

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GUILHERME ELIAS DIADOSK

Software GSearch: uma ferramenta para consulta e acesso rápido a base de dados gravimétricos no estado do Rio Grande do Sul

CAÇAPAVA DO SUL

2025

GUILHERME ELIAS DIADOSK

Software GSearch: uma ferramenta para consulta e acesso rápido a base de dados gravimétricos no estado do Rio Grande do Sul

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Geofísica da Universidade Federal do Pampa como requisito básico para a conclusão do Curso de Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Maximilian Fries

CAÇAPAVA DO SUL

2025

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

D537s Diadosk, Guilherme

Software GSearch: uma ferramenta para consulta e acesso
rápido a base de dados gravimétricos no estado do Rio Grande
do Sul / Guilherme Diadosk.

58 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2025.

"Orientação: Maximilian Fries".

1. Gravimetria. 2. Geofísica. 3. Python. I. Título.

GUILHERME ELIAS DIADOSK

**para consulta e acesso rápido a base de
estado do Rio Grande do Sul**

**Software GSearch: uma ferramenta
dados gravimétricos no**

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado no Curso de
Geofísica da Universidade Federal do
Pampa como requisito básico para a
conclusão do Curso de Geofísica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 11/12/2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Maximilian Fries
Orientador
(UNIPAMPA)

Dr. Lenon Melo Ilha
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Leugim Corteze Romio
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **MAXIMILIAN FRIES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2025, às 21:13, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LENON MELO ILHA, Técnico de Laboratório Área**, em 18/12/2025, às 22:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LEUGIM CORTEZE ROMIO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2025, às 09:08, 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 **1933800** e o código CRC **410D139E**.

**A minha mãe, pela ajuda e o apoio incondicional
em todos os momentos.**

AGRADECIMENTO

Agradeço profundamente ao professor Dr. Maximilian Fries, cuja orientação, dedicação e apoio constante foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência, paciência e comprometimento foram inspirações essenciais em cada etapa desta jornada acadêmica. Expresso também minha sincera gratidão à minha mãe, Rosane Felix Douhei, pelo amor incondicional, incentivo e força que sempre me acompanharam. Seu apoio foi decisivo para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos meus amigos, agradeço pela compreensão, companheirismo e encorajamento nos momentos mais desafiadores. Cada cafezinho fez diferença e contribuiu para a conclusão desta etapa.

**“Quando um homem é bom
amigo, também tem amigos
bons.”**

Nicolau Maquiavel

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento do Software *GSearch*, uma ferramenta projetada para facilitar a consulta, organização e acesso eficiente às bases de dados gravimétricos no estado do Rio Grande do Sul. O projeto surge da necessidade identificada por profissionais e pesquisadores das geociências em acessar valores de gravidade absoluta (*G* absoluto) utilizados em levantamentos gravimétricos terrestres. A principal motivação é a fragmentação das informações, que se encontram dispersas entre diferentes instituições (IBGE, DNPM, Petrobras, UFRGS, etc.), dificultando a integração, a logística e a redução de custos operacionais. Para superar essas limitações, propõe-se o desenvolvimento de um software com o uso da linguagem de programação *Python*, reconhecida por sua clareza, poder analítico e grande ecossistema de bibliotecas voltadas à ciência de dados. O *software* integra essas bibliotecas com sistemas de banco de dados relacionais (*PostgreSQL/PostGIS*) e não relacionais, permitindo consultas, visualizações e cálculos gravimétricos como as correções de ar-livre e *Bouguer*, com precisão e reprodutibilidade. O sistema foi desenvolvido considerando a área geográfica do Rio Grande do Sul (27°S–34°S; 49°W–58°W), abrangendo a totalidade do estado. A interface com o usuário é desenvolvida com as bibliotecas, permitindo interações intuitivas, como seleção de filtros, visualização em 2D/3D, exportação de mapas em formatos científicos (GeoTIFF, NetCDF), além de suporte multilíngue. O sistema suporta mais de 100.000 pontos com tempos de carregamento inferiores a 10 minutos, assegurando escalabilidade. Ressalta-se que os dados gravimétricos, uma vez estruturados e analisados corretamente, podem fornecer informações essenciais para investigações geológicas, geodésicas e ambientais. O desenvolvimento deste aplicativo constitui uma contribuição significativa para o acesso a dados gravimétricos, oferecendo uma solução prática, acessível e tecnológica à comunidade acadêmica e profissional das geociências.

Palavras chave: Gravimetria; *Python*; Anomalia Bouguer; Geofísica; Processamento de dados geofísicos.

ABSTRACT

This study presents the development of GSearch, a software tool designed to facilitate the retrieval, organization, and efficient access of gravimetric databases in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. The project emerged from a need identified by geoscience professionals and researchers to access absolute gravity (G-absolute) values used in terrestrial gravimetric surveys. The primary motivation is the fragmentation of information, which is dispersed across several institutions (IBGE, DNPM, Petrobras, UFRGS, among others), complicating data integration, logistics, and the reduction of operational costs. To address these limitations, the project adopts the Python programming language, recognized for its clarity, analytical power, and extensive ecosystem of data-science. The software integrates these libraries with both relational (PostgreSQL/PostGIS) and non-relational database systems, enabling queries, visualizations, and gravimetric calculations—including free-air and Bouguer corrections—with precision and reproducibility. The system was developed to cover the geographic extent of Rio Grande do Sul (27°S–34°S; 49°W–58°W), encompassing the entire state. The graphical user interface, built using Python libraries, supports intuitive interactions such as filter selection, 2D/3D visualization, and map export in scientific formats (GeoTIFF, NetCDF), in addition to offering multilingual support. The system currently handles more than 100,000 data points with loading times of less than 10 minutes, ensuring scalability. Gravimetric data, when properly structured and analyzed, can provide essential information for geological, geodetic, and environmental investigations. The development of this application represents a significant contribution to improving access to gravimetric information, offering a practical, accessible, and technologically robust solution for the academic and professional geoscience community.

Keywords: Gravimetry; Python; Bouguer Anomaly; Geophysics; Geophysical Processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa da distribuição das estações gravimétricas do Rio Grande do Sul	14
Figura 2 – Gravidade real g e gravidade teórica γ	17
Figura 3 – Platô de Bouguer	20
Figura 4 – Mapa Mental	22
Figura 5 – Exemplo da biblioteca <i>Pandas</i>	25
Figura 6 – Exemplo de <i>Data Frame</i>	26
Figura 7 – Análise exploratória dos dados	26
Figura 8 – Fluxo de Atividades	33
Figura 9 apresenta todas as funcionalidades das interface do <i>GSearch</i>	38
Figura 10 apresenta Mapa da superfície Topográfica do <i>GSearch</i>	39
Figura 11 apresenta Correção Free-Air do <i>GSearch</i>	40
Figura 12 apresenta Anomalia Bouguer do <i>GSearch</i>	41
Figura 13 comparação do <i>Gsearch</i> e o <i>Sufer com Mínima Curvatura</i>	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Comparativo das interpolações

32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- G – Gravidade (aceleração da gravidade absoluta)
- mGal – Miligal (unidade de aceleração da gravidade – $1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2$)
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
- Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A.
- IG/UFRGS – Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- UFPR – Universidade Federal do Paraná
- IAG/USP – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP
- GMT – Generic Mapping Tools*
- GDAL – Geospatial Data Abstraction Library*
- CSV – *Comma-Separated Values* (valores separados por vírgula)
- SRTM – Shuttle Radar Topography Mission*
- ALOS – Advanced Land Observing Satellite*
- PALSAR – Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*
- DPI – *Dots Per Inch* (resolução gráfica)
- SIRGAS2000 – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000
- SQL – Structured Query Language*
- HTML – Hypertext Markup Language*
- HTTP – HyperText Transfer Protocol*
- XML – eXtensible Markup Language*
- PyGMT – Python wrapper for GMT*
- GeoTIFF – Georeferenced Tagged Image File Format*
- NetCDF – Network Common Data Form*
- FFT – Fast Fourier Transform*
- GUI – Graphical User Interface*
- GIL – Global Interpreter Lock*
- API – Application Programming Interface*
- SGBD – Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados
- SQLAlchemy – Toolkit de mapeamento objeto-relacional (ORM) em Python*

Pandas – Biblioteca Python para análise de dados

NumPy – Biblioteca Python para cálculos numéricos

Matplotlib – Biblioteca Python para geração de gráficos 2D

SciPy – Biblioteca Python para computação científica

PyData – Comunidade e ecossistema voltado à ciência de dados com Python

PyPI – Python Package Index

PostGIS – Extensão geoespacial do *PostgreSQL*

Tkinter – Toolkit de interface gráfica padrão do *Python*

GeoJSON – Formato de dados geoespaciais baseado em JSON

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Trabalhos Anteriores.....	16
2 Objetivo Geral.....	15
2.1 Objetivos específicos.....	Erro! Nenhum nome foi dado ao indicador.
3 JUSTIFICATIVA.....	Erro! Nenhum nome foi dado ao indicador.
4 BASE DE ÁREA DE ABRANGÊNCIA DOS DADOS PARA BUSCA NO SOFTWARE.....	Erro! Nenhum nome foi dado ao indicador.
5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	Erro! Nenhum nome foi dado ao indicador.
5.1 O método gravimétrico - princípios básicos e correções.....	15
5.1 Anomalia gravitacional.....	16
5.2 Anomalia ar-livre.....	18
5.3 Anomalia Bouguer.....	Erro! Nenhum nome foi dado ao indicador.
6. A LINGUAGEM Python APLICADA a GERAÇÃO DE FERRAMENTAS GEOCIENTÍFICAS.....	15
6.1 Fontes de informação - dados.....	16
6.2.1 Banco de Dados.....	17
6.2.2 Biblioteca Para Ciência de Dados.....	18
6.2.4 PANDAS.....	18
6.2.4 NumPy.....	22
6.2.5 Matplotlib.....	24
6.2.6 SciPy.....	24
6.3 Dados de Campo.....	26
7. PROCESSAMENTOS APLICADOS A DADOS GRAVIMÉTRICOS.....	15
7.1.1 Mínima Curvatura.....	15
7.1.2 Krigagem.....	16
7.1.3 Inverso do Peso pela Distância (IDW).....	17
8. MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
8.1 Sequência adotada na construção da proposta - software.....	19
9 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
9.1 Interface Gráfica do Usuário.....	22
design responsivo garante adaptação a diferentes resoluções de tela.....	22
9.2 Sistema de Carregamento de Dados.....	22
modal dedicada.....	22
9.3 Sistema de Interpolação.....	22
9.4 Sistema de Visualização.....	23
9.5 Sistema de Gerenciamento.....	23
9.6 Mapa da superfície Topográfica: Base Geométrica da Análise.....	24
9.6.1 Correção Free-Air: Isolando o Efeito Altimétrico.....	25
9.6.2 Anomalia Bouguer: A Janela para a Subsuperfície.....	26

9.7 Análise de consistência validação dos dados comparativos a outros softwares comerciais.....	28
10. CONCLUSÃO.....	30
11 REFERÊNCIAS.....	32

1 INTRODUÇÃO

Estudos geofísicos envolvendo o método da gravimetria, tanto terrestre como aérea, são amplamente utilizados em estudos crustais, geológicos (exploratórios ou acadêmicos), em geofísica rasa (geotecnia, meio ambiente e arqueologia) e estudos da Terra Sólida (geodésia), (Telford 1990). Atualmente, há no estado do Rio Grande do Sul diferentes estações gravimétricas com valores das anomalias Bouguer e valores de da gravidade absoluta (Estações Geodésicas). As quais são realizadas e disponibilizadas por órgãos e instituições como IBGE, DNPM, Petrobras, IG/UFRGS, UFPR e IAG/USP.

