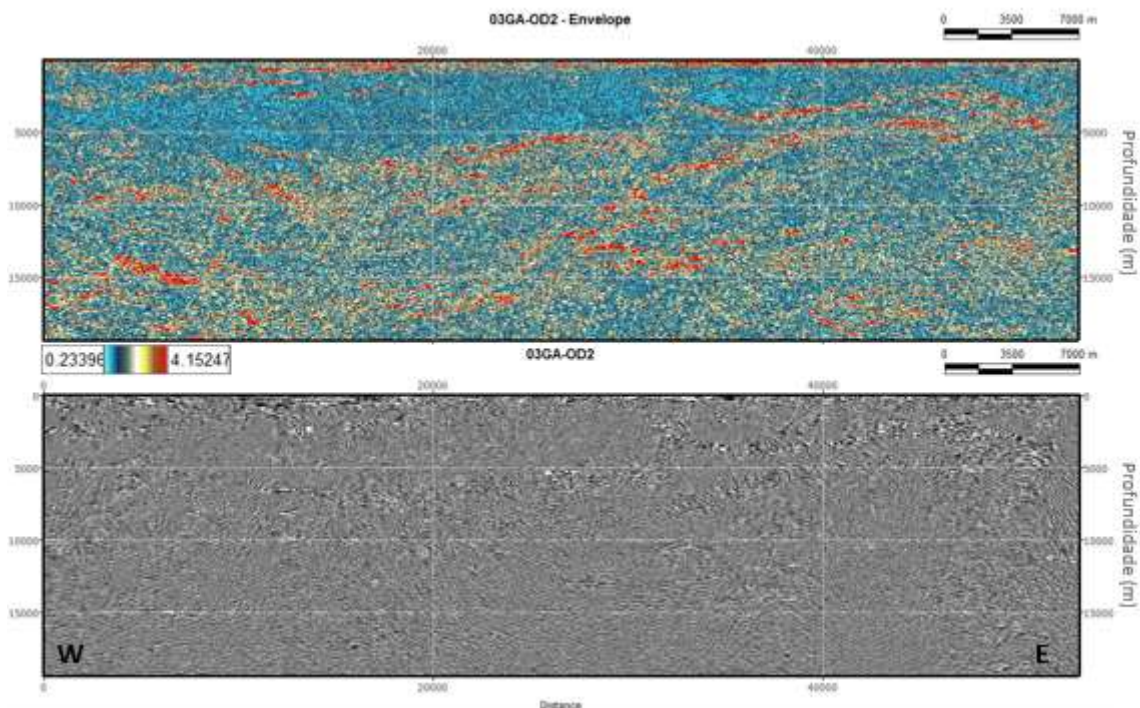


Figura 25 - Resultado do cálculo do Envelope, imagem de cima, em comparação com a migração final, imagem de baixo, da linha 03GA-OD2. Lado Oeste da linha à esquerda. Fonte: Autor.

5.2.2. Decomposição Espectral

A decomposição espectral, que consiste na filtragem do dado em diferentes frequências dominantes, foi usada para extrair padrões estratigráficos da imagem sísmica, buscando entender quais estruturas são realçadas de acordo com um conteúdo de frequência específico. Para ambas as linhas, foram analisados os espectros de amplitude (figura 26) para que fossem determinadas as frequências dominantes usadas no cálculo do atributo, que foi feito utilizando a sísmica em tempo. Observa-se maior domínio das frequências entre 20 e 55 Hz.

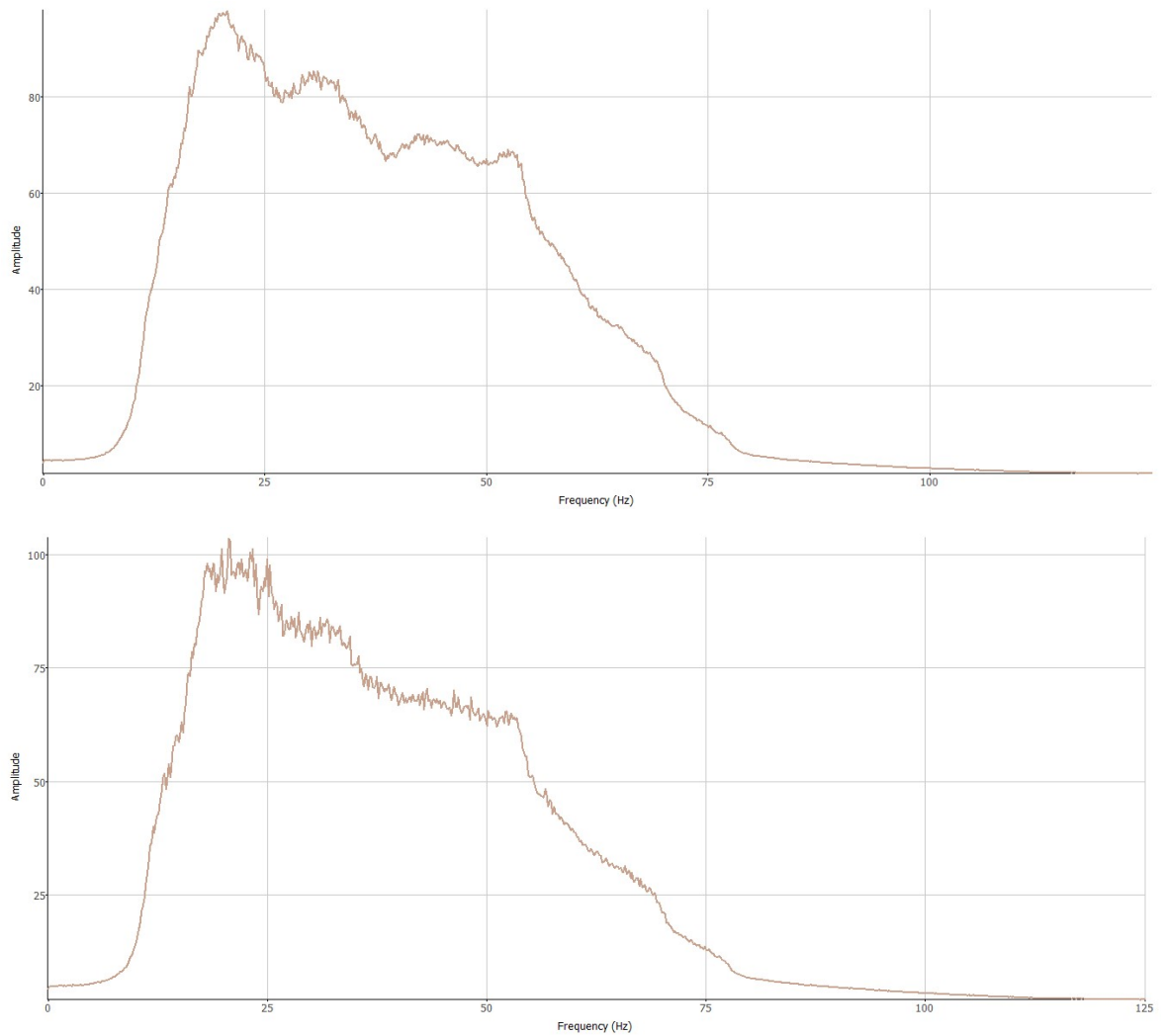


Figura 26 - Espectros de amplitude das linhas 03GA-OD1, acima, e 03GA-OD2, abaixo. Observe o domínio das frequências entre 20 e 55 Hz. Fonte: Autor.

Analisando os resultados das filtragens para a linha 03GA-OD1 (figura 27), é possível observar que conforme a frequência aumenta, os refletores mais rasos ganham maior continuidade lateral, amplitude e foco, o que é um resultado esperado e que mostra o bom funcionamento do atributo, já que se espera maior perda de conteúdo de frequência com o aumento da profundidade.

Portanto, o contrário também é observado, onde a filtragem de 45 Hz, revela mais informação em maiores profundidades que os demais filtros. Algumas estruturas apresentam maior destaque, como as feições com mergulho para norte, no lado direito das imagens na figura 27, e o anticlinal, observado também com o envelope, e agora localizado em 1500 ms aproximadamente, na parte central das imagens, com realce das reflexões pelo filtro de 45 Hz.

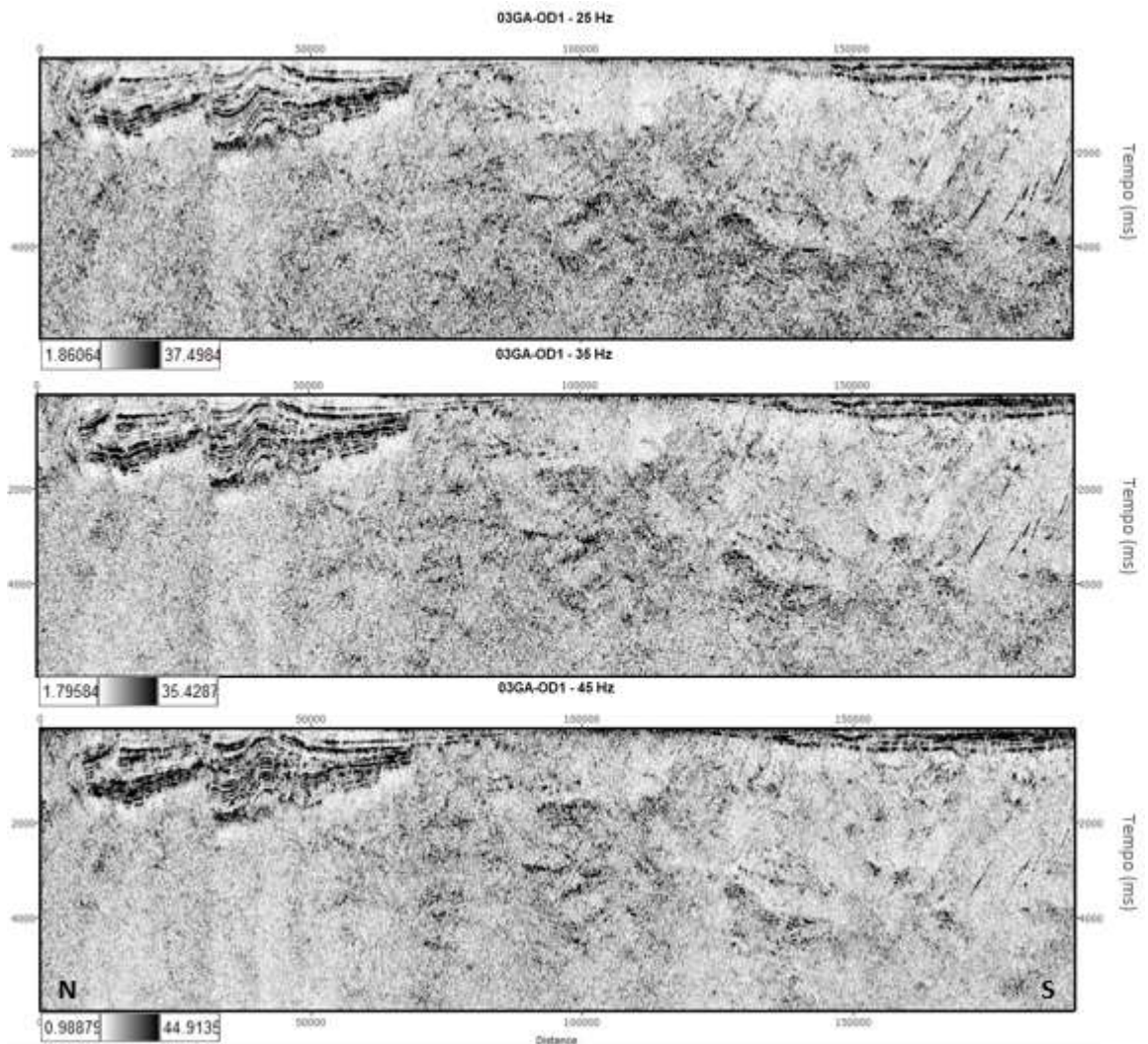


Figura 27 - Decomposição espectral da linha 03GA-OD1, com filtragens de 25, 35 e 45 Hz. Lado Norte da linha à esquerda. Fonte: Autor.

Seguindo a mesma lógica para a linha 03GA-OD2 (figura 28), observa-se a diferença de realce em relação ao conteúdo de frequência, onde o filtro de 25 Hz deu melhor destaque aos refletores profundos, como os dois eventos de alta amplitude, um com mergulho para oeste, no lado direito da imagem, e outro com mergulho para leste, no lado esquerdo da imagem.

Os filtros de 35 e 45 Hz trazem melhor iluminação na parte rasa, incluindo a estrutura considerada como uma falha de mergulho para oeste na parte direita superior da imagem, onde na imagem do filtro de 45 Hz é possível observar até o deslocamento da camada devido ao falhamento.

