

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

NICOLAS RODRIGUES HISPAGNOL

**UTILIZAÇÃO DO MODELO GEOPOTENCIAL SGG-UGM-2 PARA
CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DA ELEVAÇÃO DO RIO
GRANDE**

Orientador: Prof. Dr. Everton Frigo

Coorientador: Prof. Dr. Eder Cassola Molina

Caçapava do Sul – RS

2022

NICOLAS RODRIGUES HISPAGNOL

**UTILIZAÇÃO DO MODELO GEOPOTENCIAL SGG-UGM-2 PARA
CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DA ELEVAÇÃO DO RIO
GRANDE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geofísica da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Geofísica

Orientador: Prof. Dr. Everton Frigo

Coorientador: Prof. Dr. Eder Cassola Molina

Caçapava do Sul – RS

2022

H638u Hispagnol, Nicolas Rodrigues
UTILIZAÇÃO DO MODELO GEOPOTENCIAL SGG-UGM-2 PARA
CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DA ELEVAÇÃO DO RIO GRANDE /
Nicolas Rodrigues Hispagnol.
79 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do
Pampa, GEOFÍSICA, 2022.
"Orientação: Everton Frigo".

1. Gravimetria por Satélite. 2. Modelos Geopotenciais. 3. Elevação do
Rio Grande. I. Título.

NICOLAS RODRIGUES HISPAGNOL

UTILIZAÇÃO DO MODELO GEOPOTENCIAL SGG-UGM-2 PARA CARACTERIZAÇÃO GRAVIMÉTRICA DA ELEVAÇÃO DO RIO GRANDE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geofísica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geofísica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 17 de março de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Everton Frigo (Orientador)
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Maximilian Fries
UNIPAMPA

Dra. Renata Regina Constantino Barrella
LDEO - Columbia University



Assinado eletronicamente por **EVERTON FRIGO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/06/2022, às 13:26, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAXIMILIAN FRIES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/07/2022, às 13:19, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0770398** e o código CRC **B8D04804**.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Everton Frigo, deixo meu agradecimento especial por todo o suporte e apoio no pouco tempo que lhe coube, pelos seus incentivos, correções e principalmente por acreditar e aceitar conduzir este meu trabalho de pesquisa.

Ao meu coorientador, o Prof. Dr. Eder Cassola Molina, por todos os auxílios, ensinamentos, apoio e principalmente pela dedicação de seu escasso tempo a este dedicado.

Aos meus pais: Selma Rodrigues da Silva Hispagnol e Edson Augusto Hispagnol, por terem me ajudado nesses 4 anos e por todo o amor com incentivo e apoio.

A Universidade Federal do Pampa e ao Programa de Desenvolvimento Acadêmico (PDA) pela bolsa de pesquisa (Edital 40/2021).

A todos os meus professores do curso de Geofísica da Universidade Federal do Pampa pela excelência na qualidade de ensino. Em destaque aos professores: Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima e Dr. Maximilian Fries pelo apoio e ensinamentos.

Não esquecendo meus amigos pelas risadas e apoio mútuo: Ana Naujokat, Douglas Vinícius, Jonas Oliveira, Welynton Araujo Ramos, Ingrid Herzog, Lara Beatriz Mota e Pablo Matos Soares. A todos os outros colegas do curso de graduação por sempre demonstrarem enorme espírito colaborativo que indiretamente me ajudaram na minha graduação.

ABSTRACT

Gravimetry is the branch of geophysics that uses the elements of the gravity field to study the Earth. The configuration of the gravity field results mainly from the density variations of the constituents of the Earth's interior. With technological advances, it is now possible to carry out gravimetric studies using satellite data in areas considered difficult to access. One such region that is increasingly attracting the interest of researchers is the Rio Grande Rise (ERG), which is located approximately 870 km off the southeast coast of Brazil. The structure of the ERG is composed of seamounts, guyots, aseismic ridges and morphological elevations formed from magmatic events, called volcanic buildings. Studies focused on investigating the geological formation of the ERG conducted in recent decades have indicated the existence of favorable and permissive areas for cobalt-rich crust formation, ferromanganese crusts, and manganese nodules. In this work, the geological features present in the ERG were investigated from air-gravity and Bouguer anomaly data calculated from the SGG-UGM-2 geopotential model. The enhancement filters First Vertical Derivative (1°DV), Analytical Signal Amplitude (ASA), Regional/Residual Separation and, directional cosine were applied to these data. The results obtained allowed locating and defining the geometries of volcanic buildings and gravimetric lineaments. Furthermore, it was possible to divide the identified volcanic buildings into three groups and associate these with the ERG formation stages. Furthermore, for specific portions of the ERG, for which a greater amount of geophysical and geological information is available, it was possible to indicate promising areas for further mineral prospecting studies.

Keywords: Sattelital gravity; Geopoetencial model; Rio Grande Rise.

RESUMO

A gravimetria é o ramo da geofísica que utiliza os elementos do campo da gravidade para o estudo da Terra. A configuração do campo de gravidade resulta majoritariamente das variações de densidade dos constituintes do interior terrestre. Com o avanço tecnológico, atualmente é possível a realização de estudos gravimétricos utilizando dados de satélites em áreas consideradas como difícil acesso. Uma dessas regiões que vem despertando cada vez mais o interesse dos pesquisadores, é a Elevação do Rio Grande (ERG), que está localizada aproximadamente a 870 km da costa sudeste do Brasil. A estrutura da ERG é composta por montes submarinos, guyots, cordilheiras assísmicas e elevações morfológicas formadas a partir de eventos magmáticos, denominadas de edifícios vulcânicos. Estudos focados na investigação da formação geológica da ERG realizados nas últimas décadas indicaram a existência de áreas favoráveis e permissivas para formação de crosta rica em cobalto, crostas de ferromanganês e nódulos de manganês. Neste trabalho, as feições geológicas presentes na ERG foram investigadas a partir de dados de anomalias de gravidade ar-livre e Bouguer calculados a partir do modelo geopotencial SGG-UGM-2. A estes dados foram aplicados os filtros de realce Primeira Derivada Vertical (1° DV), Amplitude do Sinal Analítico (ASA), Separação regional/residual e, cosseno direcional. Os resultados obtidos permitiram localizar e definir as geometrias dos edifícios vulcânicos e lineamentos gravimétricos. Além disso, foi possível dividir os edifícios vulcânicos identificados em três grupos e associar estes aos estágios de formação da ERG. Além disso, para porções específicas da ERG, para as quais está disponível uma quantidade maior de informações geofísicas e geológicas, foi possível indicar áreas promissoras para o aprofundamento de estudos de prospecção mineral.

Palavras-Chave: Gravimetria por Satélite; Modelos Geopotenciais; Elevação do Rio Grande.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa apresentando feições estruturais e unidades geomorfológicas no Atlântico Sul próximos à costa brasileira e próximos à dorsal meso-oceânica, com destaque para a delimitação da ERG (polígono vermelho).....	12
Figura 2 - Diagrama de formação de nódulos de Fe-Mn hidrogenéticos e diagenéticos correlacionados com a formação de crostas de Fe-Mn hidrogenética	15
Figura 3 - Diagrama de formação de crostas de Fe-Mn hidrogenética	15
Figura 4 - Mapa de espessura sedimentar na área de estudo da ERG, unidades geomorfológicas e estruturas demarcadas. As siglas representam: Almirante Leite Bank (ALB); Alpha Crucis Seamount (ACS); Beta Crucis Seamount (BCS); Bigarella Hill (BH); Bigarella Seamount (BS); Delta Crucis Seamount (DCS); Epsilon Crucis (ECS); Gamma Crucis Seamount (GCS); Griep Seamount (GS); Hunter Channel (HC); Kazanskiy Seamount (KS); Rio Grande Abyssal Plain (RGAP); Rio Grande Gap (RGG); Sirius Guyot (SG); Sao Paulo Channel (SPC); Sao Paulo Escarpment (SPE); Sao Paulo Ridge (SPR); Vital de Oliveira Hill (VOH).....	17
Figura 5 - Mapa da idade da crosta na área de estudo da ERG, unidades geomorfológicas e estruturas demarcadas	18
Figura 6 - Mapa de localização das áreas favoráveis e permissivas para crosta de ferro-manganês, nódulos de manganês e crosta rica em cobalto na ERG, com as estruturas demarcadas. As siglas representam: Áreas favoráveis para formação da crosta de ferromanganês (AFCF); Áreas favoráveis para formação de nódulos de manganês (AFNM); Áreas permissivas para formação de crosta rica em cobalto (APFCC) e Áreas permissivas para formação de nódulos de manganês (APFNM)..	19
Figura 7 - Localização das áreas de estudo 1 e 2, principais feições da ERG destacadas, com as estruturas demarcadas.....	20
Figura 8 - Apresentação da área de estudo 1, com as estruturas demarcadas	21
Figura 9 - Testemunhos do ODP (ODP0103VJ, ODP00230 e ODP007861), localizados na área de estudo 1	21
Figura 10 - Perfis sísmicos de reflexão (WSA-10, WSA-11, WSA-13) interpretados por Praxedes (2019).....	22
Figura 11 - Apresentação da área de estudo 2, com as estruturas demarcadas	22
Figura 12 - Testemunho do ODP (ODP000220) localizado na área de estudo 2.....	23

Figura 13 - Relação entre as superfícies utilizadas para representar a forma da Terra	24
Figura 14 - Fluxograma de processamento dos dados	30
Figura 15 - Mapa da ΔG_A na área de estudo regional.....	31
Figura 16 - Mapa da ΔG_A positiva na área de estudo regional.....	32
Figura 17 - Mapa da ΔG_A negativa na área de estudo regional	32
Figura 18 - Mapa da ΔG_A positiva na área de estudo 1	33
Figura 19 - Mapa da ΔG_A positiva na área de estudo 2	34
Figura 20 - Mapa da $1^\circ DV_ \Delta G_A$ na área de estudo regional	35
Figura 21 - Mapa da $1^\circ DV_ \Delta G_A$ positiva na área de estudo regional	35
Figura 22 - Mapa da $1^\circ DV_ \Delta G_A$ negativa na área de estudo regional.....	36
Figura 23 - Mapa da $1^\circ DV_ \Delta G_A$ na área de estudo 1	37
Figura 24 - Mapa da $1^\circ DV_ \Delta G_A$ na área de estudo 2.....	37
Figura 25 - Mapa da $ASA_ \Delta G_A$ na área de estudo regional.....	38
Figura 26 - Mapa da $ASA_ \Delta G_A$ na área de estudo 1	39
Figura 27 - Mapa da $ASA_ \Delta G_A$ na área de estudo 2	39
Figura 28 - Mapa da ΔG_{BG} na área de estudo regional.....	40
Figura 29 - Mapa da $1 \Delta G_{BG}$ na área de estudo 1.....	41
Figura 30 - Mapa da $1 \Delta G_{BG}$ na área de estudo 2.....	41
Figura 31 - Espectro de potência radial dos dados de ΔG_{BG}	42
Figura 32 - Espectro de potência radial dos dados de ΔG_{BG} da área de estudo 1	43
Figura 33 - Espectro de potência radial dos dados de ΔG_{BG} da área de estudo 2....	44
Figura 34 - Mapa da $\Delta G_{BG_Residual}$ na área de estudo regional.....	45
Figura 35 - Mapa da $\Delta G_{BG_Residual}$ positiva na área de estudo regional.....	45
Figura 36 - Mapa da $\Delta G_{BG_Residual}$ negativa na área de estudo regional.....	46
Figura 37 - Mapa da $\Delta G_{BG_Residual}$ na área de estudo 1.....	46
Figura 38 - Mapa da $\Delta G_{BG_Residual}$ na área de estudo 2.....	47
Figura 39 - Mapa da localização e geometria dos edifícios vulcânicos sugeridos por Kim & Wessel (2011) (indicado pelos triangulos amarelos) e por este trabalho (indicado pelos triangulos vermelhos) com destaque aos lineamentos e polígonos indicando três grupos principais de edifícios vulcânicos	48
Figura 40 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da ΔG_A na área de estudo regional separados por direções preferenciais dos lineamentos da ΔG_A	50

Figura 41 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da $1^{\circ}DV_ \Delta G_A$ na área de estudo regional separados por direções preferenciais dos lineamentos da $1^{\circ}DV_ \Delta G_A$	51
Figura 42 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da $\Delta G_{BG_}Residual$ na área de estudo regional separados por direções preferenciais dos lineamentos da $\Delta G_{BG_}Residual$	52
Figura 43 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da ΔG_A na área de estudo 1 com o diagrama de roseta com as direções preferenciais dos lineamentos da ΔG_A	54
Figura 44 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da ΔG_A na área de estudo 2 com o diagrama de roseta com as direções preferenciais dos lineamentos da ΔG_A	55
Figura 45 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da $1^{\circ}DV_ \Delta G_A$ na área de estudo 1 com o diagrama de roseta com as direções preferenciais dos lineamentos da $1^{\circ}DV_ \Delta G_A$	56
Figura 46 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da $1^{\circ}DV_ \Delta G_A$ na área de estudo 2 com o diagrama de roseta com as direções preferenciais dos lineamentos da $1^{\circ}DV_ \Delta G_A$	57
Figura 47 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da $\Delta G_{BG_}Residual$ na área de estudo 1 com o diagrama de roseta com as direções preferenciais dos lineamentos da $\Delta G_{BG_}Residual$	58
Figura 48 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da $\Delta G_{BG_}Residual$ na área de estudo 2 com o diagrama de roseta com as direções preferenciais dos lineamentos da $\Delta G_{BG_}Residual$	59
Figura 49 - Mapa geofísico/estrutural das direções preferenciais dos lineamentos extraídos da $1^{\circ}DV_ \Delta G_A$	61
Figura 50 - Mapa geofísico/estrutural das direções preferenciais dos lineamentos extraídos da $\Delta G_{BG_}Residual$	62
Figura 51 - Mapa geofísico/estrutural dos lineamentos extraídos de fontes anômalas rasas de direção leste-oeste	63
Figura 52 - Mapa geofísico/estrutural dos lineamentos extraídos de fontes anômalas rasas de direção nordeste-sudoeste	64
Figura 53 - Mapa do cosseno direcional da ΔG_A em 45°	65
Figura 54 - Mapa do cosseno direcional da ΔG_{BG} em 45°	65
Figura 55 - Mapa do cosseno direcional da $DV_ \Delta G_A$ cosseno (45°).....	66
Figura 56 - Mapa do cosseno direcional da $DV_ \Delta G_{BG}$ cosseno (45°).....	66
Figura 57 - Mapa geofísico/estrutural dos lineamentos extraídos de fontes anômalas rasas de direção noroeste-sudeste	67

Figura 58 - Feições anômalas demarcadas na área 1 sobrepostas as áreas favoráveis áreas favoráveis para formação de crosta de ferromanganês e com os lineamentos gerados por fontes anômalas rasas68

Figura 59 - Feições anômalas demarcadas na área 2 sobrepostas as ás áreas favoráveis áreas favoráveis para formação de crosta de ferromanganês e com os lineamentos gerados por fontes anômalas rasas69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de informações do modelo geopotencial utilizado. A = altimetria, S = satélite e G = dados terrestres	27
Tabela 2 - Tabela das direções preferenciais juntas dos lineamentos de ΔG_A , $1^\circ DV_{\Delta G_A}$ e $\Delta G_{BG_Residual}$ na escala regional	53
Tabela 3 - Tabela das direções preferenciais juntas dos lineamentos de ΔG_A , $1^\circ DV_{\Delta G_A}$ e $\Delta G_{BG_Residual}$ na área de estudo 1 e 2	60

LISTA DE ABREVIATURAS

$1^{\circ}DV_ \Delta G_A$ – Primeira derivada vertical da anomalia ar-livre

ΔG_A – Anomalia ar-livre

ΔG_{BG} – Anomalia Bouguer

$\Delta G_A_ \text{cosseno}$ – Cosseno direcional da anomalia ar-livre

$\Delta G_{BG}_ \text{cosseno}$ – Cosseno direcional da anomalia Bouguer

$\Delta G_{BG}_ \text{Residual}$ – Anomalia Bouguer residual

AFCF – Áreas favoráveis para formação de crosta de ferromanganês

AFNM – Áreas favoráveis para formação de nódulos de manganês

APFCC – Áreas permissivas para formação de crosta rica em cobalto

APFNM – Áreas permissivas para formação de nódulos de manganês

ASA - Amplitude do Sinal Analítico

$ASA_ \Delta G_A$ – Amplitude do sinal analítico da anomalia ar-livre

DV – Derivada vertical

$DV_ \Delta G_A_ \text{cosseno}$ – Derivada direcional do cosseno direcional da anomalia ar-livre

$DV_ \Delta G_{BG}_ \text{cosseno}$ – Derivada direcional do cosseno direcional da anomalia Bouguer

ERG - Elevação do Rio Grande

FFT - Transformada Rápida de Fourier

GOCE – *Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*

GRACE - *Gravity Recovery and Climate Experiment*

ICGEM - *International Center for Global Gravity Field Models*

LERG - Leste Elevação do Rio Grande

LIP – Grande Província Ígnea

OERG - Oeste Elevação do Rio Grande

SSH - Altura da superfície do mar

SSG - Gradientes da altura da superfície do mar

LISTA DE SIGLAS

ACS - *Alpha Crucis Seamount*
ALB - *Almirante Leite Bank*
BCS - *Beta Crucis Seamount*
BH - *Bigarella Hill*
BS - *Bigarella Seamount*
CPRM – Serviço Geológico do Brasil
DCS - *Delta Crucis Seamount*
DSDP – *Deep-Sea Drilling Project*
ECS - *Epsilon Crucis*
GCS - *Gamma Crucis Seamount*
GS - *Griep Seamount*
HC - *Hunter Channel*
KS - *Kazanskiy Seamount*
ODP – *Ocean Drilling Project*
RGAP - *Rio Grande Abyssal Plain*
RGG - *Rio Grande Gap*
SG - *Sirius Guyot*
SPC - *São Paulo Channel*
SPE – *São Paulo Escarpment*
SPR – *São Paulo Ridge*
VOH – *Vital de Oliveira Hill*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	10
2.1. Objetivo geral	10
2.2. Objetivos específicos	11
3. REGIÃO DE ESTUDO	11
3.1. Localização e contexto geológico	11
3.2. Áreas de interesse para exploração mineral na região da ERG.....	14
3.3. Definição de áreas para um estudo mais completo	19
4. CONCEITOS BÁSICOS DE GRAVIMETRIA	23
4.1. Anomalia da gravidade	23
4.2. ANOMALIA AR-LIVRE	24
4.3. Anomalia Bouguer	25
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
5.1. Materiais.....	26
5.1.1. Dados de batimetria regional.....	26
5.1.2. Valores de anomalias ar-livre e Bouguer a partir de modelos geopotenciais.....	26
5.1.3. Modelo geopotencial SGG-UGM-2	27
5.2. Métodos	28
5.2.1. Caracterização gravimétrica da ERG a partir de dados de satélites.....	28
5.2.2. Separação regional/residual	28
5.2.3. Primeira Derivada Vertical (1°DV).....	28
5.2.4. Cosseno direcional.....	29
5.2.5. Amplitude do Sinal Analítico (ASA)	29
5.3. Fluxo de processamento	29
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30

6.1. Anomalia ar-livre	30
6.2. Primeira derivada vertical da anomalia ar-livre	34
6.3. Amplitude do sinal analítico da anomalia ar-livre	38
6.4. Anomalia Bouguer simples	40
6.5. Anomalia Bouguer residual.....	41
6.6. Delimitação dos edifícios vulcânicos.....	47
6.7. Lineamentos extraídos regionalmente.....	49
6.8. Lineamentos extraídos da área de estudo 1 e 2.....	53
7. INTERPRETAÇÕES QUALITATIVAS	60
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
ANEXO A – Reconstrução Paleogeográfica do Atlântico Sul	76

1. INTRODUÇÃO

A busca pela determinação precisa da forma da Terra, através da modelagem de sua superfície, sempre foi um dos principais temas de interesse dos geocientistas (SOUSA & GUIMARÃES, 2017). Algumas das mais relevantes contribuições para esta temática de pesquisa são advindas da gravimetria. A gravimetria é o ramo da geofísica que utiliza os elementos do campo da gravidade para o estudo da Terra. A configuração do campo de gravidade resulta majoritariamente das variações de densidade dos constituintes do interior terrestre. Tradicionalmente, os estudos gravimétricos na superfície terrestre eram realizados com a finalidade de obter informações geológicas e de prospecção mineral em escala local. Em razão do desenvolvimento tecnológico ocorrido nas últimas décadas, principalmente com o aumento da disponibilização de dados coletados por satélites, os estudos gravimétricos passaram a ser realizados em áreas que anteriormente eram inacessíveis.

Uma dessas regiões, que vem despertando cada vez mais o interesse dos pesquisadores, é a Elevação do Rio Grande (ERG), localizada a aproximadamente a 870 km da costa sudeste do Brasil, classificada como uma grande província ígnea (LIP). A ERG faz parte do sistema Rio Grande de montes submarinos e cordilheiras assísmicas no Atlântico Sul (BARKER, 1979, 1983), cujas feições geomorfológicas principais são conhecidas desde as primeiras sondagens batimétricas do início do século XX (ZENK e al., 1993). Informações geológicas mais detalhadas foram obtidas a partir de perfis sísmicos de reflexão (BARKER et al., 1983). Os primeiros estudos realizados na região da ERG visavam o entendimento de sua origem e evolução geológica. Após décadas de investigações Gamboa e Rabinowitz (1984) sugeriram que a porção ocidental da ERG foi afetada por um magmatismo alcalino durante o Eoceno ($\approx 54 - 34$ Ma). O evento magmático em questão apresentou turbiditos e deslizamentos indicando uma nova fase de deposição (GAMBOA e RABINOWITZ, *op. cit.*). A evolução tecnológica auxiliou as interpretações, principalmente com a utilização de dados satelitais, como no caso de Ussami et al. (2013) que utilizaram dados do modelo digital de batimetria e dados de anomalia ar-livre calculadas a partir do modelo geopotencial *Earth Gravitational Model 2008* (EGM2008) (PAVLIS et al., 2008), apresentando a hipótese que a ERG teria sido construída por dois eventos magmáticos. Praxedes (2020) apresentou interpretações sismoestratigráficas que

indicaram eventos tectônicos distensionais no Cretáceo Superior e eventos vulcânicos.

Nos últimos anos, os resultados das análises da grande quantidade de informações obtidas nas investigações geológicas despertaram o interesse dos pesquisadores pela possível presença de riquezas minerais com potencial econômico na região da ERG. Impulsionadas desde 2009 por pesquisas realizadas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) de prospecção e datação de rochas continentais na ERG, as pesquisas apresentaram a ocorrência de gálio, nióbio, telúrio e selênio (SANTOS et al, 2019). Outro fator importante foram os dados globais de Hein et al. (2013) e Petersen et al. (2016) que apresentaram áreas favoráveis e permissivas para a ocorrência de crosta de ferromanganês, nódulos de manganês e crosta rica em cobalto nos oceanos, apresentando áreas permissivas para formação da crosta rica em cobalto e áreas favoráveis para formação da crosta de ferro manganês na região da ERG.

Apesar dos vários estudos realizados nas últimas décadas, a caracterização geológica e geofísica da ERG ainda carece de informações de subsuperfície como os limites e as estruturas associadas. Este tipo de informação pode ser inferido através de estudos gravimétricos, que são baseados em dados de anomalias de gravidade algumas vezes calculadas a partir de modelos geopotenciais, construídos a partir de dados terrestres, marinhos, aerotransportados e altimétricos adquiridos por satélites. Estudos anteriores já demonstraram que este tipo de investigação pode produzir resultados interessantes tanto para a caracterização gravimétrica de diferentes litologias (PAL et al., 2015) quanto para a indicação de áreas mais específicas para a localização de depósitos minerais (BRAITENBERG, 2015).

O presente estudo utilizará dados gravimétricos de anomalia ar-livre e Anomalia Bouguer, obtidos a partir do modelo geopotencial SGG-UGM-2 (LIANG et al., 2020), com a finalidade de caracterizar gravimetricamente a ERG.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é caracterizar gravimetricamente a Elevação do Rio Grande a nível regional utilizando modelos geopotenciais e, a nível local, para áreas mais específicas.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Localizar e definir as geometrias dos edifícios vulcânicos e lineamentos gravimétricos presentes na ERG;
- Correlacionar os edifícios vulcânicos identificados com as etapas da formação geológica da ERG;
- Indicar regiões promissoras para o aprofundamento de estudos de prospecção mineral.

3. REGIÃO DE ESTUDO

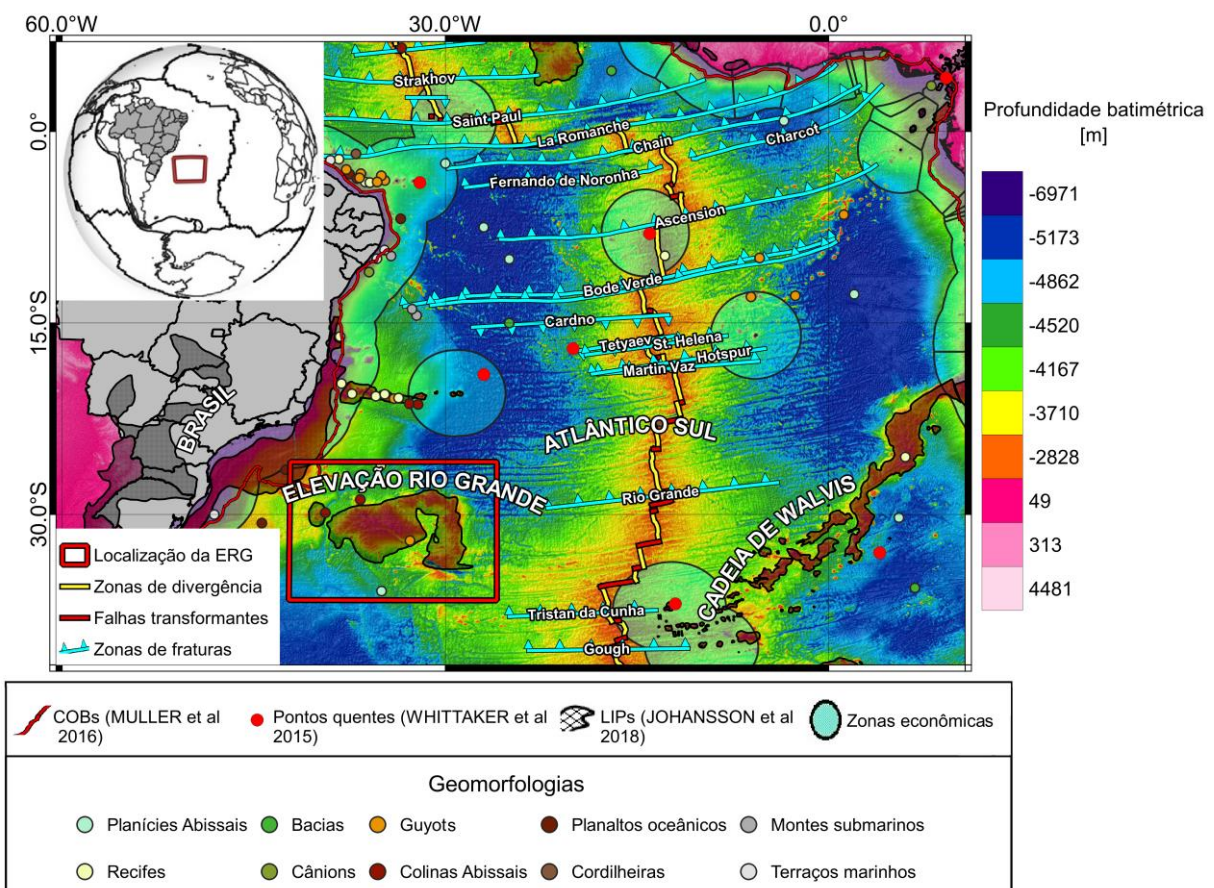
3.1. Localização e contexto geológico

O alto topográfico no fundo do Atlântico Sul, caracterizado por profundidades batimétricas entre -436 e -5923 m, que atualmente é denominado Elevação do Rio Grande (Figura 1), é visível em mapas batimétricos desde a publicação da segunda edição da *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO), ocorrida no início da década de 1930. Os resultados dos levantamentos realizados entre 1925 e 1927 a bordo do navio alemão Meteor tornaram a morfologia da ERG conhecida em mais detalhe (ZENK et al., 1993). A disponibilização de uma quantidade ainda maior de dados batimétricos e outros dados geológicos e geofísicos nos anos subsequentes deu início a um intenso debate acerca do processo geológico que resultou na formação da ERG.

Diversos autores no período de 1963 a 1971 (por exemplo, WILSON, 1963, 1965; DIETZ & HOLDEN, 1970; MORGAN, 1971) sugeriram que a ERG poderia ter sido formada à medida que as placas Sul-Americana e Africana se moviam para longe de um *hotspot*, cuja localização estaria na região central do Atlântico Sul. Posteriormente, outros autores começaram a sugerir novas hipóteses para a origem

da ERG. Le Pichon e Hayes (1971) sugeriram que uma crista transversal gerada ao longo de uma fratura foi a responsável pela criação da parte leste-oeste da ERG. Ainda, de acordo com Le Pichon e Hayes (*op. cit.*), a parte norte-sul teria se formado em decorrência de um possível rearranjo durante a separação do supercontinente Gondwana (≈ 140 a 120 Ma) e consequente abertura do Atlântico Sul. Kumar (1979) sugeriu que a ERG teria sido formada por conta de um extenso vulcanismo que teria ocorrido entre 100 a 80 Ma, em uma região no meio do Oceano Atlântico, delimitada por zonas de fraturas.

Figura 1 - Mapa apresentando feições estruturais e unidades geomorfológicas no Atlântico Sul próximos à costa brasileira e próximos à dorsal meso-oceânica, com destaque para a delimitação da ERG (polígono vermelho)



Fonte: Modificado de NOAA (2011); Cordani et al. (2016); Flanders Marine Institute (2019); GEBCO (2020); Müller et al. (2016); Whittaker et al. (2015) e Johansson et al. (2018).

O interesse pela origem e evolução tectônica da ERG aumentou ainda mais após a divulgação dos primeiros resultados do *Deep-Sea Drilling Project* (DSDP),

publicados por Barker (1983). Barker (*op. cit.*) definiu a ERG como uma estrutura complexa, que seria composta por duas unidades distintas com diferentes histórias geológicas. Ainda, a geomorfologia da parte oeste da ERG teria sido muito influenciada pelo vulcanismo que ocorreu no Eoceno ($\approx 54 - 34$ Ma). Já a região leste da ERG apresenta delimitações de norte ao sul por zonas de fraturas e possui uma parte conjugada com a Cadeia Walvis, localizada perto do arquipélago Tristão da Cunha e das ilhas de Gonçalo Álvares, estendendo-se até a costa da África. Estes resultados foram baseados na interpretação de linhas sísmicas de reflexão aliadas à dados de testemunhos de sondagem.

Gamboa e Rabinowitz (1984) utilizaram dados de testemunhos de sondagem para separar a ERG em região leste (LERG) e oeste (OERG), que são separadas por uma planície abissal estreita. A OERG teria sido afetada por um evento magmático, responsável pelas formações dos montes submarinos e *guyots*. Estes autores sugerem ainda que a LERG possui uma tendência Norte-Sul, paralela à dorsal meso-oceânica. Análises estruturais indicaram que a LERG é delimitada ao norte e ao sul pelas zonas de fraturas do Rio Grande e de Meteor. Estes resultados sugerem fortemente que a LERG, e a sua parte conjugada no cume oceânico no sul do Oceano Atlântico, foram formadas ao mesmo tempo e pelos mesmos processos. Os resultados de Gamboa e Rabinowitz (*op. cit.*) indicaram que a ERG teria sido formada durante o Coniaciano-Santoniano ($\approx 89,8 - 83,6$ Ma) após sofrer uma subsidência magmática. Já no Eoceno médio (≈ 40 Ma) teria ocorrido um evento vulcânico que elevou a LERG. A estrutura teria chegado à superfície e posteriormente erodido. Após esses eventos a estrutura sofreu subsidência térmica e sedimentação oceânica.

Posteriormente, utilizando um banco de dados mais completo, incluindo dados adquiridos por satélites, a ERG passou a ser dividida em três porções com histórias geológicas distintas: uma porção a oeste separada pelo Canal de Vema (Região Ocidental), uma porção central (Região central) mais elevada e, uma porção mais a leste (Região Oriental) (NOAA, 2011). Esta será a nomenclatura utilizada neste trabalho.

Ussami et al. (2013) construíram mapas de espessura continental utilizando modelagem flexural 3D a partir de dados do modelo digital de batimetria ETOPO1 (NOAA, 2009) e dados de anomalia ar livre calculadas a partir do modelo geopotencial EGM2008. A interpretação destes mapas confirmou que a ERG foi formada a partir

de dois eventos magmáticos apresentados por Gamboa e Rabinowitz (*op. cit.*). As análises flexurais e reconstruções paleográficas indicaram que as partes Oriental, Central e Ocidental da ERG foram separadas por diversas migrações com sentido a leste e por expansões do fundo oceânico durante o processo de formação da região central do Oceano Atlântico. Isso levou Ussami et al. (*op. cit.*) a sugerirem que o magmatismo da ERG e sua porção conjugada na Cadeia de Walvis foi resultado de um manto litosférico heterogêneo que foi fragmentado e deixado durante o rompimento do Gondwana.