No entanto, essas estações possuem pouca distribuição (densidade) e são de caráter regional, demandando a realização de medidas gravimétricas em estudos de detalhe e semidetalhe. Para tal, faz-se necessário o uso de Estações Base Gravimétricas, a fim de reduzir os valores relativos obtidos pelo gravímetro em campanhas de aquisição. O desafio surge quando o geocientista (usuário) tenta integrar essas bases de dados, já que as informações estão dispersas em diferentes sistemas, com padrões de apresentação diversos e falta de dados essenciais (como G absoluto, coordenadas e altitude). Essa fragmentação inviabiliza a compilação ágil dos dados para uso em levantamentos, obrigando, muitas vezes, o usuário a “transportar” Estações Base para locais mais remotos a partir de uma existente, o que limita a logística, aumenta o tempo de aquisição e aumentando custos. Tais elementos prejudicam uma aplicação eficaz do método.

Considerando estas premissas, propõe-se o desenvolvimento de um software para integração das diferentes bases de dados, utilizando a linguagem de programação Python, por ser considerada uma linguagem estratégica para esses problemas. Reconhecida por sua sintaxe clara, versatilidade e produtividade, criada por Guido van Rossum (1991), ela é amplamente adotada em projetos científicos e tecnológicos para processamento e análise de dados. Bibliotecas como *SQLite3*, *SQLAlchemy*, *Pandas* e *Psycopg2* permitem integração eficiente com sistemas de gerenciamento de dados relacionais (*MySQL*, *PostgreSQL*) e não relacionais (*MongoDB*), facilitando consultas, armazenamento e manipulação de dados.

Esta linguagem foi escolhida por sua capacidade de interoperar com bancos de dados gravimétricos, automatizando cálculos complexos e análises de anomalias com precisão e reprodutibilidade. Assim, este trabalho propõe a criação de um conjunto de rotinas em *Python* que centralize e interoperabilidade as informações de Estações Base Gravimétricas do Rio Grande do Sul, superando os desafios de fragmentação e contribuindo para uma aplicação mais eficiente do método gravimétrico.

1.1 Trabalhos Anteriores

O uso amplo e intensivo da linguagem *Python* nos últimos anos, especialmente em projetos e estudos centrados na gravimetria e em suas aplicações em diferentes contextos, tem sido fortemente evidenciado pela literatura científica. Pesquisadores de diversas áreas vêm utilizando essa linguagem para processar, modelar e interpretar dados geofísicos e geoquímicos, demonstrando sua flexibilidade e poder computacional. Estudos recentes, como *shipgrav: A Python package for marine gravimetry* (MARK et al., 2024), *PyGLDA: a fine-scale Python-based Global Land Data Assimilation system* (YANG et al., 2024) e *GROWTH-23: An integrated code for inversion of Bouguer anomalies* (CAMACHO et al., 2024), destacam o avanço das bibliotecas *Python* em aplicações diretas na modelagem e inversão de dados de gravidade, seja em contextos marinhos, continentais ou de dados de satélite. Tais trabalhos reforçam que *Python* não é apenas uma ferramenta teórica, mas uma solução prática e eficaz para os desafios de simulação e estimativa de parâmetros na geofísica moderna.

Nesse panorama, o projeto *SimPEG (Simulation and Parameter Estimation in Geophysics)* surge como um marco para aplicações geofísicas. Trata-se de uma biblioteca *open source* em *Python* destinada à simulação e à estimativa de parâmetros em geofísica (COCKETT et al., 2015). O *SimPEG* oferece ferramentas moduláveis para métodos geofísicos como gravidade, magnetismo, resistividade elétrica, polarização induzida, eletromagnetismo e fluxos subsuperficiais, utilizando malhas adaptativas e diferentes discretizações (1D, 2D e 3D), com suporte para refinamentos locais via *OcTree* e métodos de inversão robustos (CUDRÉ-MAUROUX; KANG et al., 2023).

No universo da gravimetria, os autores que adotaram *Python* exploraram desde a aquisição e correção de dados até a inversão e interpretação de modelos

do subsolo. McCubbine et al. (2018), por exemplo, desenvolveram o *Gsolve*, um programa em *Python*, com interface gráfica, voltado ao processamento de medidas de gravidade relativa, demonstrando a eficiência da linguagem na automação de cálculos e tratamento de séries temporais.

Na gravimetria química, trabalhos como *Gravimetric Determination of Sulphate* (ISMAIL et al., 2023) demonstram o potencial de integração entre os princípios gravimétricos clássicos e o desenvolvimento de sistemas automatizados. O uso de frameworks web como Flask e Django tem sido apontado como alternativa eficiente para criar interfaces acessíveis e intuitivas, facilitando a visualização e a consulta de dados laboratoriais e reduzindo erros manuais.

Além disso, projetos de código aberto, como o Fatiando a Terra (UIEDA et al., 2021), e métodos clássicos de inversão propostos por Li e Oldenburg (1998) continuam servindo de base para o desenvolvimento de novas rotinas computacionais, demonstrando a evolução da gravimetria de abordagens analíticas para implementações numéricas altamente escaláveis. Em síntese, o ecossistema de ferramentas do *Python* se mostra completo: manipulação de dados com *Pandas*, cálculos numéricos com *NumPy* e *SciPy*, visualização com *Matplotlib* e *Seaborn*, desenvolvimento de interfaces gráficas com *Tkinter* ou *PyQt*, persistência de dados com *SQLite* ou *PostgreSQL* via *SQLAlchemy*, além de bibliotecas específicas para geociências como *SimPEG*, *Harmonica* e *Boule*. Seja na automação de cálculos químicos, no gerenciamento de laboratórios ou no processamento e modelagem de dados geofísicos, o *Python* consolidou-se como uma linguagem poderosa, flexível e indispensável para projetos modernos em gravimetria.

2 OBJETIVO GERAL

Considerando esses elementos, o principal objetivo deste estudo consiste em compilar e agrupar bases de dados gravimétricos do estado do Rio Grande do Sul unificando-os em uma base de dados única por meio de um *software* denominado *GSearch*.

2.1 Objetivos específicos

- Elaborar e definir uma interface intuitiva e acessível para usuários;
- Proporcionar ao usuário acesso rápido;
- Criar um aplicativo com o mecanismo de busca mais intuitivo e eficiente.
- Estabelecer redes de cooperação para ampliar a base de dados no estado.
- Tornar acessíveis os dados para profissionais e pesquisadores;
- Promover o acesso livre e democrático à informação, atingindo um número maior de usuários;

3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho surgiu de uma demanda de longa data quando a dificuldade de profissionais e geocientistas no acesso a bases gravimétricas, em específico, valores de G absoluto necessário para a aquisição gravimétrica terrestre. Além disso, a organização, armazenamento e gerenciamento destes dados encontram-se em diferentes formatos.

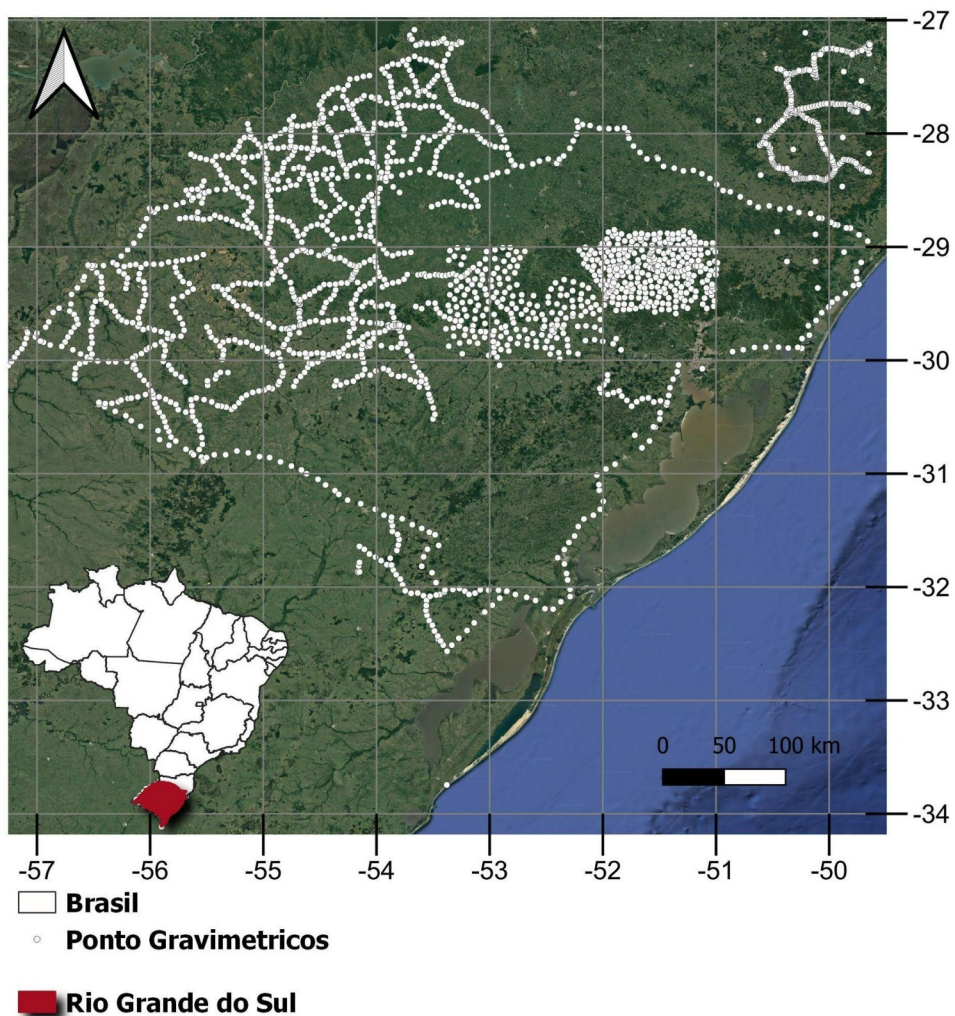
Diante dessa lacuna, este trabalho de conclusão do curso de Geofísica tem como proposta o desenvolvimento de uma ferramenta que contribua para a organização e o tratamento desses dados, utilizando a linguagem de programação *Python*.

A escolha dessa linguagem se justifica por sua ampla aplicação na área científica, além de sua versatilidade e vasto ecossistema de bibliotecas, que podem facilitar a implementação de soluções eficientes e acessíveis para a comunidade acadêmica e profissional.