Interpretando este provável falhamento e o deslocamento da camada, entende-se que pode se tratar de uma falha reversa, e, observando a presença do

anticlinal logo abaixo, é possível relacionar o falhamento reverso devido ao soerguimento da região.

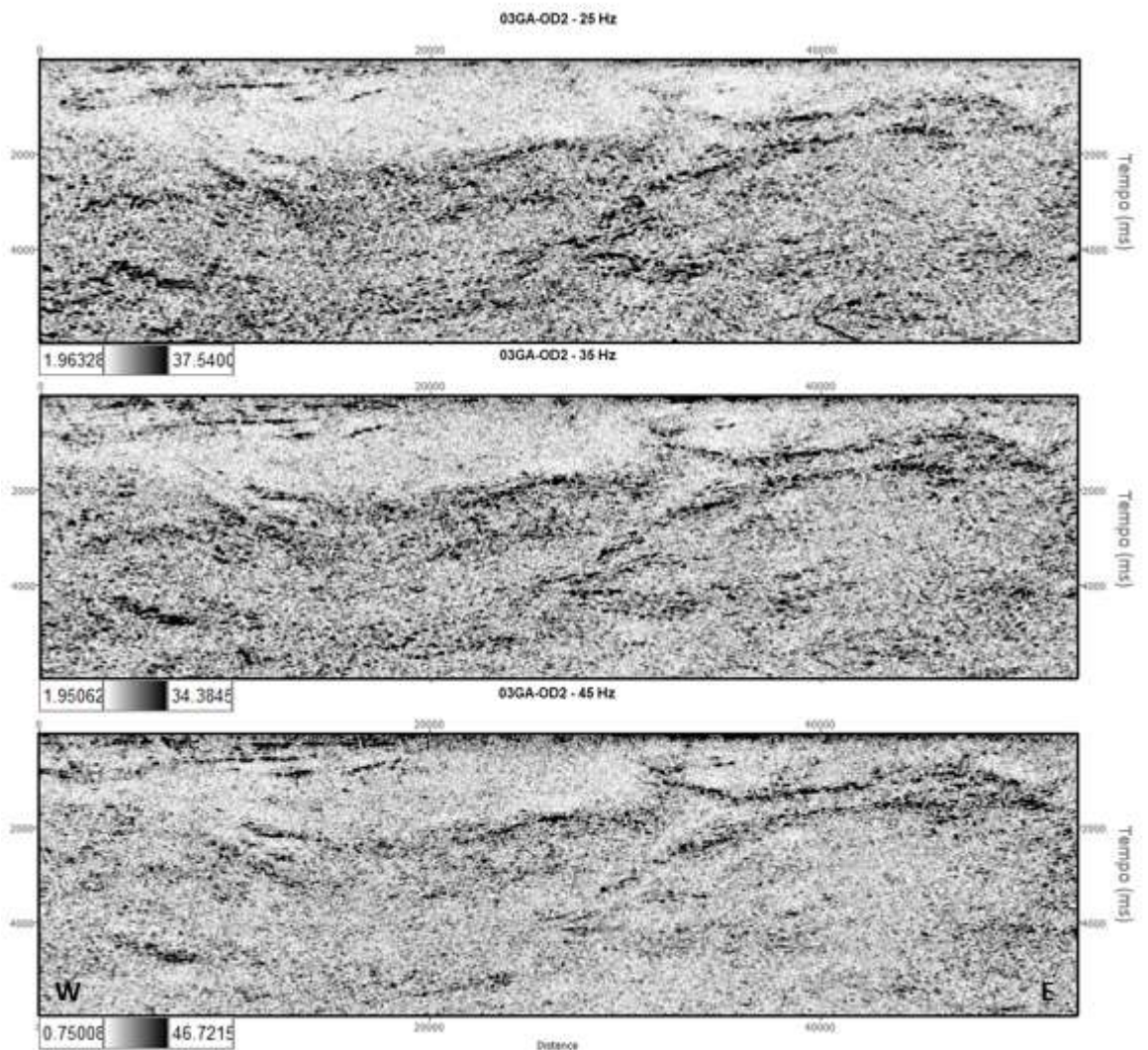


Figura 28 - Decomposição espectral da linha 03GA-OD2, com filtragens de 25, 35 e 45 Hz. Lado Oeste da linha à esquerda. Fonte: Autor.

5.2.3. Similaridade

O atributo da similaridade auxilia o intérprete na análise do dado sísmico, enfatizando mudanças laterais de litologia e realçando tendências estruturais. Neste atributo, quanto maior a similaridade dos traços, mais próximo do valor um, representado pelo branco na escala de cor. O oposto também se aplica, quanto

menor a similaridade, mais próximo de zero, e da cor preta. Um alto nível de similaridade indica uma geologia lateralmente contínua.

Na linha 03GA-OD1 (figura 29), observa-se um alto nível de similaridade nas sequências estratigráficas em ambos os lados da zona de baixa refletividade central. Falhamentos e outra estruturas são de difícil distinção.

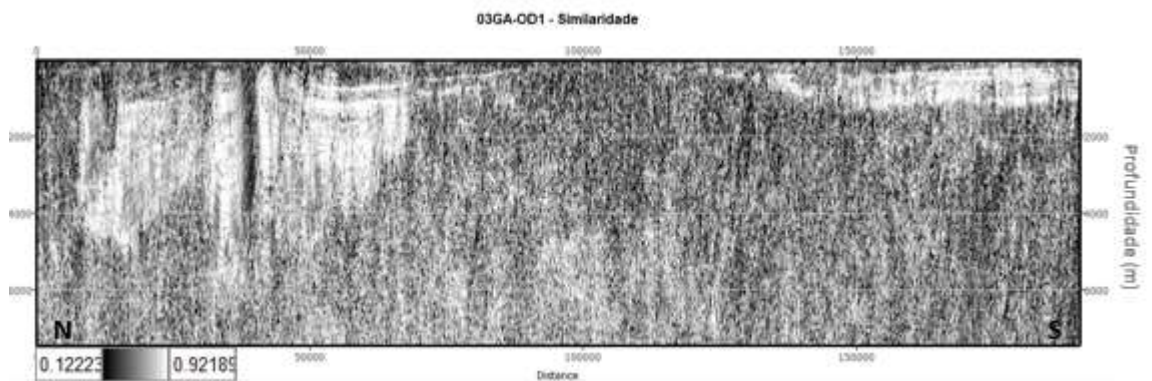


Figura 29 - Atributo da Similaridade na linha 03GA-OD1. A cor branca representa um alto nível de similaridade entre os traços, enquanto a cor preta representa o oposto. Fonte: Autor.

Já na linha 03GA-OD2 (figura 30), os principais refletores já discutidos anteriormente com os outros atributos ficam marcados pela similaridade, na cor branca, sendo possível distinguir as sequências estratigráficas à esquerda da imagem; o falhamento com mergulho para oeste; as camadas deslocadas e o anticlinal. A zona central de baixa refletividade segue indistinta.

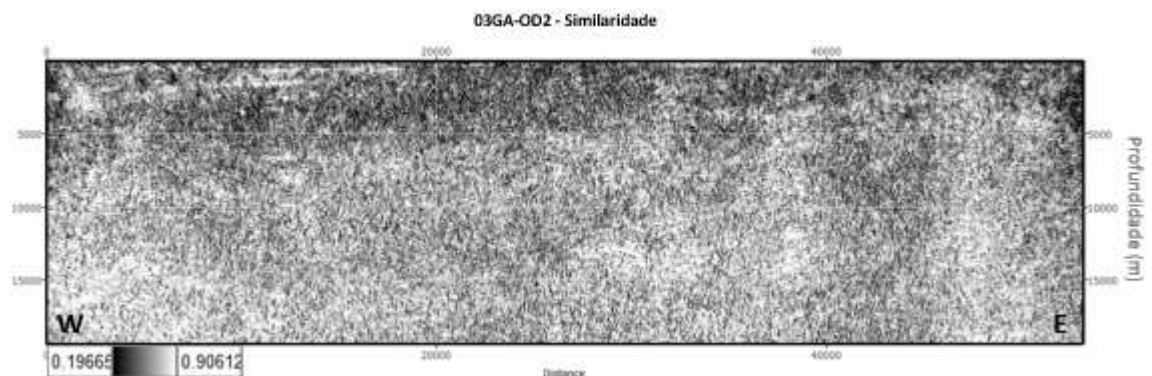


Figura 30 - Atributo da Similaridade na linha 03GA-OD2. Fonte: Autor.

5.2.4. Interpretações Sísmicas

A seguir serão mostrados os principais refletores interpretados em ambas as linhas sísmicas. Foram interpretados os eventos de maior amplitude e impedância acústica, considerados como importantes estruturas regionais, tais como limites de sequências estratigráficas, feições estruturais e falhamentos.

Como a linha 03GA-OD1 (figura 31) é muito extensa, sua visualização completa no software gera uma distorção nos refletores, suas formas são mais suaves que as observadas na imagem, ficando com mergulhos aparentes muito inclinados. Portanto, os horizontes mais rasos são originalmente quase horizontalizados. Nesta seção, poucos eventos são interpretados, já que é uma linha de difícil distinção de refletores. No entanto, os de maior importância estrutural estão presentes na imagem, onde em verde está interpretada a base da cobertura sedimentar, marcando o contato com a zona de baixa refletividade, e em vermelho a região marcada pelo possível soerguimento.

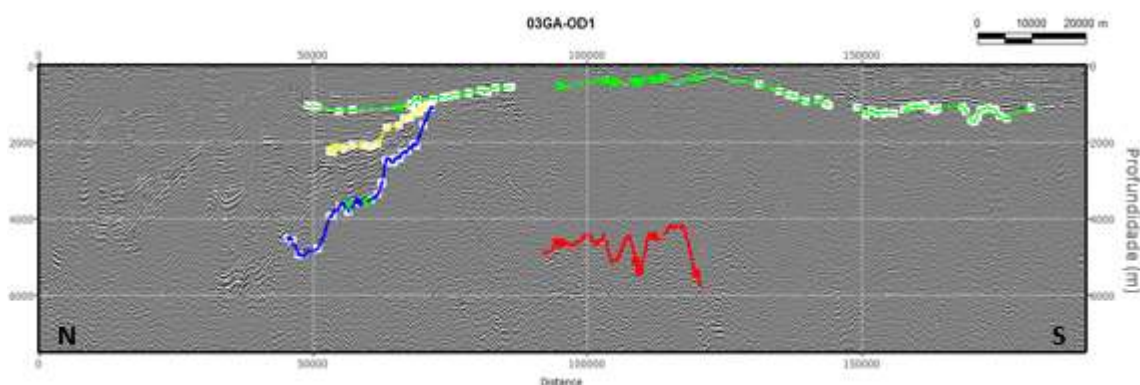


Figura 31 - Sessão de amplitudes da linha 03GA-OD1 com as interpretações da base da cobertura sedimentar em verde, horizonte conformal em amarelo, possível contato com embasamento em azul e soerguimento em vermelho. Fonte: Autor.

Na linha 03GA-OD2 (figura 32), tem-se um melhor imageamento e é possível a interpretação de mais eventos, assim como a distinção de falhas. Novamente a visualização 2D do OpendTect desfavorece a interpretação, deixando a imagem com aspecto ruidoso. Na análise em 3D foram facilmente observados os horizontes interpretados na figura abaixo.

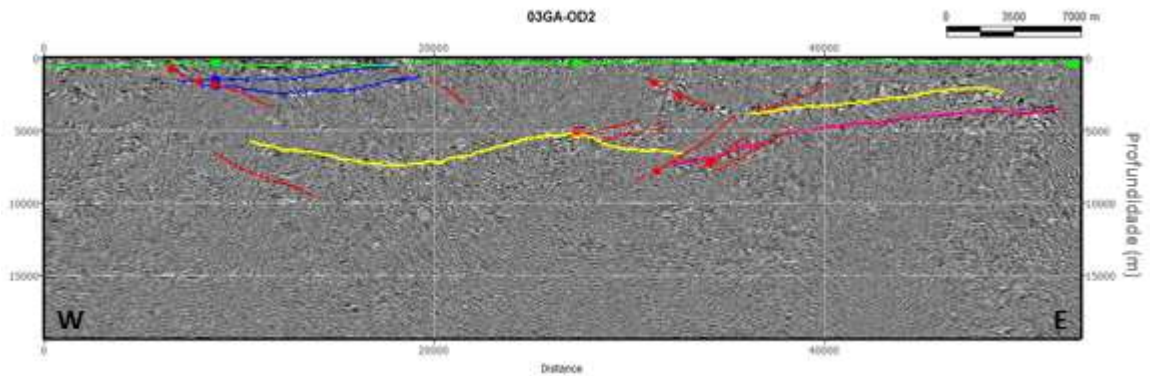


Figura 32 - Interpretação da linha 03GA-OD2 exibindo amplitudes. Base da cobertura sedimentar em verde, Gawler Range Volcanics em azul, soerguimento associado ao Grupo Hutchison em amarelo, unidade do Arqueano em rosa e falhamentos em vermelho. Fonte: Autor.