Nos últimos anos, diversos autores (CONSTANTINO et al., 2017; DICEZARE & MOLINA, 2018) realizaram estudos visando construir mapas de elementos do campo de gravidade da região do ERG e, conseqüentemente, interpretar geologicamente as anomalias gravimétricas da região. Constantino et al. (*op. cit.*) utilizaram dados de gravidade obtidos a partir de dados medidos pelos satélites CryoSat-2 e Jason-1 (SANDWELL et al., 2014), utilizando uma grade batimétrica do ETOPO1 e um modelo global de espessura de sedimentos (WHITTAKER et al., 2013) para gerar um modelo 3-D do embasamento. Dicezare & Molina (*op. cit.*) utilizaram dados de altura da superfície do mar (SSH) e gradientes da altura da superfície do mar (SSG) adquiridos por satélites das missões ERS1-GM, Geosat-GM e Seasat para caracterizar estruturas localizadas no fundo oceânico.

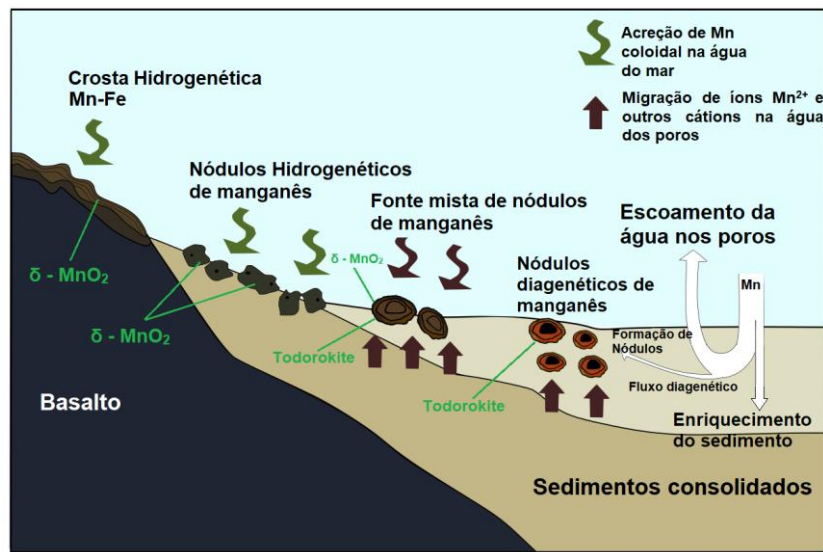
3.2. Áreas de interesse para exploração mineral na região da ERG

O interesse e a importância da exploração mineral dos oceanos aumentaram na década de 1960 principalmente após as altas estimativas de depósitos de nódulos de manganês realizados por Mero (1965). Entretanto, nos últimos anos, a exploração mineral em oceano profundo teve uma grande queda por conta de condições econômicas, desafios tecnológicos e uma crescente consciência ambiental (LUSTY & MURTON, 2018). Contudo, a importância econômica, probabilidade de escassez e desafios crescentes da mineração estão gerando novas pesquisas para buscar alternativas para matérias primas (CALAS, 2017).

As crostas ricas em cobalto ou crostas de ferromanganês geralmente se formam próximas aos cumes dos montes submarinos e podem conter manganês, ferro, cobre, níquel, platina (HEIN et al., 2013). As rochas presentes nestas áreas possuem porosidade média de 60% e crescem em média 1-5 mm/Ma (HEIN et al.,

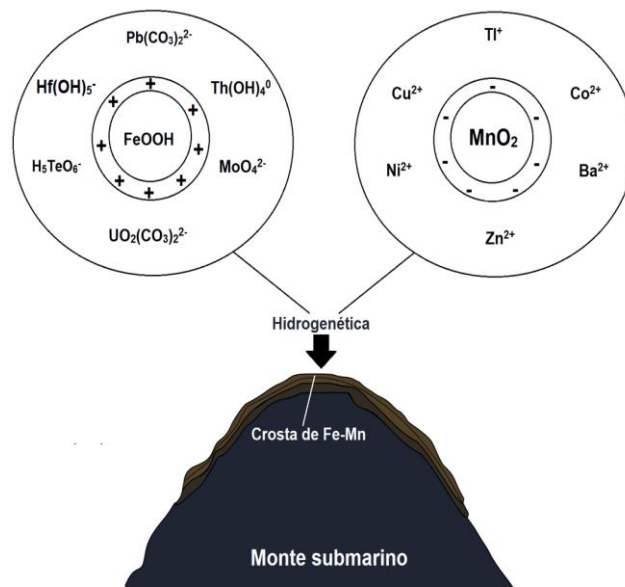
2000). A sua formação é controlada pela precipitação de coloides de óxidos de Mn e Fe hidratados, que adquirem traços de metais por processos de sorção de superfície (HEIN et al., *op. cit.*) (Figura 2 e 3). A quantidade de Mn é mais alta em ambientes do Oceano Pacífico. A quantidade de Fe geralmente é um pouco mais alta nas crostas dos oceanos Atlântico e Índico.

Figura 2 - Diagrama de formação de nódulos de Fe-Mn hidrogenéticos e diagenéticos correlacionados com a formação de crostas de Fe-Mn hidrogenética



Fonte: Modificado de Hein et al., 2013.

Figura 3 - Diagrama de formação de crostas de Fe-Mn hidrogenética



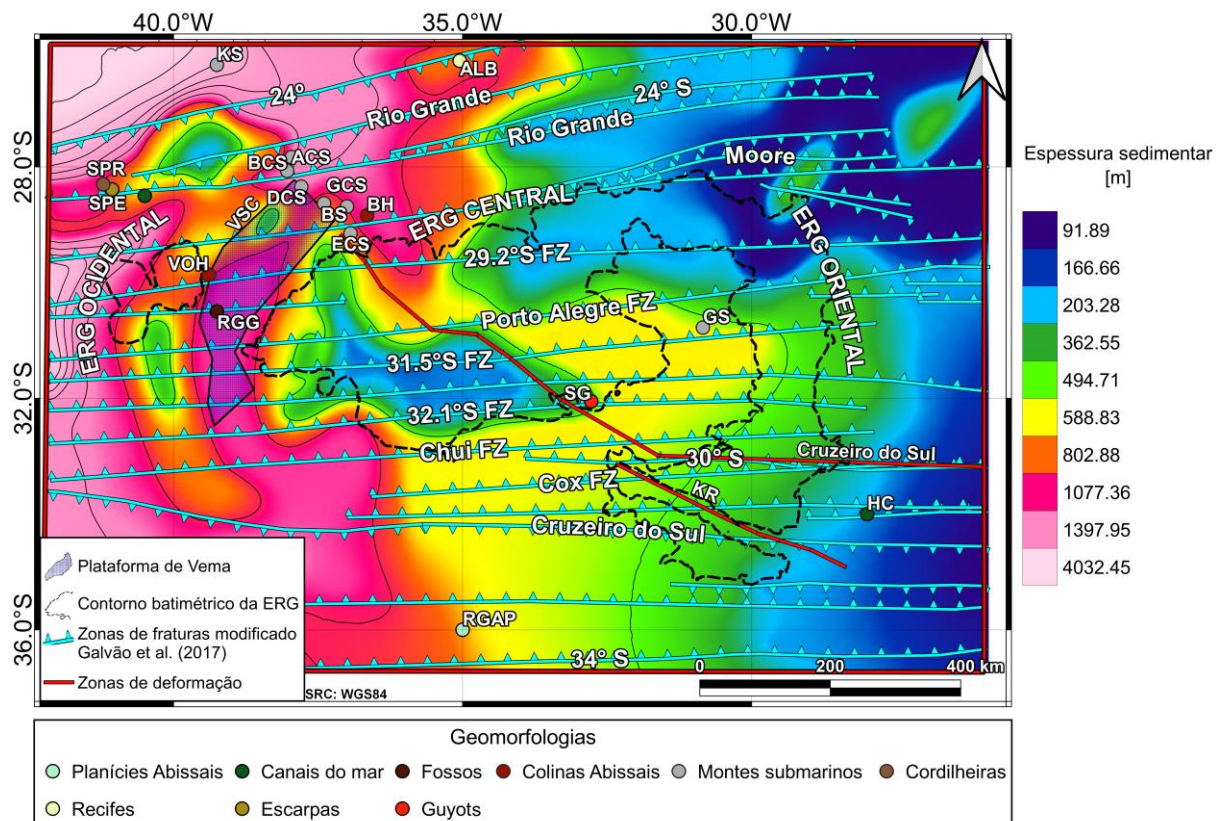
Fonte: Modificado de Hein et al., 2013.

De acordo com Straume et al. (2019), o conhecimento da espessura sedimentar é de extrema importância para o entendimento da evolução e dos processos geológicos oceânicos.

A grade de dados de espessura sedimentar construída a partir da compilação de dados regionais de espessura sedimentar (FUNCK et al., 2016; HOPPER et al., 2014; MOLINARI & MORELLI, 2011; PETROV et al., 2016; HUANG et al., 2014; WHITTAKER et al., 2013; LINDEQUE et al., 2016; WOBBE et al., 2014) junto com a compilação atualizada do Oceano Antártico e do Atlântico NE com a grade *National Geophysical Data Center* (NGDC) por Straume et al. (*op. cit.*) com uma resolução espacial de 5 minutos de arco. Os dados sobre a área da ERG estão apresentados na Figura 4.

A espessura sedimentar da ERG varia de 90 a 4000 m, sendo que os valores maiores são observados próximos à margem continental enquanto que os valores menores são observados majoritariamente longe da margem continental. A ERG ocidental apresenta valores menores de espessura sedimentar quando comparada com a região central e oriental.

Figura 4 - Mapa de espessura sedimentar na área de estudo da ERG, unidades geomorfológicas e estruturas demarcadas. As siglas representam: Almirante Leite Bank (ALB); Alpha Crucis Seamount (ACS); Beta Crucis Seamount (BCS); Bigarella Hill (BH); Bigarella Seamount (BS); Delta Crucis Seamount (DCS); Epsilon Crucis (ECS); Gamma Crucis Seamount (GCS); Griep Seamount (GS); Hunter Channel (HC); Kazanskiy Seamount (KS); Rio Grande Abyssal Plain (RGAP); Rio Grande Gap (RGG); Sirius Guyot (SG); Sao Paulo Channel (SPC); Sao Paulo Escarpment (SPE); Sao Paulo Ridge (SPR); Vital de Oliveira Hill (VOH).

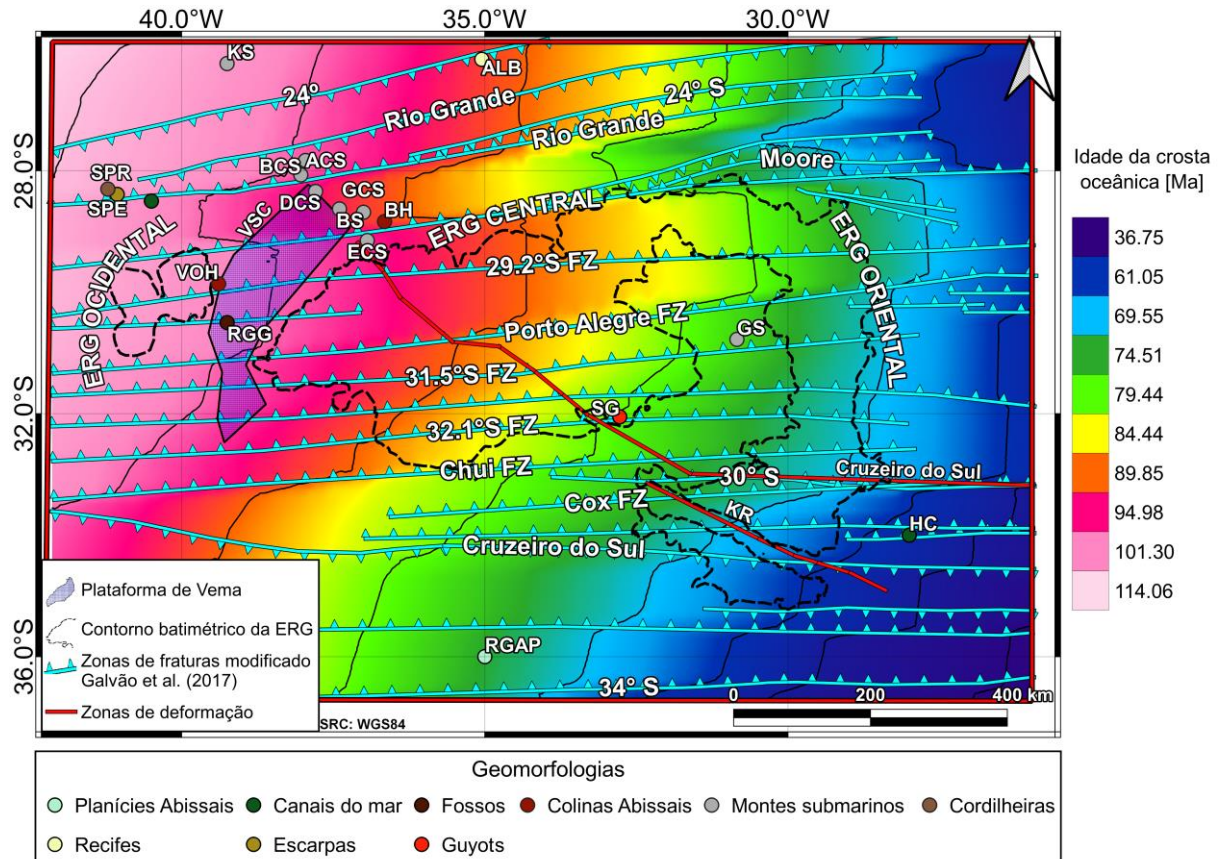


Fonte: Modificado de NOAA (2011); Galvão et al. (2017) e Straume et al. (2019).

A Figura 5 apresenta o mapa de valores de idade crustal para a região da ERG. Este mapa é baseado nos dados de Müller et al. (2008) construído a partir de anomalias magnéticas lineares, a escala de tempo de reversão geomagnética e os polos de rotação de Euler, possuindo resolução espacial de 2 minutos de arco. A idade da crosta oceânica na região da ERG varia de 35 a 115 Ma, sendo as porções mais antigas localizadas próximas à margem continental e as porções mais jovens localizadas majoritariamente longe da margem continental em direção à dorsal meso-

oceânica. A ERG ocidental apresenta uma idade crustal maior quando comparada com as regiões central e oriental.

Figura 5 - Mapa da idade da crosta na área de estudo da ERG, unidades geomorfológicas e estruturas demarcadas

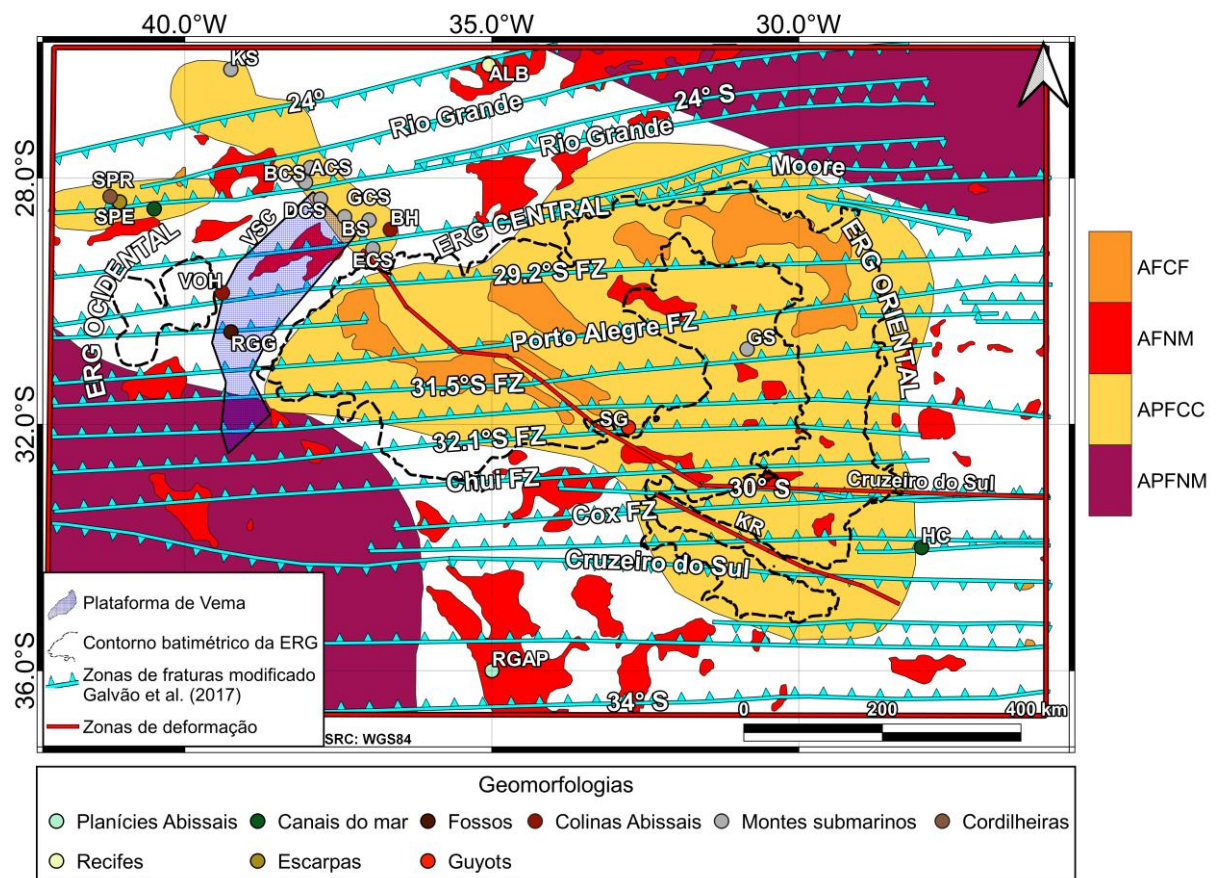


Fonte: Modificado Müller et al. (2008); NOAA (2011) e Galvão et al. (2017).

A partir dos dados de Hein et al. (2013) e Petersen et al. (2016) foi construído um mapa indicando as áreas favoráveis e permissivas para a ocorrência de crosta de ferromanganês, nódulos de manganês e crosta rica em cobalto para a região da ERG (Figura 6). As áreas favoráveis para a formação de nódulos de manganês obedecem às seguintes condições: idade do fundo do mar > 10 Ma, espessura dos sedimentos < 1000 m, taxa de sedimentação ≤ 1 cm / 1000 anos e profundidade batimétrica entre 3000 a 6000 m (PETERSEN et al., 2016). Já para as áreas favoráveis para formação da crosta de ferromanganês foi levado em conta a localização de montes submarinos, *guyots* e planaltos oceânicos, com idade do fundo do mar > 10 Ma, espessura dos

sedimentos < 500 m, taxa de sedimentação < 2cm / 1000 anos e profundidade batimétrica variando de 800 a 3000 m (PETERSEN, 2016).

Figura 6 - Mapa de localização das áreas favoráveis e permissivas para crosta de ferro-manganês, nódulos de manganês e crosta rica em cobalto na ERG, com as estruturas demarcadas. As siglas representam: Áreas favoráveis para formação da crosta de ferromanganês (AFCF); Áreas favoráveis para formação de nódulos de manganês (AFNM); Áreas permissivas para formação de crosta rica em cobalto (APFCC) e Áreas permissivas para formação de nódulos de manganês (APFNM).



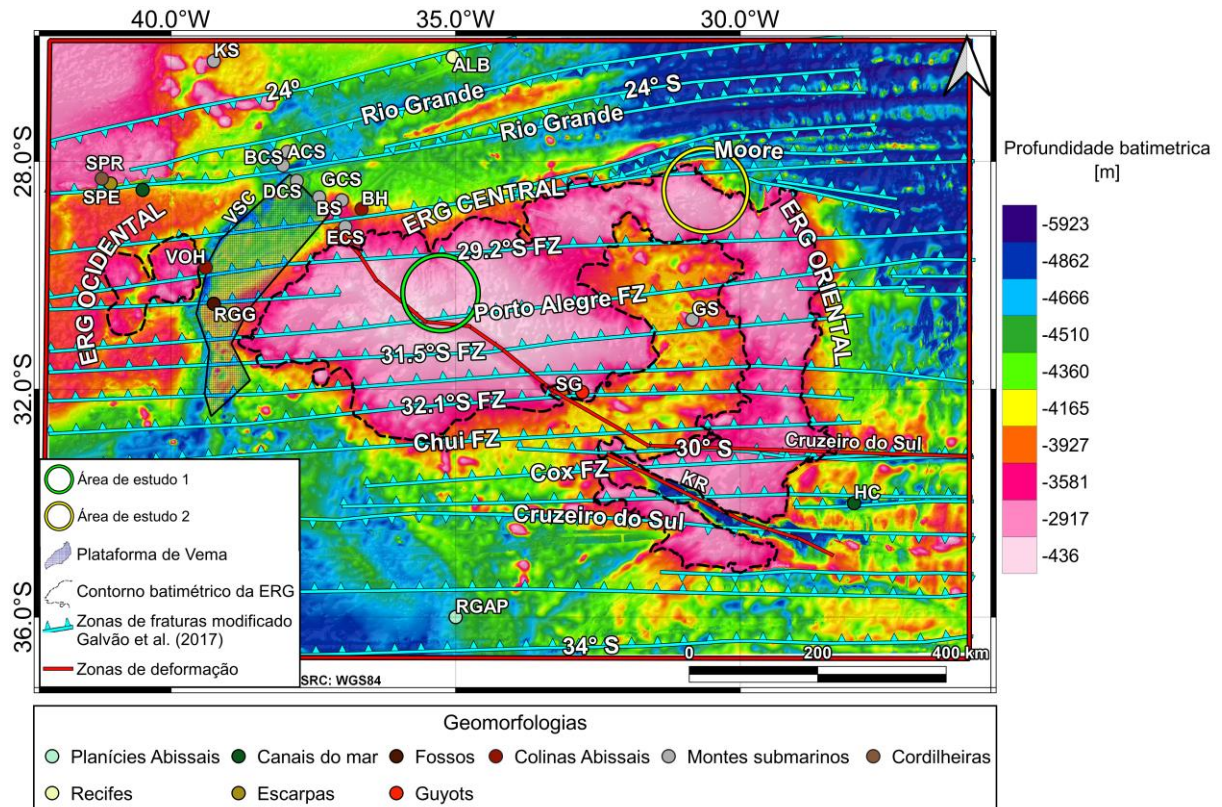
Fonte: Modificado de NOAA (2011); Hein et al. (2013); Petersen et al. (2016) e Galvão et al. (2017).

3.3. Definição de áreas para um estudo mais completo

Com base na disponibilidade de dados geofísicos e geológicos, e na localização das regiões com maior potencial para a exploração mineral, foram selecionadas duas áreas menores visando a realização de estudos mais detalhados. As localizações das áreas selecionadas, denominadas áreas de estudos 1 e 2, estão

indicadas na Figura 7. Para estas áreas estão disponíveis dados de testemunhos de sondagem, de coletas *in situ*, e de dragagens, obtidos em diferentes missões exploratórias no Atlântico Sul.

Figura 7 - Localização das áreas de estudo 1 e 2, principais feições da ERG destacadas, com as estruturas demarcadas.

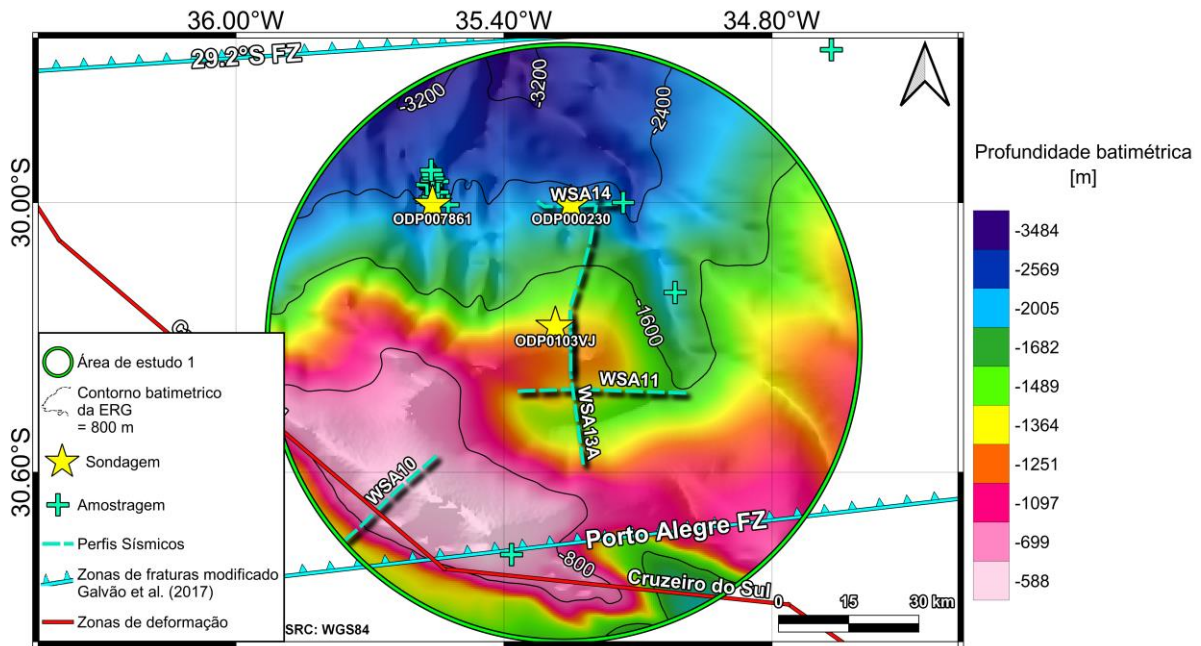


Fonte: Modificado de NOAA (2011) e Galvão et al. (2017).

Para a área de estudo 1 (Figura 8) estão disponíveis dados de três testemunhos de sondagem do *Ocean Drilling Program* (ODP) (ODP0103VJ, ODP00230 e ODP007861) (Figura 9), dados de dragagens e dados de amostragens *in situ* e dados geofísicos de sísmica de reflexão (Figura 10). Os dados batimétricos indicam as profundidades na área de estudo 1 estão entre -3484 a -588 m. Os dados de sondagem identificaram camadas espessas de calcário e entre as profundidades de 1241,1 a 1250,45 m o embasamento de basalto. Os perfis sísmicos (WSA 10, WSA 11 e WSA 13) de reflexão interpretados por Praxedes (2020), apresentaram as estruturas (falhas e *mounds*) e camadas estratigráficas idades geológicas: Maastrichtiano ($\approx 72,1$ a 66 Ma), Coniciano ($\approx 89,8$ a 86,3 Ma), Santoniano ($\approx 86,6$ a

86,3 Ma), Eoceno superior (≈ 30 Ma), Eoceno médio (≈ 40 Ma), Oligoceno (≈ 36 a 23 Ma), Mioceno inferior (≈ 22 Ma) e Pleistoceno ($\approx 2,588$ a $11,7$ Ma). Os *mounds* que estão inseridos nos pacotes sedimentares podem estar associados a atividade hidrotermal (PRAXEDES, 2020).

Figura 8 - Apresentação da área de estudo 1, com as estruturas demarcadas



Fonte: Modificado de Galvão et al. (2017) e GEBCO (2020).

Figura 9 - Testemunhos do ODP (ODP0103VJ, ODP00230 e ODP007861), localizados na área de estudo 1

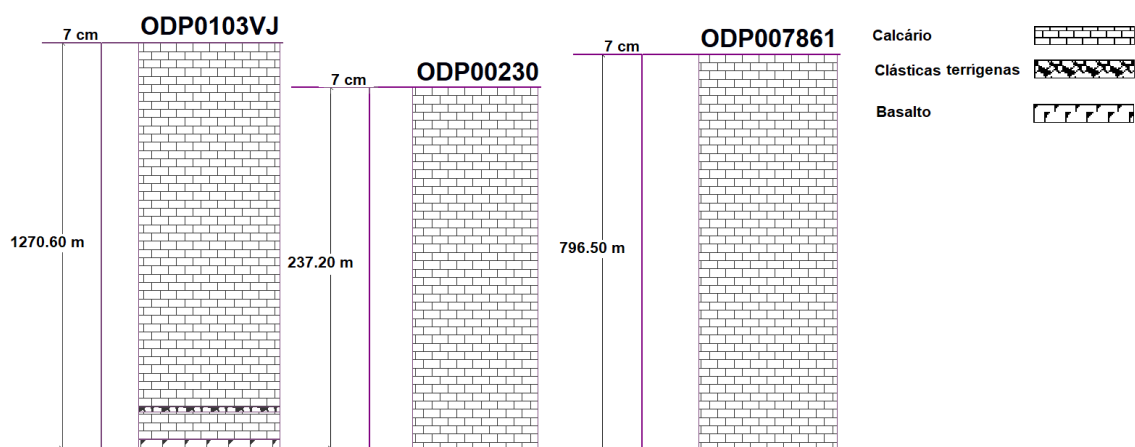
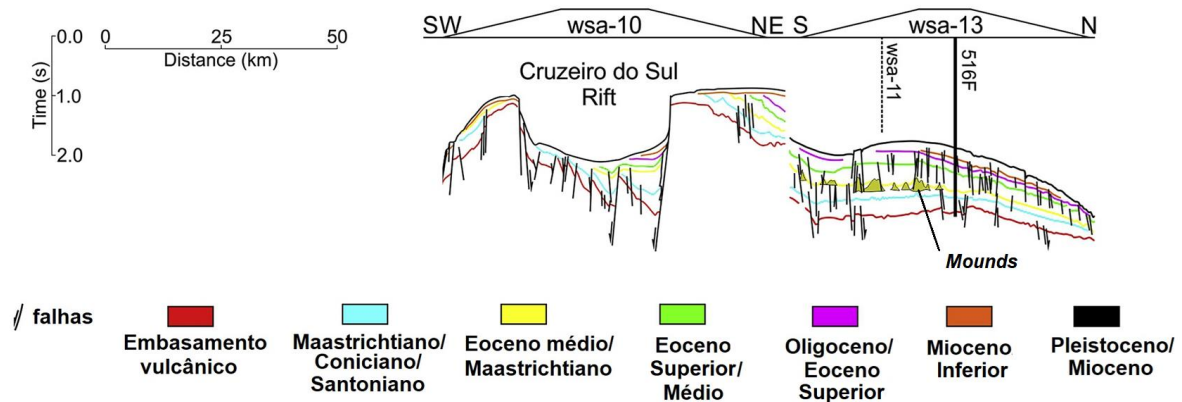


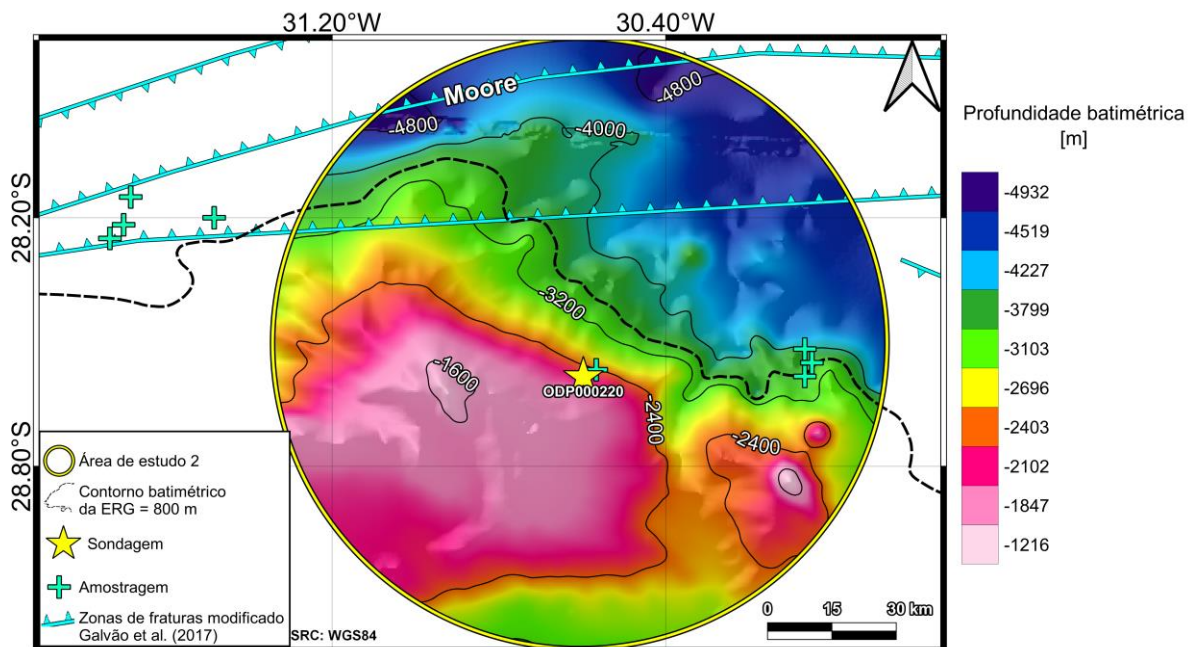
Figura 10 - Perfis sísmicos de reflexão (WSA-10, WSA-11, WSA-13) interpretados por Praxedes (2019)



Fonte: Modificado de Praxedes (2020).