4 BASE DE ÁREA DE ABRANGÊNCIA DOS DADOS PARA BUSCA NO SOFTWARE

A fim de atender os objetivos propostos, o desenvolvimento do *software* teve como área de estudo (banco de dados para busca) o estado do Rio Grande do Sul, Brasil, geograficamente delimitada entre as coordenadas 27°S e 34°S de latitude e 49°W e 58°W de longitude (Figura 1).

Figura 1- Localização dos limites da área definida para a base de dados no estado do Rio Grande do Sul, Brasil e distribuição das estações gravimétricas do IBGE.



5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A aplicação do método gravimétrico em diferentes contextos é essencial, ocorrendo por etapas, denominada processamento bruto (obtenção das anomalias gravimétricas), cujo detalhamento, por ordem de procedimento, é descrito a seguir.

5.1 O método gravimétrico - princípios básicos e correções

O método gravimétrico fundamenta-se na Lei da Gravitação Universal de Newton (1687), que estabelece a atração entre duas massas proporcionais ao produto de suas grandezas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa. Na prospecção geofísica, mede-se variações do campo gravitacional terrestre (em mGal) para inferir heterogeneidades de densidade no subsolo (Telford 1990).

A correção de deriva instrumental tem como objetivo compensar variações temporais na calibração do gravímetro, causadas por fatores termoelásticos e instabilidades mecânicas. Essa correção é realizada por meio da repetição de leituras em estações de base ao longo do tempo, permitindo a identificação e ajuste das derivações instrumentais.

A correção de latitude baseia-se no fato de que a aceleração da gravidade varia com a latitude geográfica, em função do achatamento da Terra e da força centrífuga decorrente da rotação terrestre. Para isso, aplica-se um modelo teórico, como a Fórmula Internacional da Gravidade, que ajusta os valores observados à gravidade normal esperada para a latitude da estação.

A correção de marés leva em consideração as variações periódicas no campo gravitacional causadas pelas forças gravitacionais da Lua e do Sol, que podem alcançar amplitudes de até 0,3 mGal. Esse efeito é estimado por meio de modelos analíticos, como o de Longman (1959), que utilizam a posição geográfica da estação, o horário UTC e as fases lunares e solares para calcular a maré terrestre correspondente a cada instante de medição.

Por fim, a correção do terreno visa remover a influência gravitacional exercida por irregularidades topográficas nas proximidades da estação, como montanhas e

vales. Essa correção é feita utilizando modelos digitais de elevação e métodos específicos de cálculo, como os prismas de Hayford-Bowie ou o método de Hammer, que consideram a distribuição de massa ao redor do ponto de observação.

5.1 Anomalia gravitacional

A interpretação gravimétrica significa precisamente “interpretação de anomalias gravitacionais”. As anomalias gravitacionais são o próprio objeto de interesse, embora uma anomalia sempre exija dois elementos segundo Wolfgang Jacoby; Peter L. Smilde (2009, p.9). Para isto, requer-se:

- uma observação;
- algo esperado que representa um campo normal.

Considera-se anômalo o desvio da observação em relação ao esperado. A variação geral da gravidade na Terra corresponde de forma bastante próxima ao que se espera de uma Terra idealizada sem variações laterais de estrutura e densidade, como seria o caso se um fluido se ajustasse perfeitamente às forças originadas apenas pela auto-gravitação e rotação. Passou-se a chamar essa Terra de "Terra normal".

Porém, além dos parâmetros da Terra normal e seu campo gravitacional, existem desvios, e são estes desvios em relação à norma que aqui interessa, ou seja, as anomalias gravitacionais que devem ser interpretadas. Os desvios em relação ao ideal, no entanto, não são grandes, especialmente se consideradas escalas relativas.

As observações brutas da gravidade não são facilmente interpretáveis. Elas devem primeiro ser reduzidas, ou seja, referenciadas ao modelo de gravidade normal de referência (a Terra normal). As diversas formas de tratar a Terra normal e os desvios visíveis dela são objeto dos vários tipos de reduções e análises posteriores de dados.

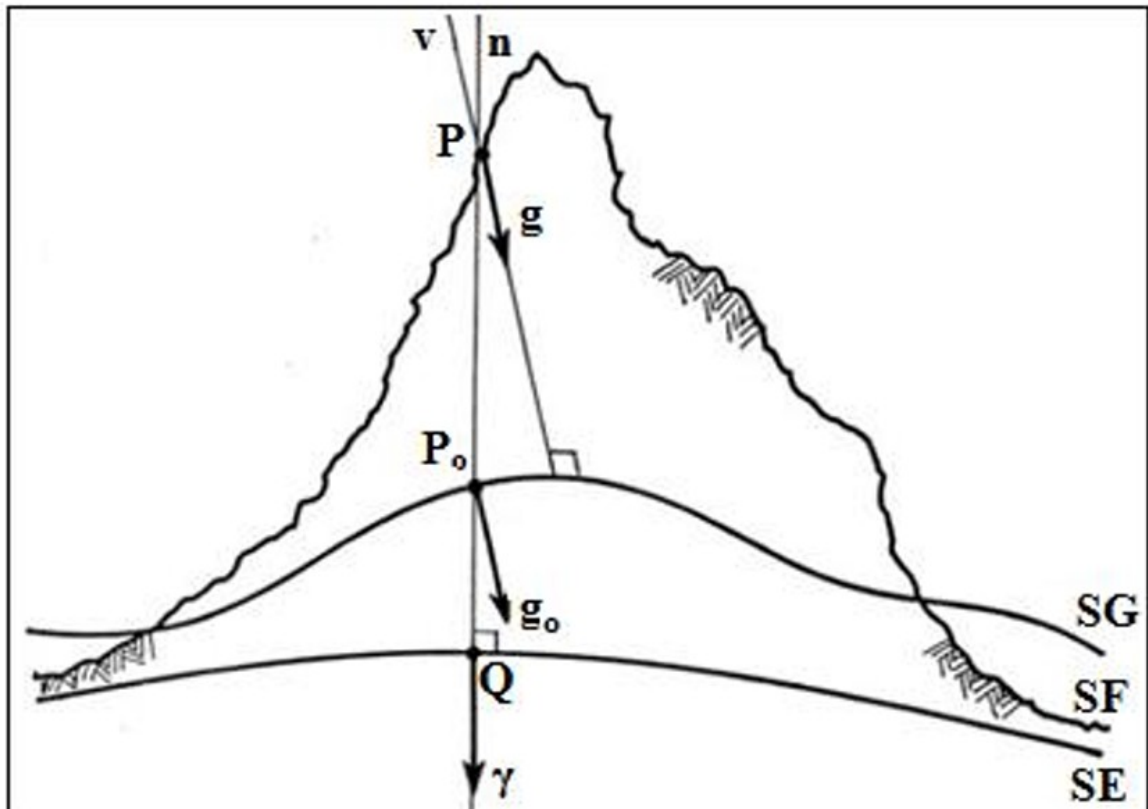
Anomalias gravitacionais são variações no espaço (e no tempo) e medidores de gravidade relativa podem perfeitamente fornecer as informações desejadas, até mesmo observações de gravidade absoluta são interessantes em suas variações

para interpretação gravimétrica. A variação implica um *grid* ou um campo contínuo, e tornou-se habitual entender o termo "anomalia" como "campo anômalo". Um valor isolado de gravidade é irrelevante para interpretação. Um conjunto de pontos discretos com valores de gravidade não é idêntico a um campo contínuo de anomalias; de fato, geralmente o campo é uma abstração. Nesse sentido, definir uma anomalia a partir de pontos discretos é um ato ou parte da interpretação. Campo e interpretação, assim, influenciam-se mutuamente, e os pontos de dados são apenas uma parte disso. Definir uma anomalia a partir de um conjunto limitado de pontos não é, portanto, uma tarefa trivial.

Os efeitos gravitacionais, geralmente na forma de funções contínuas de coordenadas, derivadas, relações no espaço e as possibilidades de explorá-las para interpretação. A análise de anomalias, trata da construção concreta de uma anomalia a partir de pontos discretos e da noção de seus erros. Como tarefa frequente, a separação de campos regionais e residuais. Em particular, os conceitos de anomalias e efeitos gravitacionais são confrontados e sua dependência mútua é considerada. Ambos devem ser claramente distinguidos.

De modo geral, uma anomalia gravimétrica consiste na diferença entre a aceleração da gravidade g , medida na superfície terrestre, corrigida de variações periódicas e da topografia, e a aceleração da gravidade produzida por um modelo (no caso o elipsoide) (SÁ, 1994). A Figura 2 representa a gravidade real g e a gravidade teórica γ .

Figura 2 – Gravidade real g e gravidade teórica γ



Fonte: Adaptado de Sá (1994).

5.2 Anomalia ar-livre

A anomalia ar-livre corresponde à determinação da anomalia ao nível do geóide como resultado da translação do ponto em altitude da superfície topográfica ao geóide, mantendo ainda a influência da atração das massas em excesso no seu exterior (CATALÃO ; ANTUNES, 2012), ou seja, elimina apenas o efeito gravitacional devido à altitude do ponto de observação. É dada pela Equação 1.

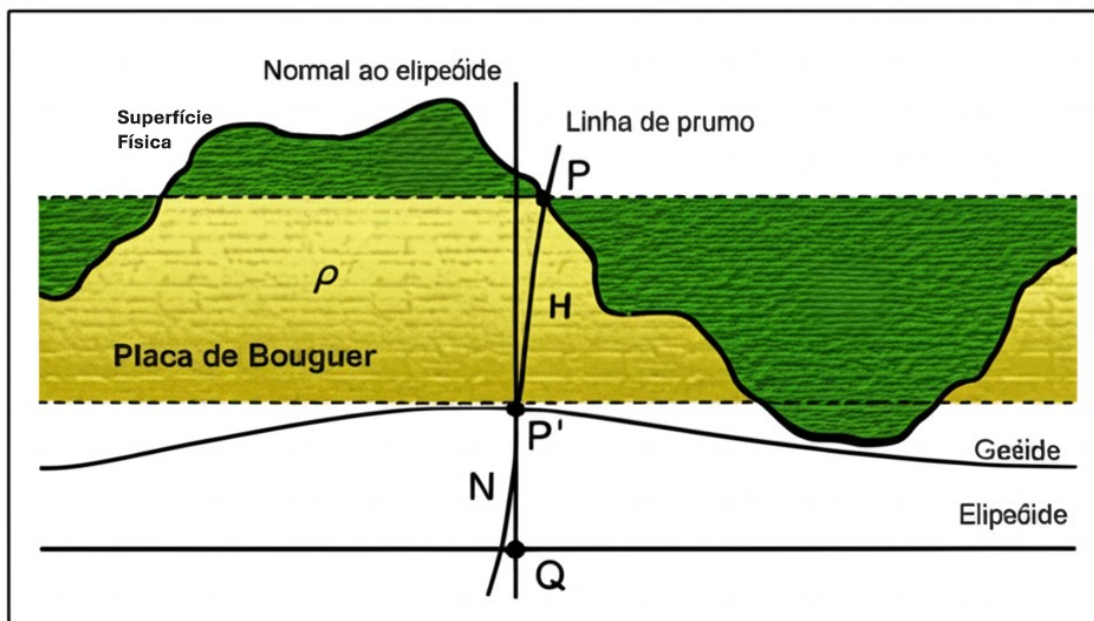
$$\Delta g_{FA} = 0,3086 \times h \quad (1)$$

Δg_{FA} correção do ar livre (em mGal)
 h altitude do ponto de medição em relação ao nível do mar (em metros)
 0,3086 mGal/m valor aproximado da aceleração gravitacional por metro de elevação
 (varia levemente com a latitude)

5.3 Anomalia Bouguer

A correção de *Bouguer* leva em consideração a massa topográfica existente entre o geóide e o ponto de observação na superfície terrestre. O propósito da correção Bouguer da gravidade é remover completamente as massas topográficas (massas fora do geóide), removendo assim o efeito gravitacional das rochas existentes entre o ponto de observação e o nível de referência. Nesta correção considera-se totalmente plana e horizontal a área situada ao redor do ponto gravimétrico, o que constitui o platô ou placa de *Bouguer* horizontal (que pode ser visualizado na Figura 3). Este platô tem densidade ρ constante, espessura H igual à altitude entre o ponto (estação) e o geóide e apresenta extensão infinita no sentido horizontal (HOFMANN-WELLENHOF & MORITZ).