Em verde, como na linha 03GA-OD1, foi interpretada a base da cobertura sedimentar com profundidades variando entre 300 e 400 m. Em azul, estão interpretados refletores associados ao *Gawler Range Volcanics*, eventos magmáticos ocorridos a aproximadamente 1590 m.a., relacionados à Suíte Hiltaba e às mineralizações de IOCG. Em amarelo, se encontram os eventos relacionados ao Grupo Hutchison, do paleoproterozóico, e contendo unidades metassedimentares. Com este horizonte foi interpretado também o domo aparente. Por último, em rosa, está interpretado o evento associado às unidades do arqueano. Estas referências geológicas foram extraídas de Wise (2015).

Alguns falhamentos também foram identificados na linha 03GA-OD2, e estão representados em vermelho. Na figura 33 estão representadas as interpretações dos falhamentos sem a análise de atributos, no entanto, como visto anteriormente, uma das principais falhas, com mergulho para oeste, foi destacada com a ajuda do envelope e da decomposição espectral. Sua interpretação pode ser vista na figura 33 abaixo.

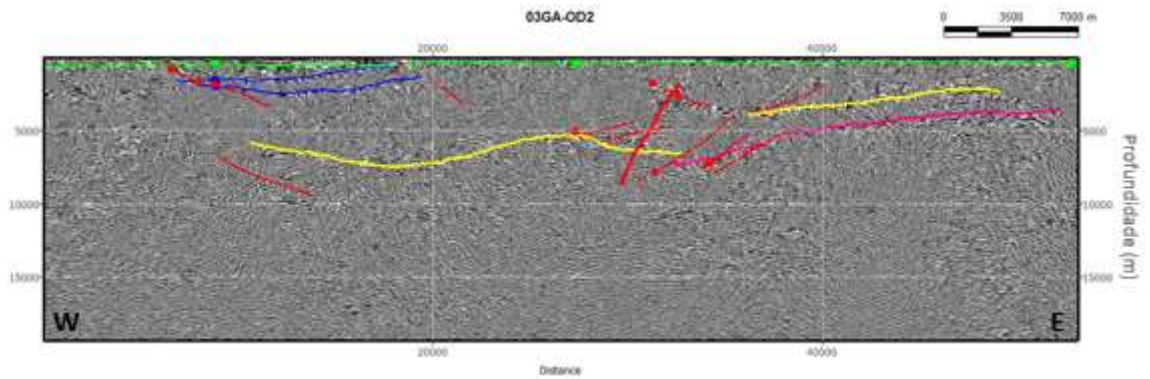


Figura 33 - Nova interpretação dos falhamentos sobre a sessão de amplitudes da linha 03GA-OD2 com a adição da falha com mergulho para oeste, identificada com a ajuda dos atributos sísmicos. Fonte: Autor.

Apesar das dificuldades de imageamento de ambas as linhas, foi possível identificar importantes estruturas que contribuem para o entendimento da estruturação do depósito de Olympic Dam, de um ponto de vista regional. Estas interpretações serão integradas com os demais métodos e com as informações geológicas mais à frente na seção.

5.3. Inversão e Interpretação dos Dados Magnéticos

A inversão do dado magnético foi feita com a intenção de gerar informações em profundidade sobre as propriedades magnéticas na região do depósito, haja vista o contraste regional de rochas vulcânicas, intrusivas e sedimentares, criando um ambiente com respostas bastante distintas.

Além disso, estes resultados podem ser correlacionados com o imageamento sísmico, buscando feições coerentes em ambos os métodos. Por exemplo, é esperada uma baixa susceptibilidade magnética para a cobertura sedimentar e uma alta susceptibilidade magnética na região da *Gawler Range Volcanics*, observada a oeste da linha 03GA-OD2. Já na zona de baixa refletividade sísmica, representando a área do depósito, com o granito Roxby Downs como rocha encaixante, é esperada uma variação na propriedade magnética, já que o depósito tem um conteúdo variável de magnetita e hematita.

Na tentativa de gerar uma inversão mais detalhada, foi usada a Primeira Derivada Vertical (1VD) da intensidade magnética total (TMI) como input, realçando

o conteúdo de alta frequência, como mostrado previamente na metodologia. Os resultados serão expostos a seguir.

5.3.1. Inversão do Vetor de Magnetização

A inversão do dado magnético com a filtragem 1VD, feita no Oasis montaj, utilizou a técnica de MVI (*Magnetization Vector Inversion*), criada por Ellis *et al.* (2012), que não assume a direção do vetor de magnetização, nem faz suposições a respeito da fonte magnética, se é remanente ou induzida. Isto reduz o possível erro de posicionamento das anomalias devido à presença de magnetização remanente.

A MVI calcula o vetor de magnetização $M(r)$ da equação 2:

$$B(r_j) = \nabla \int_V M(r) \cdot \nabla \frac{1}{|r-r_j|} dr^3 \quad (2)$$

Em que $B(r_j)$ é o campo magnético no ponto r_j resultante de um volume V de magnetização $M(r)$ com centro em r .

Ao discretizar V em N subvolumes v_k de magnetização m_k tem-se a equação 3:

$$B_\beta(r_j) = \sum_{k,\alpha}^{N,3} m_{k,\alpha} \int_{v_k} \partial_\alpha \partial_\beta \frac{1}{|r-r_j|} dr^3 \quad (3)$$

A equação 3 define o problema direto da MVI. Então, a inversão resolve a magnetização de m_k de um corpo de volume v_k dado um campo magnético B .

O resultado da inversão é um bloco 3D (figura 34) da amplitude do vetor de magnetização e deste bloco foram retiradas seções nas localidades da mina de Olympic Dam e das linhas sísmicas. Os valores do resultado da MVI, por serem sobre a primeira derivada vertical do campo magnético, não correspondem a valores típicos de susceptibilidade magnética.

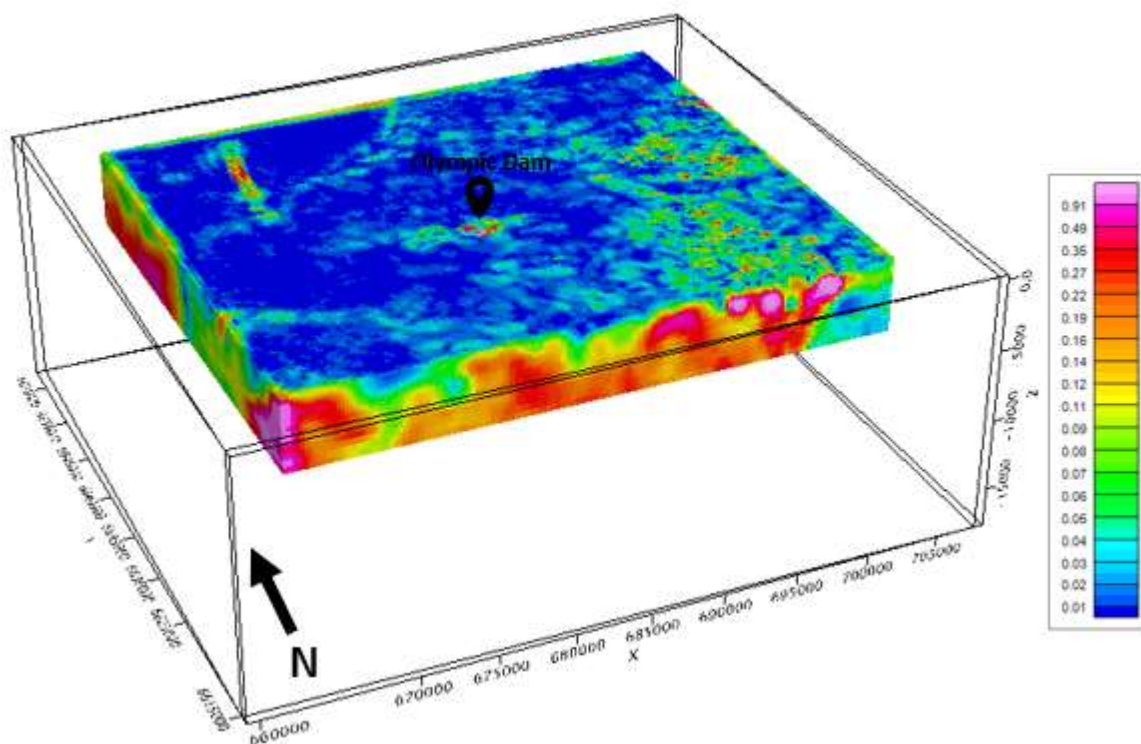


Figura 34 - Bloco 3D da Inversão do Vetor de Magnetização da Primeira Derivada Vertical. Fonte: Autor.

5.3.2. Interpretação dos Dados Magnéticos

A primeira seção extraída do modelo 3D de susceptibilidade magnética se encontra na direção da mina de Olympic Dam (figura 35), cortando o depósito de oeste para leste. A mina está compreendida entre as coordenadas UTM 675000 E e 680000 E na imagem.

Analisando a seção, podemos ver, como esperado, os baixos valores de susceptibilidade magnética associados à cobertura sedimentar, assim como uma anomalia magnética centralizada com a localidade da mina, que diminui a magnetização do centro para as bordas. Esta tendência é esperada já que, como visto na seção sobre geologia, na parte central do depósito há a presença de diques e, por consequência, da alteração hidrotermal, substituindo a magnetita por hematita neste mesmo sentido.

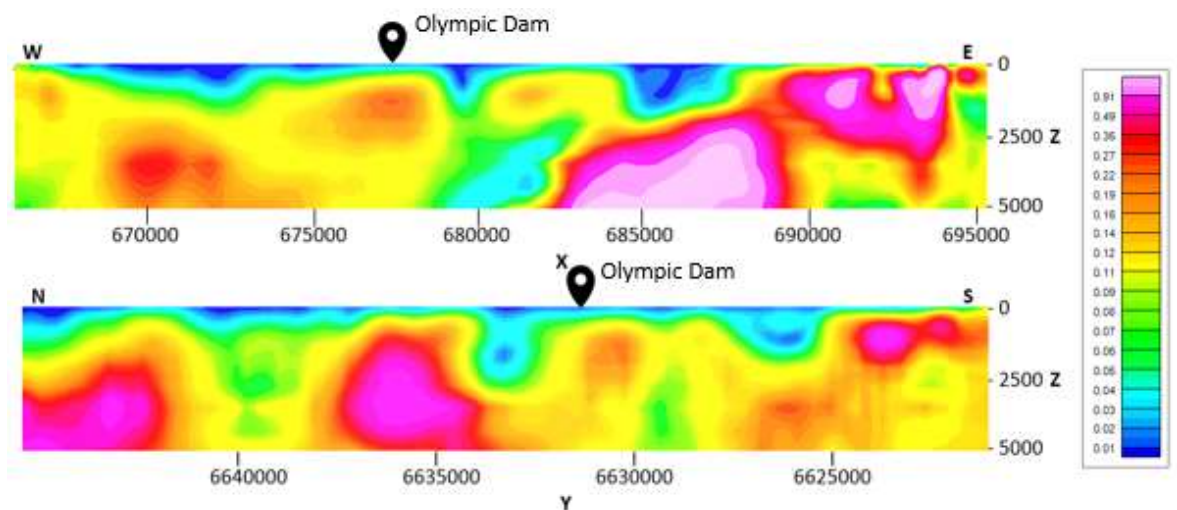


Figura 35 - Seções do modelo de susceptibilidade magnética sob a mina de Olympic Dam. Fonte: Autor.

Observando a outra direção, de norte a sul, sabendo que a mina está localizada entre 6635000 N e 6630000 N, observa-se a mesma tendência na anomalia próxima de 6630000 N, com um núcleo mais magnético e diminuição de intensidade para as bordas. Esta é seguida lateralmente por uma região de baixa susceptibilidade e, mais ainda para norte, uma forte anomalia magnética, que segundo Ehrig, *et al.* (2012), pode estar associada ao enriquecimento de ferro (> 20%) no complexo de brechas de Olympic Dam.

As seções extraídas nas direções das linhas sísmicas são uma generalização das localidades, já que as linhas não são exatamente W-E nem N-S. Posteriormente, na seção sobre integração de métodos, as seções 2D serão analisadas em mais detalhes, fazendo uma correlação mais precisa com a linha sísmica.