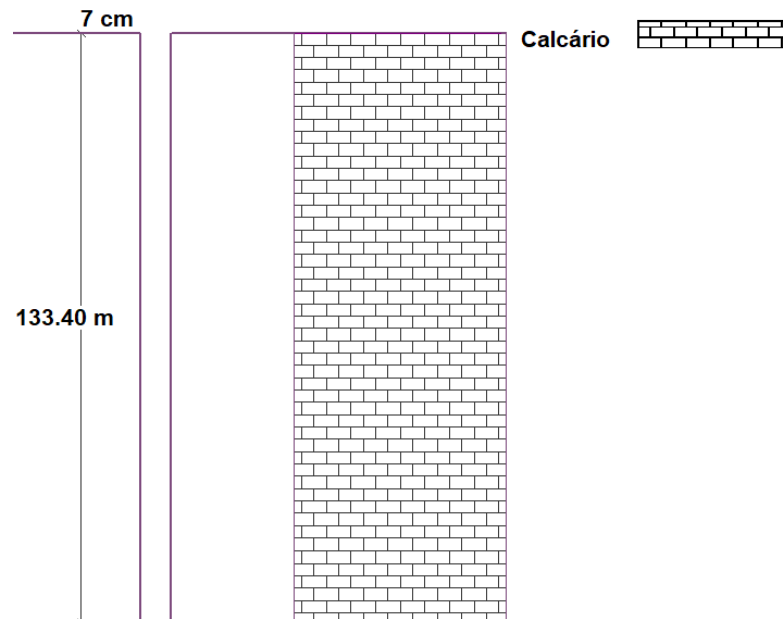
A área de estudo 2 (Figura 11), estão disponíveis dados do testemunho ODP (ODP000220) (Figura 12) e alguns dados obtidos por amostragens *in situ*. A profundidade batimétrica está entre -4932 a -1216 m. O testemunho ODP apresentou uma camada de 133,40 m de profundidade de rocha calcária.

Figura 11 - Apresentação da área de estudo 2, com as estruturas demarcadas



Fonte: Modificado de Galvão et al. (2017) e GEBCO (2020).

Figura 12 - Testemunho do ODP (ODP000220) localizado na área de estudo 2



4. CONCEITOS BÁSICOS DE GRAVIMETRIA

4.1. Anomalia da gravidade

O valor da componente vertical da aceleração da gravidade g medido sobre a superfície física da Terra é influenciado por diferentes fatores como a distância do ponto de medida até o centro de massa da Terra e a variação de densidade no interior da Terra. Por isso, o valor de g medido sobre a superfície física deve ser corrigido. A anomalia de gravidade (Δg) é a diferença entre o valor real (g_0) da aceleração da gravidade medido em um ponto sobre a superfície física da Terra e o valor de aceleração da gravidade calculado teoricamente (γ). Assim, Δg pode ser expressa, de forma geral, como:

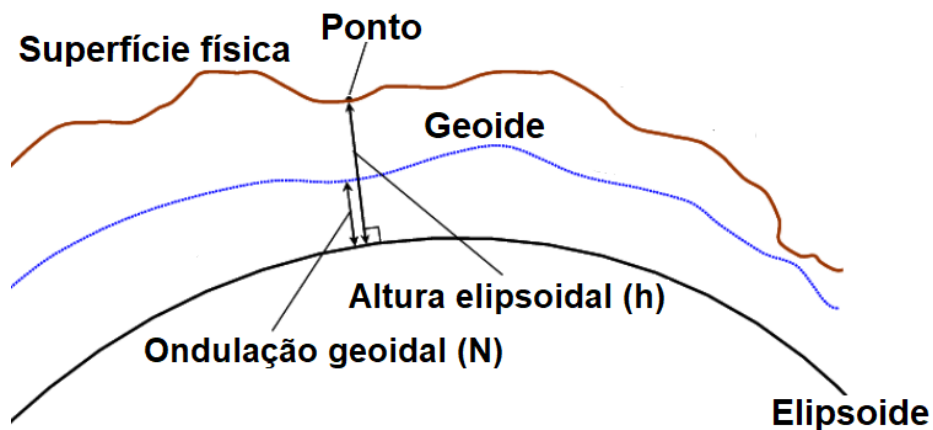
$$\Delta g = g_0 - \gamma \quad (1)$$

O índice zero utilizado em g_0 indica que o valor de aceleração da gravidade está referenciado em relação à superfície geoidal (nível zero). A superfície geoidal é a superfície equipotencial do campo de gravidade que coincide com o nível médio do mar nos oceanos não perturbados.

O valor teórico da aceleração da gravidade é calculado a partir da fórmula internacional da gravidade normal. Esta fórmula permite estimar o valor da aceleração da gravidade para a projeção normal de um ponto em relação ao elipsoide de referência.

A distância medida sobre a direção normal entre um ponto P qualquer, sobre a superfície física da Terra e a superfície elipsoidal, é denominada altitude geométrica. A distância medida sobre a direção vertical entre um ponto P qualquer, sobre a superfície física da Terra, e a superfície geoidal é denominada altura ortométrica (H). A distância medida sobre as superfícies elipsoidal e geoidal é denominada altura geoidal ou ondulação do geóide (Figura 13).

Figura 13 - Relação entre as superfícies utilizadas para representar a forma da Terra



Fonte: Modificado de ZIEBART (2004).

Em homenagem a Galileu, a unidade utilizada atualmente em medições gravimétricas é o Gal. O valor de 1 Gal equivale a 1 cm s^{-2} . Os valores das anomalias gravimétricas são geralmente expressos em miliGal (mGal), sendo $1 \text{ mGal} = 0,001 \text{ cm s}^{-2}$.

4.2. ANOMALIA AR-LIVRE

A redução da aceleração da gravidade observada na superfície física da Terra para a superfície geoidal é realizada a partir da correção ar-livre. Esta correção, que leva em consideração o gradiente vertical da aceleração da gravidade normal e a

altitude ortométrica do ponto onde foi realizada a medição gravimétrica, pode ser expressa como:

$$C_A = -\frac{\partial\gamma}{\partial H} H \cong 0,3086 H \quad (2)$$

com H sendo medido em metros e C_A em mGal.

A anomalia ar-livre é calculada com base na correção ar-livre a partir da expressão:

$$\Delta g_A = \Delta g + C_A = \Delta g + 0,3086 H \quad (3)$$

A anomalia ar-livre é normalmente utilizada para determinação de algumas estruturas geomorfológicas por demonstrar uma clara correlação com a batimetria, conforme demonstrado por diversos autores (por exemplo, JACOBY & SMILDE, 2009). Seus maiores valores (geralmente positivos) tendem a representar zonas de excesso de massa (por exemplo, os montes submarinos e *guyots*). Os menores valores (geralmente negativos) são interpretados como zonas de ausência ou de pouca massa (por exemplo, os riftes e as falhas).

4.3. Anomalia Bouguer

A correção do efeito das massas topográficas localizadas entre as superfícies física e geoidal é denominada correção Bouguer. A anomalia gravimétrica obtida após esta correção é denominada anomalia Bouguer.

O valor da anomalia Bouguer (simples) fornecida pelo *International Center for Global Gravity Field Models* (ICGEM) é calculada a partir da subtração do valor da atração da placa Bouguer do valor da anomalia de gravidade clássica, de acordo com a equação (HOFMANN-WELLEHOF & MORITZ, 2005):

$$\Delta g_B = \Delta g_A - 2\pi G\rho h \quad (4)$$

Nesta equação G é a constante gravitacional, ρ é a densidade do meio (convencionada como $2,67 \text{ g/cm}^3$), h é a espessura da placa Bouguer (altura topográfica do ponto acima do geóide). Para dados abaixo do nível do mar a densidade utilizada é igual à subtração $2,67 \text{ g/cm}^3$ pela densidade da água do mar ($1,025 \text{ g/cm}^3$). O cálculo dos valores da anomalia Bouguer levam em conta a atração do material entre a estação (local de medida) e o geóide, ou seja, o efeito da massa topográfica (TELFORD et al., 1990). A anomalia Bouguer simples não considera os efeitos das irregularidades do terreno ao redor do ponto. A anomalia Bouguer é normalmente utilizada para modelar a estrutura geológica subterrânea e a variação regional da espessura da crosta.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Materiais

5.1.1. Dados de batimetria regional

Os dados de batimetria regional serão obtidos do *General Bathymetric Chart of the Oceans 2020* (GEBCO, 2020), que fornece cobertura global em uma grade com resolução de 15 segundos de arco. A grade é o resultado de uma composição de aquisições navais e de altimetria por satélite (TOZER et al, 2019).

5.1.2. Valores de anomalias ar-livre e Bouguer a partir de modelos geopotenciais

Os valores de anomalias de gravidade utilizados no estudo regional da ERG serão obtidos do banco de dados de acesso livre do ICGEM. Neste estudo serão utilizados valores de anomalias de gravidade calculados a partir do modelo geopotencial SSG-UGM-2 (LIANG et al, 2020), de grau 2190, utilizando o sistema de referência WGS84 (Tabela 1).

Tabela 1 - Tabela de informações do modelo geopotencial utilizado. A = altimetria, S = satélite e G = dados terrestres

Modelo	Ano	Grau máximo	Dados
SGG-UGM-2	2020	2190	A, EGM2008, Grace, S (Goce)

Fonte: Modificado ICGEM (<http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime> Acesso em: 23 jul. 2021).

As relações do grau máximo de cada modelo ($n_{m\acute{a}x}$) com o comprimento de onda máximo $\lambda_{m\acute{a}x}$ e com a resolução máxima $\rho_{m\acute{a}x}$ são dadas pelas equações (AMOS, 2007):

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2\pi R}{n_{m\acute{a}x}} \cos \varphi \quad (5)$$

e

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{\lambda_{m\acute{a}x}}{2} \quad (6)$$

nas quais R é o raio terrestre e φ é a latitude.

Admitindo que a ordem do modelo é igual a 2190, e considerando que a área de estudo compreende o intervalo de latitudes $-25,86^\circ \leq \varphi \leq -38,84^\circ$, o valor de comprimento de onda máximo será de aproximadamente 18,30 km e a resolução espacial máxima atingível será de aproximadamente 9,15 km.

5.1.3. Modelo geopotencial SGG-UGM-2

O modelo geopotencial SGG-UGM-2 foi construído utilizando gravimetria por satélite, altimetria de satélite e dados derivados do modelo geopotencial EGM2008. O modelo SGG-UGM-2 foi desenvolvido até o grau 2190 e ordem 2159 utilizando como base as fórmulas de mínimos quadrados derivadas do método da análise e coeficiente harmônica elipsoidal transformação. Os dados contam com a combinação das

observações do *Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer* (GOCE), a equação normal do *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE), dados de gravidade marinha obtidos por dados de altimetria por satélite e dados de gravidade continental do EGM2008.

5.2. Métodos

5.2.1. Caracterização gravimétrica da ERG a partir de dados de satélites

Para este trabalho foi utilizado grades de valores de anomalias ar-livre e Bouguer com intervalo espacial de $0,01^\circ \times 0,01^\circ$ (limite de resolução dos dados fornecidos pelo ICGEM) do modelo geopotencial SGG-UGM-2. Estes dados foram interpolados através do método da Mínima Curvatura (BRIGGS, 1974), e serão produzidos mapas de anomalias ar-livre e Bouguer. Numa primeira análise, os mapas gerados permitirão a identificação de áreas com valores anômalos de gravidade.

Posteriormente, será realizada a separação das parcelas regional e residual nos valores de anomalia de gravidade. Na sequência, serão aplicados os filtros da primeira Derivada Vertical (DV) e da Amplitude do Sinal Analítico (ASA). Com base nos resultados obtidos, será realizada a identificação de lineamentos gravimétricos e a interpretação das anomalias Bouguer e ar-livre.

5.2.2. Separação regional/residual

Os métodos potenciais permitem a detecção de fontes profundas (comprimentos de onda longos) e rasas (comprimentos de onda mais curtos). Conseqüentemente, a separação regional/residual permite distinguir as respostas superficiais, intermediárias e profundas (DENTITH & MUDGE, 2014). Neste trabalho a separação será realizada de forma semi-quantitativa a partir da Transformada Rápida de Fourier (FFT) utilizando o filtro no domínio da frequência *Butterworth* com um Espectro de potência radial como referência.

5.2.3. Primeira Derivada Vertical (1°DV)

A DV é aplicada através do domínio da frequência no qual as derivadas das anomalias são calculadas em relação a direção vertical Z. Portanto a DV estima a taxa de variação da anomalia gravimétrica ou magnética à medida que se aproxima ou se afasta da fonte causadora (BLAKELY, 1996). A DV considera os mais corpos rasos em preferência aos mais profundos, sendo considerado um filtro de aprimoramento de detalhes (DENTITH et al., 2014).

5.2.4. Cosseno direcional

Utilizado para suavizar feições direcionais de um conjunto de dados. A função cosseno (GEOSOFT, 1994) é dada como:

$$L(\theta) = \left| \cos^n \left(\alpha - \theta + \frac{\pi}{2} \right) \right|$$

Sendo, α a direção do filtro em graus (0-360), n é o grau do filtro e θ é a direção do número de onda.

5.2.5. Amplitude do Sinal Analítico (ASA)

Segundo (NABIGHIAN, 1972) a aplicação do filtro ASA em dados gravimétricos pode auxiliar na delimitação de limites geológicos. A ASA é calculada a partir da derivada de três gradientes direcionais do campo gravimétrico (DENTITH et al., 2014), como:

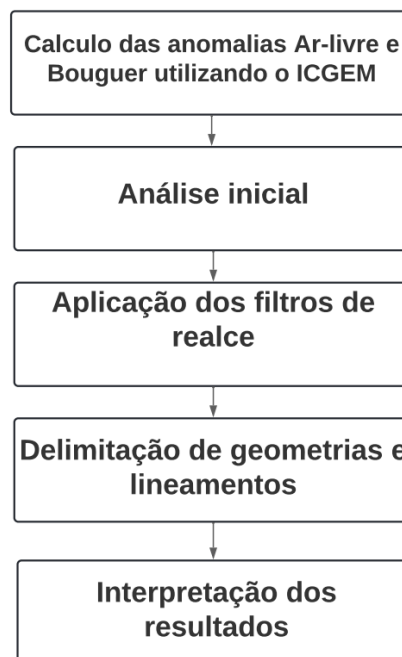
$$ASA(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2} \quad (10)$$

sendo, f os valores das anomalias gravimétricas e x , y e z as direções vetoriais dos valores gravitacionais ou magnéticos.

5.3. Fluxo de processamento

O fluxo de processamento dos dados (Figura 14) se inicia com o cálculo das anomalias Ar-livre e Bouguer pelo site do ICGEM. A partir da obtenção dos dois *grids* das anomalias são realizadas as análises iniciais (separação de anomalias positivas e negativas), após as análises são aplicados os filtros de realce (separação regional/residual, 1° derivada vertical, amplitude do sinal analítico e cosseno direcional) utilizados para delimitação de geometrias de corpos anômalos e lineamentos. A última etapa é a de interpretação que neste caso é realizada de forma qualitativa, nesta etapa são utilizadas ferramentas de SIG (Sistema de Informação Geográfica) e diagramas de roseta.

Figura 14 - Fluxograma de processamento dos dados



6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Anomalia ar-livre

Os dados de anomalia ar-livre (ΔG_A) na área de estudo regional (Figura 15) apresenta valores variando de -145,72 a 185,94 mGal. Para melhor visualização foi realizada a separação de valores positivos (Figura 16) e negativos (Figura 17) da ΔG_A , os valores positivos demarcam os limites da ERG e feições geomorfológicas, como a cadeia de montes submarinos de Jean Charcot ao noroeste, montes submarinos, colinas abissais, *guyots* e cordilheiras abissais. Os valores negativos auxiliaram para

a demarcação do Rifte Cruzeiro do Sul, o Canal do Mar de Vema e o Canal do Caçador.

Figura 15 - Mapa da ΔG_A na área de estudo regional

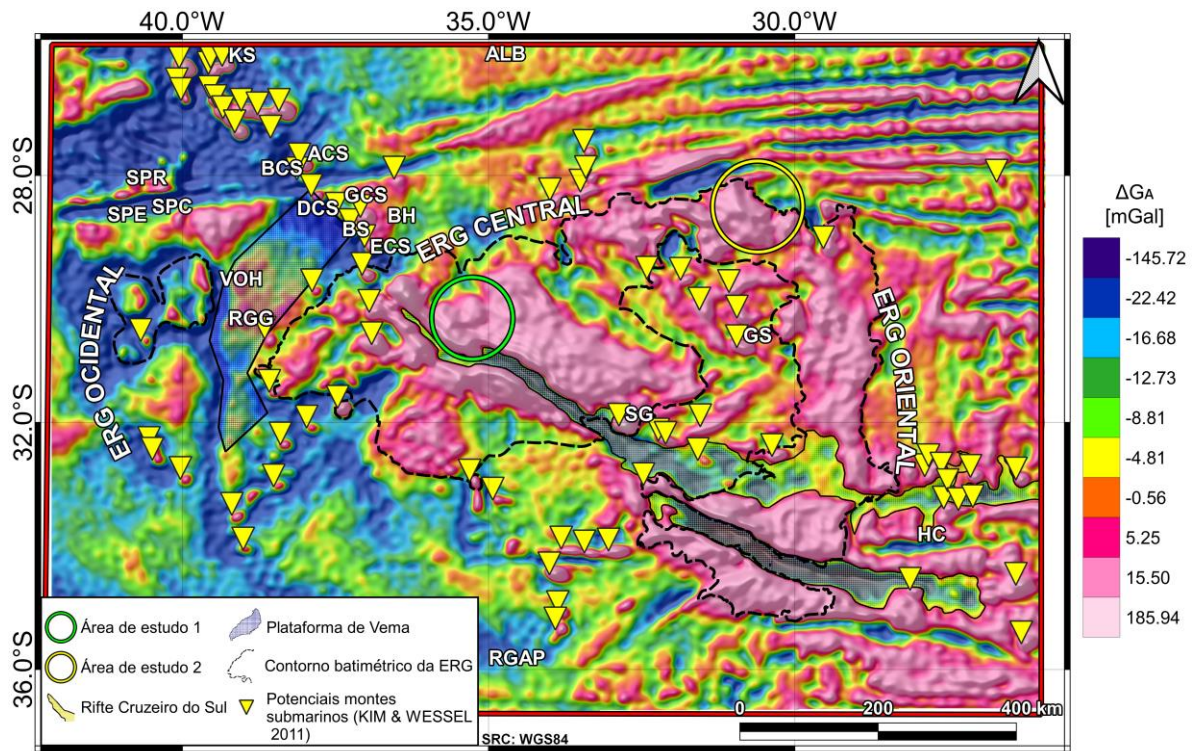
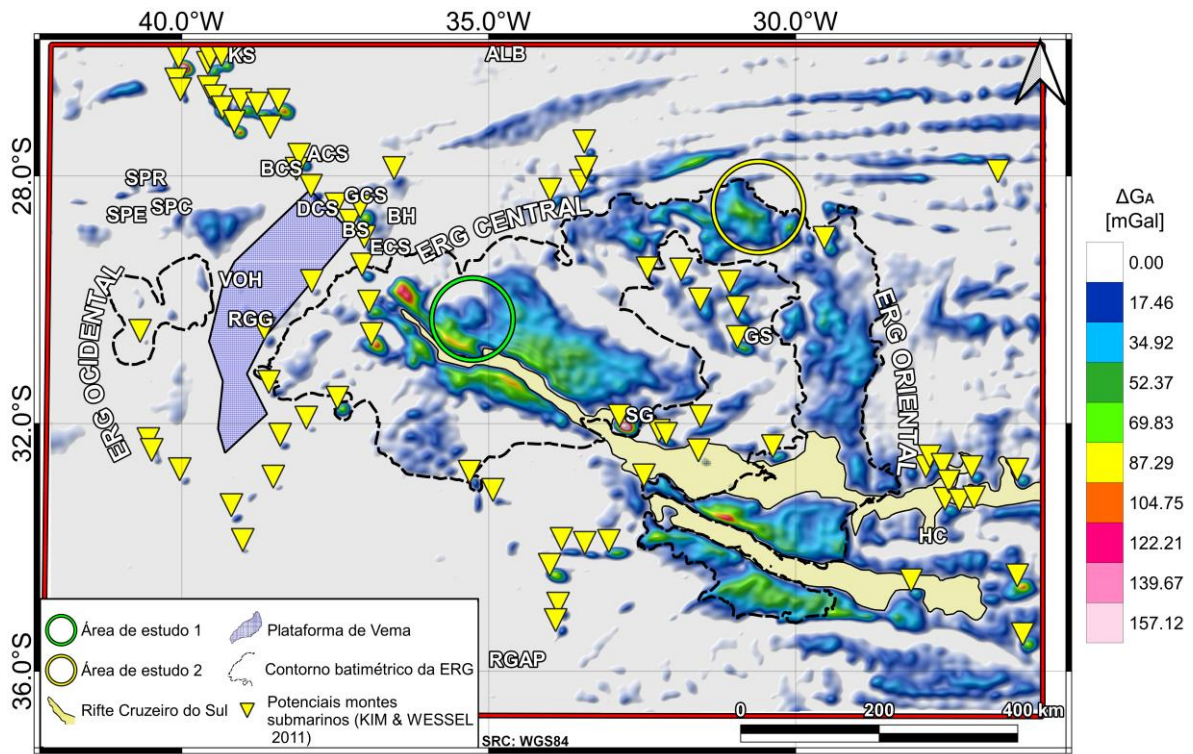
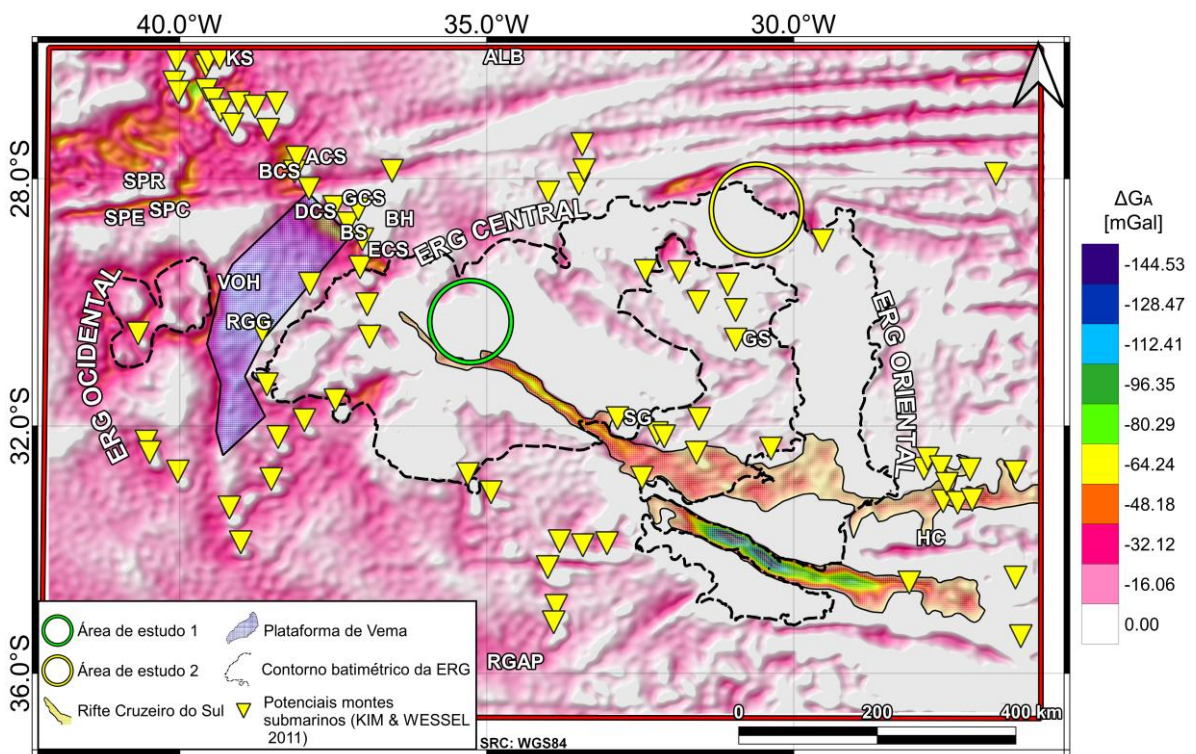


Figura 16 - Mapa da ΔG_A positiva na área de estudo regional



Fonte: Modificado Kim & Wessel, (2011).

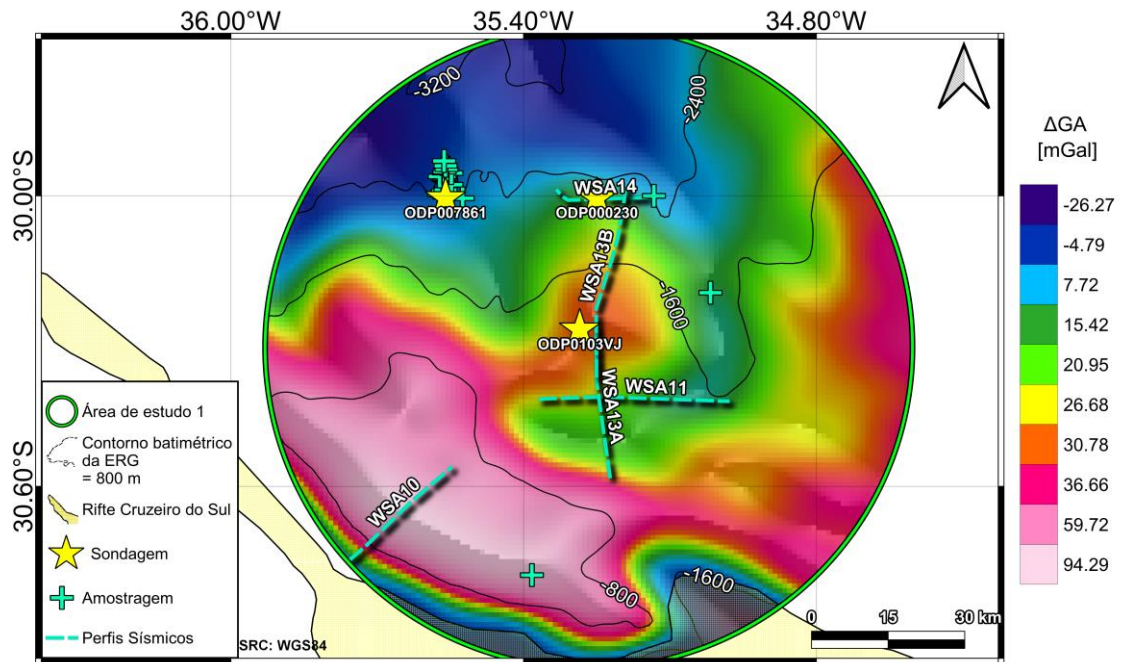
Figura 17 - Mapa da ΔG_A negativa na área de estudo regional



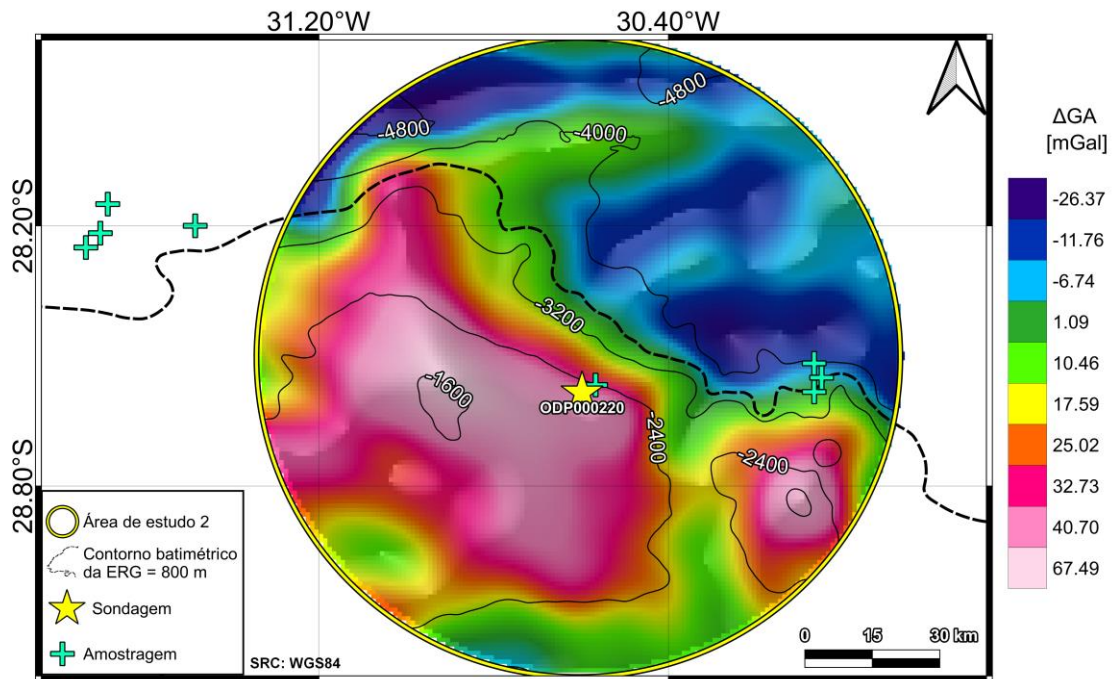
Fonte: Modificado Kim & Wessel, (2011).

Os dados de ΔG_A na área de estudo 1 (Figura 18) possuem valores variando de -26,27 a 94,29 mGal. Apresentando altos valores na região da borda do rifte, valores baixos na região norte e no rifte e valores intermediários na região central.

Figura 18 - Mapa da ΔG_A positiva na área de estudo 1



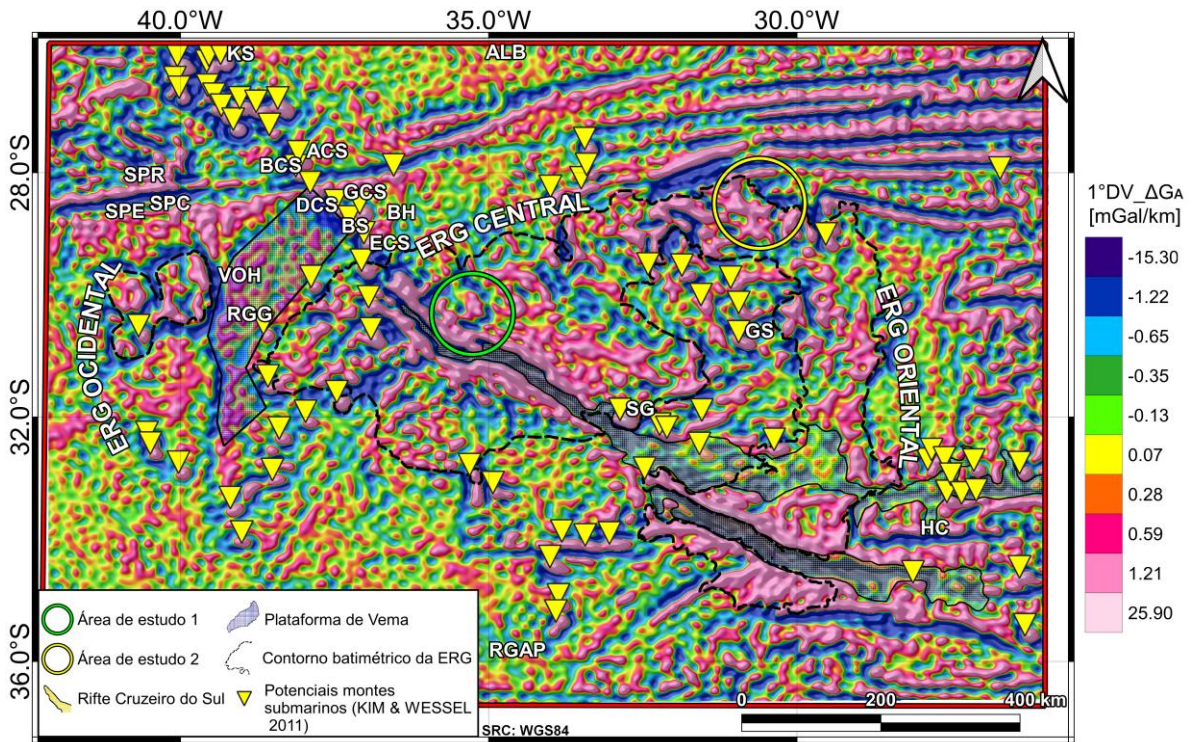
Os valores de ΔG_A na área de estudo 2 (Figura 19) variam de -26,37 a 67,49 mGal. Os valores mais altos são observados na região central enquanto os valores mais baixos se localizam na região nordeste. Os altos valores estão relacionados com as cordilheiras e os baixos valores estão relacionados com o fundo oceânico.