Figura 3 – Platô de Bouguer



A fórmula de bouguer é dada pela seguinte equação 2:

$$\Delta g_B = 0,04193 \times \rho \times h \quad (2)$$

Δg_B correção de Bouguer (em mGal)

ρ densidade média das rochas entre o ponto de medição e o nível do mar
(em g/cm^3 , normalmente entre $2,67 \text{ g}/\text{cm}^3$)

h altitude do ponto (em metros)

$0,04193 \text{ mGal} \cdot \text{cm}^3/(\text{g} \cdot \text{m})$ constante de Bouguer

6. A LINGUAGEM *Python* APLICADA a GERAÇÃO DE FERRAMENTAS GEOCIENTÍFICAS

A linguagem *Python* teve seu desenvolvimento iniciado em 1989 no instituto nacional de pesquisa em Matemática e Ciência da Computação, CWI (*Centrum Wiskunde & Informatica*), na Holanda, por Guido van Rossum (*Python*).

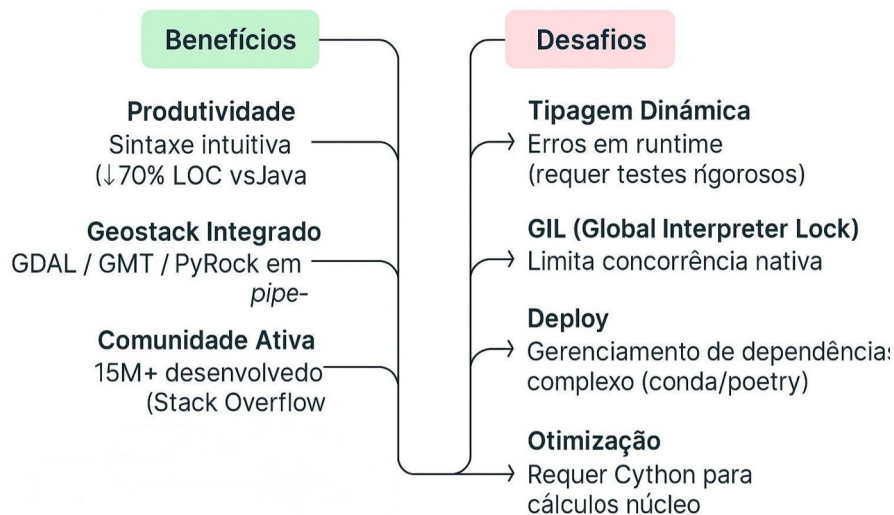
No mesmo instituto, Guido participou do desenvolvimento da linguagem de programação ABC (sintaxe similar à linguagem C, capacidades de *scripting* de *shell*, paradigmas de orientação a objetos, modelo interpretado dinâmico) que tem características de uso de propósito geral, além de participar do desenvolvimento de um sistema operacional distribuído denominado *Amoeba* (*History of python*).

Com uma sintaxe bastante semelhante à da linguagem C, o Python foi concebido com o objetivo de suprir lacunas existentes entre a linguagem C e o shell. Trata-se, portanto, de uma linguagem interpretada, orientada a objetos e interativa, cuja versatilidade permite sua aplicação em propósitos diversos, abrangendo diferentes naturezas e níveis de complexidade. Entre suas principais aplicações destacam-se a automatização e o gerenciamento de infraestrutura de servidores em larga escala, o desenvolvimento de aplicações web e a criação de ferramentas voltadas à análise de dados.

Essa diversidade de aplicações, aliada à facilidade de aprendizado, contribuiu para que o Python despertasse interesse não apenas entre profissionais da área de informática, mas também entre especialistas de outras áreas do conhecimento. Esses profissionais frequentemente necessitam de soluções computacionais para automatizar tarefas que envolvem atividades sequenciais e repetitivas, anteriormente realizadas de forma manual. Ademais, o crescimento da popularidade da linguagem no contexto educacional e profissional é amplamente reconhecido na literatura, conforme destacado por Hale (2018).

A Figura 4 apresenta um mapa mental que sintetiza os principais benefícios e desafios associados ao uso de linguagens e ferramentas de programação no contexto das geociências. Entre os benefícios observam-se o aumento da produtividade, a integração com o *geostack*, a existência de uma comunidade ativa e o suporte a múltiplos paradigmas de programação. Por outro lado, os desafios incluem a tipagem dinâmica, a limitação imposta pelo *Global Interpreter Lock (GIL)*, a complexidade nos processos de *deploy* e a necessidade de otimização de desempenho em aplicações específicas.

Figura 4 - Mapa Mental



Fonte: O autor (2025)

6.1 Fontes de informação - dados

Os dados são elementos que constituem a matéria-prima da informação. São definidos, também, como conhecimento bruto, ainda não devidamente tratado para prover *insights* para uma organização. Assim, os dados representam um ou mais

significados que, de forma isolada, não conseguem ainda transmitir uma mensagem clara (know solutions, 2019). Já as informações são os dados devidamente tratados e analisados, produzindo conhecimento relevante. Ao contrário dos dados, elas têm significados práticos e podem ser utilizadas para reforçar o processo de tomada de decisão (know solutions, 2019). Dados podem ser estruturados, semi-estruturados ou não estruturados. Independente do tipo, eles ficam sempre armazenados em “arquivos” distribuídos através das redes (Neto, 2021). Abaixo, são mostrados alguns exemplos de formatos de arquivos:

a) Planilha no *Microsoft Excel*, no *LibreOffice Calc* e no *Google Planilhas*, é um modo conveniente de armazenar informações (Oracle Brasil, 2021). Foi originalmente projetada para único usuário, ou um pequeno número de usuários (suas características refletem isso) que não precisam fazer manipulações de dados extremamente complicadas. (Oracle Brasil, 2021). Planilha, no caso Planilha Eletrônica, ou Folha de Cálculo, ou ainda Planilha de Cálculo, é uma implementação por meio de programas de computador, que utiliza tabelas para realização de cálculos, ou apresentação de dados. Cada tabela é formada por uma grade composta de linhas e colunas.

b) *Comma-Separated Values (CSV) ou Valores Separados por Vírgula*, é um formato de arquivo que contém linhas de dados de texto compostas por colunas separadas por vírgula. O formato é útil porque é fácil de analisar e pode ser carregado e editado com qualquer programa de planilha. Como as vírgulas podem fazer parte dos dados, qualquer coluna que inclua uma vírgula, esta deve ser colocada entre aspas duplas (Fry, 2008).

6.2.1 Banco de Dados

Assim como a planilha, é um modo conveniente de armazenar informações (Oracle Brasil, 2021). Ao contrário da planilha, é projetado para conter coleções muito maiores de informações organizadas, quantidades enormes, às vezes. Permite que vários usuários, ao mesmo tempo, acessem e consultem com rapidez e segurança os dados, usando lógica e linguagem altamente complexas (Oracle Brasil, 2021). Um banco de dados é uma coleção organizada de dados, ou informações, normalmente armazenadas eletronicamente em um sistema de

computador. Um banco de dados é geralmente controlado por um sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD). Os dados e o SGBD, juntamente aos aplicativos associados a eles, são chamados de sistema de banco de dados, geralmente abreviados para apenas banco de dados (Oracle Brasil, 2021).

6.2.2 Biblioteca Para Ciência de Dados

PyData (PyData) é um programa educacional promovido pela empresa *NUMFOCUS* cujo objetivo é o de fomentar a utilização, divulgação, compartilhamento de ideias, melhores práticas e novas abordagens relacionadas às ferramentas de processamento, gerenciamento, análise, bem como visualização de dados, focando principalmente no ecossistema *Python* para Ciência de Dados.

Devido ao aumento de profissionais e a popularidade da linguagem, bem como a importância dos eventos em todo o mundo, a comunidade adotou como referência e denominou de *PyData Stack* o conjunto de ferramentas específicas de *Python* que são recomendadas pelo *PyData* para a utilização em Análise de Dados.

Apesar de serem bibliotecas recomendadas e com grande aceitação no ambiente corporativo e acadêmico, a lista não tem a pretensão de ser oficial e definitiva, porém, conforme avaliação em páginas de tecnologia são as mais utilizadas para a realização de tarefas relacionadas à análise de dados .

Existem atualmente mais de 160 mil pacotes (*Pypi*) disponíveis para a linguagem *Python* com propósitos diversos, entretanto, os pacotes *pandas*, *NumPy*, *Matplotlib*, *scikit-learn* são os mais populares no âmbito de Ciência de Dados, empregados tipicamente para efetuar a preparação dos dados, cálculos e análises matemáticas, criação de gráficos e visualização de dados e criação de modelos analíticos de dados. Abaixo seguem as propostas de cada uma e alguns exemplos de sua utilização.

6.2.4 PANDAS

A biblioteca *pandas* teve o início de seu desenvolvimento em 2008, por Wes McKinney, (Mckinney) na companhia *AQR Capital Management*, e desde então é

comumente utilizada para manipular e efetuar análise de dados estruturados. O ciclo de vida da Análise de Dados, se inicia na fase de Preparação com objetivo de realizar o tratamento dos dados, pois possuem diversas funcionalidades que facilitam sua manipulação e visualização sem precisar recorrer para outras ferramentas mais específicas, tais como *softwares* de planilhas de texto, de estatística e banco de dados relacional. A ferramenta *Pandas* ganhou notoriedade devido a sua facilidade de uso e produtividade devido a sua capacidade para lidar com grandes massas de dados sem perder a eficiência.

No que tange as necessárias verificações e análises estatísticas, como cálculos de desvio padrão, soma, média, quartil, valores mínimos e máximos, entre outros, tais análises são facilmente realizadas através de funções simples existentes na biblioteca. Além de possibilitar a junção de dois ou mais conjuntos de dados, realizar agrupamentos entre diferentes tipos de dados, realizar a conversão e criação de séries temporais (contendo data e hora).