Analisando a seção leste-oeste (figura 36), referente à linha 03GA-OD2, que se encontra à aproximadamente 3 km ao sul da seção de mesma direção sob a mina de Olympic Dam, é possível observar uma feição próxima de 675000 E com características similares à observada na seção da figura 35, mas com menor intensidade e extensão. Além desta continuação da estrutura observada anteriormente, vê-se uma intercalação mais acentuada de anomalias de alta susceptibilidade com regiões de baixa susceptibilidade. Isto pode ainda estar associado às diferenças mineralógicas na zona alterada do granito Roxby Downs, com as diferentes concentrações de Fe, como visto em Ehrig, *et al.* (2012).

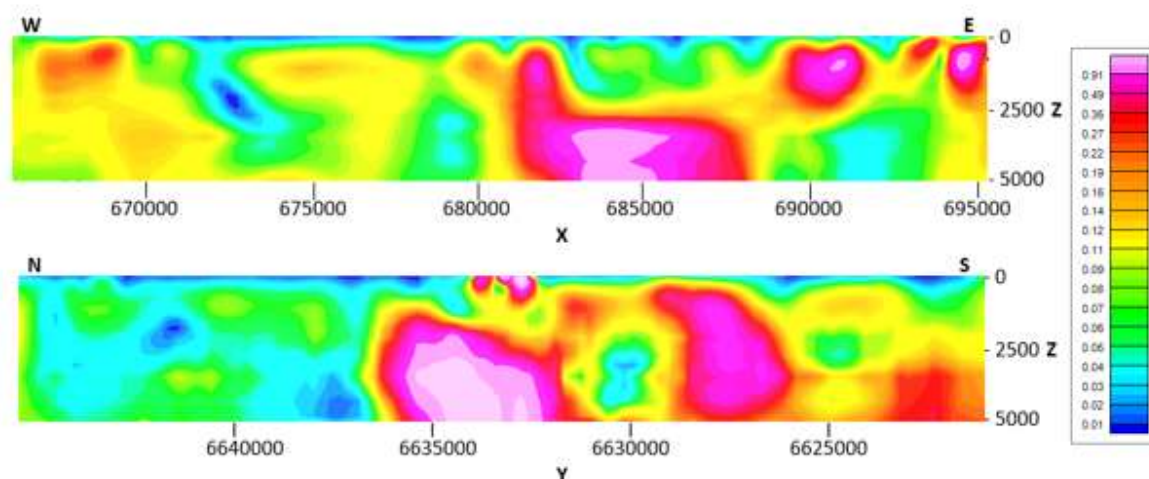


Figura 36 - Seções do modelo de susceptibilidade magnética nas localidades aproximadas das linhas sísmicas. Fonte: Autor.

A seção norte-sul, na direção da linha 03GA-OD1, e à aproximadamente 5 km a leste da seção da figura 35, mostra comportamento parecido em relação às intercalações de anomalias, o que pode contribuir para o estudo da geometria destas zonas de enriquecimento de ferro. Nesta seção, também é possível observar uma feição rasa de alta susceptibilidade magnética entre 6635000 N e 6630000 N, identificada como uma estrutura intrusiva de composição máfica a félsica por Hall, *et al.* (2018).

5.4. Inversão e Interpretação dos Dados Gravimétricos

A inversão dos dados gravimétricos foi feita utilizando o dado de gravidade vertical, como explicado na metodologia. Portanto, essa inversão obteve um resultado mais regional que a magnética, devido ao dado de entrada. Sendo assim, não é esperado um grande detalhamento do bloco 3D (figura 37) que representa o modelo de densidade calculado pela inversão.

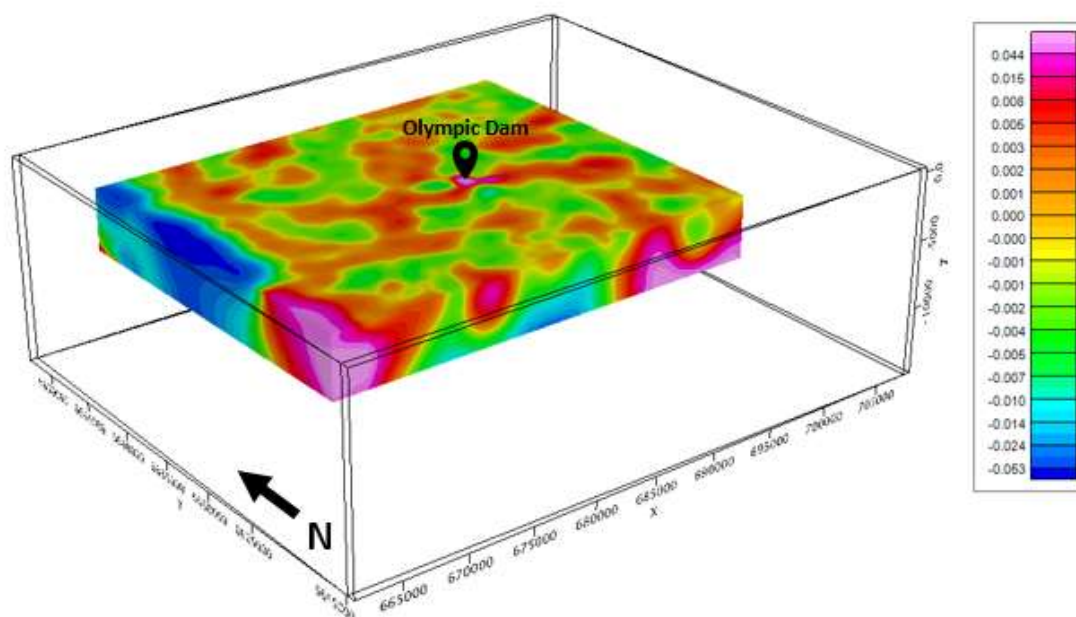


Figura 37 - Bloco 3D da inversão gravimétrica da Gravidade Vertical. Fonte: Autor.

As feições esperadas para a interpretação dos dados gravimétricos são zonas de alta densidade na região do depósito de Olympic Dam, valores intermediários característicos de rochas sedimentares acima de 400 m e baixos no modelo de densidade em zonas de falhamentos. Os valores resultantes da inversão não são valores típicos de densidade por serem derivados da gravidade vertical calculada pelo método da fonte equivalente. As interpretações deste estudo são qualitativas e têm a intenção de correlacionar feições entre os métodos.

Seguindo a lógica de interpretação mostrada acima, com a magnetometria, na figura 38 estão expostas as seções do modelo de densidade extraídas sob a mina de Olympic Dam.

Analisando a seção leste-oeste, é possível verificar uma forte anomalia nas mesmas coordenadas do depósito, assim como uma anomalia mais rasa à direita da anomalia de Olympic Dam, que coincide com a localização do corpo intrusivo indicado por Hall, *et al.* (2018). Como a região é dominada por intrusões, típicas da Suíte Hiltaba, observam-se outras anomalias de alta densidade ao longo da seção.

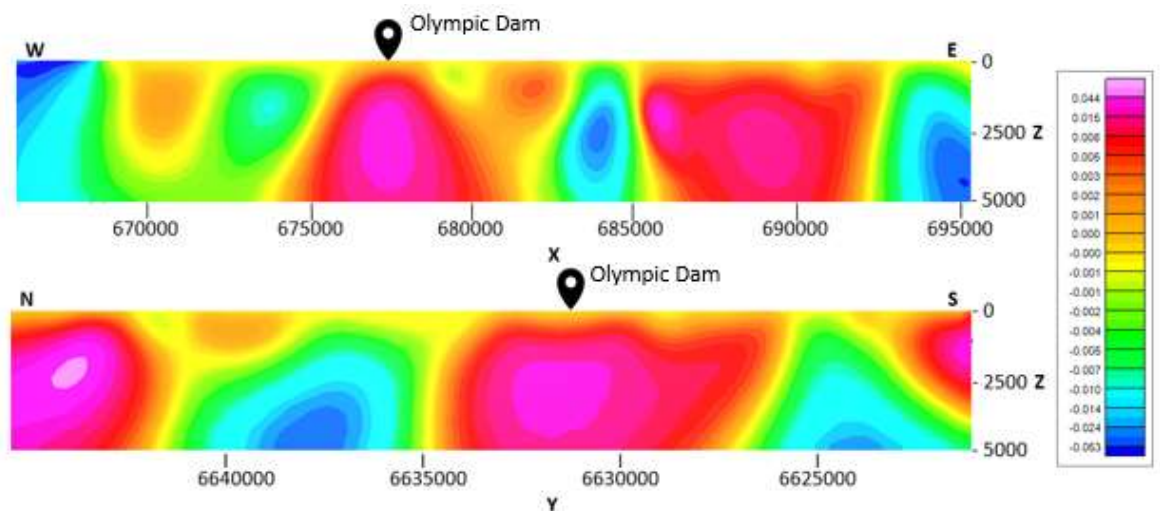


Figura 38 - Seções do modelo de densidade sob a mina de Olympic Dam. Fonte: Autor.

A seção norte-sul é coerente com a leste-oeste e mostra a mesma alta densidade entre as coordenadas 6635000 N e 6630000 N, indicando a região abaixo da mina de Olympic Dam. Observa-se que esta anomalia está encaixada entre duas zonas de densidade mais baixa indicando mudança de litologia, podendo ser o limite da zona de alteração do granito Roxby Downs, com enriquecimento de ferro. A cobertura sedimentar mantém o comportamento esperado de valores intermediários.

Fazendo esta análise para as seções com referencial nas linhas sísmicas, é possível observar na seção leste-oeste (figura 39) a presença da alta densidade referente ao depósito, com o mesmo deslocamento para oeste observado na estrutura interpretada com o modelo de susceptibilidade magnética. Também se vê um alargamento da região de baixa densidade à direita da anomalia, indicando possivelmente um estreitamento da rocha encaixante para sul.

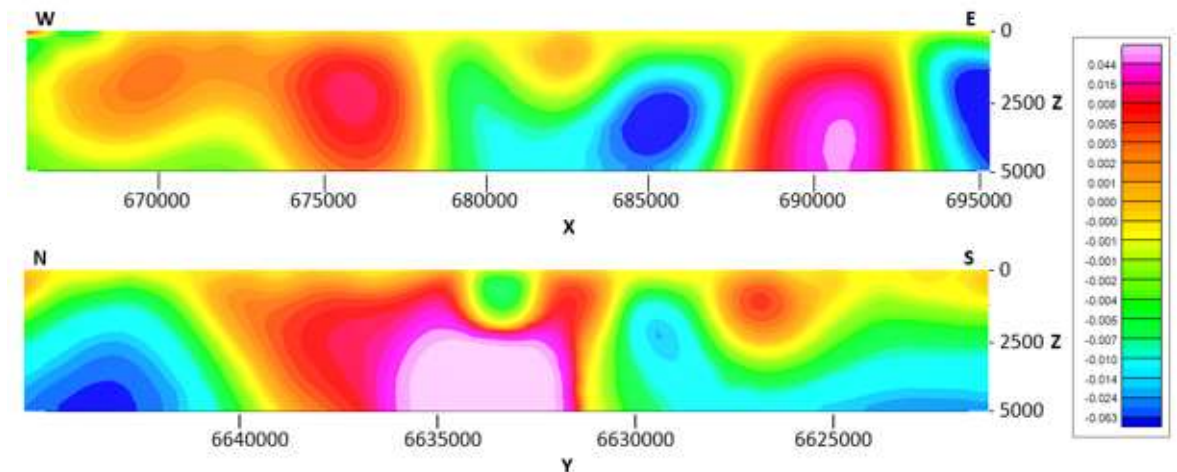


Figura 39 - Seções do modelo de densidade com referencial nas linhas sísmicas. Fonte: Autor.

A seção norte-sul, com o referencial da linha 03GA-OD1, portanto, mais ao leste da mina de Olympic Dam, mostra um deslocamento da anomalia associada ao depósito para norte, e, também, uma bifurcação, indicando uma possível conexão mais profunda com o corpo intrusivo. Esta mesma tendência de deslocamento é observada nas zonas de densidade mais baixa no entorno da anomalia.

A seguir serão analisadas em conjunto as observações já explanadas nas seções acima, formando um panorama integrado entre os três métodos abordados, com foco na contribuição do método sísmico para o estudo regional.

5.5. Integração de Métodos

Com o objetivo de compreender melhor a contribuição da sísmica terrestre na prospecção de depósitos minerais, será analisada a seguir a correlação das feições observadas através da interpretação sísmica e das interpretações das inversões magnética e gravimétrica (figura 40). A coerência entre as repostas geofísicas será validada com mapas e modelos geológicos obtidos através de artigos e da base de dados SARIG.