Figura 19 - Mapa da ΔG_A positiva na área de estudo 2

6.2. Primeira derivada vertical da anomalia ar-livre

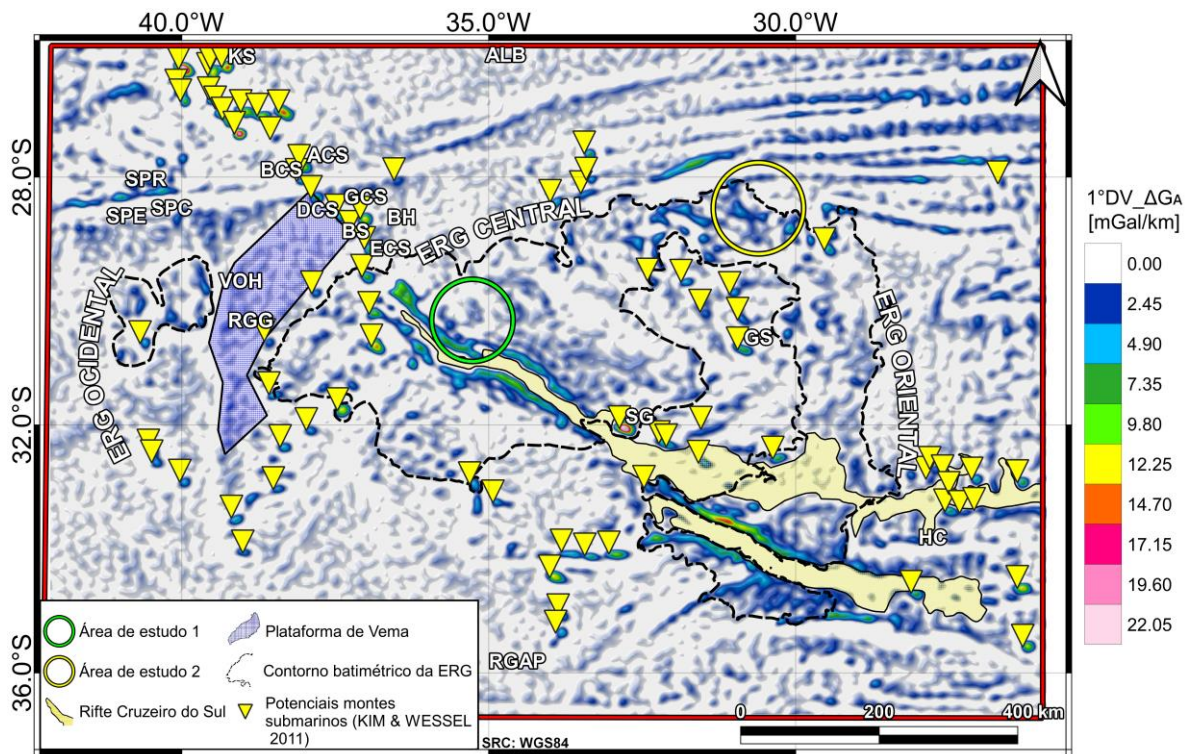
Para visualização das fontes de anomalias mais rasas foi calculada a primeira derivada vertical ($1^\circ DV_ \Delta G_A$). Na área de estudo regional (Figura 20), os valores da $1^\circ DV_ \Delta G_A$ estão entre -15,30 e 25,90 mGal / km. Os dados obtidos com a $1^\circ DV_ \Delta G_A$ foram separados em valores positivos (Figura 21) e negativos (Figura 22). Os valores positivos demarcam as anomalias mais rasas da ERG, relacionadas a borda do rifte Cruzeiro do Sul. Outras feições mais rasas associadas a montes submarinos, colinas submarinas, *guyots* e as regiões mais próximas a superfície (baixa profundidade batimétrica) das cordilheiras abissais localizadas ao norte da ERG oriental também são visíveis. Os valores negativos auxiliaram a delimitação do Rifte Cruzeiro do Sul, do Canal do Mar de Vema e do Canal do Caçador.

Figura 20 - Mapa da $1^\circ DV_{\Delta G_A}$ na área de estudo regional



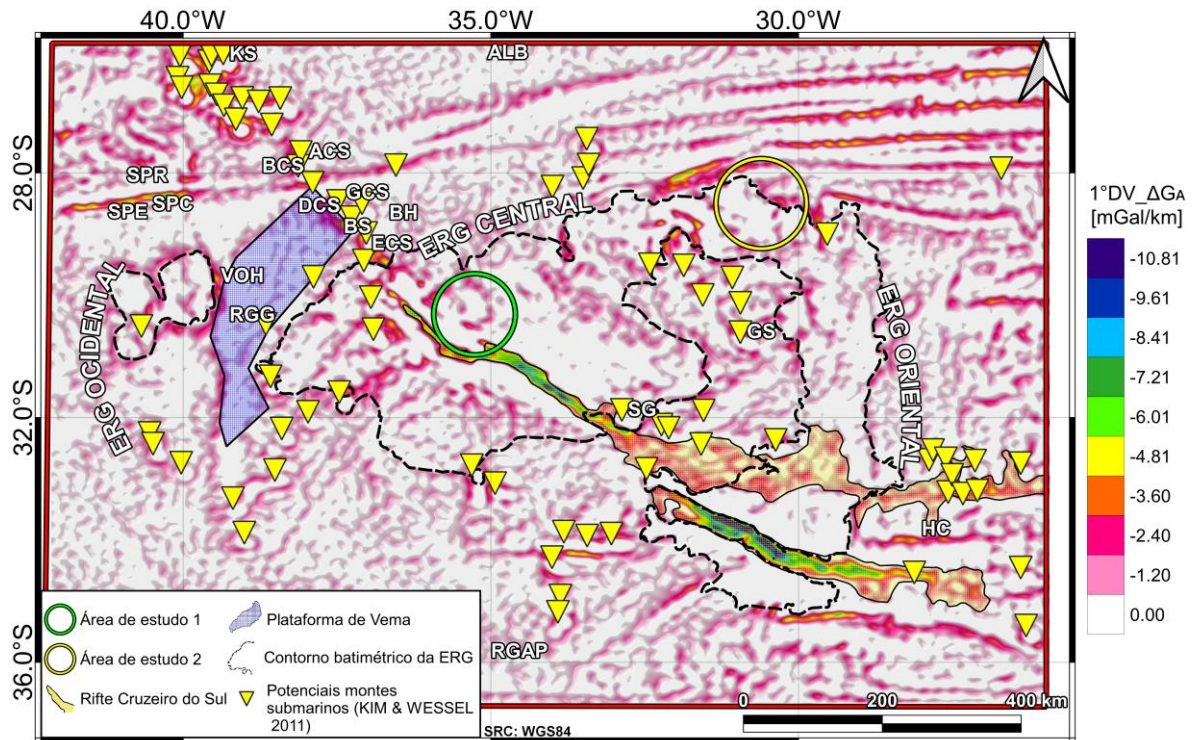
Fonte: Modificado Kim & Wessel, (2011).

Figura 21 - Mapa da $1^\circ DV_{\Delta G_A}$ positiva na área de estudo regional



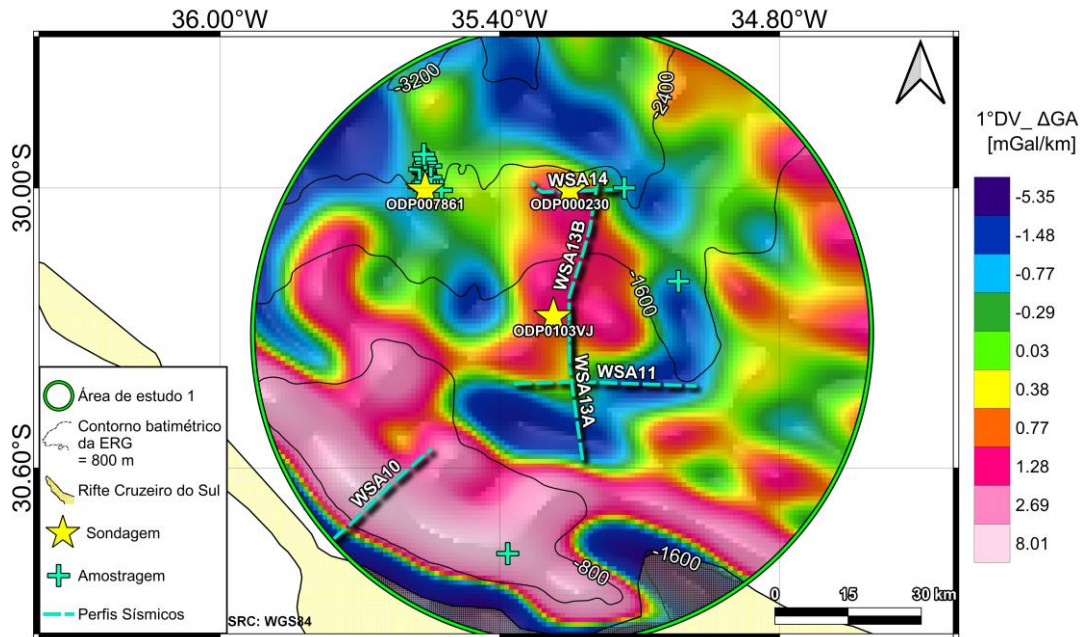
Fonte: Modificado Kim & Wessel, (2011).

Figura 22 - Mapa da $1^{\circ}DV_ \Delta G_A$ negativa na área de estudo regional

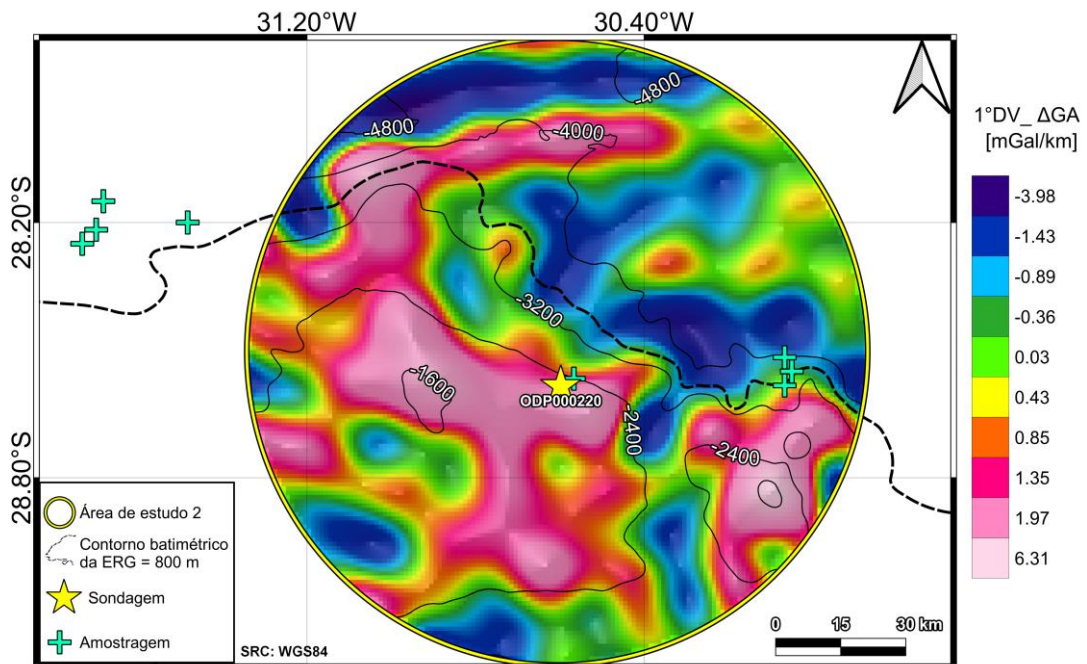


Fonte: Modificado Kim & Wessel, (2011).

Os resultados da $1^{\circ}DV_ \Delta G_A$ na área de estudo 1 (Figura 23) apresentaram valores variando de -5,35 a 8,01 mGal / km. Os valores mais altos estão localizados na borda do rife, mas diferente dos resultados da ΔG_A , os resultados da $1^{\circ}DV_ \Delta G_A$ deformaram (afinou e esticou) o corpo anômalo.

Figura 23 - Mapa da $1^\circ DV_ \Delta G_A$ na área de estudo 1

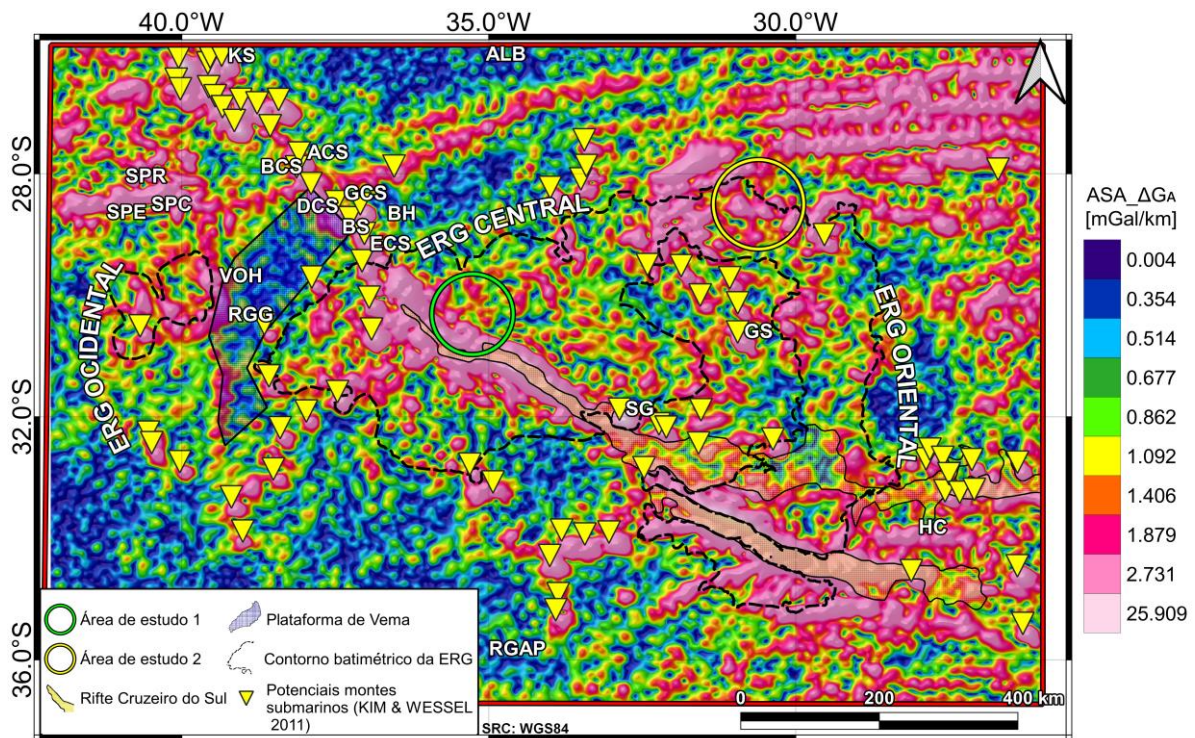
Os resultados da $1^\circ DV_ \Delta G_A$ na área de estudo 2 (Figura 24) mostraram valores entre -3,98 e 6,31 mGal / km. Os valores mais altos estão localizados no centro próximo a borda da ERG, na região nordeste possuindo um corpo anômalo de geometria retangular esticado na direção leste.

Figura 24 - Mapa da $1^\circ DV_ \Delta G_A$ na área de estudo 2

6.3. Amplitude do sinal analítico da anomalia ar-livre

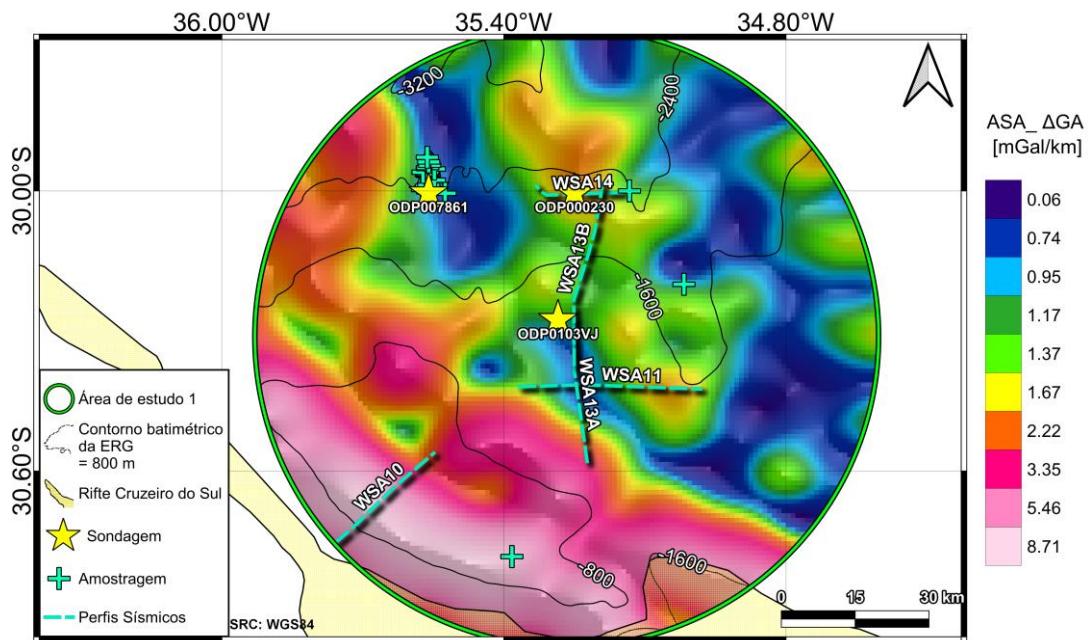
A amplitude do Sinal Analítico (ASA) se caracteriza por ampliar os curtos e atenuar os longos comprimentos de onda em três direções ortogonais (X, Y, Z). Na área de estudo regional (Figura 25) seus valores variam de 0,02 a 24,16 mGal / km. Os dados realçaram as bordas do rifteamento e realçaram feições geomorfológicas semicirculares. Além destas foram identificadas outras que podem ser associadas à edifícios vulcânicos.

Figura 25 - Mapa da ASA_ ΔG_A na área de estudo regional

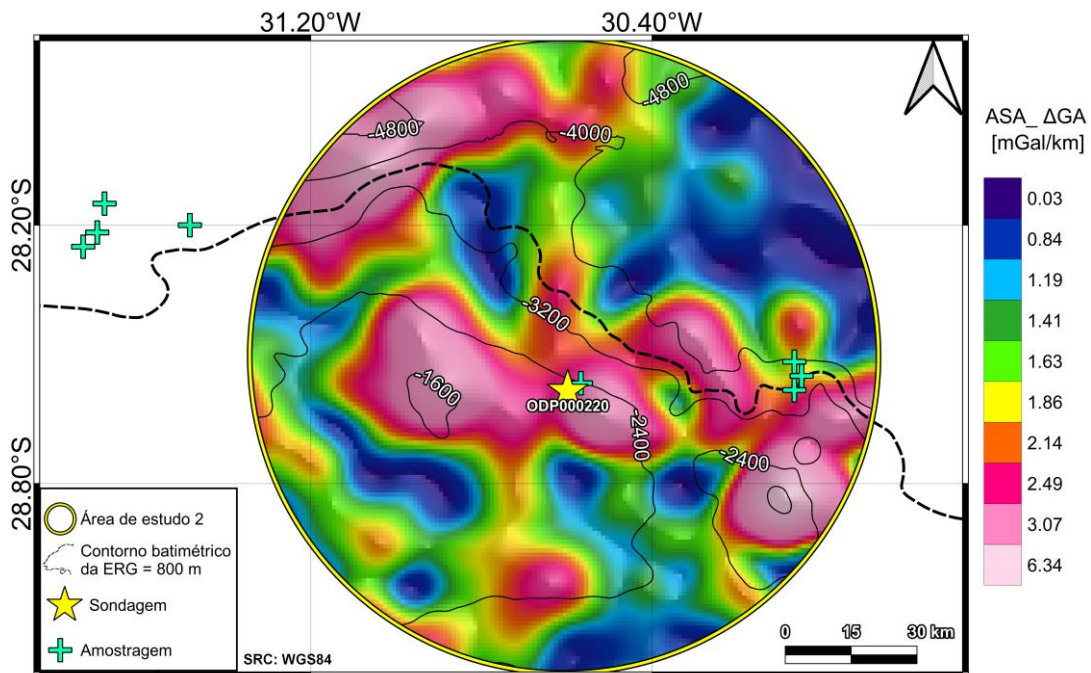


Fonte: Modificado Kim & Wessel, (2011).

Os valores de ASA_ ΔG_A na área de estudo 1 (Figura 26) variam de 0,06 a 8,71 mGal / km. Os valores mais altos estão relacionados diretamente com o contato das fontes anômalas na borda do rifteamento. A feição semicircular detectada pela 1°DV_ ΔG_A é visível novamente, porém com maior realce.

Figura 26 - Mapa da ASA_ ΔG_A na área de estudo 1

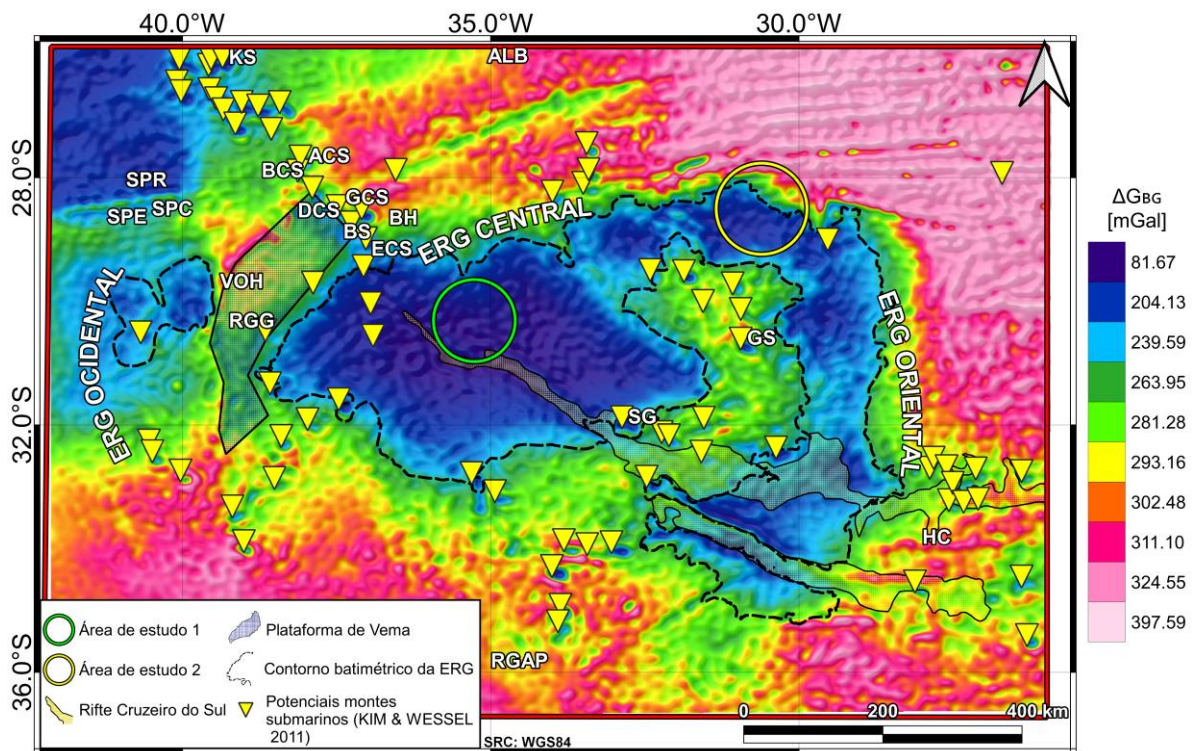
Os valores de ASA_ ΔG_A na área de estudo 2 (Figura 27) ficaram entre 0,03 e 6,34 mGal / km. Os maiores valores estão localizados nas regiões mais altas (batimetricamente) da cordilheira. Na região leste da área de estudo é novamente visível a feição semicircular com maior realce.

Figura 27 - Mapa da ASA_ ΔG_A na área de estudo 2

6.4. Anomalia Bouguer simples

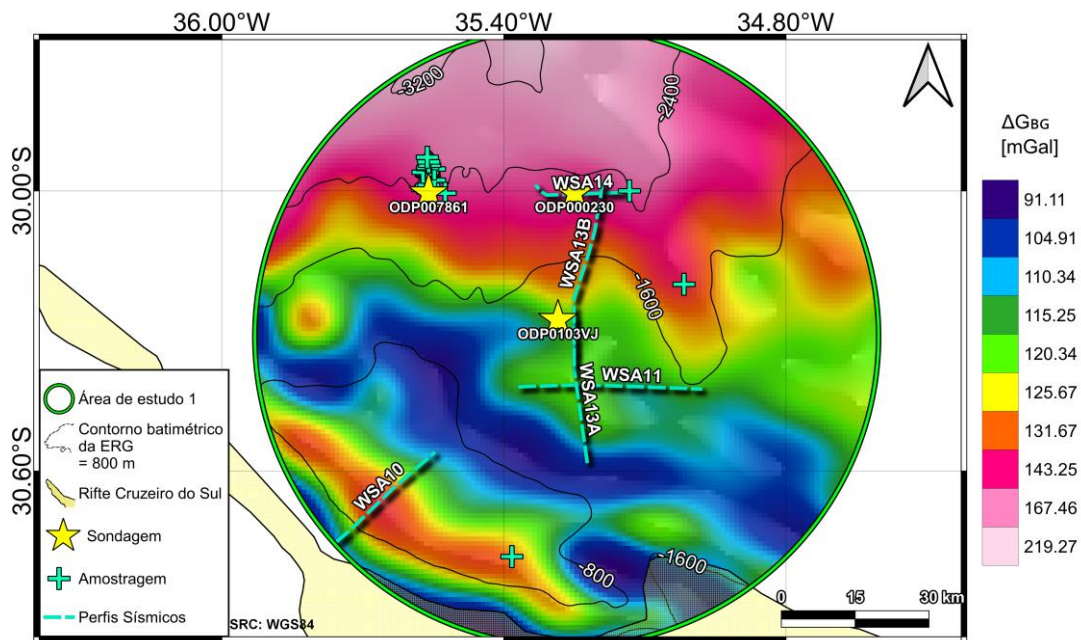
Os valores da anomalia Bouguer simples (ΔG_{BG}) na área de estudo regional (Figura 28) variam de -81,67 a 397,59 mGal. Os valores mais baixos estão localizados na região delimitada da ERG e na região noroeste delimitando a cordilheira de São Paulo. Os valores mais altos estão localizados nas regiões de fundo oceânico.

Figura 28 - Mapa da ΔG_{BG} na área de estudo regional

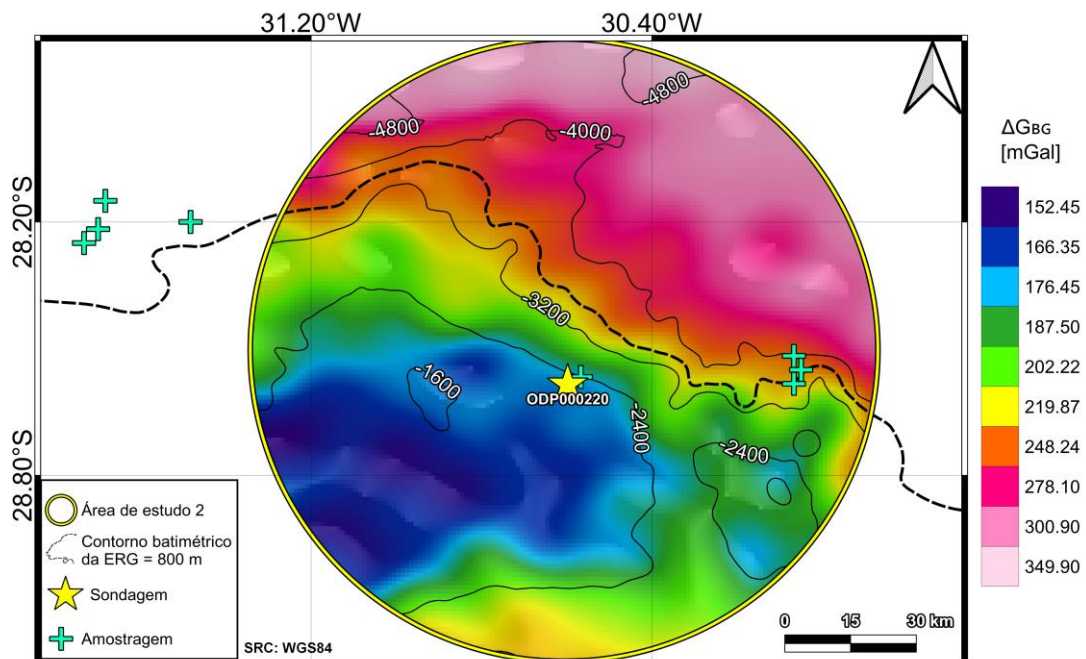


Fonte: Modificado Kim & Wessel, (2011).

Os valores de ΔG_{BG} na área de estudo 1 (Figura 29) possuem valores de 91,11 a 219,27 mGal. Os valores mais altos estão localizados ao norte da área de estudo, podendo estar correlacionados com a alta deposição de sedimentos. Os altos valores estão localizados ao norte da área de estudo podendo estar correlacionado com a alta deposição de sedimentos, os médios valores estão relacionados as bordas do rifteamento e os baixos valores ao rifteamento e na região de transição de borda e planície abissal.

Figura 29 - Mapa da $1 \Delta G_{BG}$ na área de estudo 1

Os valores de anomalia Bouguer na área 2 (Figura 30) de estudo estão entre 152,45 e 349,90 mGal. Os valores mais baixos estão relacionados a região das cordilheiras enquanto os valores mais altos estão relacionados ao fundo oceânico.

Figura 30 - Mapa da $1 \Delta G_{BG}$ na área de estudo 2

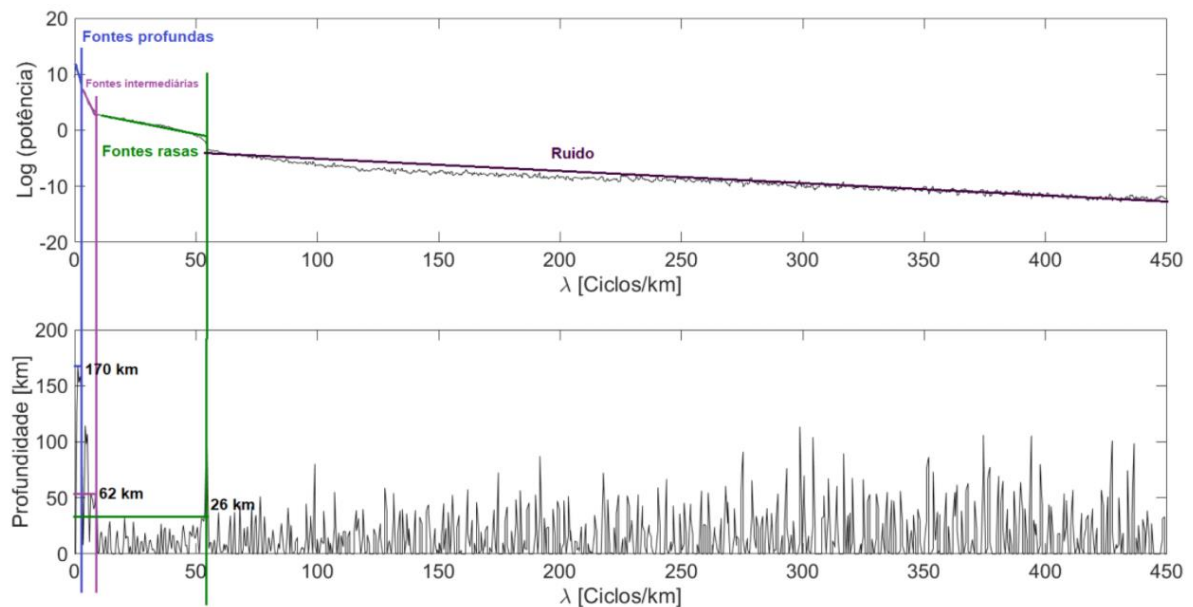
6.5. Anomalia Bouguer residual

Conforme observado nos dados da Figura 28, os valores ΔG_{BG} são caracterizados por serem altos e positivos. Uma explicação para estes altos valores positivos seria a influência da profundidade rasa da descontinuidade de Mohorovičić (Moho) (NAGY, 1966).

Para reduzir este efeito é necessário remover os altos comprimentos de ondas (relacionados a fontes anômalas profundas) por meio da técnica de filtragem separação regional/residual. Neste trabalho, a aplicação desta técnica de realce foi realizada de forma semi-quantitativa, a partir da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT), e pela análise de um espectro de potência radial gerado a partir dos dados de ΔG_{BG} (Figura 31), da área de estudo 1 (Figura 32) e da área de estudo 2 (Figura 33).