Entretanto, uma das características que mais se destacam na biblioteca é a facilidade na manipulação de dados, como, por exemplo, efetuar a separação de determinados objetos em grupos, agrupamento de dados baseado em algum critério determinado, aplicar uma função para um conjunto de dados selecionados, entre outros. Utilizando duas de suas principais estruturas de dados, *Series* (1 dimensão) e *Data Frame* (2 dimensões), que possui similaridade com uma planilha, o Cientista de Dados pode facilmente efetuar a transformação (adição, remoção ou alternância) para a visualização de linhas e colunas desejadas, processo muito utilizado na Análise de Dados.

Exemplos de utilização da biblioteca *Pandas*: *Series* é uma estrutura de dados unidimensional, ou seja, contém apenas linhas e, que possui um vetor de dados e um vetor de índice, que são os rótulos dos dados. No exemplo da Figura 5 é criado um vetor notas contendo os nomes dos alunos como rótulos dos dados.

Figura 5 - Exemplo da biblioteca *Pandas*

```
import pandas as pd

# Criando uma Series com nomes como índice e notas como valores
notas = pd.Series([8.5, 7.0, 9.2, 6.8], index=["Ana", "Bruno", "Carlos", "Diana"])

# Exibindo a Series
print("Séries - Notas dos alunos:")
print(notas)

# Acessando dados usando rótulo (index)
print("\nNota do aluno Carlos:", notas["Carlos"])
```

Séries - Notas dos alunos:

Ana	8.5
Bruno	7.0
Carlos	9.2
Diana	6.8

dtype: float64

Nota do aluno Carlos: 9.2

Figura 5: Exemplo: *Pandas* – Utilizando Séries Conforme especificado na criação do vetor através do parâmetro *index*, é possível acessar os dados do vetor através de seus rótulos. A utilização de rótulos em Análise de Dados, é importante e facilita o acesso aos dados em casos onde existem um grande número de colunas, por exemplo. *Data Frame* é uma estrutura de dados bidimensional, com formato tabular, que contém uma coleção de colunas, com seus respectivos valores em sua formação (linhas). É uma matriz que pode conter diferentes tipos de dados em cada coluna existente, podendo ser do tipo texto, número inteiro, número decimal, entre outros. No exemplo da Figura 12 foi criado um *Data Frame* passando como entrada um dicionário de dados denominado *data*.

Figura 6 - Exemplo de *Data Frame*

```
# Criando um dicionário de dados
data = {
    "Nome": ["Ana", "Bruno", "Carlos", "Diana"],
    "Idade": [20, 22, 21, 19],
    "Nota": [8.5, 7.0, 9.2, 6.8]
}

# Criando o DataFrame
df = pd.DataFrame(data)

# Exibindo o DataFrame
print("\nDataFrame criado:")
print(df)
```

Através da função *dtypes* da biblioteca, é possível visualizar os tipos de dados de cada coluna. Esse processo é bastante utilizado para uma análise exploratória dos dados, conforme exemplo da Figura 7:

Figura 7 – Análise exploratória dos dados

```
[ ] # Verificando os tipos de dados de cada coluna
print("\nTipos de dados em cada coluna:")
print(df.dtypes)
```

↳

```
Tipos de dados em cada coluna:
Nome      object
Idade     int64
Nota      float64
dtype: object
```

Figura 7: Exemplo: Pandas – Visualizando tipos de dados. Dados matemáticos e estatísticos. Em Análise de Dados, é comum que o Cientista de Dados, faça um mapeamento estatístico dos dados existentes, seja para entender como os dados estão distribuídos ou efetuar algum cálculo no conjunto de dados, por exemplo. É possível descobrir a quantidade de registros (*count*), média (*mean*),

desvio padrão (*std*), valores mínimos e máximos (*min*, *max*) e quartis (Q1: 25%, Q2: 50%, Q3: 75%) utilizando a função *describe*, que são exibidas estas informações para cada campo do *data frame*.

Visualização de dados, uma das etapas mais importantes na Análise de Dados é a Preparação dos dados. É quando o Cientista de Dados deve avaliar o conjunto de dados existentes e efetuar seu tratamento. Entretanto, dados que estão ausentes podem comprometer a criação do modelo Analítico de Dados e, portanto, devem ser identificados. A biblioteca *Pandas* permite nativamente uma rápida identificação desses dados, indicando com valores *NaN* os dados que estão faltando ou estão nulos.

6.2.4 NumPy

O *NumPy* é a junção de duas ferramentas (*Numeric* e *NumArray*) (*Numpy*) que surgiram com o propósito de efetuar cálculos e análises estatísticas e matemáticas e manipulações numéricas avançadas através de matrizes multidimensionais (ou n-dimensional, onde n representa o número de dimensões existentes), diferentemente do *Pandas* que possui propósito em manipular dados com uma dimensão ou duas dimensões, contendo apenas linhas e colunas.

A utilização de matrizes multidimensionais é bastante importante em Análise de Dados pois permite fazer uma avaliação estatística e cálculos matemáticos utilizando diversas métricas e variáveis ao mesmo tempo, onde cada uma representa uma dimensão, além de poder ser utilizado em aplicações de geolocalização e manipulação de imagens coloridas, onde geralmente são representadas por 3 camadas de cores (RGB), contendo portanto, 3 dimensões, entre outros exemplos. Um exemplo prático dessa avaliação é a criação de uma espécie de cubo de dados de venda, contendo lojas, funcionários e produtos, como dimensões de análise.

Nesse caso é possível fazer uma análise estatística e descobrir quais lojas mais venderam e, a partir de uma determinada loja saber quais são os funcionários que mais venderam e quais foram os produtos mais vendidos por esses funcionários, formando nesse caso uma matriz tridimensional de dados. Entretanto, esse tipo de abordagem analítica, utilizando matrizes com n dimensões, requer um

considerável poder computacional, e devido a problemas de performance e de funcionalidades.

Travis Oliphant, em conjunto com a comunidade de desenvolvedores, resolveram unificar as duas ferramentas para que aproveitassem as melhores características de cada uma e, após as correções e ajustes necessários, surgiu então em 2006 a primeira versão da biblioteca *NumPy*. A otimização de performance realizada na biblioteca *Numpy* em relação às funcionalidades nativas do *Python*, como as listas por exemplo, foram bastante significativas, tais como o menor consumo de memória para armazenamento dos dados e menor tempo de execução de instruções (*Course*), o que colaborou para o crescimento e adoção da ferramenta. A utilização da matriz multidimensional (*ndarray*), que possui função similar, porém, da biblioteca *NumPy*. Em um conjunto de dados contendo 10.000 valores diferentes, o tempo gasto para efetuar o cálculo do seno de um ângulo utilizando lista, ficou em 1.8ms, já utilizando *ndarray* ficou em 0,2ms, ou seja, quase 10 vezes mais rápido.

Os recursos matemáticos avançados utilizando matrizes permitem que a biblioteca seja bastante atrativa para sua utilização no ramo científico, pois é possível efetuar operações de álgebra linear com bastante simplicidade e eficiência, tais como normalização, multiplicação entre matrizes, efetuar cálculos de determinantes, resolver equações, realizar inversão e transposição de matrizes entre diversas outras funcionalidades. Os tipos de dados existentes na biblioteca *NumPy* também são em quantidade superior às existentes no *Python* e, essa característica permite um nível de precisão bastante significativo em cálculos matemáticos, possibilitando respostas contendo mais casas decimais e, conseqüentemente, mais precisas.

Além dos diversos métodos prontos para a criação de matrizes, a biblioteca *NumPy* possui diversas funções prontas que agilizam os cálculos matemáticos e estatísticos, pois sem essas funções seria necessário percorrer cada linha e coluna da matriz para realizar os cálculos desejados, gerando problemas de performance e aumentando o tempo necessário para a obtenção das respostas. Calcular a determinante de uma matriz, entre matrizes, cálculos polinomiais, efetuar o transformação de *Fourier*, no qual é bastante utilizado para o processamento de sinais digitais, são apenas alguns exemplos de funções já disponíveis para utilização.

6.2.5 *Matplotlib*

A biblioteca *Matplotlib* surgiu com o propósito de ser uma alternativa à linguagem de programação proprietária *MATLAB*, no qual permite a geração de gráficos 2D de maneira independente e com simplicidade. A medida que a complexidade no desenvolvimento de aplicações utilizando *MATLAB* aumentava, envolvendo interações com servidores de aplicações, banco de dados, diferentes estruturas de dados, além de perceber limitações como linguagem de programação, John Hunter, decidiu criar uma biblioteca com características similares, porém utilizando *Python*.

Assim, em 2003 surgiu a primeira versão do *Matplotlib*, com a proposta de gerar gráficos de alta qualidade de maneira simples, utilizando uma linguagem de fácil entendimento e expansível, além de ser possível a utilização em diferentes ambientes de desenvolvimento e sistemas operacionais, tornando uma biblioteca multiplataforma e altamente customizável. A visualização dos dados em formatos de gráficos é bastante utilizada durante o processo de Análise de Dados, pois permite ao cientista de dados ter uma noção maior de como as amostras de dados estão distribuídas, sendo possível identificar valores que estão sem preenchimentos, valores de dados discrepantes, identificar tendências, além de mostrar os resultados das análises realizadas ao final do ciclo de vida. Exemplos de utilização da biblioteca *Matplotlib*: Criação de gráficos diversos Durante toda a etapa do ciclo da Análise de Dados é realizada uma avaliação do conjunto de dados com objetivo de entender como os dados estão distribuídos, efetuar alguma comparação entre variáveis, identificar valores discrepantes, informar resultados ou até mesmo obter conhecimentos para uma tomada de decisão mais adequada.

No decorrer dessas análises, a utilização da biblioteca *matplotlib* permite que os dados sejam interpretados rapidamente através de gráficos diversos. Existem diversas opções para a criação de gráficos.

6.2.6 SciPy

A biblioteca *SciPy* (*Scientific Python*) é uma ferramenta de código aberto desenvolvida em linguagem *Python*, voltada para computação científica de alto desempenho. Ela estende as funcionalidades do *NumPy* ao oferecer um conjunto abrangente de algoritmos e rotinas para áreas como matemática aplicada, estatística, processamento de sinais, análise numérica e otimização. Entre seus principais módulos, destacam-se os voltados à integração numérica (*scipy.integrate*), otimização de funções (*scipy.optimize*), interpolação de dados (*scipy.interpolate*), transformadas de Fourier (*scipy.fft*), álgebra linear (*scipy.linalg*) e análise estatística (*scipy.stats*). Esses módulos são implementados com base em bibliotecas consolidadas, como *BLAS*, *LAPACK* e outras rotinas otimizadas em linguagens de baixo nível, como *C* e *Fortran*, garantindo alto desempenho computacional. Além disso, o *SciPy* apresenta uma estrutura modular que facilita a interoperabilidade com outras bibliotecas do ecossistema *Python*, como *Matplotlib*, *Pandas* e *SymPy*. Sua robustez, documentação extensa e ampla aceitação na comunidade científica e industrial tornam o *SciPy* um dos pilares da computação científica moderna com *Python* (VIRTANEN et al., 2020).