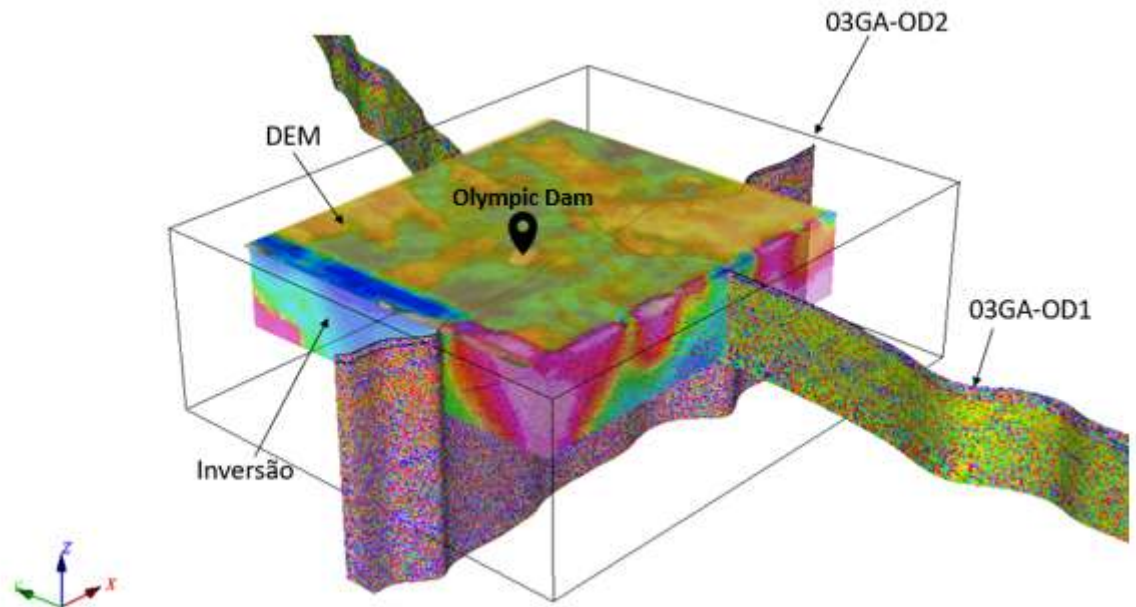


Figura 40 - Análise integrativa de métodos. Exemplo de visualização 3D com o software Oasis montaj. Uso do modelo digital de elevação de terreno (DEM) para auxiliar na identificação da mina de Olympic Dam. Fonte: Autor.

O papel das informações geológicas neste tipo de estudo é fundamental, pois em sua maioria, são baseadas em furos de sondagem, que são os dados mais confiáveis do processo prospectivo. Sendo assim, são uma forma confiável de validação das análises geofísicas, mostrando a aplicabilidade dos métodos indiretos no fluxo de trabalho da mineração.

No caso das linhas sísmicas, foi possível sobrepor algumas superfícies de um modelo geológico regional da Província de IOCG do Gawler oriental, baseado em furos de sondagem, aos horizontes interpretados, confirmando o posicionamento de refletores no imageamento sísmico. Esta sobreposição é visualizada na figura 41 abaixo, onde há uma boa correlação entre a unidade do arqueano e o horizonte interpretado (imagem de cima) e entre o falhamento com mergulho para oeste, primeiramente identificado com o auxílio dos atributos sísmicos, e a superfície que representa esta mesma falha no modelo geológico (imagem de baixo).

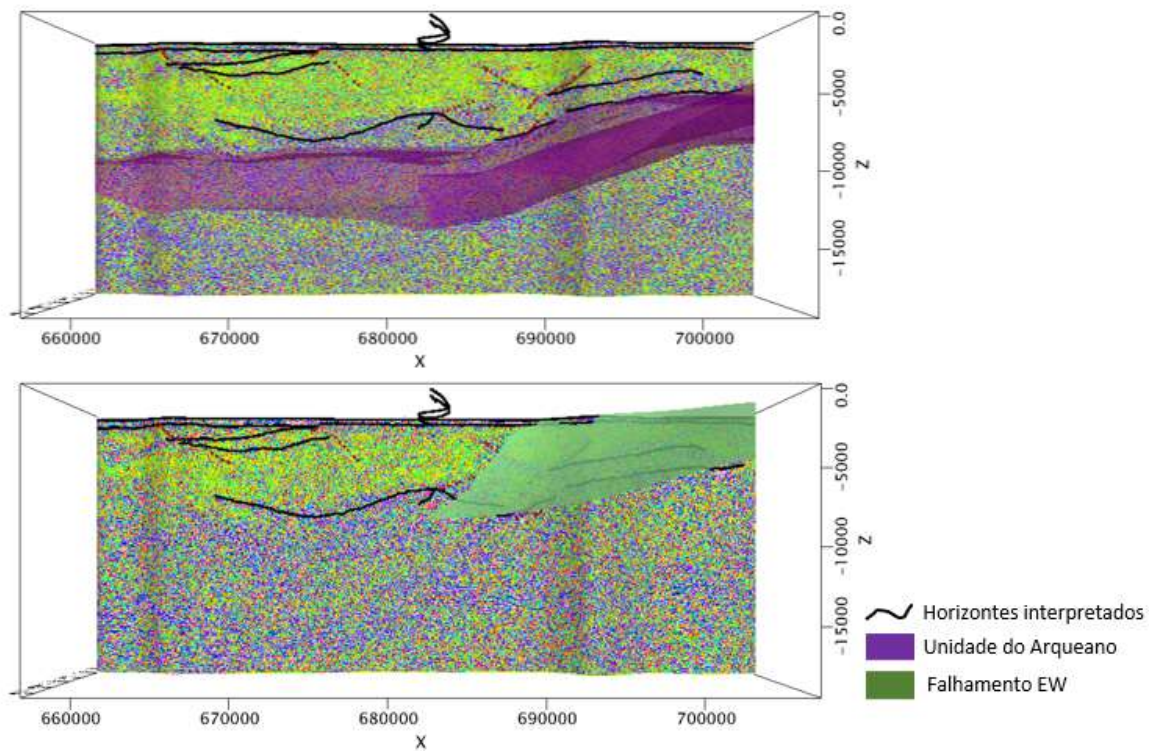


Figura 41 - Linha sísmica 03GA-OD2 com horizontes interpretados e sobreposição de superfícies do modelo geológico. Imagem de cima indica correlação na unidade do Arqueano e imagem de baixo no falhamento com mergulho para oeste interpretado com auxílio dos atributos sísmicos. Fonte: Autor.

Como é um modelo geológico bastante extenso, mostrando as principais superfícies do Gawler oriental, apenas estas duas feições puderam ser aproveitadas. No entanto, já são suficientes para mostrar a coerência nas interpretações sísmicas e a acurácia do imageamento e processamento.

Continuando a integração, as seções dos modelos de susceptibilidade magnética e densidade também foram sobrepostas à sísmica na intenção de buscar correlação entre as propriedades físicas gravimétricas e magnéticas e o imageamento da subsuperfície.

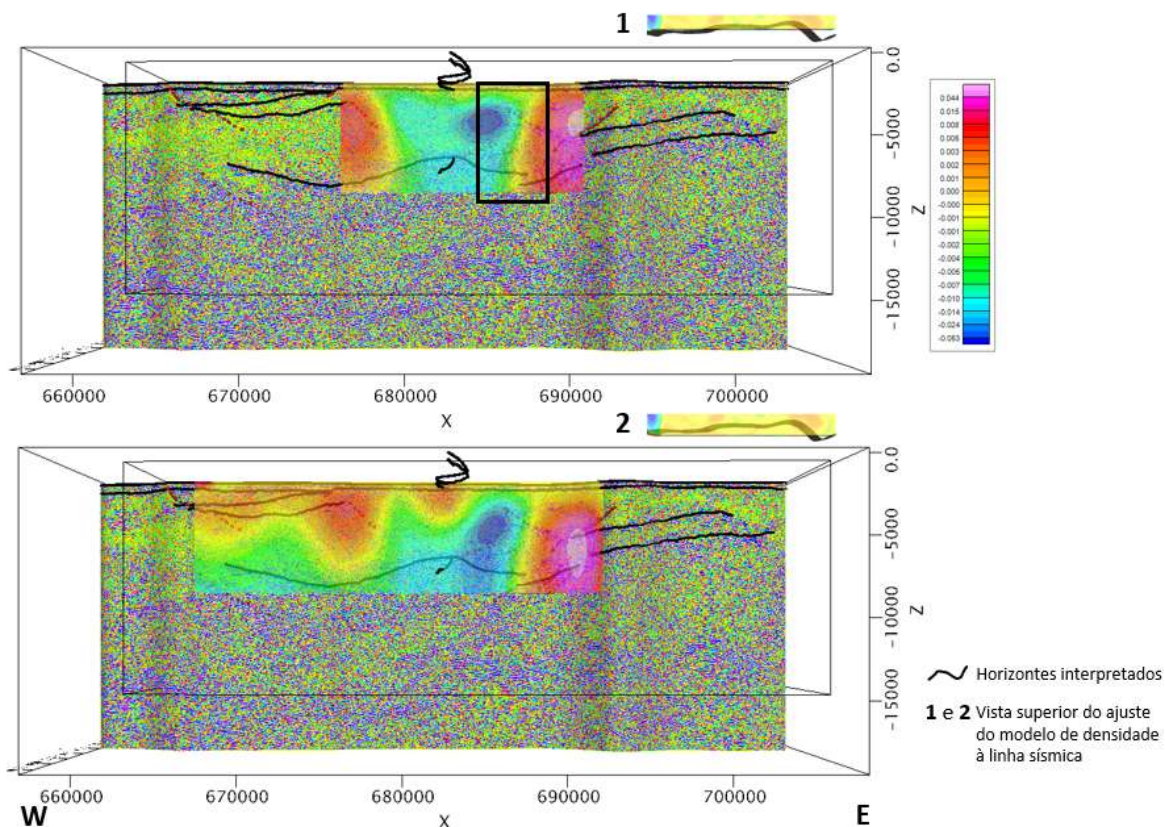


Figura 42 - Sobreposição do modelo de densidade com a linha sísmica 03GA-OD2. Imagens acima das seções mostram o ajuste da inversão com a posição da linha. Fonte: Autor.

A sobreposição do modelo de densidade à linha 03GA-OD2 (figura 42) foi feita em duas visualizações, pois a linha sísmica não é perfeitamente leste-oeste. As imagens acima das seções mostram o posicionamento da seção do modelo de acordo com a localização da sísmica. Com esta análise, é possível ver a coerência entre o contato das zonas de alta e baixa densidade, aproximadamente na coordenada 685000 E, e a falha com mergulho para oeste interpretada na sísmica e confirmada com o modelo geológico (polígono preto). Também se observa que a região de baixa densidade está compreendida entre duas anomalias de alta densidade, sendo que a do lado esquerdo, se encontra na direção do depósito de IOCG. Esta zona de baixa densidade se correlaciona com a interpretação do domo aparente, que segundo Wise (2015), pode estar relacionado ao controle estrutural do fluxo de fluidos hidrotermais. Entende-se que para percolação de fluidos são necessários falhamentos, estes por sua vez, podem reduzir a densidade relativa na rocha.

Além destas estruturas, também pode-se observar uma região de alta densidade a oeste da linha 03GA-OD2, que, segundo Wise (2015), se encontra sobre os refletores dos eventos *Gawler Range Volcanics* (figura 43), relacionados ao vulcanismo bimodal, logo, sendo coerente com a anomalia.

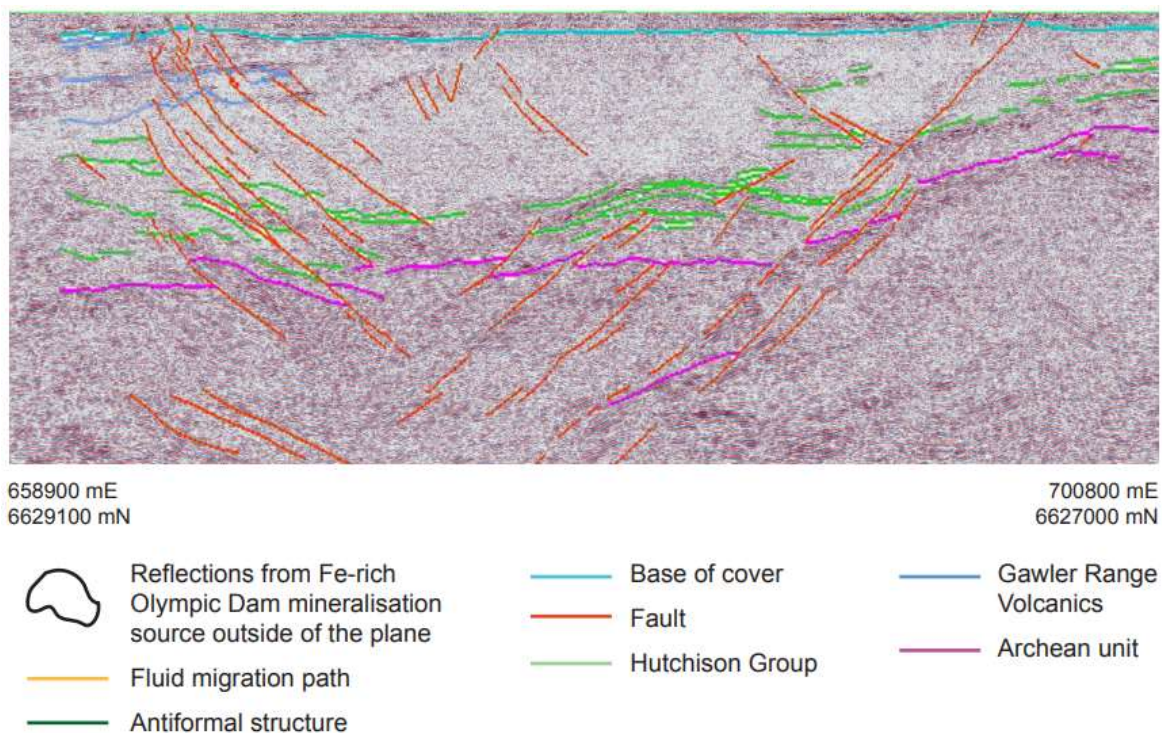


Figura 43 - Interpretação sísmica da linha 03GA-OD2. Modificado de Wise et al., 2015.