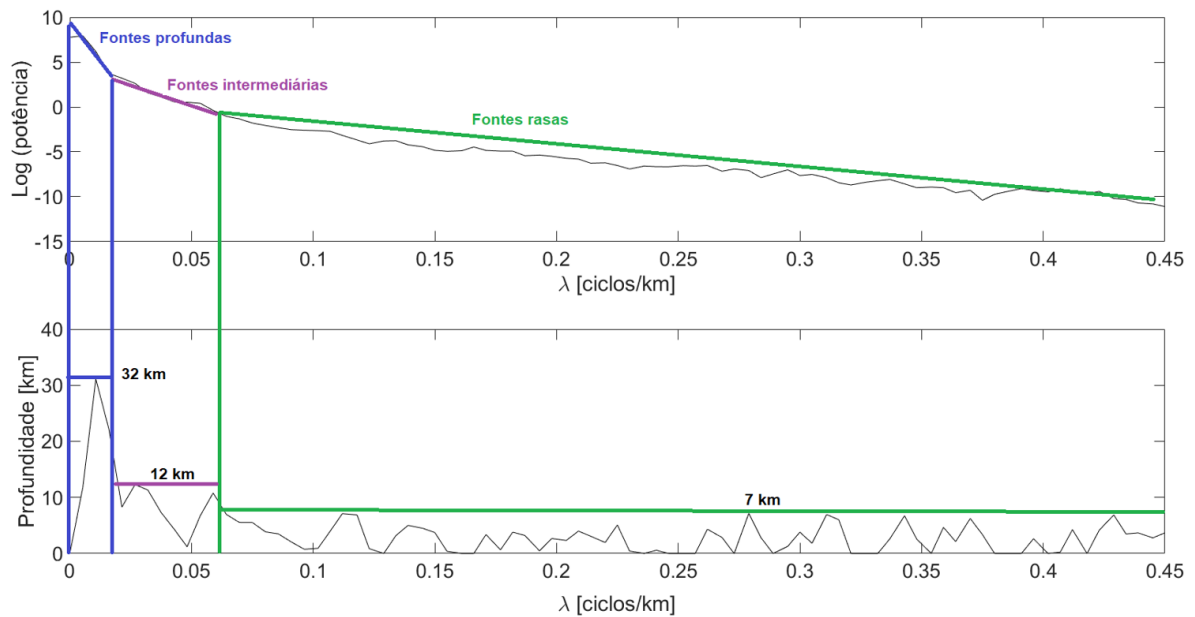
- a) Os resultados do espectro de potência radial da ΔG_{BG} (Figura 33) indicam a presença de fontes anômalas profundas localizadas até 170 km de profundidade, fontes anômalas intermediárias localizadas no máximo a 62 km de profundidade e, fontes anômalas rasas (residuais) com profundidade máxima de 26 km;

Figura 31 - Espectro de potência radial dos dados de ΔG_{BG}



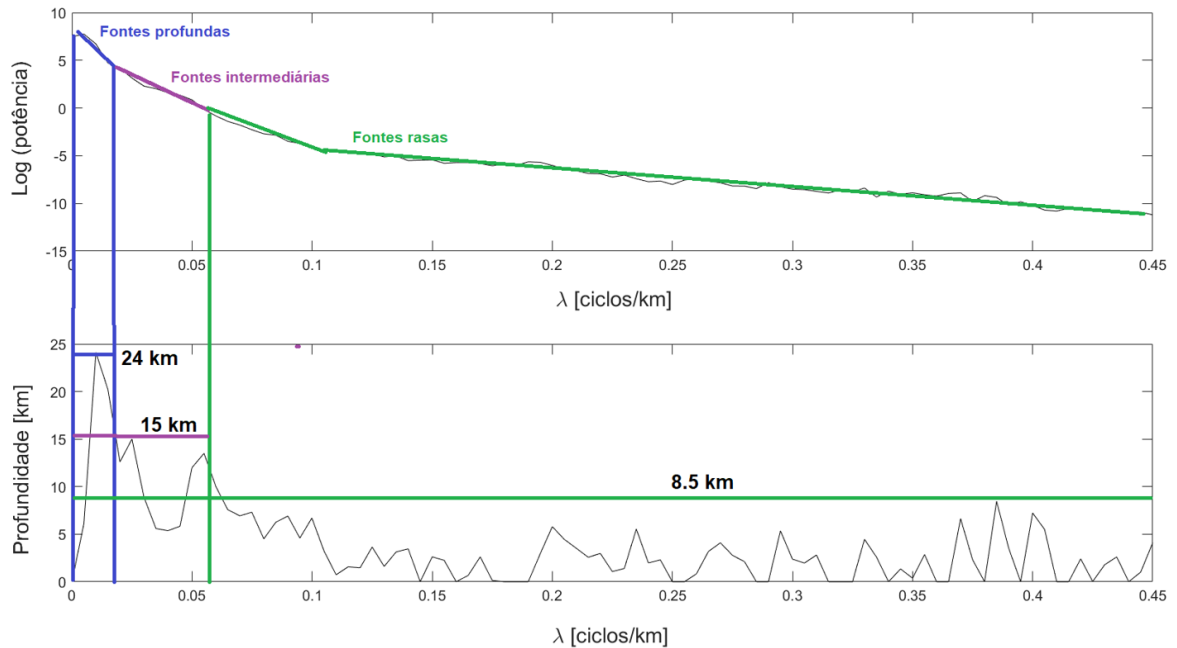
- b) Os resultados de ΔG_{BG} da área de estudo 1 (Figura 34) indicaram fontes anômalas profundas localizadas no máximo a 32 km de profundidade, fontes anômalas intermediárias localizadas no máximo a 12 km de profundidade e fontes anômalas rasas (residuais) com profundidade máxima de 7 km;

Figura 32 - Espectro de potência radial dos dados de ΔG_{BG} da área de estudo 1



- c) Os resultados de ΔG_{BG} da área de estudo 2 (Figura 35) indicaram fontes anômalas profundas localizadas a até 24 km de profundidade, fontes anômalas intermediárias localizadas no máximo a 15 km de profundidade e fontes anômalas rasas (residuais) com profundidade máxima de 8,5 km.

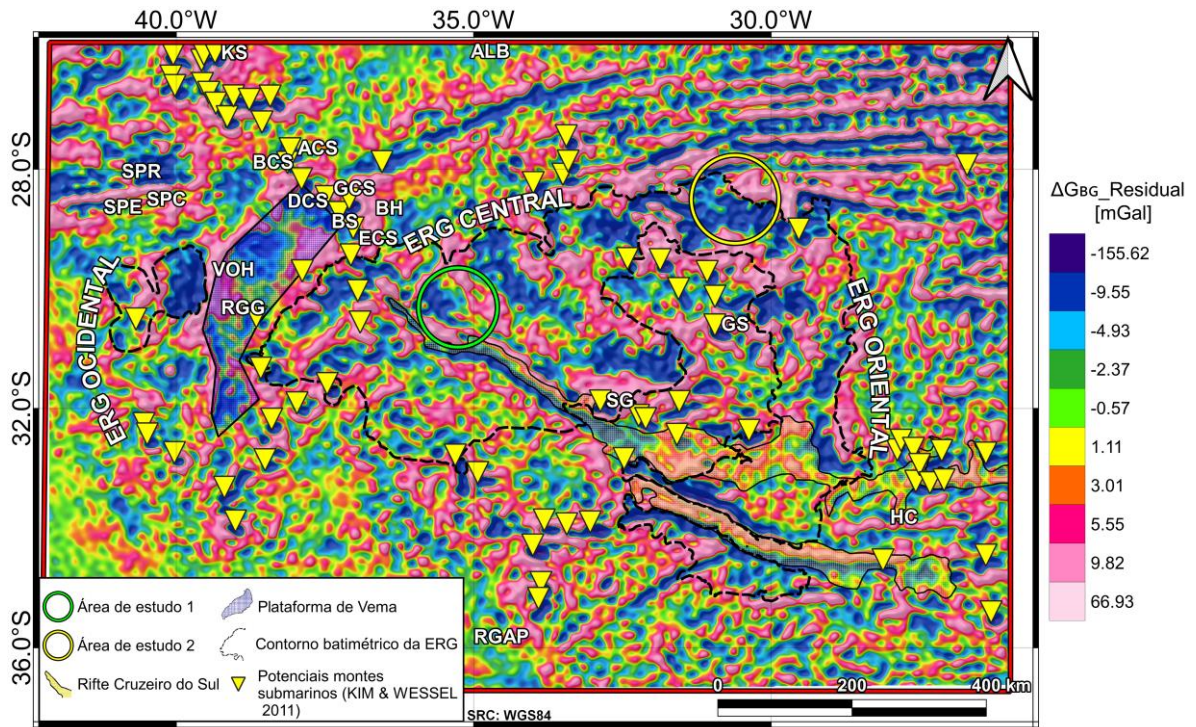
Figura 33 - Espectro de potência radial dos dados de ΔG_{BG} da área de estudo 2



As separações das frequências são realizadas de forma semi-qualitativa com relação a profundidade (comprimentos de ondas longos, intermediários e curtos) de fontes causadoras (SPECTOR & GRANT, 1970). Após a definição do limite de cada comprimento de onda é aplicado o filtro *Butterworth* para extrai-la.

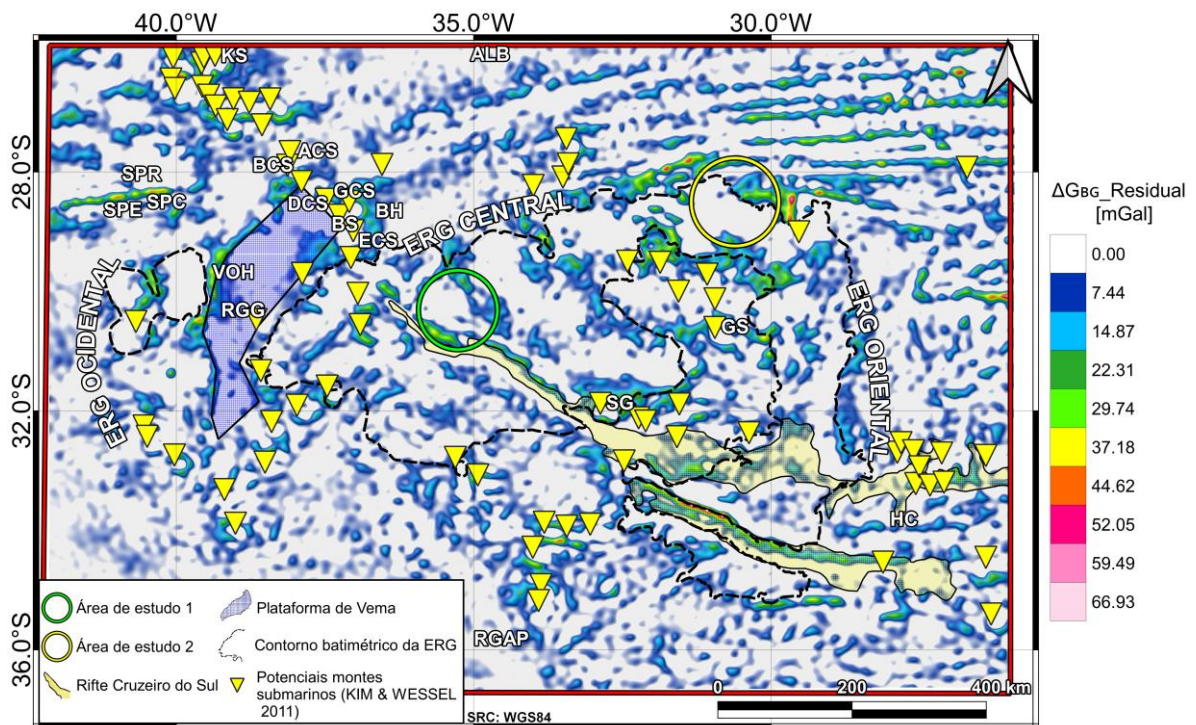
A anomalia Bouguer Residual ($\Delta G_{BG_Residual}$), na área de estudo regional (Figura 34) apresenta fontes rasas (<26 km), com valores variando de -155,62 a 66,93 mGal. Para melhor visualização foram separados os valores positivos (Figura 35) e negativos (Figura 36) da $\Delta G_{BG_Residual}$. Os valores negativos permitiram delimitar geometrias das feições geomorfológicas.

Figura 34 - Mapa da $\Delta G_{BG_Residual}$ na área de estudo regional



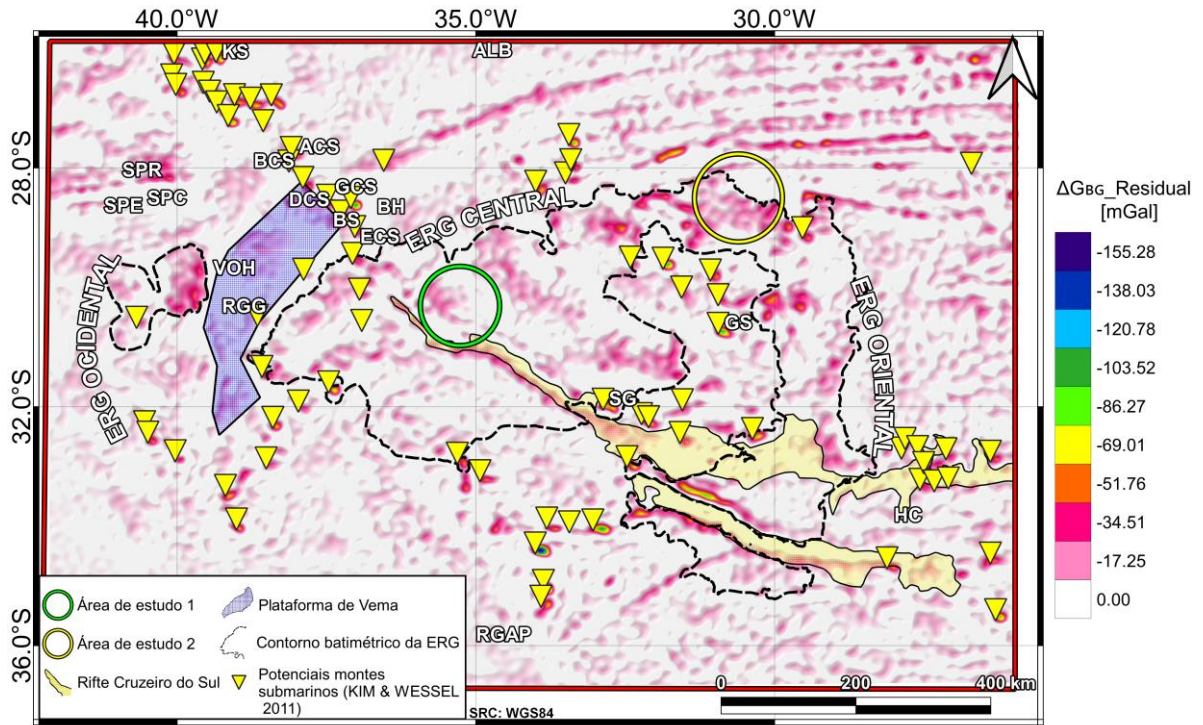
Fonte: Modificado Kim & Wessel, (2011).

Figura 35 - Mapa da $\Delta G_{BG_Residual}$ positiva na área de estudo regional



Fonte: Modificado Kim & Wessel, (2011).

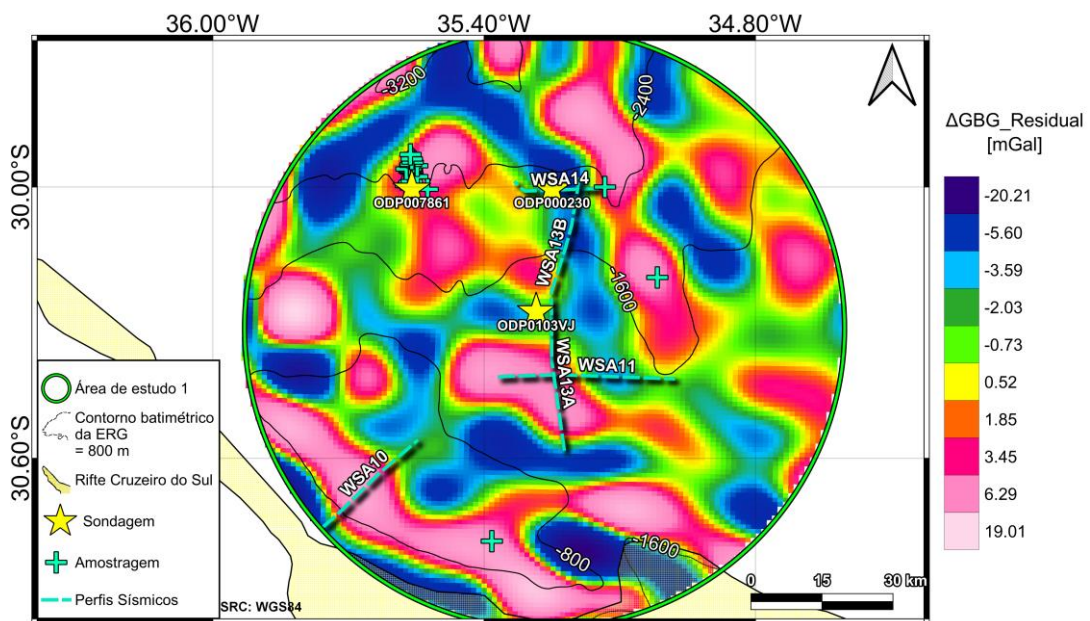
Figura 36 - Mapa da $\Delta G_{BG_Residual}$ negativa na área de estudo regional



Fonte: Modificado Kim & Wessel, (2011).

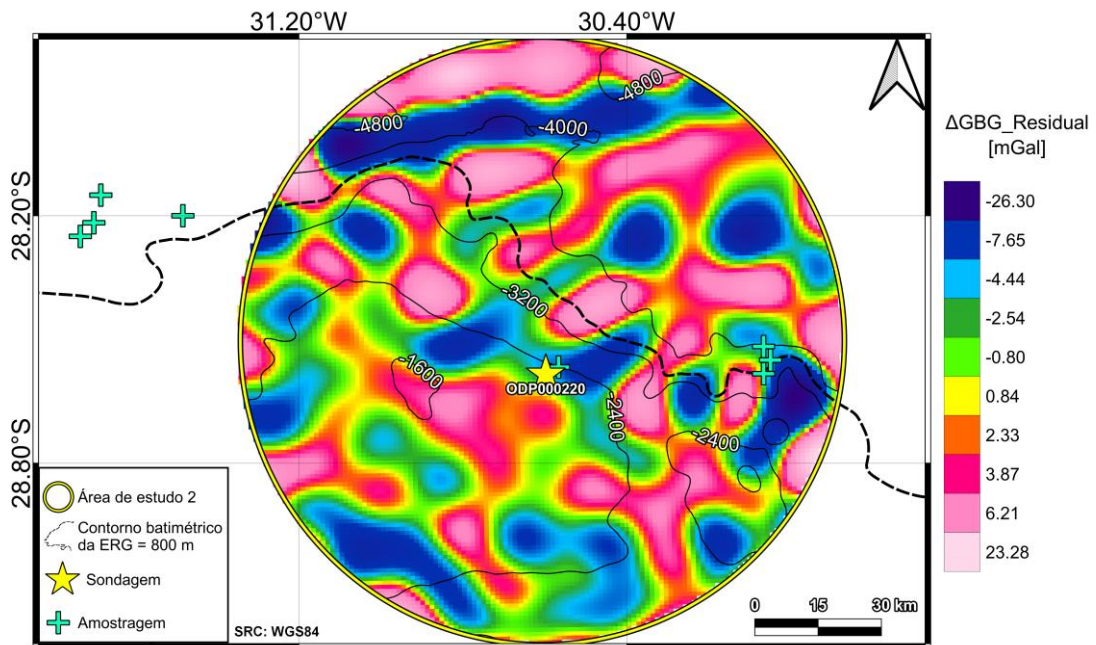
A anomalia $\Delta G_{BG_Residual}$ para a área de estudo 1 (Figura 37) apresenta fontes anômalas rasas (< 7 km) com valores de -20,21 a 19,01 mGal.

Figura 37 - Mapa da $\Delta G_{BG_Residual}$ na área de estudo 1



A $\Delta G_{BG_Residual}$ para a área de estudo 2 (Figura 38) apresenta fontes anômalas rasas (< 8,5 km) com valores entre -26,30 e 23,26 mGal.

Figura 38 - Mapa da $\Delta G_{BG_Residual}$ na área de estudo 2

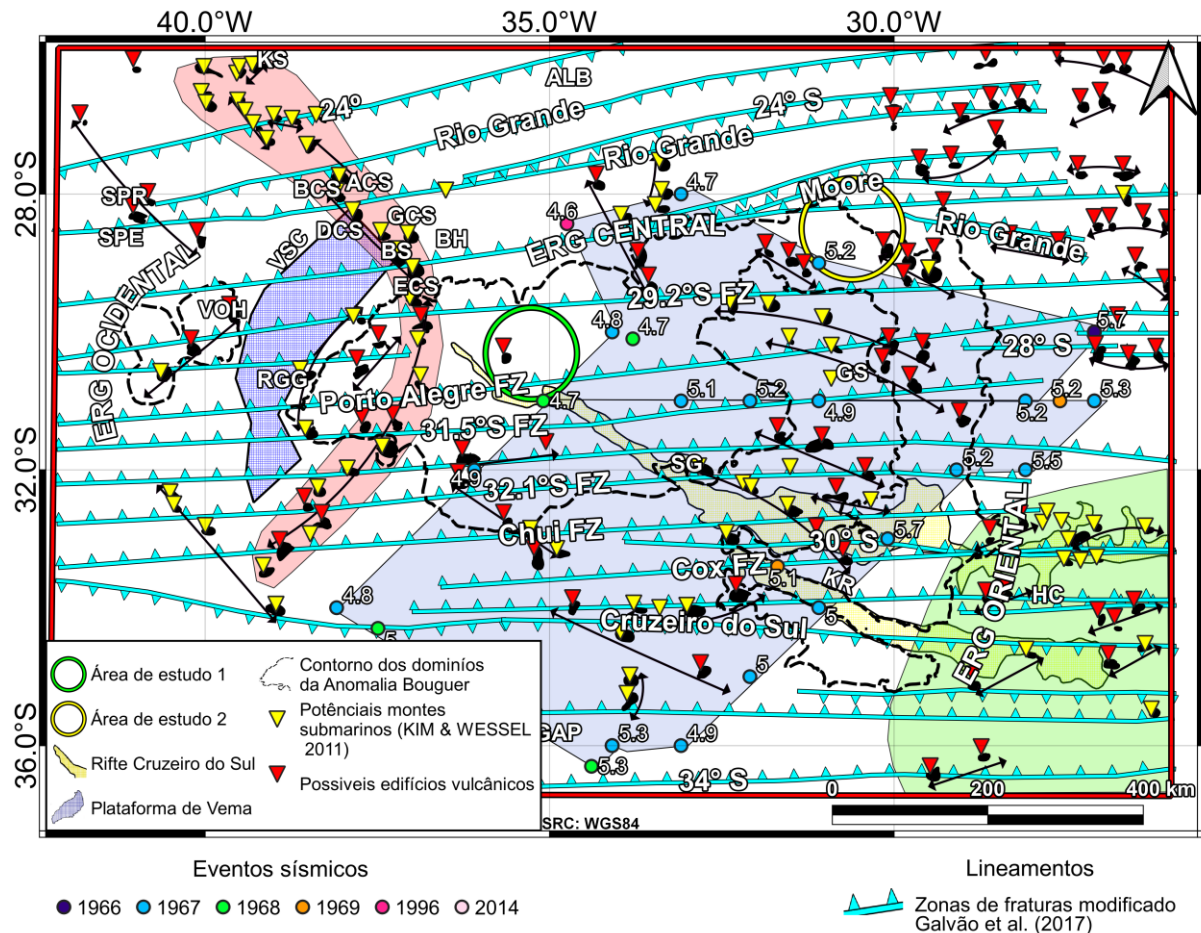


6.6. Delimitação dos edifícios vulcânicos

O termo “edifício vulcânico” é definido em glossários geológicos e livros didáticos da vulcanologia como: elevações morfológicas formadas a partir de eventos magmáticos.

As geometrias dos edifícios vulcânicos e dos potenciais montes submarinos (KIM & WESSEL, 2011) geradas a partir da anomalia ar-livre, Bouguer e pelas técnicas de realce podem ser visualizadas na Figura 39.

Figura 39 - Mapa da localização e geometria dos edifícios vulcânicos sugeridos por Kim & Wessel (2011) (indicado pelos triângulos amarelos) e por este trabalho (indicado pelos triângulos vermelhos) com destaque aos lineamentos e polígonos indicando três grupos principais de edifícios vulcânicos



Fonte: Modificado de Galvão et al. (2017), Kim & Wessel, (2011) e IRIS (2011)

Os edifícios vulcânicos interpretados foram separados em 3 polígonos que estão relacionados com as etapas de formação geológica da formação da ERG, do qual a partir da Figura 1 (Anexo A) é possível visualizar a reconstrução Paleogeográfica do Atlântico Sul (SCOTSESE, 2014).

O polígono vermelho faz referência as tendências dos segmentos da Cadeia Jean Charcot cuja formação pode ser análoga com diversos eventos magmáticos ocorridos ao longo da margem sudeste brasileira (GALVÃO et al. 2017). Ainda, de acordo com estes autores as intersecções com as zonas de falhas reativadas durante a formação do Rifte Cruzeiro do Sul podem ter servido como condutos para elevação magmática.

O polígono azul apresenta uma região que foi interpretada como uma possível microplaca inativa que teria sido formada entre 83,6 Ma a 71,1 Ma (THORAM et al. 2019) junto com a localização de eventos sísmicos no período de 1966 a 2014 (IRIS, 2011). Está seria uma possível teoria para explicar a formação dos edifícios vulcânicos e o motivo das distorções das anomalias gravimétricas (ΔG_A e ΔG_{BG}) por conta do excesso de produção de crosta ou limites entre excesso e déficit.

Já o polígono verde indica os edifícios vulcânicos que podem ter sido formados pelo deslocamento do ponto quente de Tristan da Cunha entre 90 a 80 Ma podendo indicar um excesso de produção de crosta e conseqüentemente a geração dos edifícios vulcânicos. O deslocamento do ponto quente pode ser inferido a partir dos dados paleobatimétricos apresentados por Pérez-Díaz & Eagles (2017).

6.7. Lineamentos extraídos regionalmente

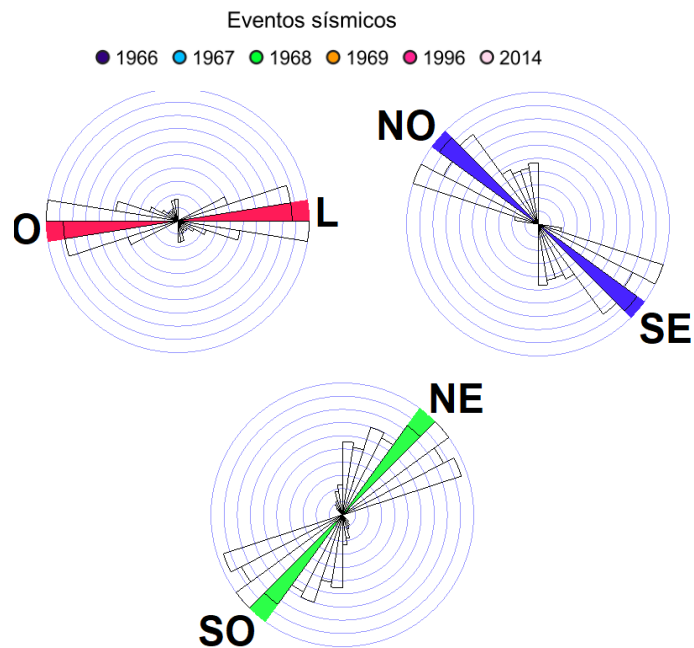
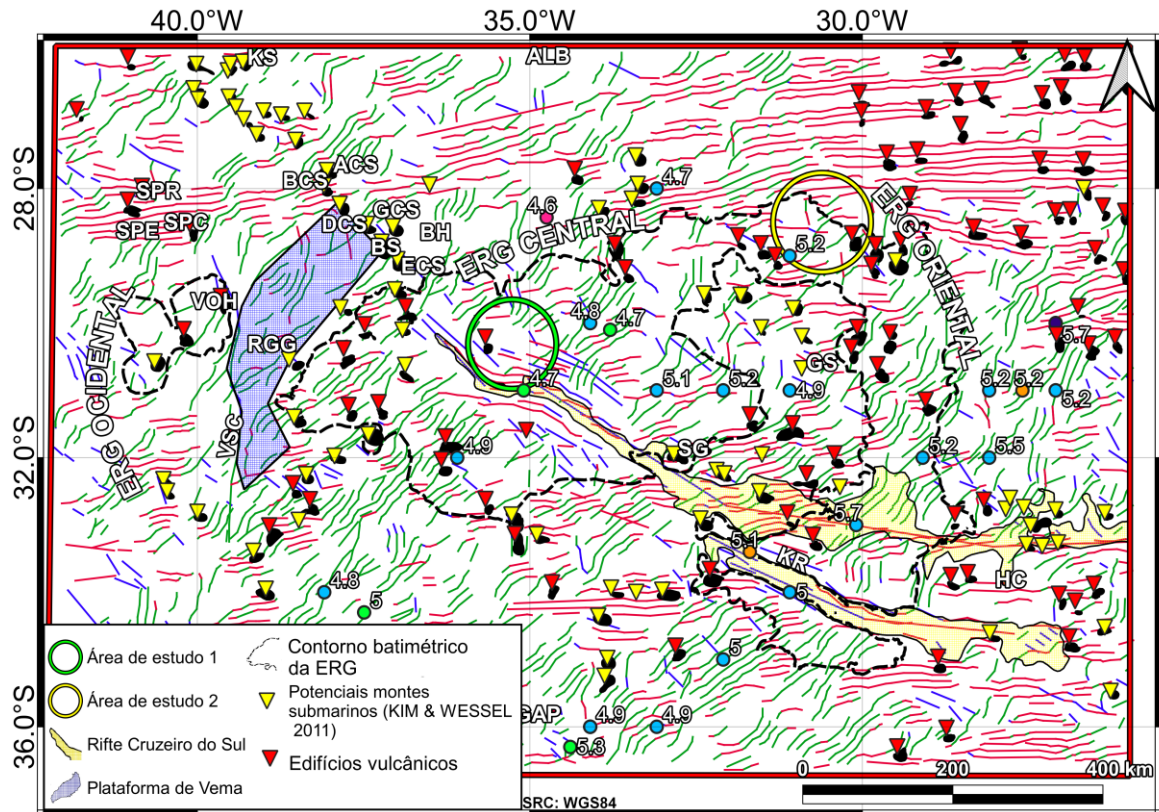
A partir dos mapas das ΔG_A , $1^\circ DV_ \Delta G_A$ e $\Delta G_{BG_Residual}$ foram realizadas as demarcações e análises dos lineamentos gravimétricos regionais (Figura 40, 41 e 42).

As direções dos lineamentos demarcados qualitativamente podem ser observadas pelos diagramas de rosa, do qual, para melhor visualização as direções preferenciais dos lineamentos foram separadas em 3 grupos indicados por cores diferentes:

- a) Grupo 1 (cor vermelha): Possui direção preferencial leste-oeste;
- b) Grupo 2 (cor azul): Possui direção preferencial noroeste-sudeste;
- c) Grupo 3 (cor verde): Possui direção preferencial nordeste-sudoeste.

A direção preferencial ao todo dos lineamentos observados para a ΔG_A é leste-oeste.

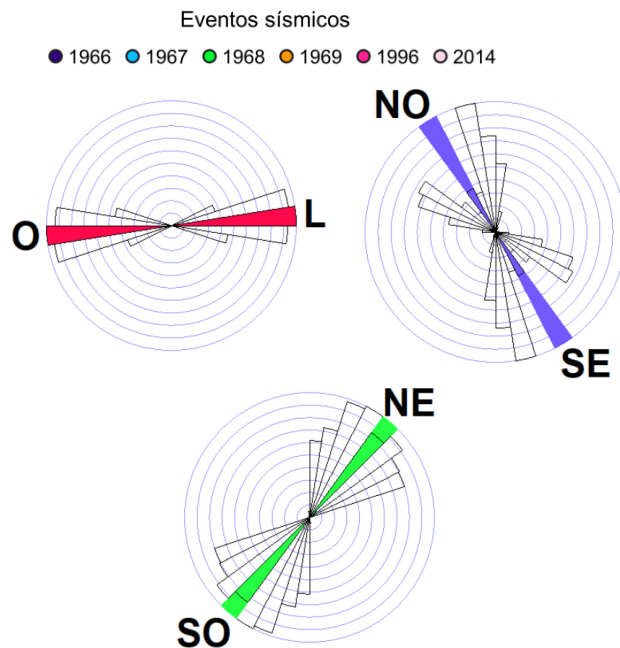
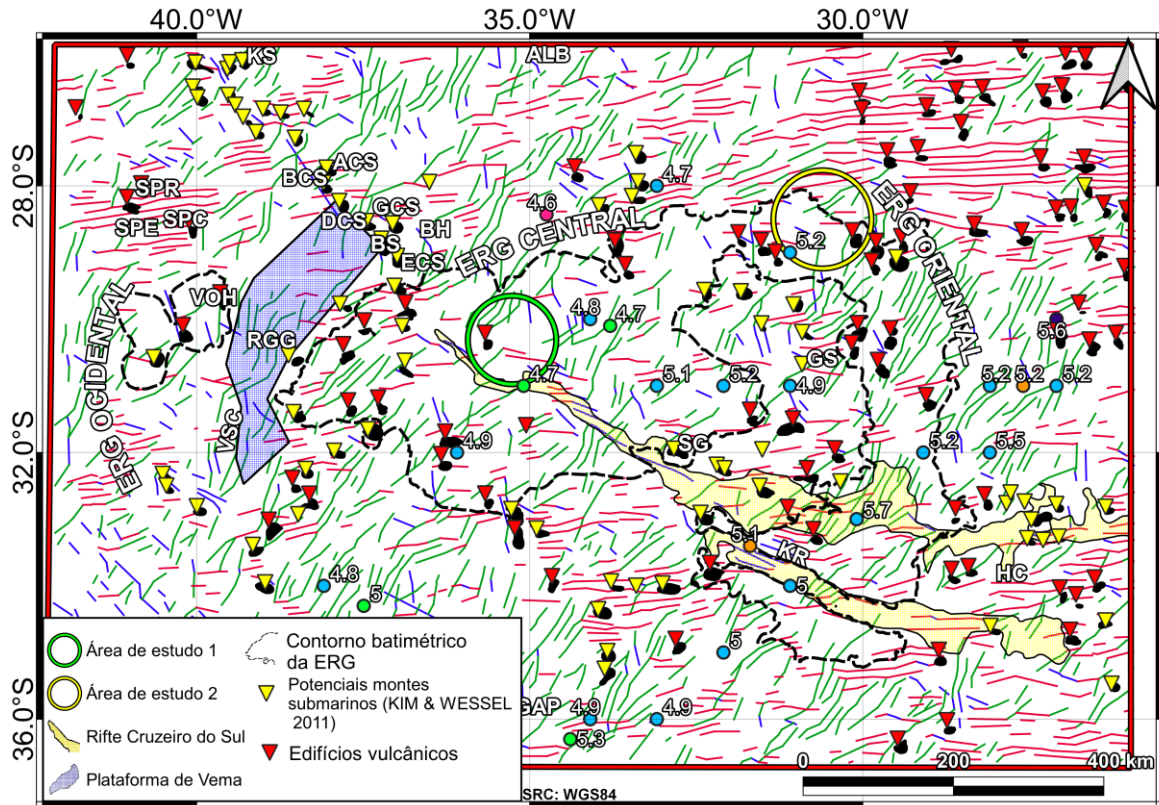
Figura 41 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da $1^\circ DV_ \Delta G_A$ na área de estudo regional separados por direções preferenciais dos lineamentos da $1^\circ DV_ \Delta G_A$



Fonte: Modificado de Kim & Wessel, (2011) e IRIS (2011).