A função *griddata* da biblioteca *SciPy* é essencial para interpolar dados não estruturados em grades regulares, sendo amplamente utilizada em ciências geofísicas, meteorologia e processamento de sinais. Sua importância reside na capacidade de reconstruir superfícies contínuas a partir de pontos dispersos, mesmo quando estes estão irregularmente distribuídos no espaço. A funcionalidade principal é calcular valores em locais não amostrados usando métodos de interpolação como linear, *nearest* ou *cubic*, o que permite:

- 1- Criar mapas suaves a partir de dados esparsos
- 2- Preencher lacunas em medições de campo
- 3 - Visualizar tendências espaciais complexas

6.3 Dados de Campo

O estudo geofísico realizado por Fries (2008) na porção nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, região sudeste do Brasil, empregou as técnicas de gravimetria e magnetometria em escala de semi-detalhe, com o propósito de investigar os altos estruturais de Pitanga, Ártemis, Pau D'Alho e Jibóia. As análises geofísicas permitiram identificar lineamentos estruturais associados aos principais trends tectônicos da bacia, destacando-se direções preferenciais NW-SE, relacionadas a zonas de fraqueza do embasamento e a falhas e fraturas que controlaram a intrusão de rochas básicas.

Além dessas estruturas principais, foram observadas feições secundárias com orientações NE-SW, E-W e N-S, interpretadas como reflexo de reativações tectônicas mais recentes. As modelagens gravimétricas e magnetométricas apresentaram resultados coerentes com os estudos geológicos precedentes, indicando espessuras sedimentares médias de aproximadamente 500 metros sobre os altos estruturais e espessamento progressivo até cerca de 1000 metros nas áreas adjacentes.

A integração dos dados de gravimetria, magnetometria e *DGPS (Differential Global Positioning System)* foi fundamental para o reconhecimento, correlação e interpretação das feições geológicas e estruturais, fornecendo subsídios para a compreensão dos processos tectônicos e evolutivos responsáveis pela formação dos altos estruturais na Bacia Sedimentar do Paraná.

7. PROCESSAMENTOS APLICADOS A DADOS GRAVIMÉTRICOS

O processamento e a interpolação de dados gravimétricos são etapas fundamentais na construção de modelos contínuos do campo de gravidade a partir de observações pontuais. Esses métodos permitem representar de forma precisa as variações espaciais da anomalia gravimétrica, possibilitando análises estruturais, correlações geológicas e modelagens quantitativas.

Entre os principais métodos utilizados destacam-se: Mínima Curvatura, *Krigagem* e Inverso da Distância Ponderada (IDW), que diferem quanto à natureza matemática, suavidade da superfície gerada e complexidade computacional.

A Tabela 1 mostra uma comparação de interpolação.

7.1.1 Mínima Curvatura

O método da Mínima Curvatura é amplamente utilizado na interpolação de dados geofísicos, como gravimetria, magnetometria e topografia. Esse método busca gerar uma superfície contínua e suave que passe por todos os pontos conhecidos, minimizando a curvatura total da superfície.

Fisicamente, a solução é análoga à deformação de uma placa fina e elástica que se ajusta aos pontos de dados, equilibrando tensões de curvatura.

Formulação Matemática 3 :

A superfície interpolada $z(x,y)$ é obtida pela minimização do funcional de curvatura:

$$j = \int_{\square} \int_{\square} \left[\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right)^2 \right] dx dy \quad (3)$$

$z(x,y)$ representa a superfície interpolada;

$\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right)$, $\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \right)$, $\left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right)$ são as derivadas parciais de segunda ordem da

superfície;

J é o funcional de curvatura, cuja minimização resulta em uma superfície suave, amplamente utilizada em métodos de interpolação do tipo *minimum curvature*.

7.1.2 Krigagem

A *Krigagem* é um método geostatístico baseado na teoria das variáveis regionalizadas. Ela fornece uma estimativa ótima e não tendenciosa dos valores em locais não amostrados, considerando a estrutura espacial da variabilidade dos dados (semivariograma).

Diferentemente de métodos puramente determinísticos, a *Krigagem* incorpora a dependência espacial e permite avaliar a incerteza da estimativa.

Formulação Matemática 4 :

O valor interpolado em um ponto PPP é dado por:

$$Z^*(P) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(P_i) \quad (4)$$

$Z^*(P)$ é o valor interpolado no ponto P;

$Z(P_i)$ representa o valor observado no ponto P_i ;

λ_i são os pesos de interpolação associados a cada ponto P_i ;

n é o número total de pontos amostrais considerados no processo de interpolação.

7.1.3 Inverso do Peso pela Distância (IDW)

O método *IDW* é uma técnica determinística que estima valores desconhecidos com base em uma média ponderada dos valores observados, onde os pesos são inversamente proporcionais à distância ao ponto de interpolação. Assim, pontos mais próximos exercem maior influência na estimativa final.

Formulação Matemática 5 :

$$Z^*(P) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z(P_i)}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (5)$$

onde d_i é a distância entre o ponto P e o ponto de amostragem P_i , e p é o expoente de ponderação (tipicamente entre 1 e 3).

Tabela 1- Comparativo das interpolações

Método	Suavidade	Complexidade Computacional	Requer Grade
Mínima Curvatura	Muito suave	Alta	Sim
Krigagem	Suave (C1)	Moderada-Alta	Sim
IDW	Variável (com p)	Baixa-Moderada	Não

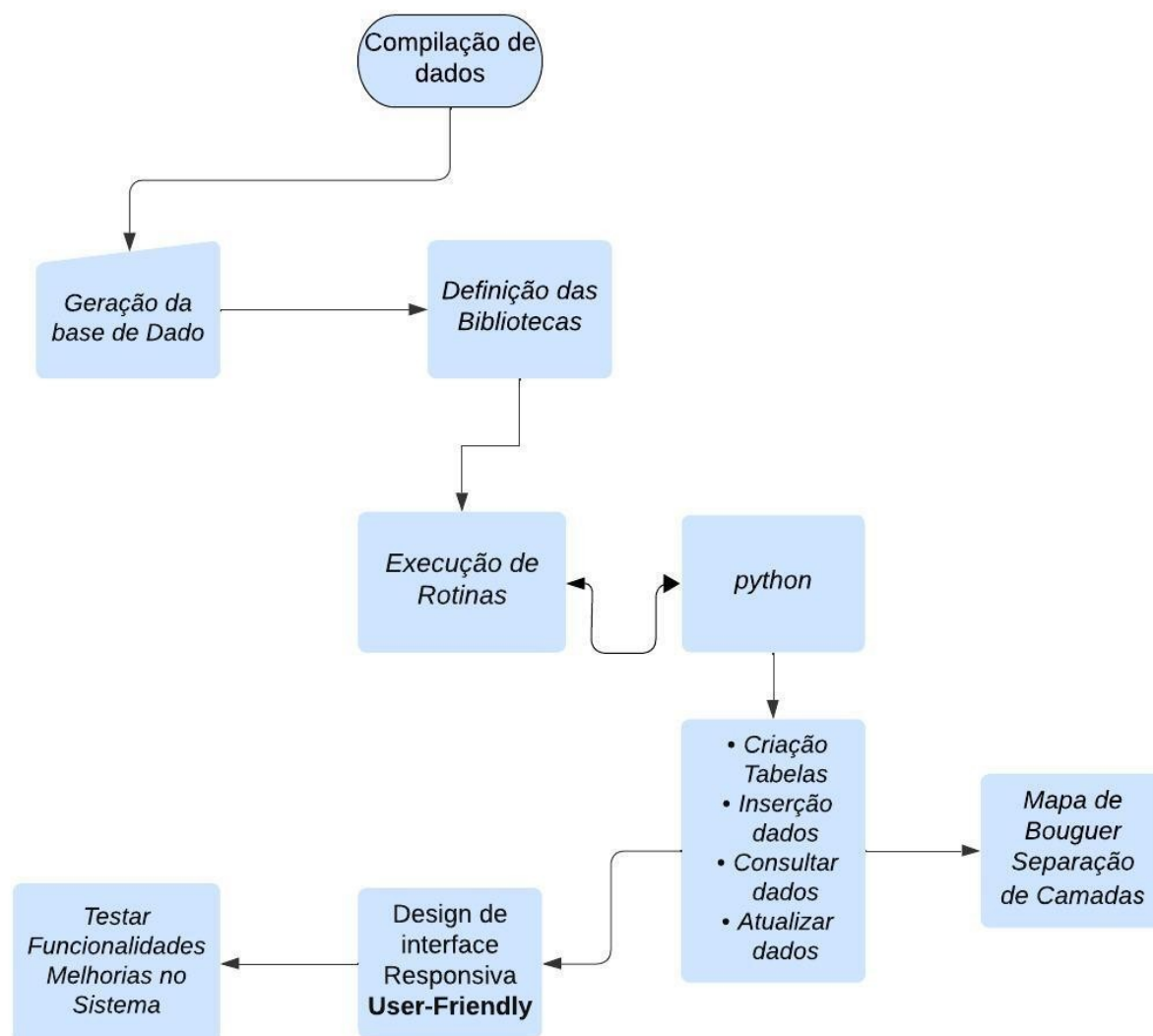
Fonte: O autor (2025)

8. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a aplicação do método gravimétrico em diferentes contextos, foram definidas as seguintes etapas:

- Compilação, análise de consistência e organização das bases de dados existentes (IAG, IBGE, Petrobras e UFRGS);
- Processamento bruto (obtenção das anomalias gravimétricas e dados brutos do instrumento/gravímetro denominados de *raw data*);
- Redução dos dados gravimétricos - obtenção dos valores da anomalia *Free-Air* e Bouguer
- Processamento das estações gravimétricas - interpolações das anomalias observadas, superfícies e isovalores.

A seguir na Figura 8, é apresentado um fluxo de atividades exemplificando as principais etapas e procedimentos realizados.



Fonte: O autor (2025)

8.1 Sequência adotada na construção da proposta - software

A configuração inicial envolve a definição das bibliotecas técnicas, estabelecendo um ambiente *Python* especializado com ferramentas como *NumPy* e *Pandas* para manipulação numérica eficiente de grandes volumes de dados. Integra-se *GeoPandas* para gestão de dados espaciais em formatos *Shapefile/GeoJSON* e *PyGMT* para geração de mapas com padrões cartográficos científicos, enquanto bibliotecas como *gravmag* ou *Fatiando a Terra* são incorporadas para cálculos gravimétricos otimizados, garantindo compatibilidade entre versões através de ambientes virtuais *conda* para total reprodutibilidade dos processos.

Prossegue-se com a construção da base de dados, implementando esquemas robustos contendo campos essenciais: coordenadas geográficas

(latitude/longitude), valores de gravidade observada em mGal, altitude em metros e metadados críticos como data de coleta e incertezas de medição. Adota-se *PostgreSQL* com extensão *PostGIS* para gestão espacial avançada, desenvolvendo operações automatizadas de ingestão para formatos comuns como *CSV* e *XLSX*. A base dimensiona-se para suportar mais de 100.000 registros com tempos de resposta inferiores a 120 segundos, incorporando validações automáticas de faixas de valores e backups diários robustos.

Na fase de cálculo de anomalias Bouguer, aplicam-se correções sequenciais rigorosas: compensação altimétrica (ar-livre), efeito de massa topográfica (*Bouguer*) e ajuste fino do terreno mediante modelos digitais *SRTM* ou *ALOS PALSAR*. Alcança-se precisão de ± 0.1 mGal através de paralelização com *Dask* e parâmetros ajustáveis de densidade crustal, permitindo reprocessamento dinâmico conforme variações geológicas regionais.