Seguindo o mesmo esquema de visualização, na figura 44 estão expostos os ajustes das seções do modelo de densidade para a linha sísmica 03GA-OD1, de direção aproximadamente norte-sul. Esta linha, como mencionado anteriormente, gera maior dificuldade para interpretação sísmica. No entanto, observam-se algumas correlações como a zona de alta densidade na direção do depósito de Olympic Dam, entre 6635000 N e 6630000 N, e a zona de baixa refletividade sísmica, e a região de baixa densidade coincidindo com o horizonte interpretado sobre o soerguimento (destacadas pelos polígonos A e B, respectivamente).

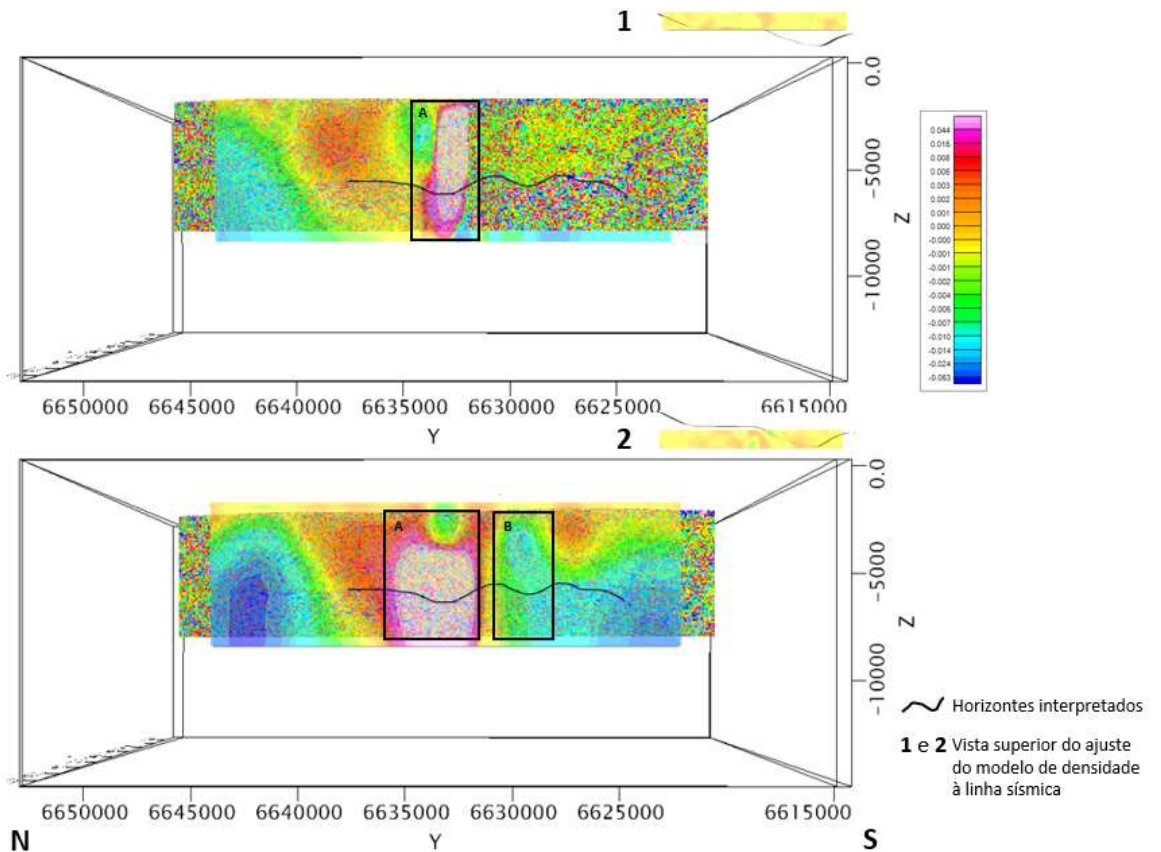


Figura 44 - Sobreposição do modelo de densidade com a linha sísmica 03GA-OD1. Imagens acima das seções mostram o ajuste da inversão com a posição da linha. Fonte: Autor.

Analisando as seções do modelo de susceptibilidade magnética sobre a linha 03GA-OD2 (figura 45), identifica-se a anomalia magnética rasa (polígono A), central a linha, observada também pela inversão gravimétrica, interpretada por Hall *et al.* (2018) como um corpo intrusivo de composição máfica a félsica, como um conduto vulcânico, dique ou soleira. Além disso, vê-se um afinamento da estrutura (identificado pela seta) relacionada ao depósito de IOCG de Olympic Dam, onde, nas seções próximas à linha leste-oeste, já se encontra com menores valores de susceptibilidade magnética e menor extensão.

Também é possível observar uma forte anomalia de alta susceptibilidade magnética na região do domo e falhamentos (polígono B), podendo estar relacionada à alteração hidrotermal e presença de zonas de enriquecimento de ferro.

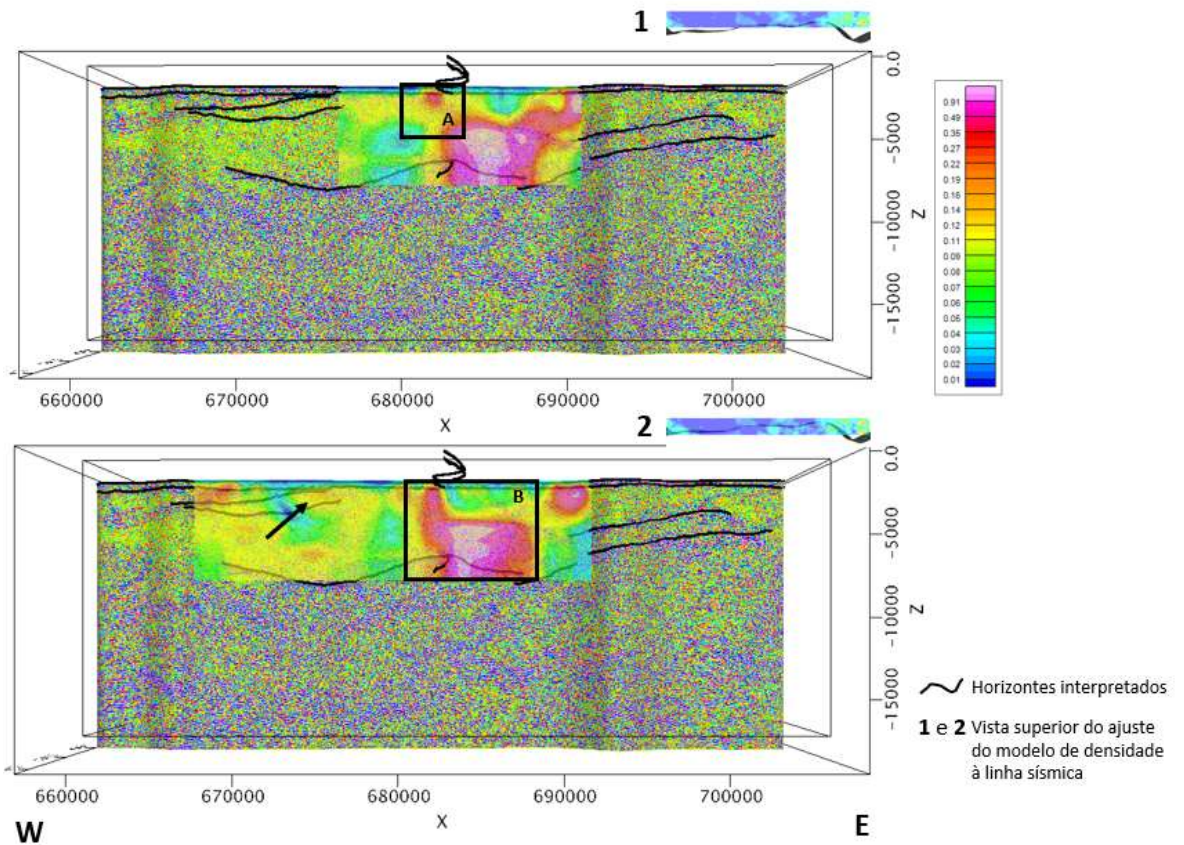


Figura 45 - Sobreposição do modelo de susceptibilidade magnética com a linha sísmica 03GA-OD2. Fonte: Autor.

Na direção norte-sul (figura 46; polígono A) ainda é possível observar uma forte magnetização na região de baixa refletividade, compatível com o depósito, se mostrando uma feição profunda e com coerência tridimensional em relação à linha 03GA-OD2. Observa-se também uma alta variação de susceptibilidade magnética ao longo da linha, possivelmente por se aproximar do limite da zona de alteração do granito Roxby Downs.

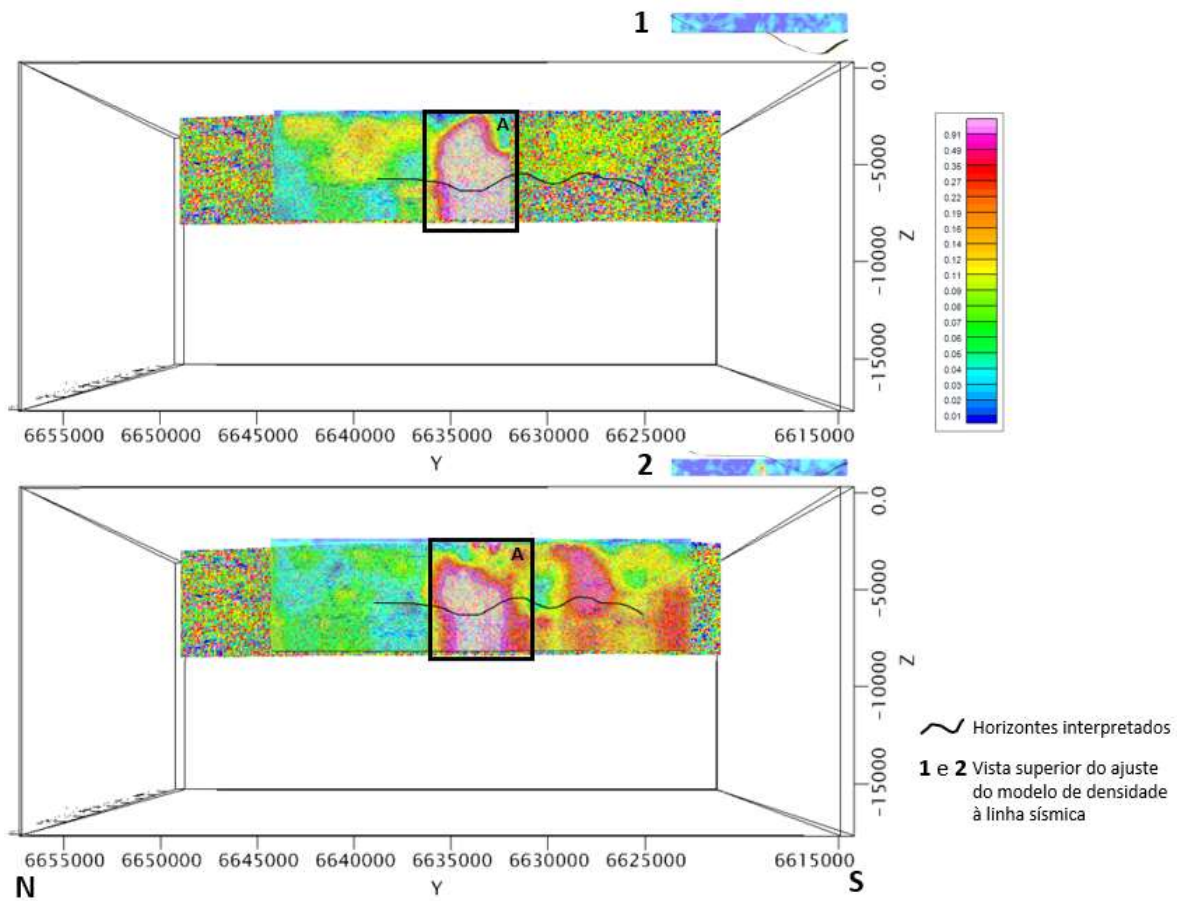


Figura 46 - Sobreposição do modelo de susceptibilidade magnética com a linha sísmica 03GA-OD1. Fonte: Autor.