A direção preferencial ao todo dos lineamentos observados para a $1^\circ DV_{\Delta G_A}$ é nordeste-sudoeste.

Figura 42 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da $\Delta G_{BG_Residual}$ na área de estudo regional separados por direções preferenciais dos lineamentos da $\Delta G_{BG_Residual}$

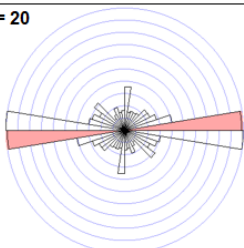
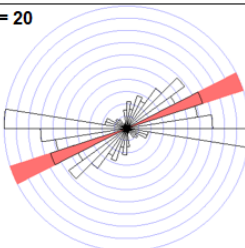
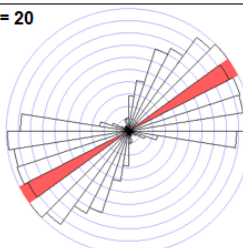


Fonte: Modificado de Kim & Wessel, (2011) e IRIS (2011).

Os mapas de $\Delta G_{BG_Residual}$ geraram resultados parecidos com os obtidos pela $1^\circ DV_ \Delta G_A$. Esta similaridade se deve ao fato de que ambos os filtros ressaltam as fontes anômalas rasas. A principal diferença observada é o maior realce de lineamentos gravimétricos na direção nordeste-sudoeste.

Para melhor visualização das direções preferenciais juntas dos lineamentos de ΔG_A , $1^\circ DV_ \Delta G_A$ e $\Delta G_{BG_Residual}$ foi gerada a Tabela 2.

Tabela 2 - Tabela das direções preferenciais juntas dos lineamentos de ΔG_A , $1^\circ DV_ \Delta G_A$ e $\Delta G_{BG_Residual}$ na escala regional

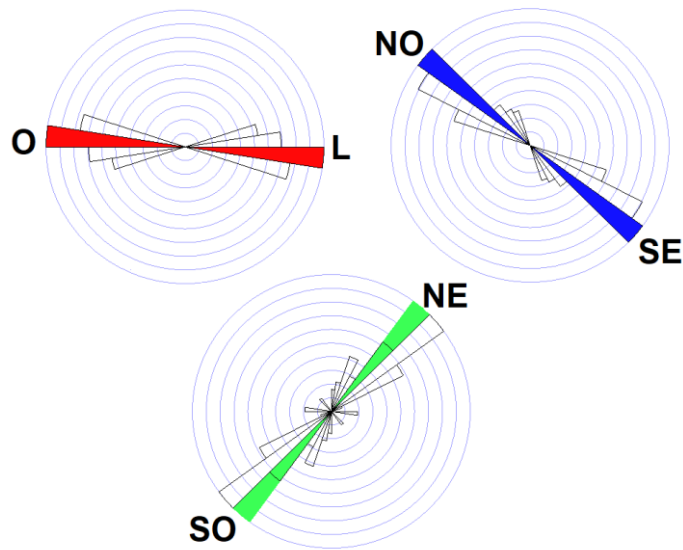
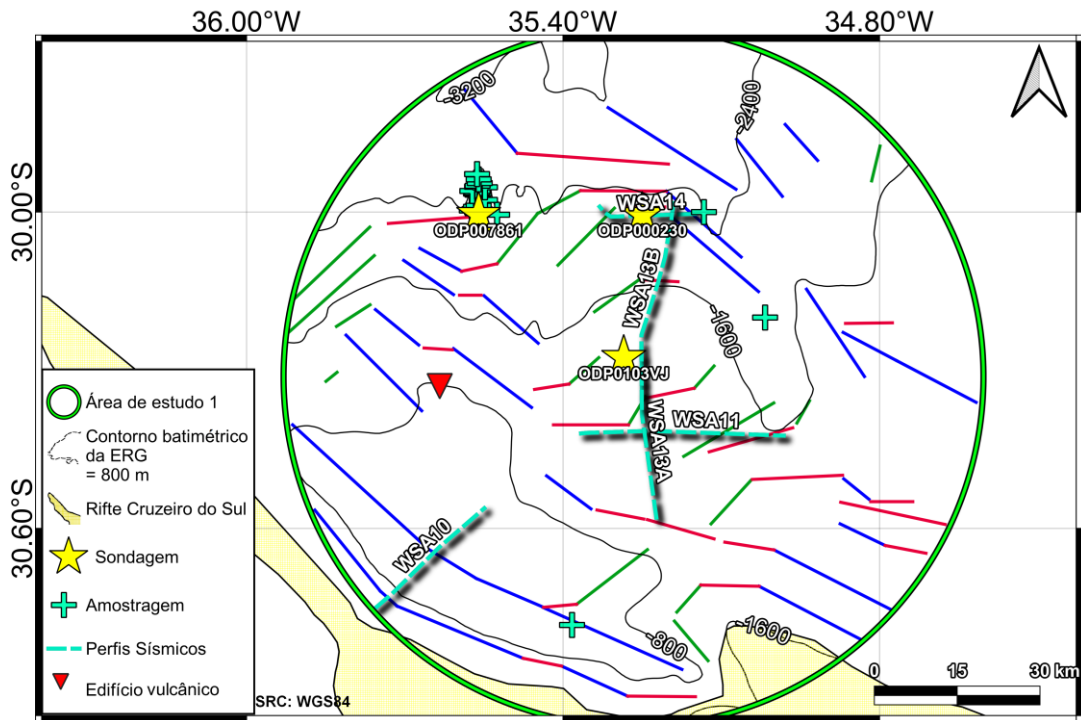
Áreas de estudo	ΔG_A	$1^\circ DV_ \Delta G_A$	$\Delta G_{BG_Residual}$
Regional	n = 20 	n = 20 	n = 20 

6.8. Lineamentos extraídos da área de estudo 1 e 2

Para os estudos locais foram adotadas as mesmas divisões de grupos para direções preferenciais utilizadas nos mapas regionais.

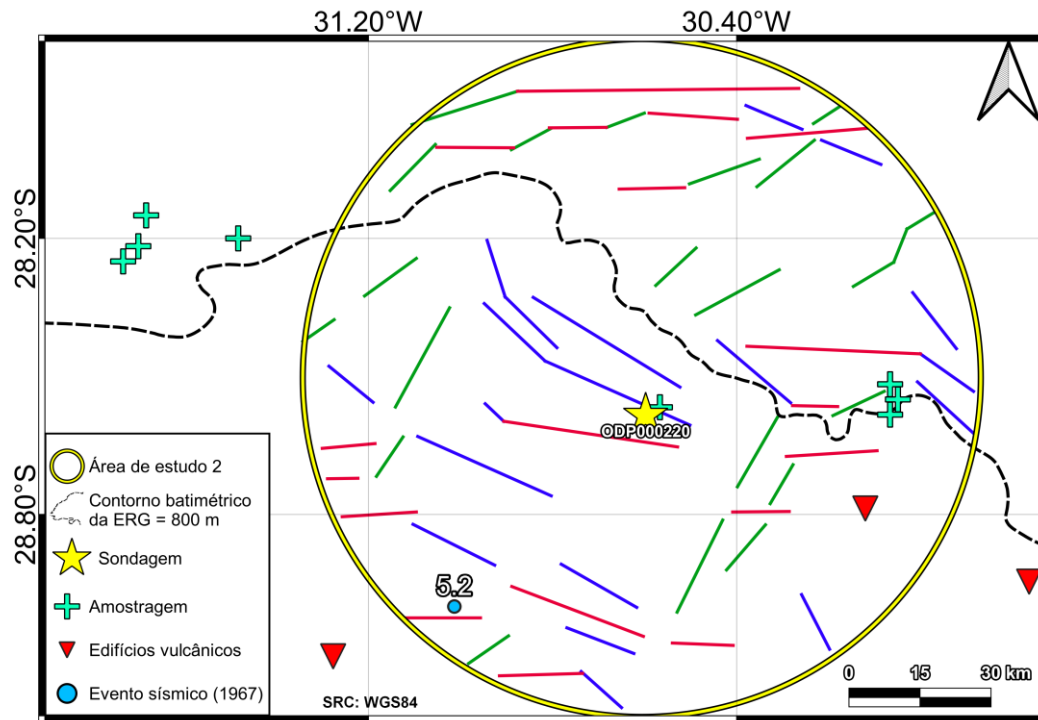
A partir dos mapas das áreas 1 e 2 das ΔG_A , $1^\circ DV_ \Delta G_A$ e $\Delta G_{BG_Residual}$ foram realizadas as demarcações dos lineamentos gravimétricos (Figura 43, 44 45, 46, 47, 48).

Figura 43 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da ΔG_A na área de estudo 1 com o diagrama de roseta com as direções preferenciais dos lineamentos da ΔG_A



O diagrama apresenta diversos lineamentos de direção leste-oeste, noroeste-sudeste e norte-sul, sendo a direção preferencial observada para os dados de ΔG_A noroeste-sudeste.

Figura 44 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da ΔG_A na área de estudo 2 com o diagrama de roseta com as direções preferenciais dos lineamentos da ΔG_A



Na área de estudo 1 o diagrama apresenta diversos lineamentos de direção leste-oeste, noroeste-sudeste e norte-sul, sendo a direção preferencial observada para os dados de ΔG_A noroeste-sudeste. Na área de estudo 2 a direção preferencial observada para os dados de ΔG_A é nordeste-sudoeste e apresenta diversos lineamentos na direção leste-oeste.

Figura 45 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da 1°DV_ ΔG_A na área de estudo 1 com o diagrama de roseta com as direções preferenciais dos lineamentos da 1°DV_ ΔG_A

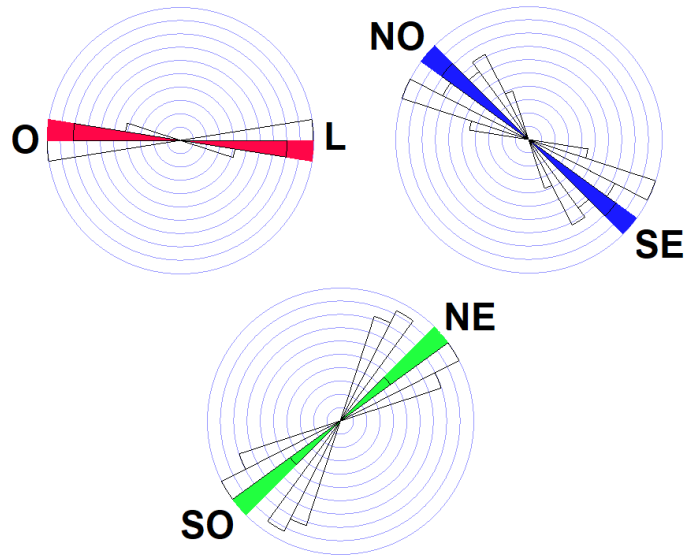
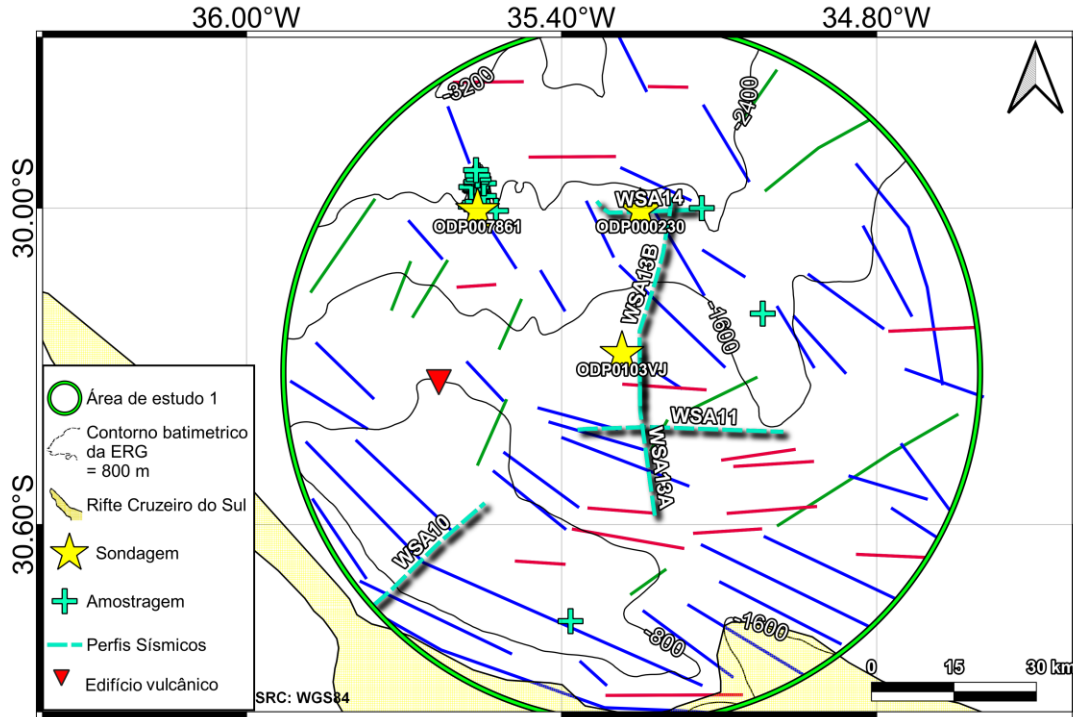
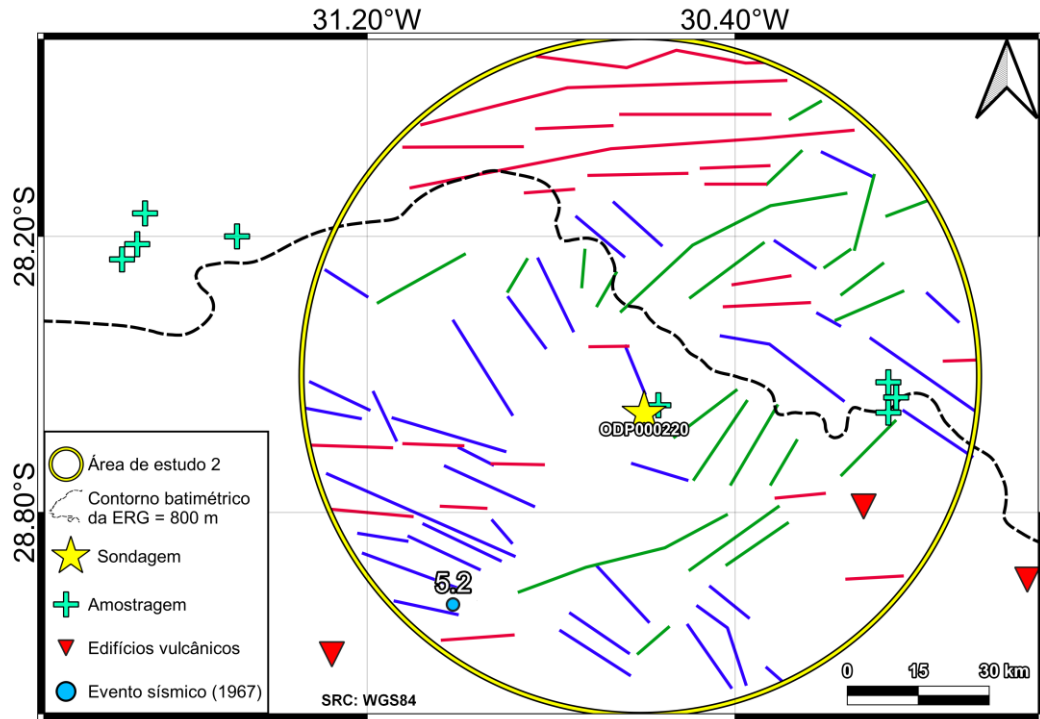


Figura 46 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da $1^{\circ}DV_ \Delta G_A$ na área de estudo 2 com o diagrama de roseta com as direções preferenciais dos lineamentos da $1^{\circ}DV_ \Delta G_A$



Os lineamentos de $1^{\circ}DV_ \Delta G_A$ para a área de estudo 1 apresenta a mesma direção preferencial que os lineamentos demarcados pela ΔG_A (noroeste-sudeste) e apresenta diversos lineamentos de direção leste-oeste. Esta relação pode ser relacionada as anomalias rasas geradas pelo rifteamento Cruzeiro do Sul que para a área de estudo 1 está orientada em noroeste-sudeste. Os lineamentos obtidos pela

$1^{\circ}DV_{\Delta G_A}$ na área de estudo 2 possuem direção preferencial leste-oeste e apresenta muitos lineamentos de direção noroeste-sudeste.

Figura 47 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da $\Delta G_{BG_Residual}$ na área de estudo 1 com o diagrama de roseta com as direções preferenciais dos lineamentos da $\Delta G_{BG_Residual}$

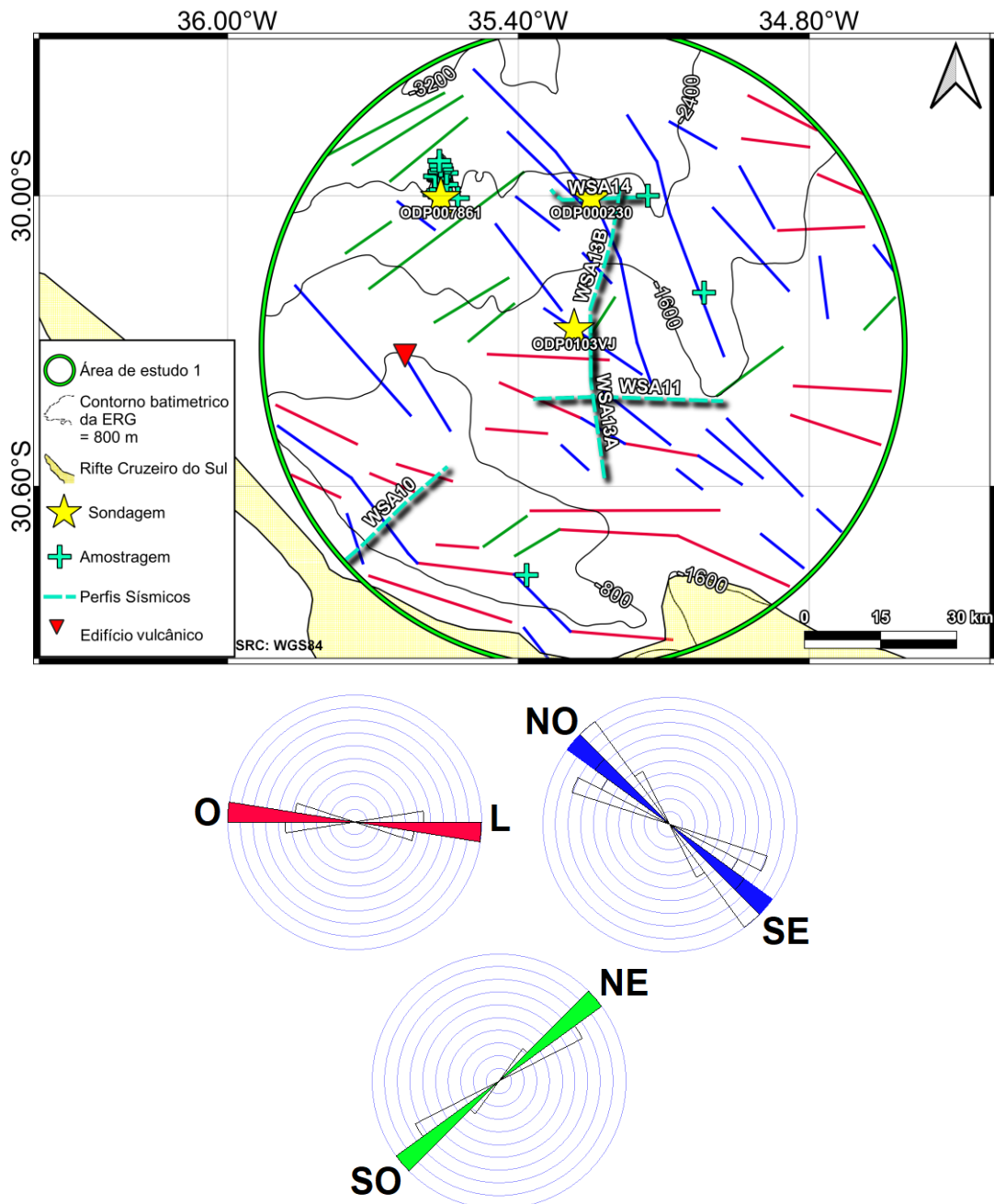
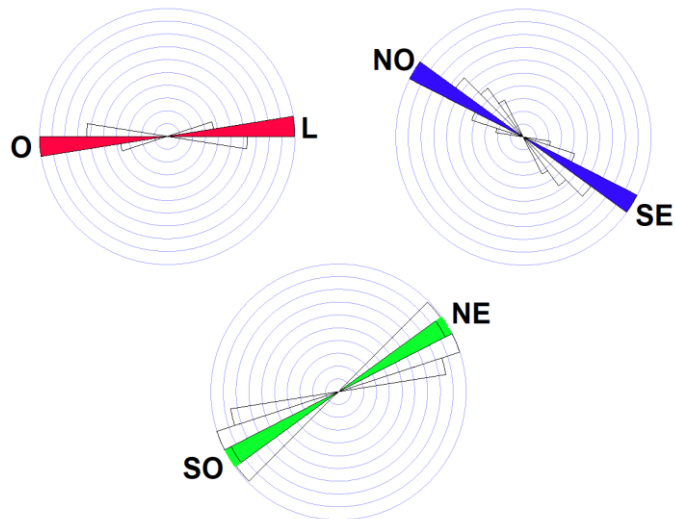
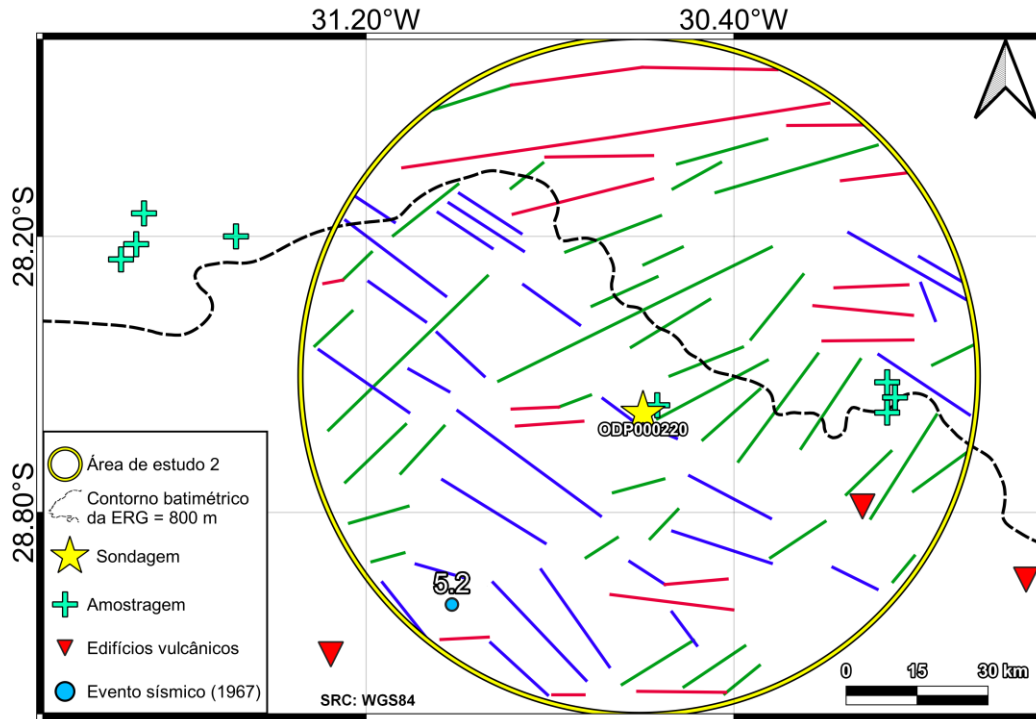


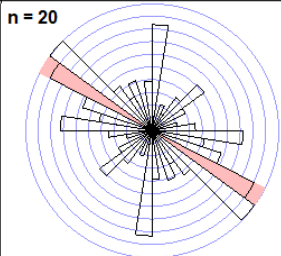
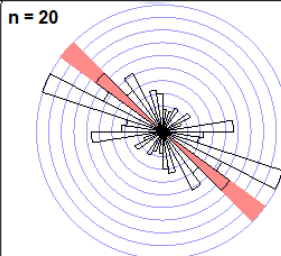
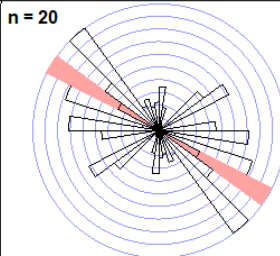
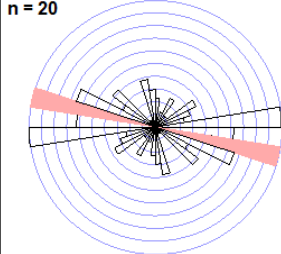
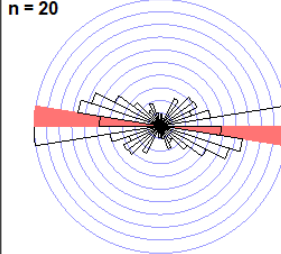
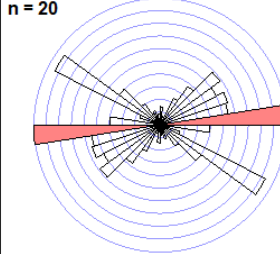
Figura 48 - Mapa geofísico/estrutural dos dados da $\Delta G_{BG_Residual}$ na área de estudo 2 com o diagrama de roseta com as direções preferenciais dos lineamentos da $\Delta G_{BG_Residual}$



Os lineamentos obtidos pela $\Delta G_{BG_Residual}$ na área de estudo 1 apresentam orientação preferencial noroeste-sudeste e diversos lineamentos nordeste-sudoeste. Para a área de estudo 2 os lineamentos obtidos pelo mapa de $\Delta G_{BG_Residual}$ a direção preferencial observada foi de leste-oeste, apresentando diversos lineamentos noroeste-sudeste e nordeste-sudoeste.

As direções preferenciais obtidas para as áreas de estudo 1 e 2 podem ser observadas em conjunto na Tabela 2.

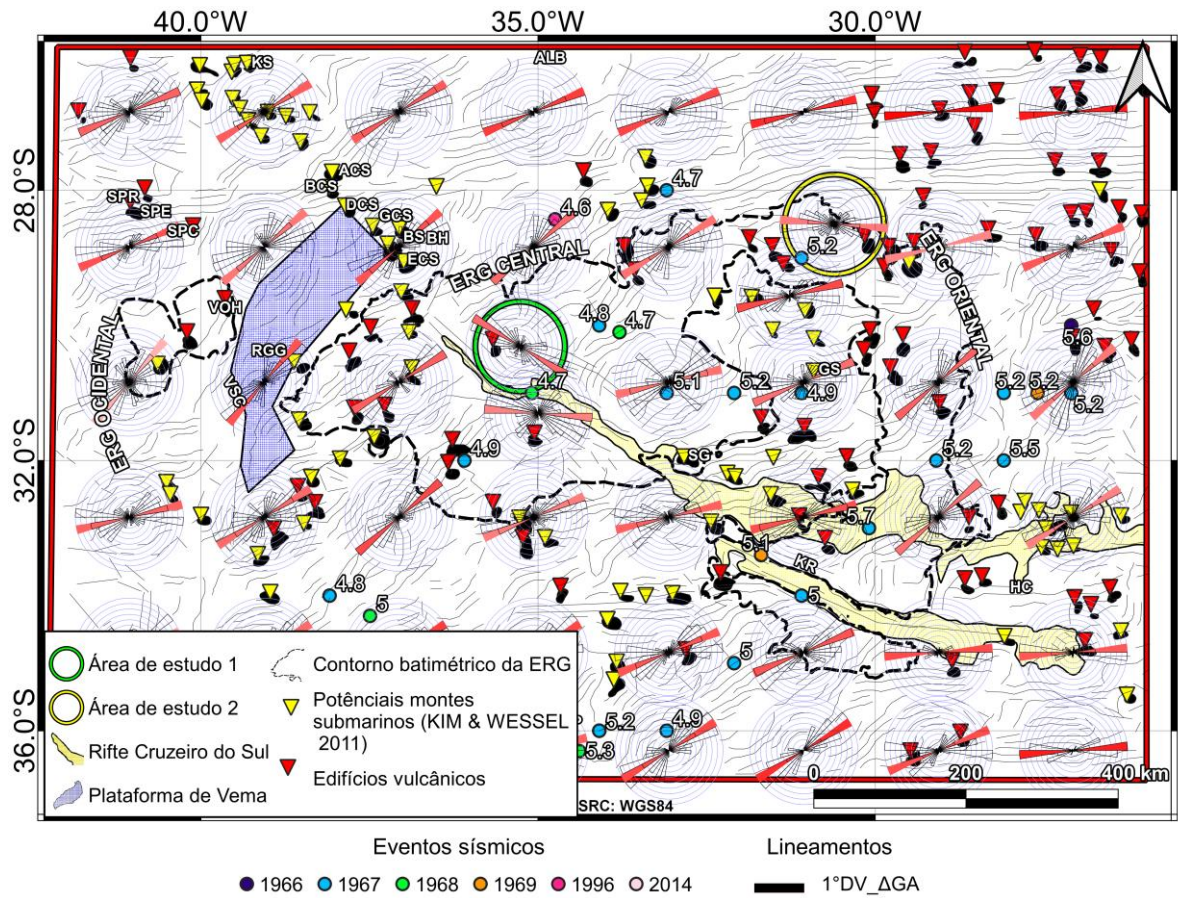
Tabela 3 - Tabela das direções preferenciais juntas dos lineamentos de ΔG_A , $1^\circ DV_ \Delta G_A$ e $\Delta G_{BG_Residual}$ na área de estudo 1 e 2

Áreas de estudo	ΔG_A	$1^\circ DV_ \Delta G_A$	$\Delta G_{BG_Residual}$
Área 1	n = 20 	n = 20 	n = 20 
Área 2	n = 20 	n = 20 	n = 20 

7. INTERPRETAÇÕES QUALITATIVAS

Para a visualização regional da variação da direção preferencial dos lineamentos da $1^\circ DV_ \Delta G_A$ e $\Delta G_{BG_Residual}$ foram gerados retângulos de 20x20 km para a criação de diagramas de roseta em quadrantes. Os lineamentos da $1^\circ DV_ \Delta G_A$ podem ser observados pela Figura 49, os diagramas de roseta apresentam ao extremo nordeste do mapa uma mudança brusca de direção preferencial sudeste-nordeste para leste-oeste. Na região central também podemos observar mudanças bruscas de direção.