Para separação de camadas, implementam-se técnicas avançadas de processamento de sinais, incluindo filtragem Gaussiana com *kernels* personalizáveis (≥ 20 km para regionais profundas, ≤ 5 km para residuais rasas), complementadas por decomposição espectral via *FFT* e *wavelets* multi-resolução. Desenvolvem-se interfaces interativas para ajuste de parâmetros em tempo real, com visualização comparativa imediata e exportação em formatos padrão *GeoTIFF/NetCDF* para integração com softwares de interpretação 3D.

Na geração de mapas profissionais, emprega-se interpolação espacial avançada (*krigagem/splines*) e visualização com *PyGMT*, incorporando elementos técnicos como relevo sombreado, paletas de cores divergentes otimizadas, escalas precisas e sobreposição de dados geológicos. Garante-se resolução mínima de 300 DPI compatível com publicações científicas e adesão estrita aos padrões *SIRGAS2000* para referenciamento espacial.

Estabelecem-se protocolos rigorosos de validação mediante análise estatística de resíduos, variogramas espaciais e validação cruzada com dados de sondagem. Implementam-se testes automatizados para verificação de cálculos fundamentais, fluxos integrados e desempenho sob carga massiva, assegurando incerteza total inferior a 5% do sinal com documentação técnica detalhada em cada etapa.

Finalmente, desenvolve-se uma interface de usuário intuitiva utilizando *Streamlit*, incorporando componentes interativos como seletores de perfis, controles

deslizantes para parâmetros de filtragem e visualizadores 2D/3D integrados. Otimiza-se performance para carregamento de 50.000 pontos em menos de 60 segundos com atualização de mapas em tempo real, além de design responsivo e modos de acessibilidade. Todo o fluxo – desde ingestão de dados brutos até produtos interpretativos – executa-se em menos de 10 minutos para 100.000 pontos, gerando saídas conforme normas acadêmicas com suporte multi-idioma (PT/EN/ES) planejado para expansões futuras.

9 RESULTADOS E DISCUSSÃO

9.1 Interface Gráfica do Usuário

A interface do GSearch foi desenvolvida utilizando *Tkinter*, a biblioteca gráfica padrão do *Python*, combinada com *ttk (Themed Tkinter)* para componentes modernos. A arquitetura segue um padrão *MVC (Model-View-Controller)* modificado, permitindo separação clara entre lógica de negócio e apresentação. A interface principal foi organizada em painéis temáticos, incluindo um menu superior para acesso rápido às funcionalidades principais, painel de controle de dados para carregamento e gerenciamento de *datasets*, configurações avançadas para ajuste de parâmetros de interpolação, e uma área de visualização em tempo real com estatísticas instantâneas. Um sistema de tema dual oferece modos claro e escuro com transição suave, enquanto o design responsivo garante adaptação a diferentes resoluções de tela.

9.2 Sistema de Carregamento de Dados

O *GSearch* implementa algoritmos inteligentes para detecção automática de formatos e delimitadores. O sistema realiza leitura adaptativa com suporte a múltiplos *encodings* e formatos, seguida de limpeza automática com remoção de colunas vazias e linhas inválidas. Um mapeamento inteligente identifica automaticamente colunas por padrões de nome, enquanto a conversão segura garante transformação de dados com tratamento robusto de erros. O sistema inclui uma interface interativa para associação manual de colunas quando necessário, oferecendo combo boxes para cada tipo de dado em janela modal dedicada.

9.3 Sistema de Interpolação

O núcleo de interpolação do *GSearch* implementa múltiplos algoritmos científicos. O método de Mínima Curvatura utiliza funções de base radial (RBF) com função multiquadric e parâmetro epsilon ajustável, ideal para dados geofísicos. A interpolação Cúbica emprega `scipy.interpolate.griddata` para dados com distribuição regular, oferecendo balanceamento entre velocidade e precisão. O método IDW (Inverse Distance Weighting) aplica peso proporcional ao inverso da distância com controle de número de pontos vizinhos e potência, adequado para dados com tendências locais fortes. Algoritmos lineares e nearest neighbor complementam o sistema para verificação rápida e prototipagem. Controles avançados permitem ajuste de resolução (100 a 500 pontos por eixo) e seleção intuitiva de método com pré-visualização imediata dos resultados.

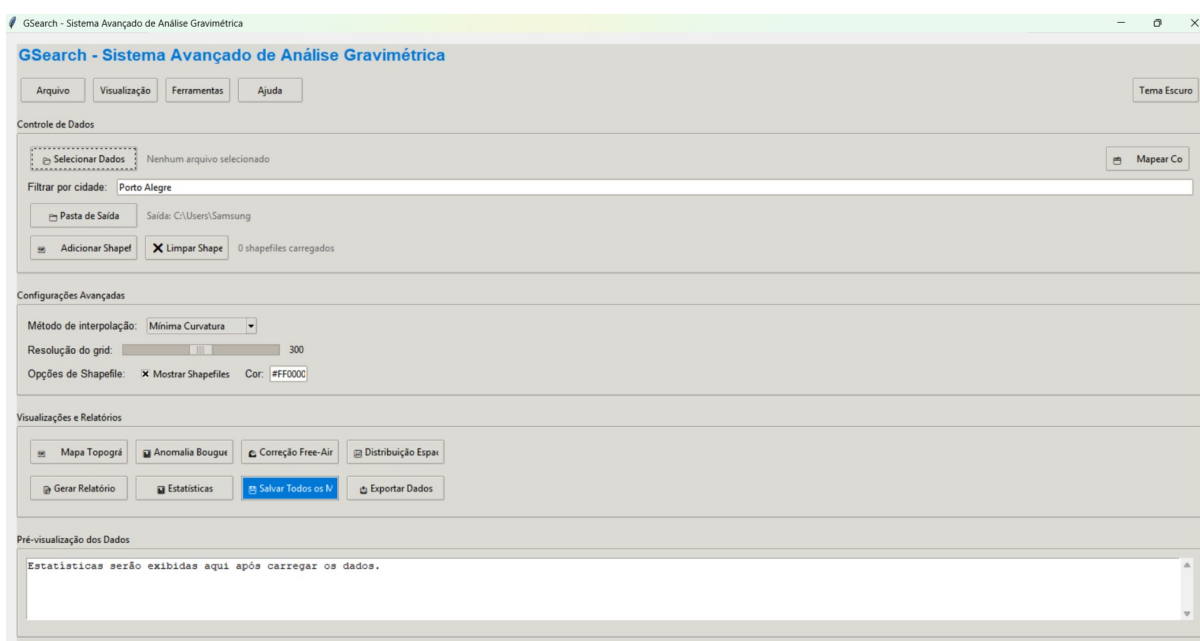
9.4 Sistema de Visualização

A visualização integra perfeitamente `matplotlib` com *Tkinter* através de *FigureCanvasTkAgg*, oferecendo renderização de alta qualidade com barra de ferramentas de navegação completa. O sistema produz mapas temáticos incluindo visualização de dados altimétricos para topografia, análise de anomalias gravimétricas para *Bouguer*, correções gravimétricas para *Free-Air*, e análise 3D e densidade para distribuição espacial. Ferramentas interativas incluem zoom avançado com *RectangleSelector* para seleção por região, *toolbar matplotlib* integrada para navegação, e exportação em múltiplos formatos com qualidade ajustável.

9.5 Sistema de Gerenciamento

O sistema incorpora tratamento robusto de erros com blocos *try-except* abrangentes que capturam exceções e fornecem feedback informativo ao usuário. Técnicas de otimização incluem cache de resultados para armazenamento de interpolações recentes, processamento *lazy* para cálculos sob demanda, e gerenciamento proativo de memória com liberação consciente de recursos. O architecture é extensível, permitindo futuras expansões e integrações.

Figura 9 - apresenta todas as funcionalidades das interface do GSearch



Fonte: O autor (2025)

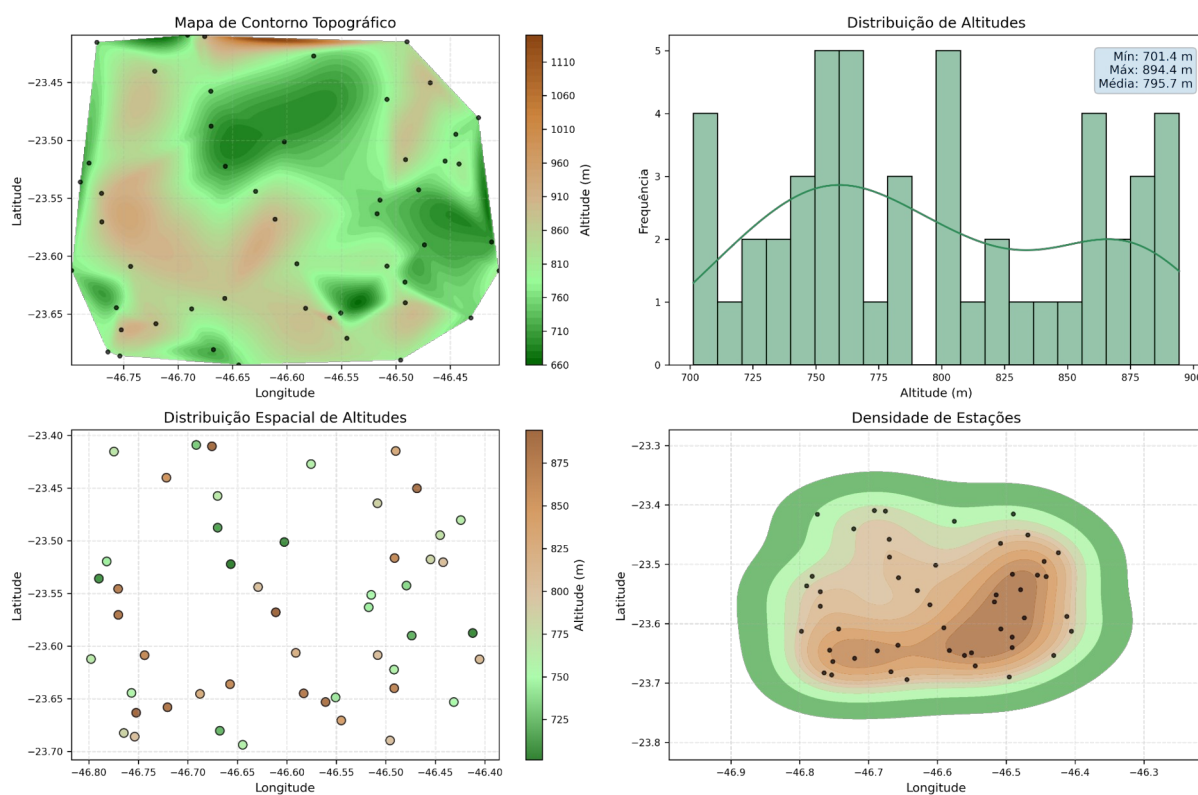
9.6 Mapa da superfície Topográfica: Base Geométrica da Análise

O mapa topográfico constitui a base geométrica sobre a qual todas as correções gravimétricas são aplicadas. Este mapa deriva de dados altimétricos coletados simultaneamente às medições gravimétricas, utilizando sistemas GNSS com precisão centimétrica a métrica, dependendo da metodologia de aquisição. A superfície contínua é gerada através de algoritmos de interpolação espacial, onde a

Figura 10 ,método de Mínima Curvatura geralmente oferece os melhores resultados para dados gravimétricos, pois preserva as características geomorfológicas sem introduzir artefatos excessivos.