Nas figuras 47 e 48, estão expostas a correlação do mapa geológico de mineralização de Ehrig, *et al.* (2012) e cortes em profundidade dos modelos de densidade e susceptibilidade magnética.

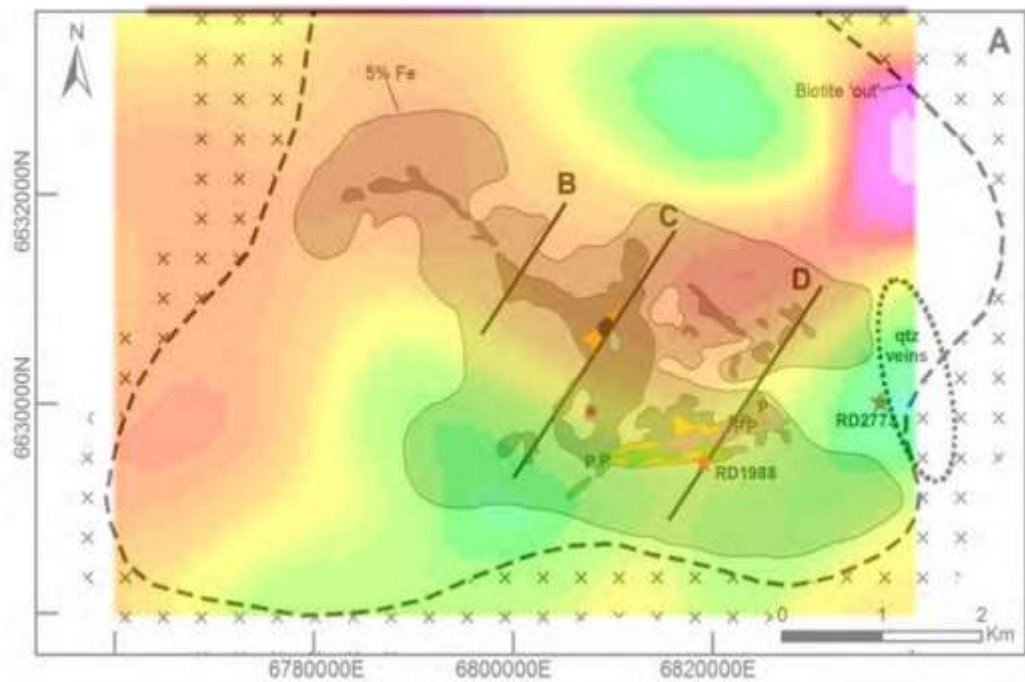


Figura 47 - Sobreposição do mapa geológico sobre o depósito de IOCG de Olympic Dam com o modelo de densidade. Fonte: Autor.

Ambos os modelos foram cortados em 400 m de profundidade, abaixo da base da cobertura sedimentar, e foram sobrepostos com o mapa geológico que contém informações acerca da região mineralizada, zona de alteração do granito Roxby Downs e região sem alterações do granito (figura 49).

Observando o modelo de densidade é possível distinguir uma mesma tendência em relação à zona mineralizada, no entanto, por se tratarem de respostas regionais não há grande correlação em relação às anomalias.

Já o modelo de susceptibilidade magnética, com um pouco mais de resolução, apresenta maior coerência entre as anomalias e o mapa, mostrando uma geometria bastante similar à exposta no mapa, apenas com uma inclinação mais acentuada NW-SE.

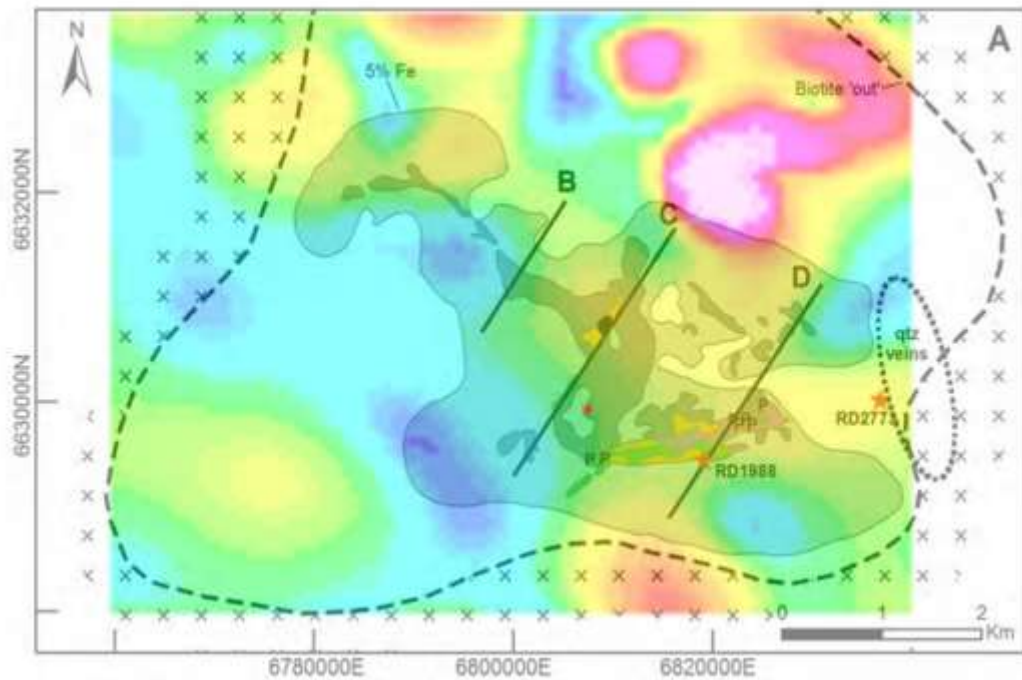


Figura 48 - Sobreposição do mapa geológico sobre o depósito de IOCG de Olympic Dam com o modelo de susceptibilidade magnética. Fonte: Autor.

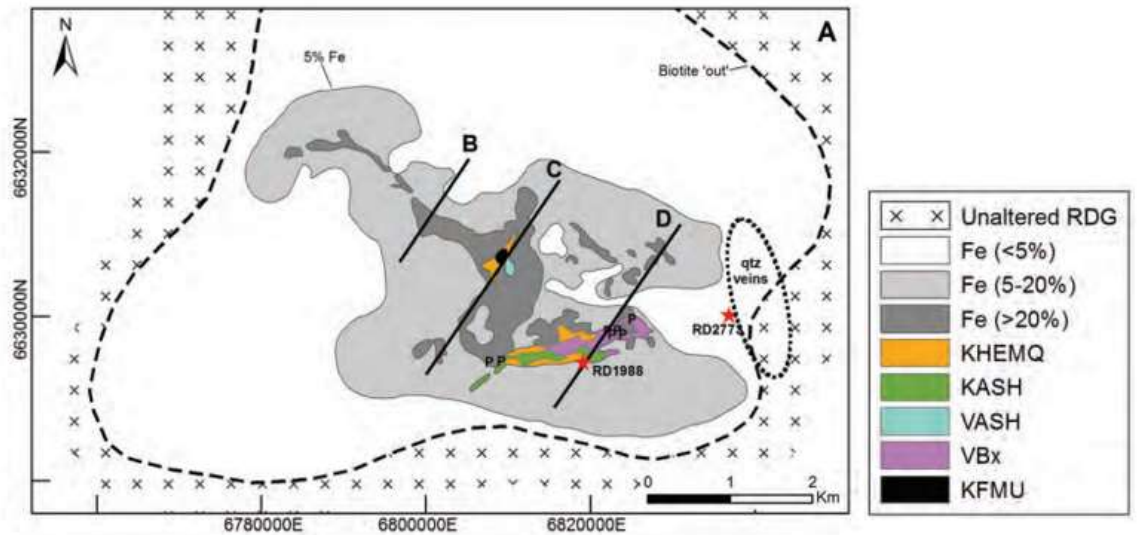


Figura 49 - Mapa geológico sobre o Complexo de Brechas do depósito de IOCG de Olympic Dam. Modificado de Ehrig, et al. (2012).

O mapa acima mostra o Complexo de Brechas, que contém o depósito de Olympic Dam, e sua distribuição de rochas, com a zona do granito Roxby Downs não-alterada, que forma os limites externos da zona de brechação e

metassomatismo, cujo primeiro contorno tem a concentração de 5% de Fe. Esta primeira zona é seguida pela região de brechas graníticas (5-20% Fe), brechas ricas em hematita (> 20% Fe), arenitos e lamitos laminados (KASH), arenitos ricos em hematita, lamitos e brecha-conglomerado (KHEMQ), lamitos finamente laminados com grande conteúdo de hematita (VASH), conglomerado vulcânico (KFMU) e brechas ricas em hematita com clastos vulcânicos félsicos porfíricos (VBx).

Ambas as linhas sísmicas cortam o limite sul e leste da zona alterada do granito como mostrado na figura 50 com as linhas destacadas. Com a intenção de verificar se o imageamento mostra alguma mudança na reflexão sísmica, as linhas foram analisadas localmente com a sobreposição do modelo de susceptibilidade magnética, já que possui maior detalhamento e por se tratar de zonas com diferentes concentrações de ferro, obtendo melhor resposta geofísica.

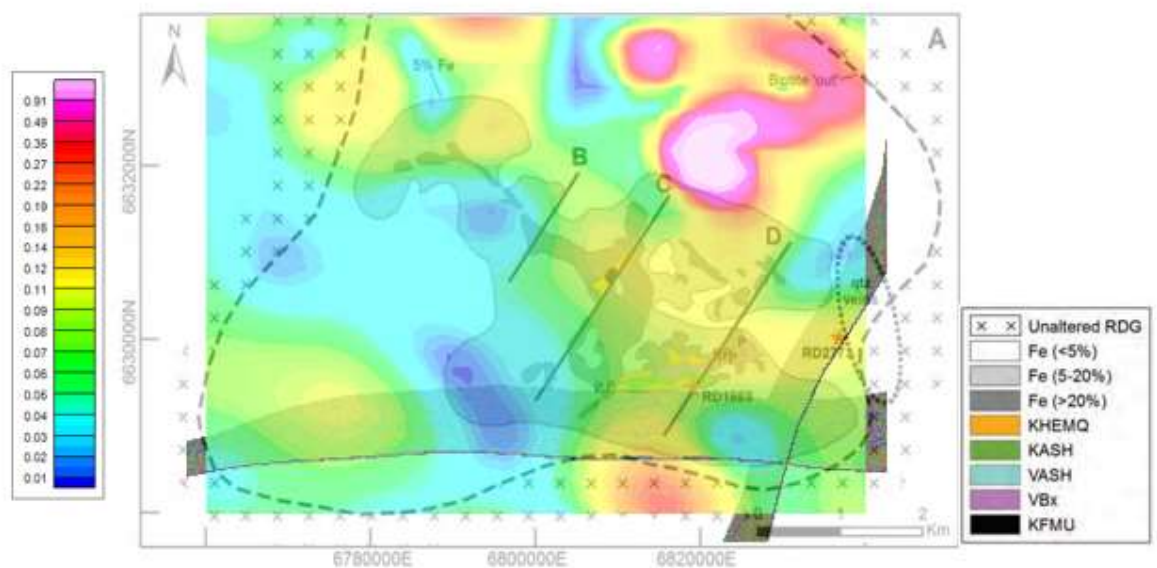


Figura 50 - Sobreposição do mapa geológico, com o modelo de susceptibilidade magnética e as duas linhas sísmicas. Fonte: Autor.

Na figura 51 abaixo estão expostas as seções leste-oeste, imagem de cima, e norte-sul, imagem de baixo. É possível ver uma zona de maior refletividade, identificada com o polígono A, coincidindo com a anomalia rasa, aproximadamente onde a linha 03GA-OD2 corta a zona de brechas graníticas (5-20% Fe). O restante da extensão da linha mostra valores de susceptibilidade magnética um pouco

menores, mantendo a coerência com a região com concentrações de 5% Fe e um contraste de impedância no limite superior da zona magnética (~600 m).