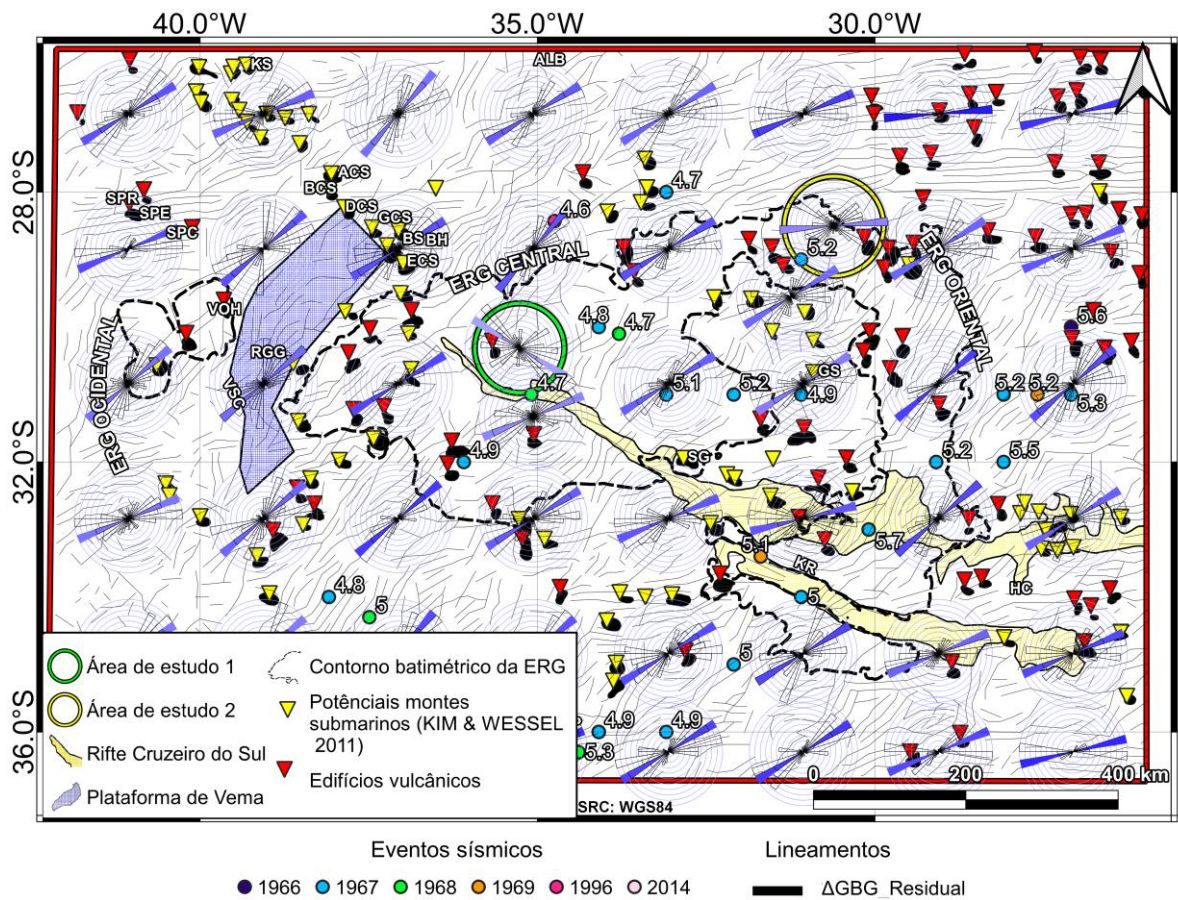
Figura 49 - Mapa geofísico/estrutural das direções preferenciais dos lineamentos extraídos da $1^{\circ}DV_{\Delta GA}$



Fonte: Modificado de Kim & Wessel, (2011) e IRIS (2011).

Os lineamentos extraídos da $\Delta G_{BG_Residual}$ (Figura 50) apresentam similaridade quando a direção preferencial.

Figura 50 - Mapa geofísico/estrutural das direções preferenciais dos lineamentos extraídos da $\Delta G_{BG_Residual}$

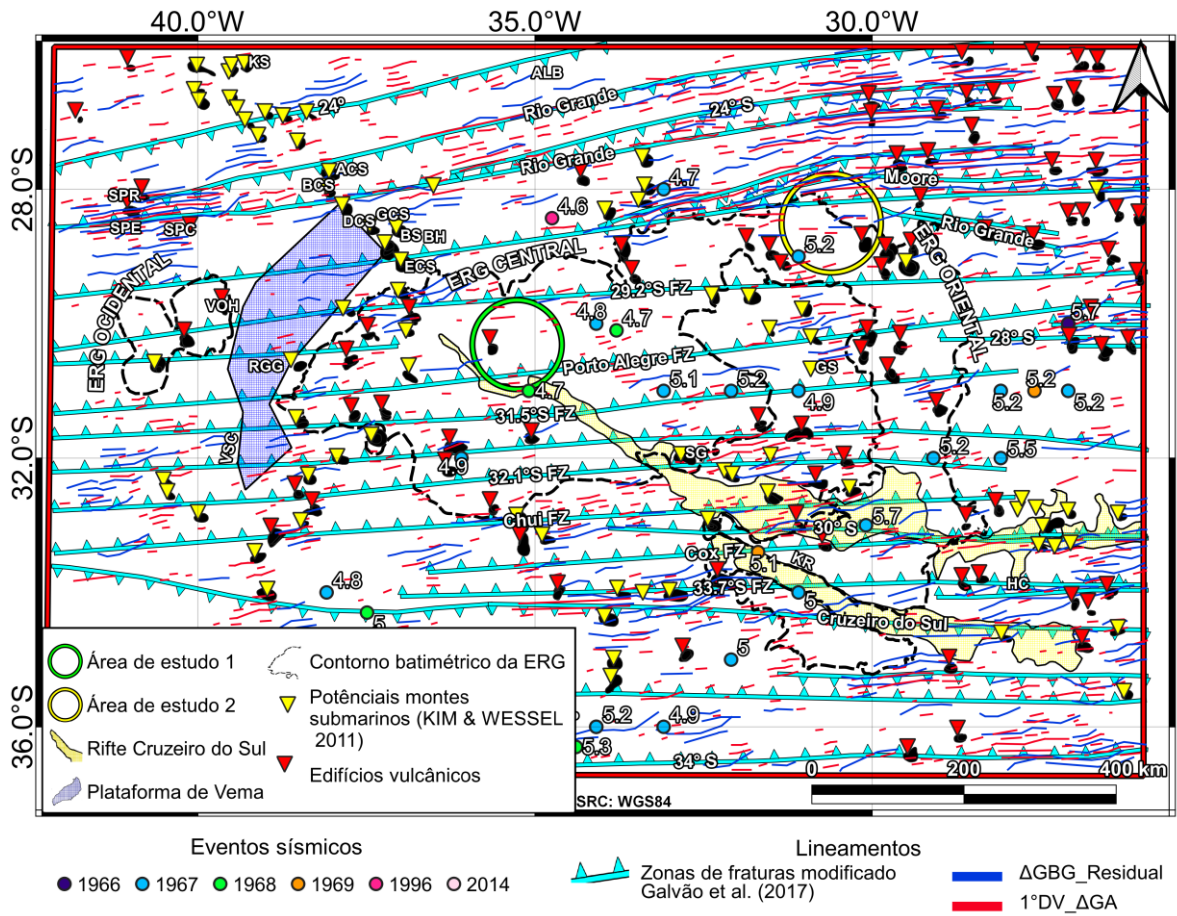


Fonte: Modificado de Kim & Wessel, (2011) e IRIS (2011).

Os lineamentos gerados por fontes anômalas rasas podem ser subdivididos entre dois grupos.

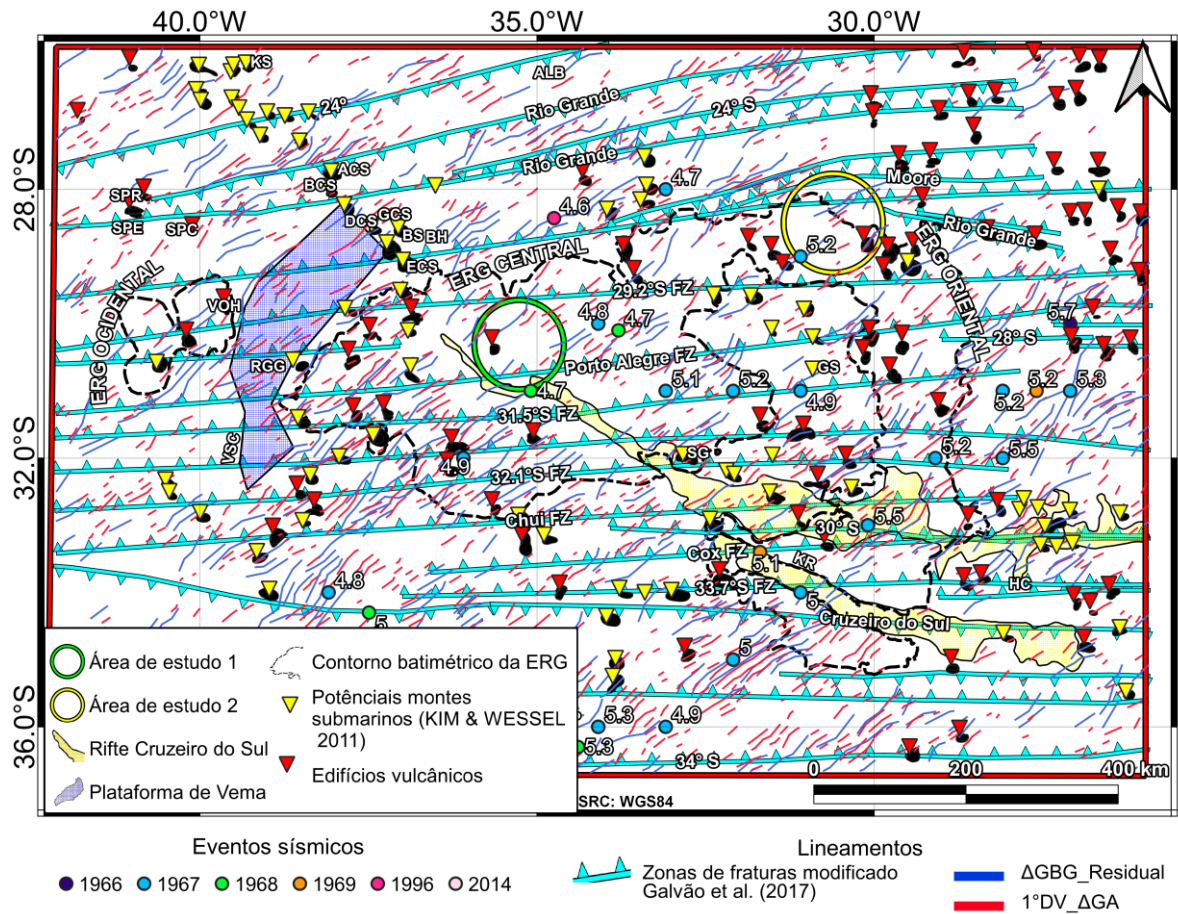
O grupo 1 (Figura 51) possui orientação leste-oeste estando alinhada as zonas de fraturas, uma possível explicação da causa destes lineamentos seria o tectonismo vertical (BONATTI, 1978), sendo definido como soerguimento de rochas ultramáficas pelo movimento vertical do manto superior e dos blocos crustais. Já o grupo 2 (Figura 52) apresenta orientação nordeste-sudoeste.

Figura 51 - Mapa geofísico/estrutural dos lineamentos extraídos de fontes anômalas rasas de direção leste-oeste



Fonte: Modificado de Galvão et al. (2017), Kim & Wessel, (2011) e IRIS (2011).

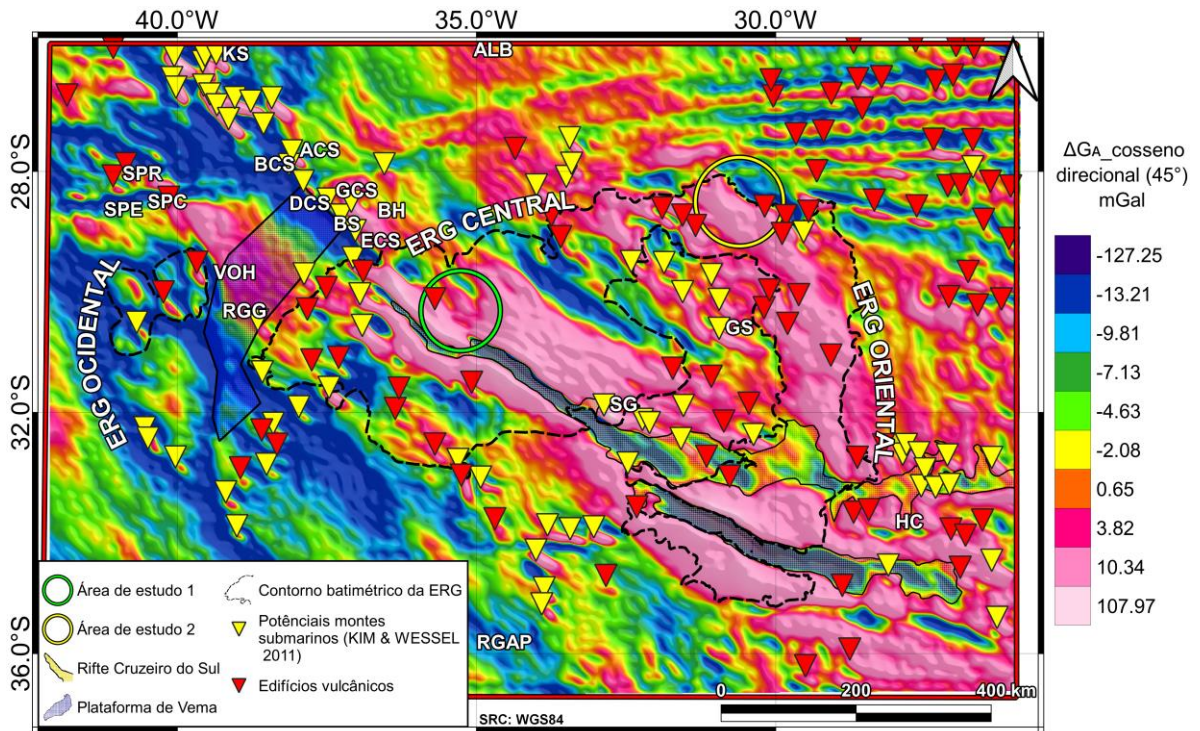
Figura 52 - Mapa geofísico/estrutural dos lineamentos extraídos de fontes anômalias rasas de direção nordeste-sudoeste



Fonte: Modificado de Galvão et al. (2017), Kim & Wessel, (2011) e IRIS (2011).

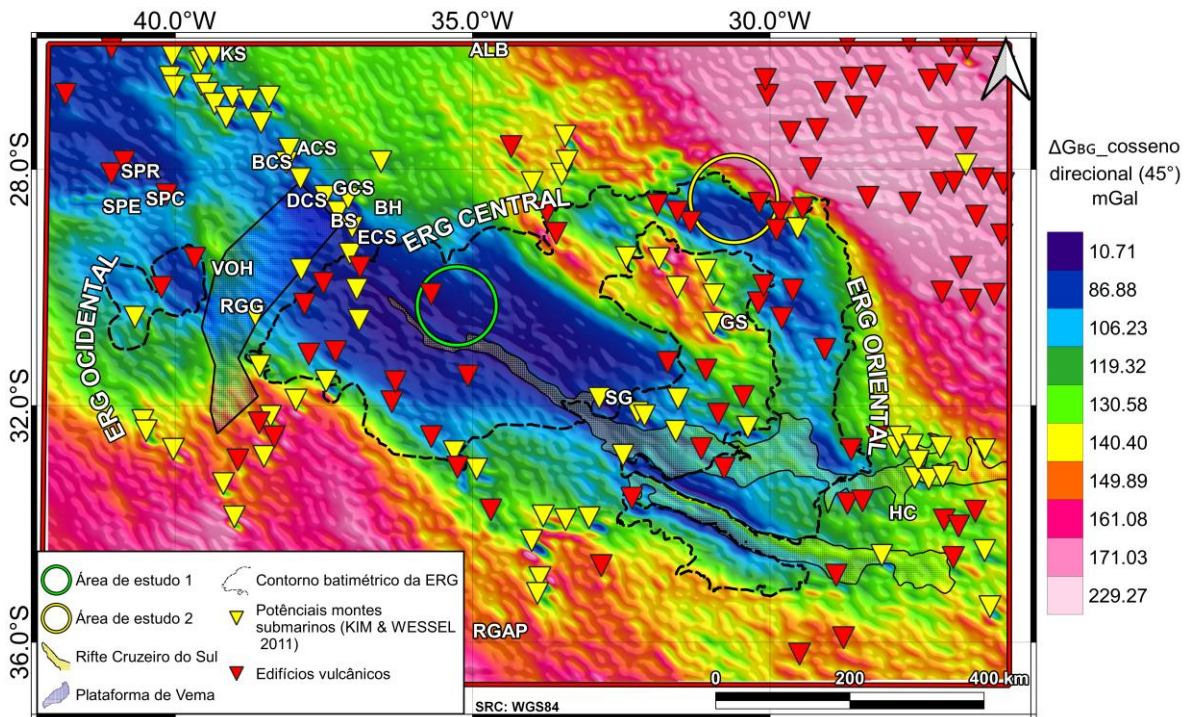
Os lineamentos de direção preferencial noroeste-sudeste estão mascarados pelas anomalias nordestes - sudoeste. Para remover este efeito primeiramente foi aplicado o filtro de cosseno direcional considerando o ângulo do azimute como 45° nos dados de ΔG_A (Figura 53) e ΔG_{BG} (Figura 54) para suavizar anomalias nesta direção. Após a aplicação deste filtro foi aplicada a derivada vertical de primeira ordem para os novos dados de $\Delta G_{A_cosseno}$ (45°) (Figura 55) e $\Delta G_{BG_cosseno}$ (45°) (Figura 56).

Figura 53 - Mapa do cosseno direcional da ΔG_A em 45°



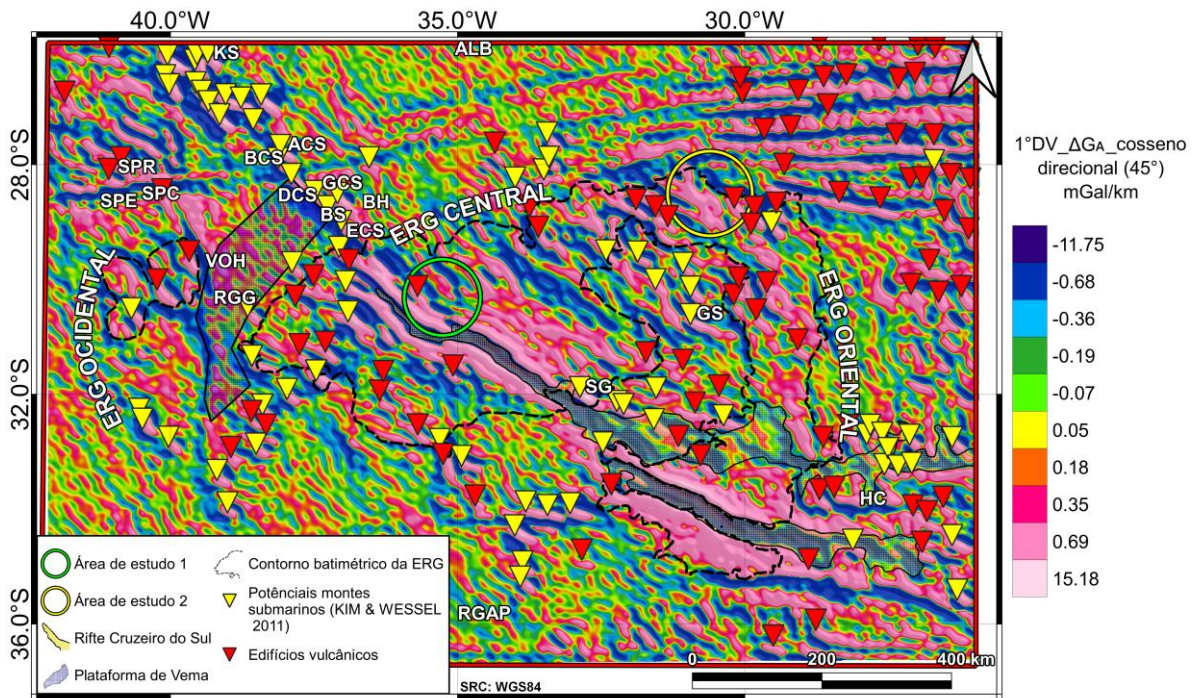
Fonte: Modificado de Kim & Wessel, (2011).

Figura 54 - Mapa do cosseno direcional da ΔG_{BG} em 45°



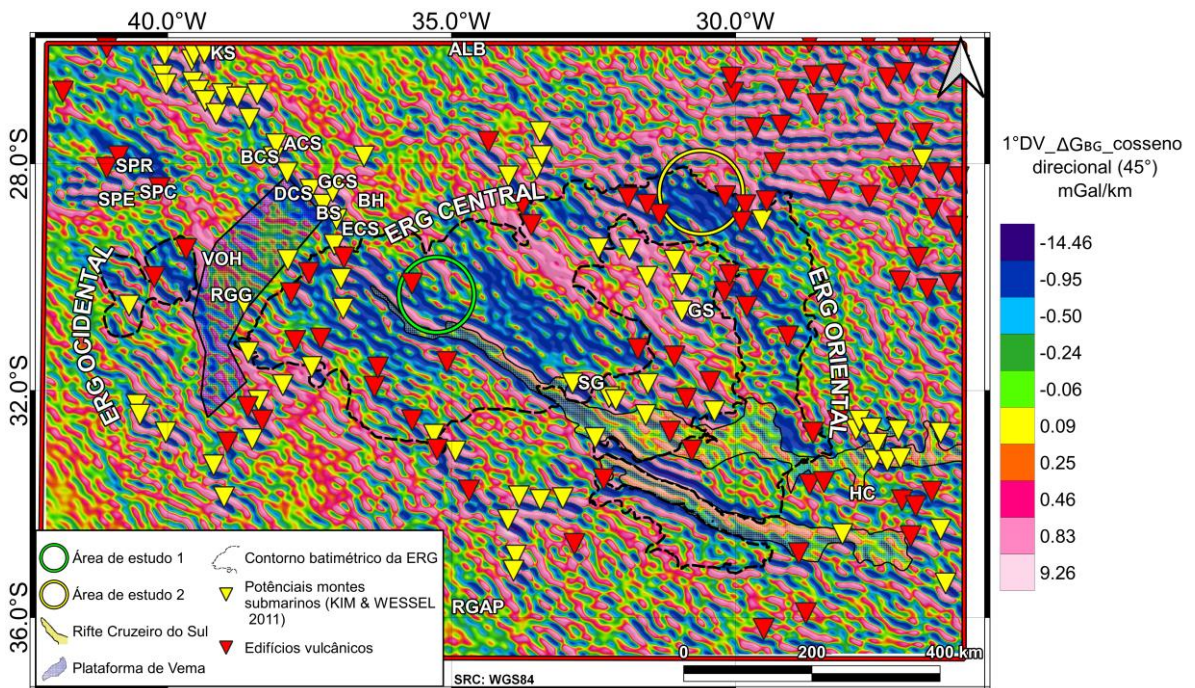
Fonte: Modificado de Kim & Wessel, (2011).

Figura 55 - Mapa do cosseno direcional da DV_ ΔG_A _cosseno (45°)



Fonte: Modificado de Kim & Wessel, (2011).

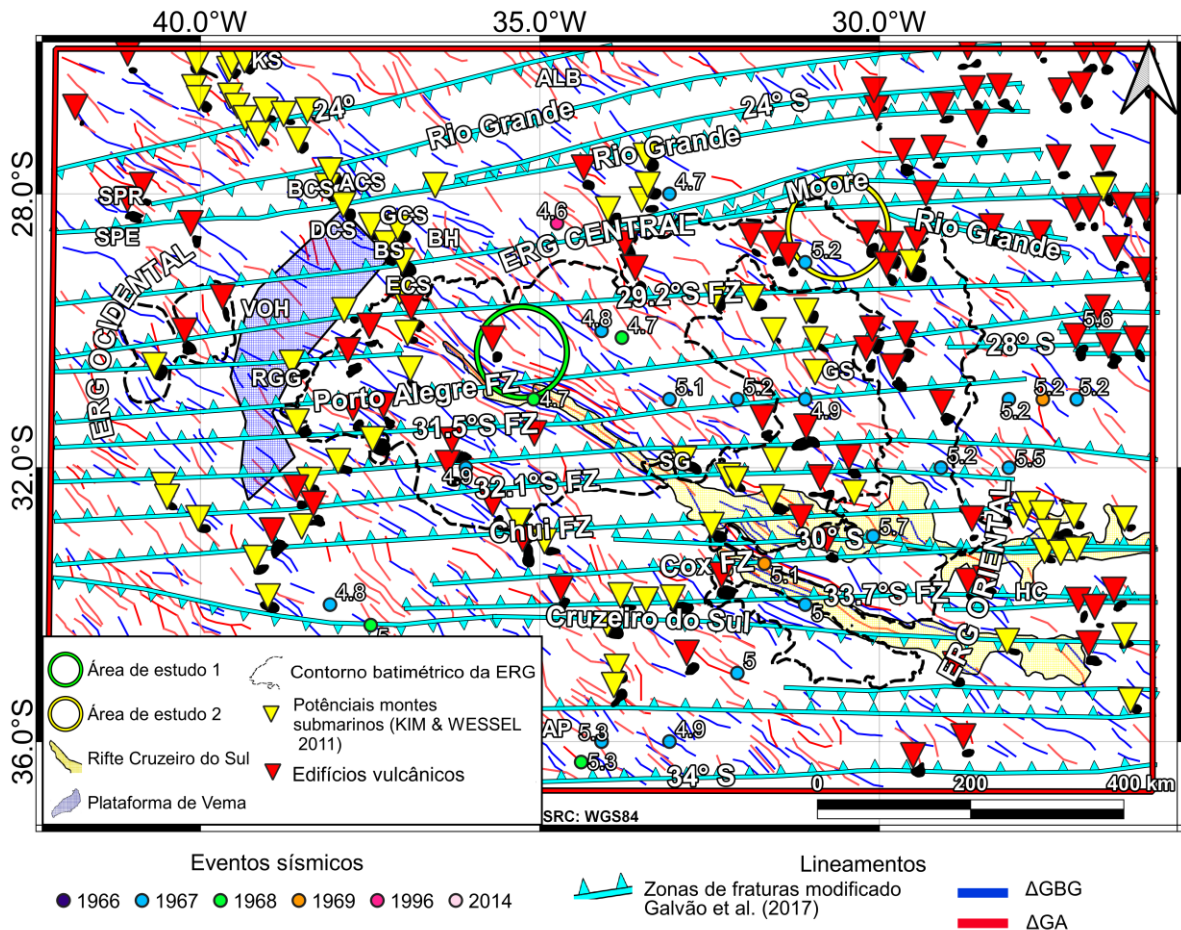
Figura 56 - Mapa do cosseno direcional da DV_ ΔG_{BG} _cosseno (45°)



Fonte: Modificado de Kim & Wessel, (2011).

A partir das Figuras 55 e 56 foi gerado um mapa geofísico/estrutural dos lineamentos extraídos de fontes anômalas rasas de direção noroeste – sudeste (Figura 57).

Figura 57 - Mapa geofísico/estrutural dos lineamentos extraídos de fontes anômalas rasas de direção noroeste-sudeste

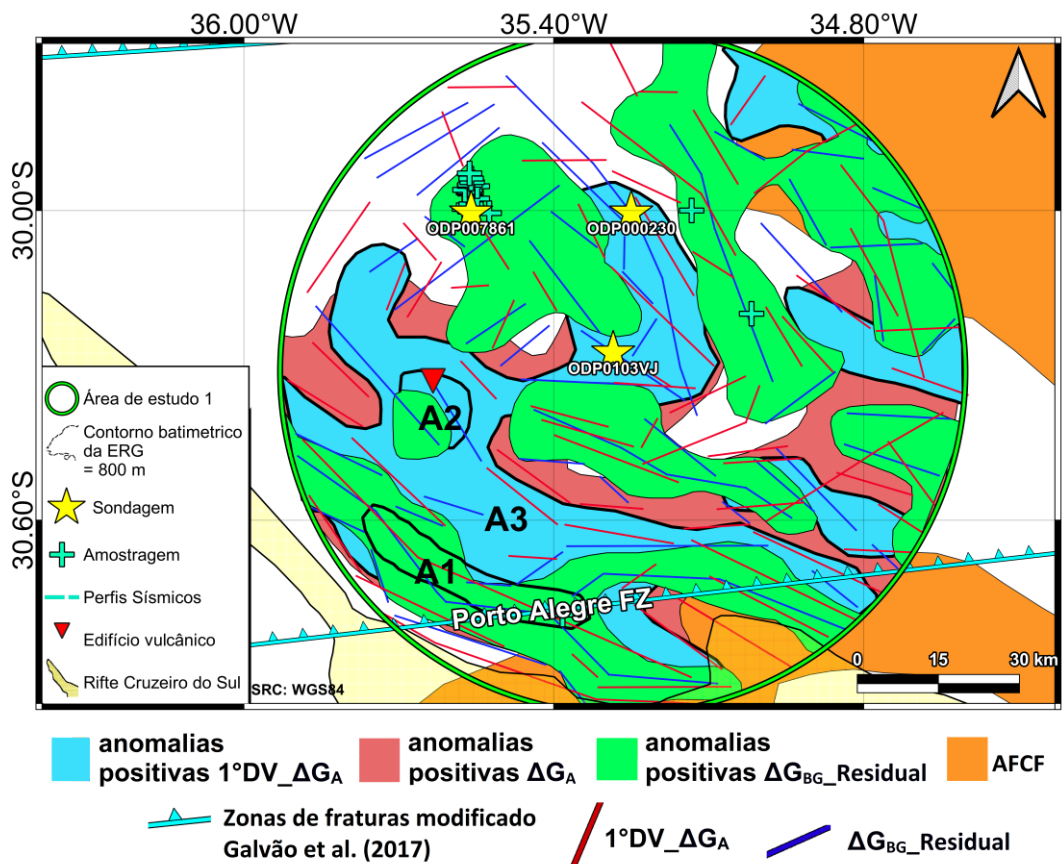


Fonte: Modificado de Galvão et al. (2017), Kim & Wessel, (2011) e IRIS (2011).

A partir dos dados observados da área de estudo 1 foram definidas 4 regiões anômalas principais (Figura 58). A anomalia A1 é interpretada como um corpo vulcânico de rocha basáltica que possui um formato retangular alongado na direção noroeste-sudeste. Sua espessura sedimentar média é de aproximadamente 625,48 m e sua profundidade batimétrica média é de -576,41 m. Amostragens realizadas pelo navio VM24 (1967) da *Lamont-Doherty Earth Observatory* – LDEO revelaram depósitos de nódulos de ferromanganês na região leste da feição 1. A anomalia A2, interpretada como uma anomalia de fonte rasa, possui geometria semicircular, e foi

interpretada como um edifício vulcânico. Sua espessura sedimentar média é de 675,20 m e sua profundidade batimétrica média é de -709,67 m. A anomalia A3 possui geometria semelhante a um derrame vulcânico. A A3 possui uma espessura sedimentar média de 599,65 m e profundidade batimétrica rasa, de -946,39 m.

Figura 58 - Feições anômalas demarcadas na área 1 sobrepostas às áreas favoráveis para formação de crosta de ferromanganês e com os lineamentos gerados por fontes anômalas rasas

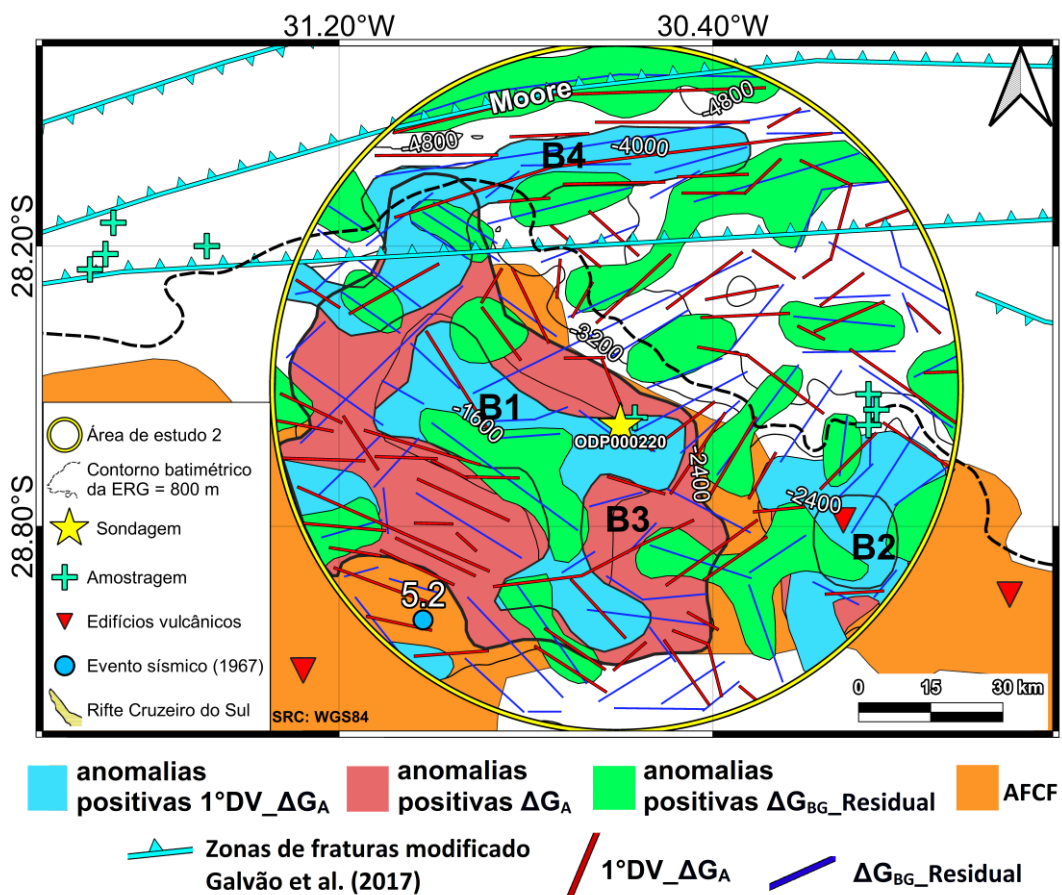


Fonte: Modificado de Galvão et al. (2017).

A partir dos resultados obtidos para a área de estudo 2 foram definidas 3 feições principais (Figura 59). A anomalia B1 possui espessura sedimentar média de 170 m e profundidade batimétrica média de -1800 m, com direção preferencial. A anomalia B2 possui espessura sedimentar média de 100 m e profundidade batimétrica média de -1380 m. Em razão de sua geometria semicircular ela foi classificada como um edifício vulcânico. Próximo a borda desta feição as amostragens obtidas pelo navio Robert D. Conrad (1967) e pelo navio Vema (1968) da *Lamont-Doherty Earth Observatory* –

LDEO apresentaram a ocorrência de óxido de manganês. A anomalia B3 possui a espessura sedimentar média de 166 m e profundidade batimétrica média igual a -1384 m. A anomalia B4 apresenta espessura sedimentar média igual a 155 m e profundidade batimétrica média de -3490 m, a anomalia apresenta uma geometria alongada na direção nordeste.

Figura 59 - Feições anômalas demarcadas na área 2 sobrepostas às áreas favoráveis para formação de crosta de ferromanganês e com os lineamentos gerados por fontes anômalas rasas



Fonte: Modificado de Galvão et al. (2017) e IRIS (2011).

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo, obtidos a partir do processamento e análise das anomalias gravimétricas na região da ERG em escala regional, permitiram definir geometrias de edifícios vulcânicos já conhecidos e, de outros ainda não conhecidos. Os edifícios vulcânicos identificados foram divididos em três grupos que refletem as

complexas etapas de formação geológica da ERG. Os filtros de realce ($1^\circ DV_{\Delta G_A}$, $\Delta G_{BG_Residual}$ e cosseno direcional) permitiram delimitar os lineamentos gravimétricos das ΔG_A , $1^\circ DV_{\Delta G_A}$ e $\Delta G_{BG_Residual}$, possibilitando a separação destes em três grupos principais (com direções leste-oeste, nordeste-sudoeste e noroeste-sudeste). Os diagramas de roseta plotados regionalmente indicaram as bruscas mudanças de orientação dos lineamentos gravimétricos localizados porção nordeste da área de estudo.

Para os estudos locais foi possível realizar a delimitação da geometria de anomalias rasas e profundas positivas. Estas foram interpretadas com auxílio de perfis sísmicos de reflexão e de dados de testemunhos de sondagens. Na área de estudo 1 foi delimitado o corpo anômalo A1 possui relação com a ocorrência de nódulos de manganês. Os lineamentos gravimétricos observados na área de estudo 1 podem apresentar relação com atividades hidrotermais na região, sendo necessários mais dados geofísicos e geológicos para confirmar esta possibilidade. Em razão de que a área 1 e 2 contempla a região de áreas permissivas para formação de crosta rica em cobalto, estes corpos anômalos demarcados podem ser considerados alvos exploratórios promissores.

De forma geral, os resultados deste estudo contribuem para o reconhecimento de feições geológicas em subsuperfície. Além disso, é apresentado um importante conjunto de informações que permitem otimizar os mapeamentos geológicos na região e auxiliar no entendimento das estruturas geológicas. Adicionalmente, nossos resultados contribuem para a escolha de áreas para futuras aquisições geofísicas marinhas de detalhe e para a coleta de dados geológicos *in situ*, como medidas de densidade, susceptibilidade e descrições petrográficas para refinamento dos resultados.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMOS, M. J. Quasigeoid Modelling in New Zealand to Unify Multiple Local. Tese de doutorado, Curtin University, Department of Sciences, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/20.500.11937/1949>>.

BARKER, P. F. Tectonic Evolution and Subsidence History of the Rio Grande Rise. Deep Sea Drilling Project Initial Reports, v. 72, p. 956 - 976, 1983.

BARKER, P. F. The history of ridge-crest offset at the Falkland—Agulhas Fracture Zone from a small-circle geophysical profile. Geophysical Journal International, v. 59, p. 131–145, 1979.

BLAKELY, R. J. Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. California: Cambridge University Press, 1996. 464 p.

BONATTI, E. Vertical tectonism in oceanic fracture zones. Earth and Planet. Sci. Lett., 37, 369- 379, 1978.

BRAITENBERG, C. Exploration of tectonic structures with GOCE in Africa and across-continent. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015.

BRIGGS, J. C. Marine Zoogeography. Nova York: McGraw-Hill Book Company, 1974. 475 p.

CALAS, G. Mineral Resources and Sustainable Development. Elements, 2017.

CONSTANTINO, R. Hackspacher, P. Souza. I. Costa, I. Basement structures over Rio Grande Rise from gravity inversion. Journal of South American Earth Sciences, p. 85-91, 2017.

CORDANI, U. G. et al. Tectonic Map of South America at 1:5.9M. [S.l.]. 2016.

DENTITH, M. Mudge. S. T. Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist. Perth: Cambridge University Press, 2014.

DICEZARE, M. T. Molina. E. C. Characterization of the Rio Grande Rise from elements of the terrestrial gravity field. Revista Brasileira de Geofísica, Publicação Nacional, v. 36, p. 1-13, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v36i3.1950>>.

DIETZ, R.S. Holden, J. C. Journal of Geophysics Research, v. 75, p. 4939 - 4956, 1970.

FLANDERS MARINE INSTITUTE. MarineRegions.org, 14 setembro 2021. Disponível em: <www.marineregions.org>.

FUNCK, T. et al. Moho and basement depth in the NE Atlantic Ocean based on seismic refraction data and receiver functions. Geological Society London Special Publications, 2016.

GAMBOA, L.A.P., Rabinowitz, P.D., 1984. The evolution of the Rio Grande rise in the southwest Atlantic ocean. *Mar. Geol.* 58 (1e2), 35e58.

GALVÃO, I. L., & de Castro, D. L. Contribution of global potential field data to the tectonic reconstruction of the Rio Grande Rise in the South Atlantic. *Marine and Petroleum Geology*, 86, 932–949, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.06.048>>.

GEBCO, BATHYMETRIC COMPILATION GROUP 2020. The GEBCO_2020 Grid - a continuous terrain model of the global oceans and land, 2020.

HEIN, J. R. Koschinsky. A. Bau. Manheim. F. T. Kang. J. K. Roberts. L. Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific. [S.I.]: CRC Press, 2000.

HEIN, J. R. Mizell. K. Koschinsky. A. Conrad. T. A. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources. *Ore Geology Reviews*, v. Volume 51, p. 14, 2013.

HOFMANN-WELLEHOF, B. Moritz, H. Physical Geodesy, Springer. Verlag Wien. Printed in Austria, 2005.

HOPPER, J. R. Funck, T. Stoker, T. Ártung, U. Peron-Pinvidic, G. Doornenbal, J. C. & Gaina. C. Tectonostratigraphic atlas of the north-east Atlantic region. Copenhagen: Dinamarca, 2014. 340 p.

IRIS DMC. Data Services Products: EventPlots Maps, record sections & other plots for M6.0+ events, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.17611/DP/EP.1>>.

JACOBY, W. Smilde. P. L. Gravity Interpretation. 1. ed. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 395 p.

JOHANSSON, L., Zahirovic, S., & Müller, R. D. The interplay between the eruption and weathering of large igneous provinces and the deep-Time carbon cycle. *Geophysical Research Letters*, 45, 2018. doi:10.1029/2017GL076691

KIM, S. S., & P. Wessel. New global seamount census from the altimetry-derived gravity data, *Geophys. J. Int.*, 186, 615-631, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05076.x>>.

KUMAR, N. Origin of “paired” aseismic rises: Ceará and Sierra Leone rises in the equatorial, and the Rio Grande Rise and Walvis Ridge in the South Atlantic. *Marine Geology*, v. 30, p. 175-191, 1979.

LE PICHON, X. Fox, P. J. Marginal offsets, Fracture Zones and The Early. *Geophys. Res*, p. 6294-6308, 1971.

LIANG, W. et al. A High-Resolution Earth’s Gravity Field Model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, Satellite Altimetry, and EGM2008. *Engineering*, p. 38, 2020.

LUSTY, P. A. J.; Murton, B. J. Deep-Ocean Mineral Deposits: Metal Resources and Windows into Earth Processes. *Elements*, v. 14, p. 301–306, 2018.

MERO, J. L. Geochemistry and descriptions of manganese nodules and crusts retrieved from the open ocean. *PANGAEA*, p. 312, 1965.

MOLINARI, I. MORELLI, A. E. P. Crust: a reference crustal model for the European Plate. *Geophys. J. int.*, p. 12, 2011.

MORGAN, W. J. Convection Plumes in the Lower Mantle. *Nature*, p. 42-43, 1971.
MÜLLER, R. D. et al. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2008.

MÜLLER R.D., Seton, M., Zahirovic, S., Williams, S.E., Matthews, K.J., Wright, N.M., Shephard, G.E., Maloney, K.T., Barnett-Moore, N., Hosseinpour, M., Bower, D.J., Cannon, J. Ocean basin evolution and global-scale plate reorganization events since Pangea breakup, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol 44, 107-138, 2016. DOI: 10.1146/annurev-earth-060115-012211.

NABIGHIAN, M.N. The Analytic Signal of Two-Dimensional Magnetic Bodies with Polygonal Cross-Section: Its Properties and Use for Automated Anomaly Interpretation. *Geophysics*, 37, 507-517, 1972. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1190/1.1440276>>.

NAGY D., The gravitational attraction of a right rectangular prism, *Geophysics*, 31(2), 362–371, 1966.

NOAA, 2011. GEBCO – Undersea Feature Names Gazetteer. NOAA, Disponível em <<https://www.ngdc.noaa.gov/gazetteer/>> Acesso em 15 set. 2021.

PAL, S. K. et al. Utilization of high-resolution EGM2008 gravitydata for geological exploration over theSinghbhum-Orissa Craton, India. *Geocarto International*, p. 783-802, 2015.

PAVLIS, N.K. Holmes, S.A. Kenyon, S. C. Schmidt, D. Trimmer, R. An earth gravitational model to degree 2160. *Geophysic Res, EGU General Assembly*, 2008.

PETERSEN, S. A. Krätschell, A. Augustin, N. Jamieson, J. Hein, J. R. Hannington, M. D. News from the seabed – Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources. *Marine Policy*, p. 175-187, 2016.

PÉREZ-DÍAZ, L., Eagles, G. South Atlantic paleobathymetry since early Cretaceous. *Sci Rep* 7, 11819, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-017-11959-7>>.

PETROV, O. et al. Crustal structure and tectonic model of the Arctic region. *Earth Science Reviews*, p. 29–71, 2016.

PRAXEDES, A. G. P. Estudo geofísico/geológico da elevação do Rio Grande e feições submarinas adjacentes - Atlântico Sul. Tese de doutorado, 2020.

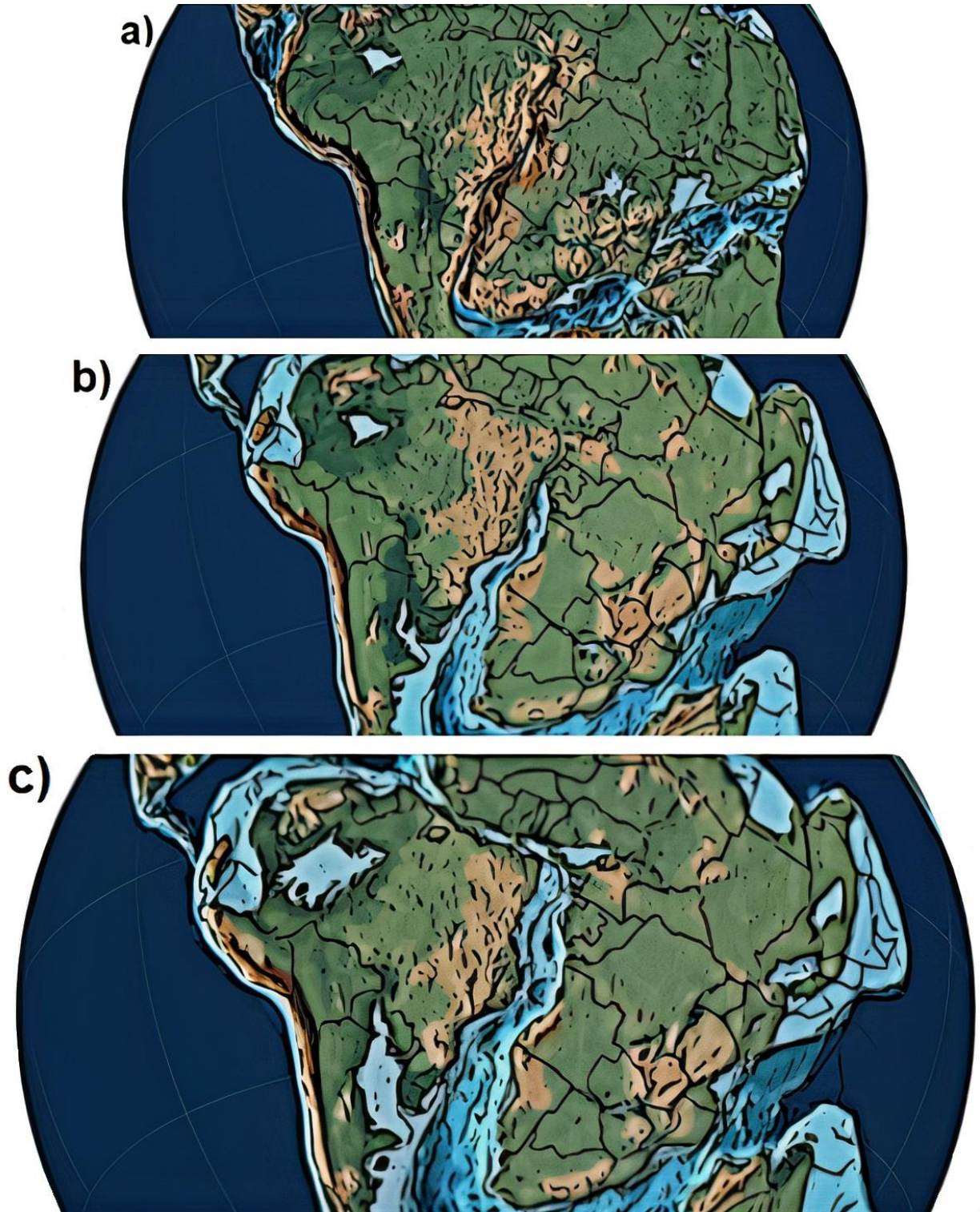
- SANDWELL, D. T. et al. New global marine gravity model from Cryo-Sat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, p. 65-67, 2014.
- SANTOS, R. V. et al. Dating Gondwanan continental crust at the Rio Grande Rise, South Atlantic. *Terra Nova*, p. 424-429, 2019.
- SCOTSESE, C. Atlas of Neogene Paleogeographic Maps (Mollweide Projection), Maps 1-7 Volume 1 – The Cenozoic, PALEOMAP Atlas for ArcGis, PALEOMAP Project, Evanston, IL, 2014.
- SOUSA, L. A. S. Guimarães. G. N. Avaliação da potencialidade dos modelos da missão GOCE no equador. *R. bras. Geom.*, v. 5, n. 4, 2017.
- SPECTOR, A. & GRANT, F.S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*. 35: 293-302, 1970.
- STRAUME, E. O. et al. GlobSed: Updated Total Sediment Thickness in the World's Oceans. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2019.
- TELFORD, W.M. Geldart, L. P. Sheriff, R. E. Applied geophysics. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 770 p, 1990.
- TOZER, B. et al. Global Bathymetry and Topography at 15 Arc Sec: SRTM15+. *Earth and Space Science*, p. 1847-1864, 2019.
- THORAM, S., Sager, W.W., and Jokat, W. Implications of updated magnetic anomalies for the Late Cretaceous tectonic evolution of Walvis Ridge: *Geophysical Research Letters*, v. 46, p. 9474–9482, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2019GL083467>>.
- USSAMI, N. C. Chaves. C. A. M. Marques, L. S. Ernesto, M. Origin of the Rio Grande Rise-Walvis Ridge reviewed integrating palaeogeographic reconstruction, isotope geochemistry and flexural modelling. *Geological Society, London, Special Publications*, p. 129 - 146, 2013.
- WHITTAKER, J. M. et al. Global sediment thickness data set updated for the Australian-Antarctic Southern Ocean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, p. 3297-3305, 2013.
- WILSON, J. T. A. Possible origin of the hawaiian islands. *Canadian Journal of Physics*, 1963.
- WILSON, J. T. Submarine fracture zones, aseismic ridges and the International Council of Scientific Unions Line-Proposed western margin of the East Pacific Ridge. *Nature*, v. 2007, no 5000, p. 907-911, 1965.
- WOBBE, F. ANSA, L. KARSTEN, G. Anomalous South Pacific lithosphere dynamics derived from new total sediment thickness estimates off the West Antarctic margin. *Global and Planetary Change*, p. 139-149, 2014.

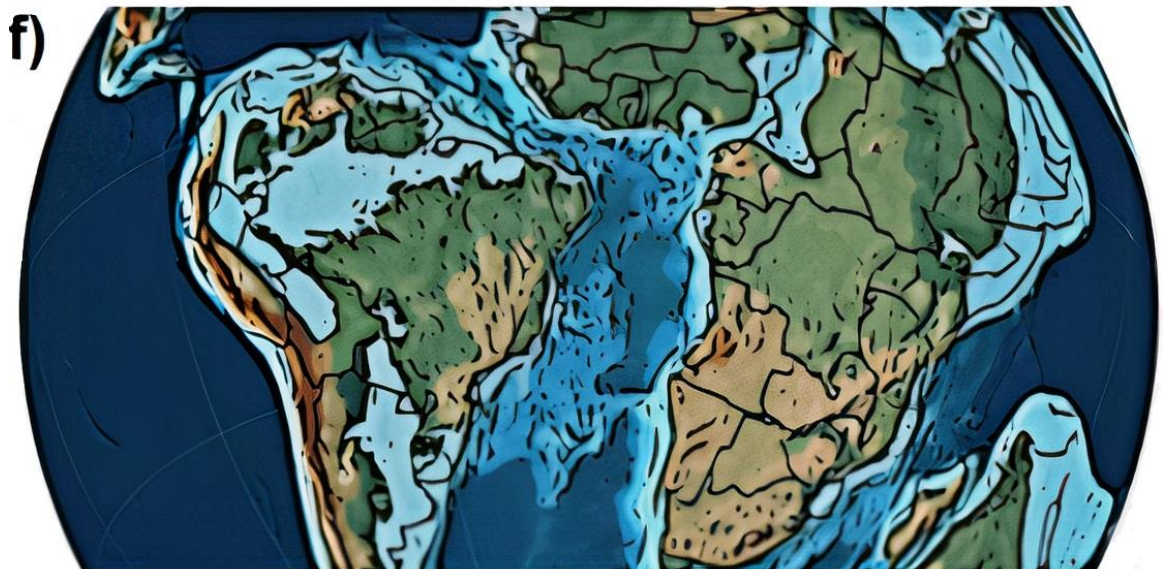
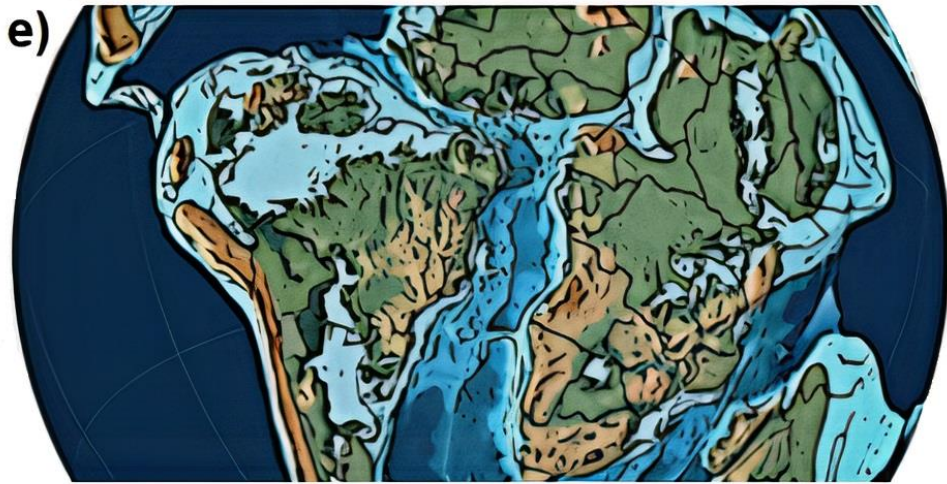
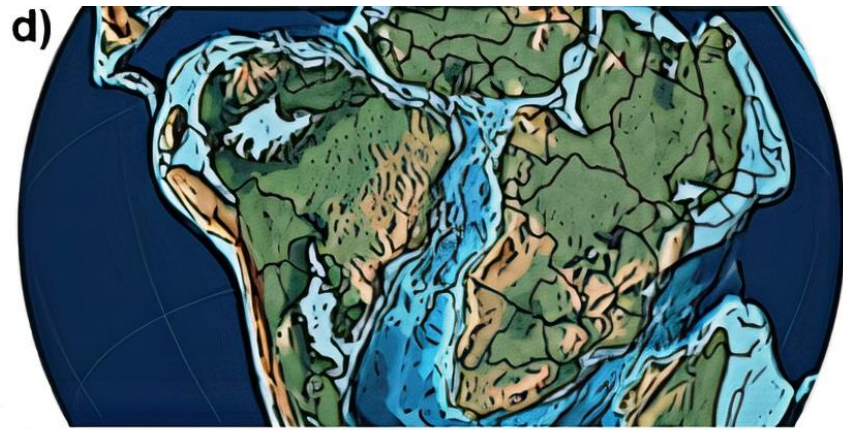
ZENK, W. SPEER, K. G. HOGG, N. G. Bathymetry at the Vema Sill. *Deep-Sea Res.* 40(9), p 1925-2933, 1993.

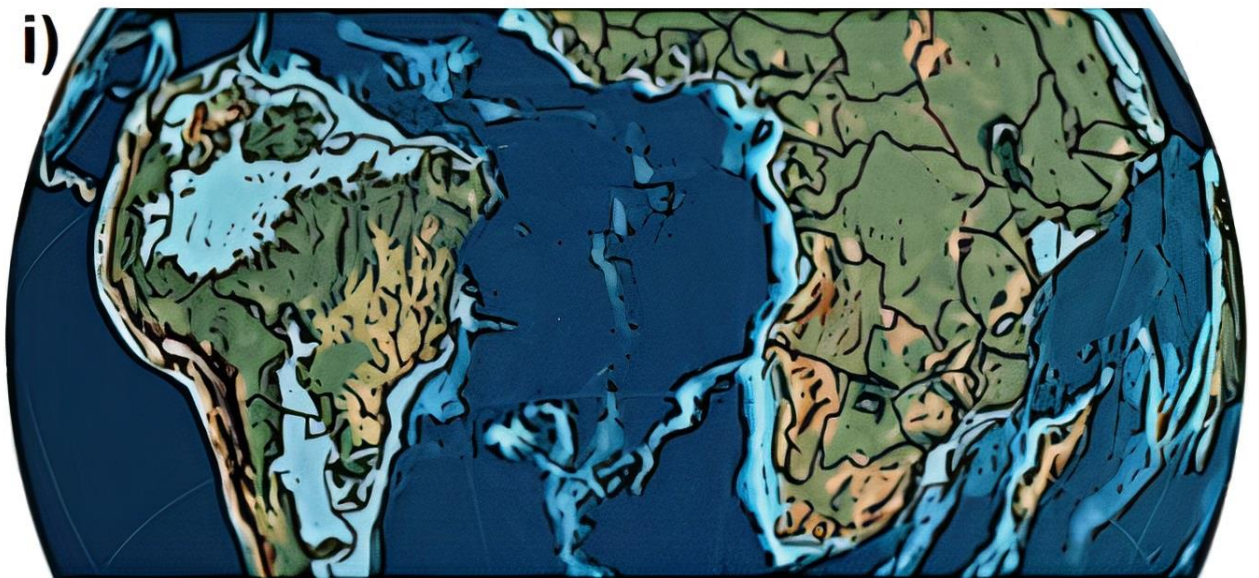
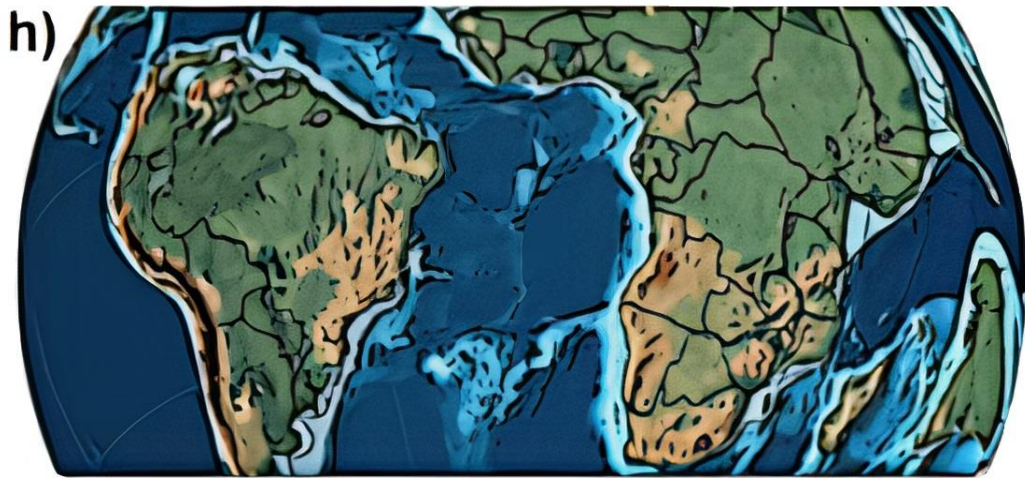
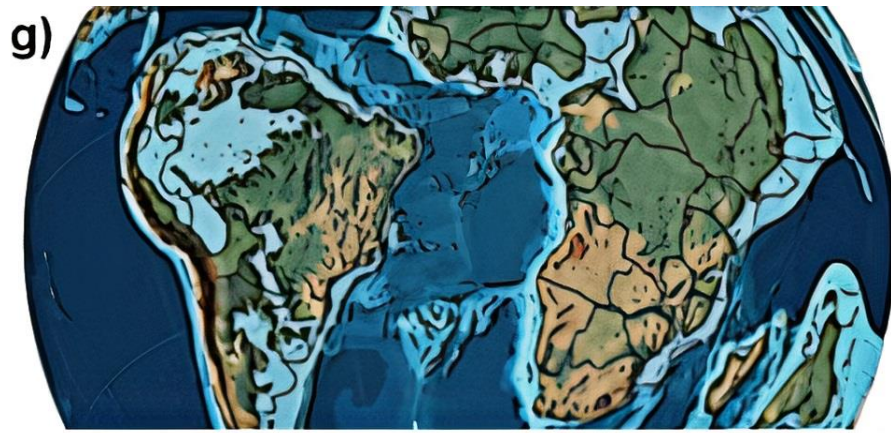
ZIEBART, M., Iliffe, J., Cross, P., Forsberg, R., Strykowski, G., Tscherning, C. Great Britains GPS Height Corrector Surface. *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*, Long Beach, CA, 2004, pp. 203-210.

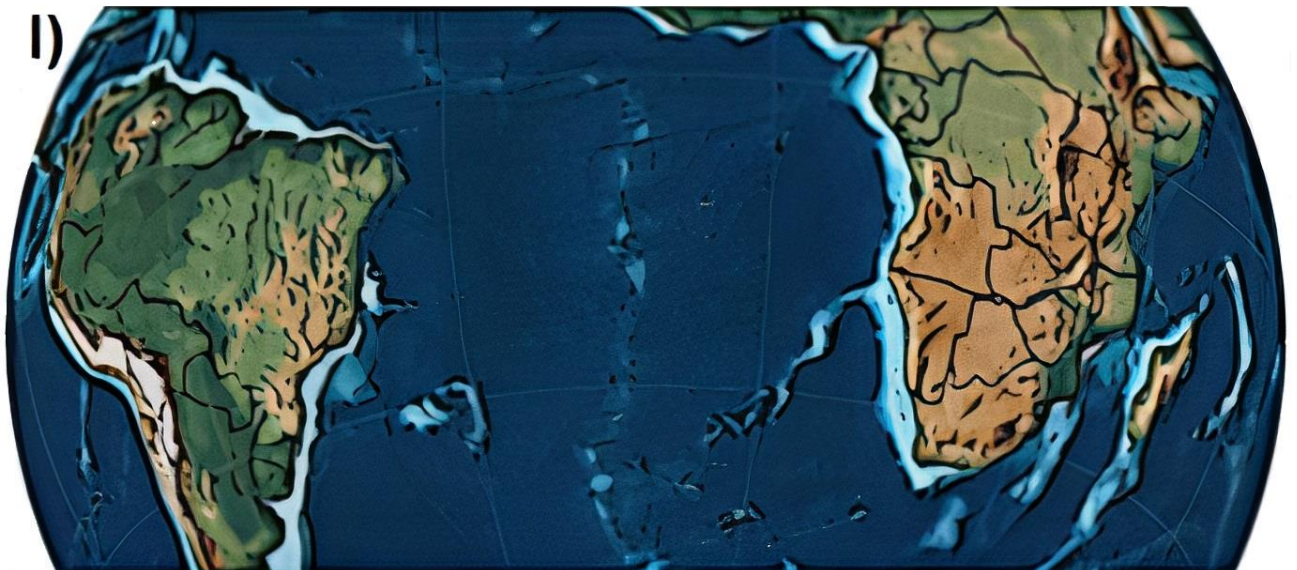
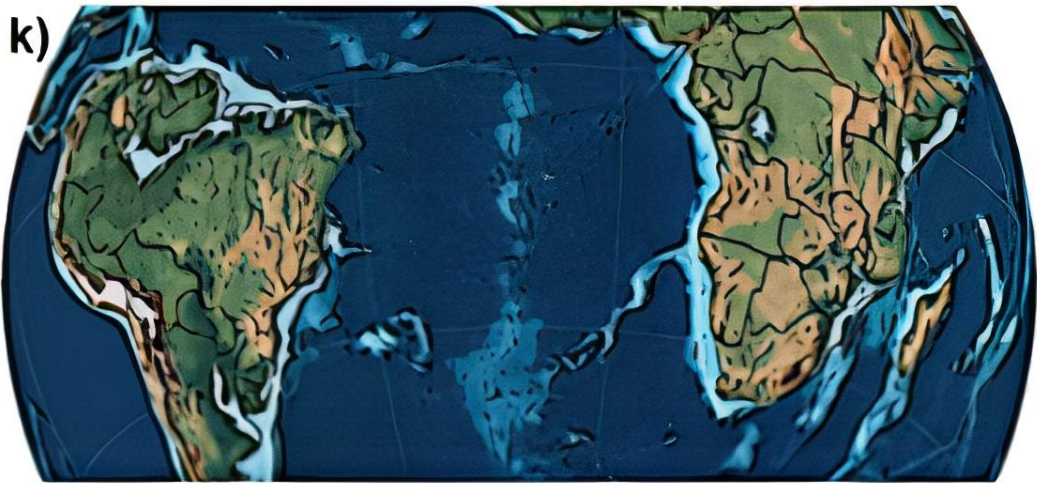
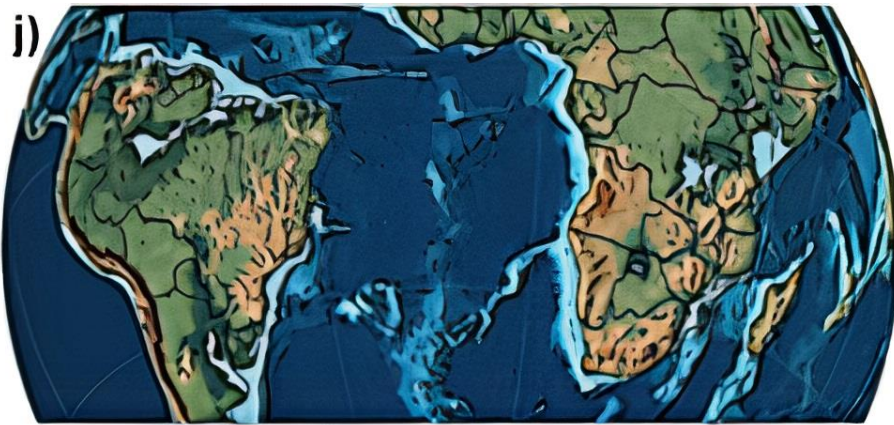
ANEXO A – Reconstrução Paleogeográfica do Atlântico Sul

Figura 1 – Atlas da reconstrução Paleogeográfica do Atlântico Sul. a) 148 Ma; b) 117,95 Ma; c) 114,81 Ma; d) 105,81 Ma; e) 98,81 Ma; f) 89,81 Ma; g) 75,29 Ma; h) 65,29 Ma; i) 50,29 Ma; j) 40,29 Ma; k) 21,29 Ma; l) Atual.









Fonte: Modificado de Scotese (2014).