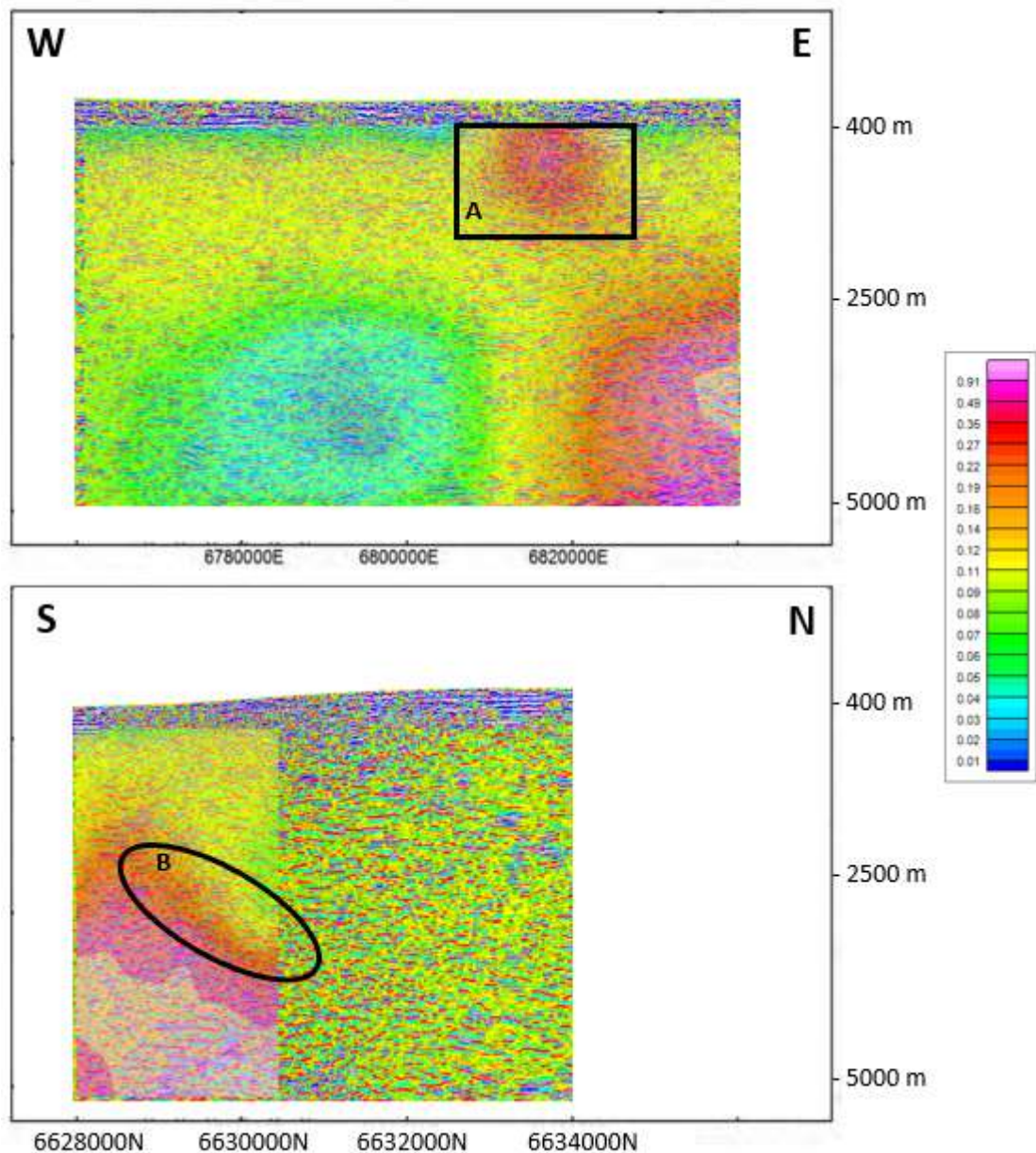


Figura 51 - Seções em profundidade na localização do mapa geológico com a sobreposição do modelo de susceptibilidade magnética com as linhas 03GA-OD2, acima, e 03GA-OD1, embaixo. Fonte: Autor.

A seção sobre a linha 03GA-OD1 também mostra coerência entre refletores e anomalia magnética. Onde na região de alta susceptibilidade é possível observar refletores com mergulho para norte similar ao da estrutura, destacados em B.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho mostra a contribuição da sísmica ao melhor entendimento da subsuperfície a nível regional, identificando importantes estruturas no contexto geológico do depósito de IOCG de Olympic Dam e correlacionando-se razoavelmente bem com as inversões gravimétrica e magnética.

O dado sísmico utilizado, embora tendo sido processado com ferramentas antigas e contemplado duas linhas regionais, mostrou refletores com bom nível de detalhe a poucas profundidades na região do mapa geológico. Maiores detalhes relacionados às mudanças de litologia dentro do depósito não foram observados, apenas uma zona de baixa refletividade. Talvez com um estudo de detalhe, com maior resolução, a sísmica demonstre eficiência e aplicabilidade para a prospecção de depósitos profundos, já que mesmo numa escala pequena, desempenhou seu papel para a correlação e validação das respostas obtidas através das inversões dos métodos potenciais.

Foi observado um contraste razoável de impedância entre algumas feições como os refletores do *Gawler Range Volcanics*, o contato da cobertura sedimentar com o granito Roxby Downs, reflexões relacionadas a intrusões como a identificada por Hall *et al.* (2018) e o domo aparente pertencente as rochas metassedimentares do Grupo Hutchison.

Estas estruturas também foram interpretadas nas inversões dos métodos potenciais, baseadas nas anomalias de densidade e susceptibilidade magnética. Sendo assim, foi possível gerar uma análise integrada com razoável coerência entre as informações geológicas e geofísicas contribuindo para o entendimento acerca do método sísmico aplicado à mineração. Embora este não tenha muito espaço na prospecção mineral, este trabalho mostra sua aplicabilidade prática, visando aprimorar seu uso para este fim.

7. REFERÊNCIAS

- AUSTRALIA, Geoscience. ABARE, 2010. **Australian energy resource assessment**, p. 358, 2010.
- BARNES, Arthur E. (Ed.). **Handbook of poststack seismic attributes**. Society of Exploration Geophysicists, 2016.
- DIREEN, Nicholas G.; LYONS, Patrick. Regional crustal setting of iron oxide Cu-Au mineral systems of the Olympic Dam region, South Australia: Insights from potential-field modeling. **Economic Geology**, v. 102, n. 8, p. 1397-1414, 2007.
- EHRIG, Kathy; MCPHIE, Jocelyn; KAMENETSKY, V. S. Geology and mineralogical zonation of the Olympic Dam iron oxide Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia. 2012.
- ELLIS, Robert G.; DE WET, Barry; MACLEOD, Ian N. Inversion of magnetic data for remanent and induced sources. **ASEG Extended Abstracts**, v. 2012, n. 1, p. 1-4, 2012.
- ELLIS, Robert; MACLEOD, Ian. Constrained voxel inversion using the Cartesian cut cell method. **ASEG Extended Abstracts**, v. 2013, n. 1, p. 1-4, 2013.
- HALL, James et al. Thermochronological history of the northern Olympic Domain of the Gawler Craton; correlations between cooling ages and mineralising systems. **ASEG Extended Abstracts**, v. 2018, n. 1, p. 1-4, 2018.
- HAND, Martin; REID, Anthony; JAGODZINSKI, Liz. Tectonic framework and evolution of the Gawler Craton, Southern Australia. **Economic Geology**, v. 102, n. 8, p. 1377-1395, 2007.
- HAYNES, Douglas W. et al. Olympic Dam ore genesis; a fluid-mixing model. **Economic Geology**, v. 90, n. 2, p. 281-307, 1995.
- JOHNSON, James P.; CROSS, Ken C. U-Pb geochronological constraints on the genesis of the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia. **Economic Geology**, v. 90, n. 5, p. 1046-1063, 1995.
- KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. **An introduction to geophysical exploration**. John Wiley & Sons, 2002.
- KOLA-OJO, Muyi. Using Similarity Attribute as a Quality Control Tool in 5D Interpolation.
- LAUGHLIN, K.; GAROSSINO, P.; PARTYKA, G. Spectral decomposition applied to 3D. **AAPG Explorer**, v. 23, n. 5, p. 28-31, 2002.

MALEHMIR, Alireza et al. 3D reflection seismic imaging for open-pit mine planning and deep exploration in the Kevitsa Ni-Cu-PGE deposit, northern Finland. **Geophysics**, v. 77, n. 5, p. WC95-WC108, 2012.

NETO, EBERTON RODRIGUES DE OLIVEIRA. CONTROLE DOS CORPOS ÍGNEOS NA DEPOSIÇÃO DE CORPOS TURBIDÍTICOS DO SANTONIANO NO CAMPO DE URUGUÁ, BACIA DE SANTOS.

OKAN, Evans Onojasun. **Feasibility of Using Regional Seismic Reflections Surveys to Discover Iron Oxide Copper Gold (IOCG) Deposits in the Gawler Craton, South Australia**. 2018. Tese de Doutorado. Curtin University.

ORESQUES, Naomi; EINAUDI, Marco T. Origin of rare earth element-enriched hematite breccias at the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, Roxby Downs, South Australia. **Economic Geology**, v. 85, n. 1, p. 1-28, 1990.

PARTYKA, Greg; GRIDLEY, James; LOPEZ, John. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization. **The leading edge**, v. 18, n. 3, p. 353-360, 1999.

REEVE, J. S. Olympic Dam copper-uranium-gold-silver deposit. **Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea**, p. 1009-1035, 1990.

REID, Anthony. The Olympic Cu-Au Province, Gawler Craton: a review of the lithospheric architecture, geodynamic setting, alteration systems, cover successions and prospectivity. **Minerals**, v. 9, n. 6, p. 371, 2019.

REYNOLDS, Lachlan J.; PORTER, T. M. Geology of the olympic dam Cu-U-Au-Ag-REE deposit. **Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective**, v. 1, p. 93-104, 2000.

REYNOLDS, Lachlan J. Geology of the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag-REE deposit. **MESA J.**, v. 23, p. 4-11, 2001.

SALISBURY, Matthew H.; MILKEREIT, Bernd; BLEEKER, Wouter. Seismic imaging of massive sulfide deposits; Part I, Rock properties. **Economic Geology**, v. 91, n. 5, p. 821-828, 1996.

SALISBURY, Matthew H. et al. Physical properties and seismic imaging of massive sulfides. **Geophysics**, v. 65, n. 6, p. 1882-1889, 2000.

SARHAN, Mohammad Abdelfattah. The efficiency of seismic attributes to differentiate between massive and non-massive carbonate successions for hydrocarbon exploration activity. **NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics**, v. 6, n. 2, p. 311-325, 2017.

SCHÖN, J. H., 1996, Physical properties of Rocks: Fundamentals and principle of petrophysics: in Klaus, H., and T. Sven, ed., Handbook of Geophysical Exploration, 18, Pergamon Press, London, 583.

SKIRROW, Roger G. et al. The geological framework, distribution and controls of Fe-oxide Cu-Au mineralisation in the Gawler Craton, South Australia. Part II-alteration and mineralisation. 2002.

SMITH, Jeremy Barrett. **Seismic reflection as a direct detector of gold mineralisation in the Carlin district, USA**. 2010. Tese de Doutorado. BSc thesis, Curtin University.

SWAIN, Greg et al. Provenance and tectonic development of the late Archaean Gawler Craton, Australia; U–Pb zircon, geochemical and Sm–Nd isotopic implications. **Precambrian Research**, v. 141, n. 3-4, p. 106-136, 2005.

TANER, M. Turhan. Seismic attributes. **CSEG recorder**, v. 26, n. 7, p. 48-56, 2001.

TINGDAHL, KRISTOFER M.; DE GROOT, PAUL FM. Post-stack dip-and azimuth processing. **Journal of Seismic Exploration**, v. 12, n. 2, p. 113-126, 2003.

UROSEVIC, M.; STOLTZ, N.; MASSEY, S. Seismic Exploration for Gold in a Hard Rock Environment–Yilgarn Craton, Western Australia. In: **67th EAGE Conference & Exhibition**. European Association of Geoscientists & Engineers, 2005. p. cp-1-00176.

WILLIAMS, Patrick J. et al. Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin. **Economic Geology**, p. 371-405, 2005.

WISE, Tom et al. Olympic Dam seismic revisited: reprocessing of deep crustal seismic data using partially preserved amplitude processing. **ASEG Extended Abstracts**, v. 2016, n. 1, p. 1-7, 2016.

WITHERLY, Ken. The evolution of minerals exploration over 60 years and the imperative to explore undercover. **The Leading Edge**, v. 31, n. 3, p. 292-295, 2012.