A confiabilidade deste mapa é elevada, tipicamente entre 85-95%, uma vez que se baseia em medições diretas de posicionamento. No entanto, a resolução efetiva está intrinsecamente ligada à densidade de amostragem - áreas com espaçamento entre estações inferior a 500 metros apresentam representação topográfica confiável, enquanto regiões com espaçamento superior a 2 quilômetros podem apresentar suavização excessiva de feições geomorfológicas locais. Este mapa não apenas contextualiza a área de estudo, mas fornece os parâmetros geométricos essenciais para as correções subsequentes.

Figura 10 apresenta Mapa da superfície Topográfica do GSearch



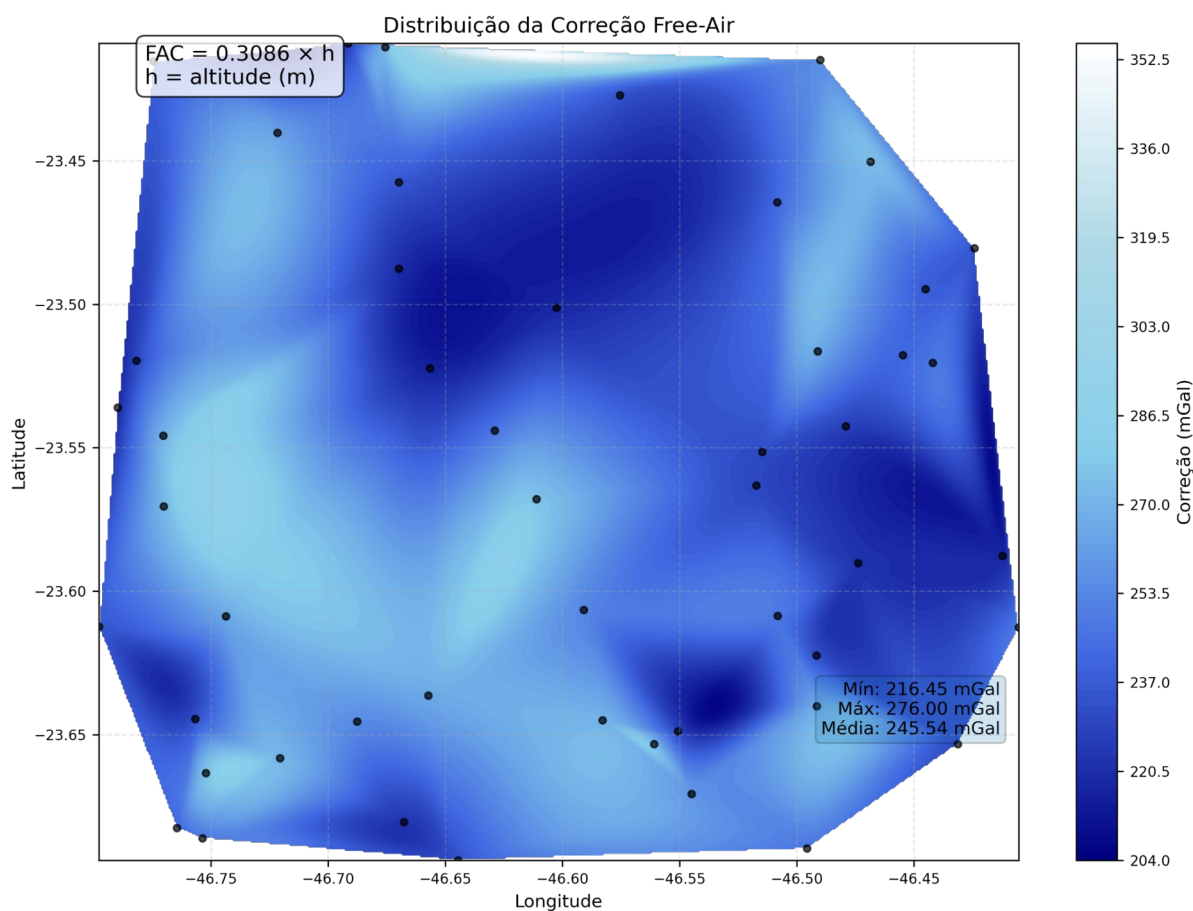
Fonte: O autor (2025)

9.6.1 Correção Free-Air: Isolando o Efeito Altimétrico

A correção Free-Air representa o componente puramente geométrico da variação gravimétrica. Este valor de 0.3086 mGal/m corresponde ao gradiente vertical teórico da gravidade em latitude 45°, derivado da forma e rotação terrestre. A aplicação desta correção tem como objetivo remover a variação gravimétrica atribuível exclusivamente à distância do ponto de medição em relação ao geóide.

Na Figura 11 mostra que a confiabilidade deste mapa é excepcionalmente alta (95-98%), fundamentando-se em princípios geofísicos bem estabelecidos e na precisão dos dados altimétricos. As limitações residem principalmente nas pequenas variações do gradiente real devido a heterogeneidades crustais locais, que podem desviar-se do valor teórico em até $\pm 0,001$ mGal/m. Este mapa serve como ponte fundamental entre a gravidade observada e as anomalias de interesse geológico, isolando eficazmente o componente puramente geométrico do sinal gravimétrico.

Figura 11 apresenta Correção Free-Air do GSearch



Fonte: O autor (2025)

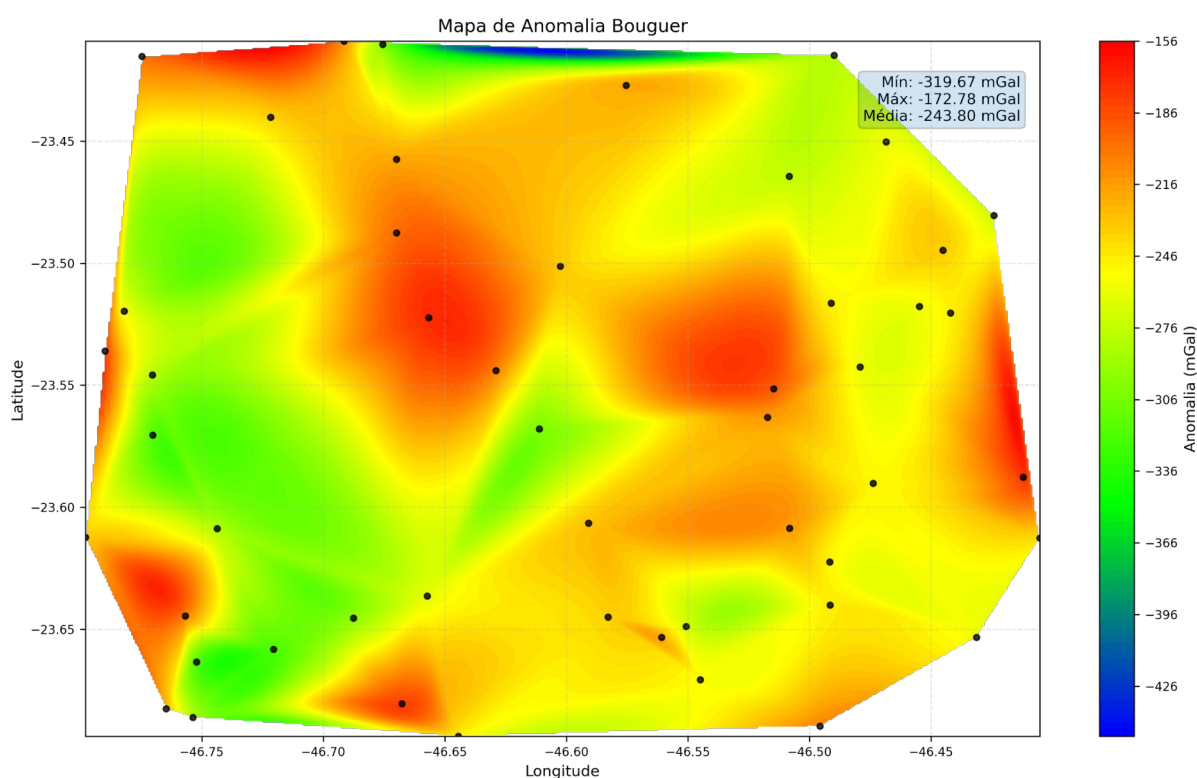
9.6.2 Anomalia Bouguer: A Janela para a Subsuperfície

A anomalia Bouguer representa o cerne da interpretação geofísica, correspondendo ao resíduo gravimétrico após a remoção dos efeitos conhecidos da altitude e topografia. Este mapa revela as variações de densidade intrínsecas às formações geológicas subterrâneas, permitindo identificar contrastes litológicos, estruturas tectônicas e variações crustais.

A Figura 12 tem o grau de certeza associado à anomalia Bouguer é moderado a alto (75-85%), dependendo criticamente da precisão das correções aplicadas e do conhecimento prévio das densidades regionais. Em contextos exploratórios, a confiabilidade aumenta significativamente quando calibrada com dados de poços ou sísmica. As principais fontes de incerteza incluem variações não

modeladas na densidade superficial, efeitos de heterogeneidades crustais profundas e limitações na correção topográfica em terrenos complexos. A interpretação deste mapa deve sempre considerar o contexto geológico regional para evitar inferências equivocadas.

Figura 12 - apresenta Anomalia Bouguer do GSearch



Fonte: O autor (2025)

9.7 Análise de consistência validação dos dados comparativos a outros softwares comerciais

O GSearch emerge no cenário de *software* geofísico como uma ferramenta

notavelmente robusta e acessível , demonstrando capacidades avançadas de processamento gravimétrico que rivalizam com soluções estabelecidas como *Surfer*, *Oasis Montaj* e *MATLAB*. Desenvolvido com uma arquitetura técnica sólida em *Python*, este software oferece um desempenho excepcional no processamento de dados gravimétricos, combinando eficiência computacional com precisão analítica. Sua capacidade de manipular grandes volumes de dados com algoritmos de interpolação avançados, incluindo Mínima Curvatura, *Krigagem*, Lineares e *IDW*, posiciona-o como uma alternativa viável às soluções tradicionais do mercado.

A robustez do *GSearch* manifesta-se através de sua estabilidade operacional excepcional, com mecanismos avançados de manipulação de erros e prevenção de vazamentos de memória que garantem sessões prolongadas de trabalho sem interrupções. O programa demonstra notável resistência a falhas, com sistemas de recuperação automática e salvamento contínuo do estado da aplicação, assegurando a integridade dos dados mesmo em condições operacionais adversas. Esta confiabilidade é complementada por rigorosos protocolos de segurança de dados, incluindo verificação de integridade em todas as operações de importação e exportação, prevenção ativa contra corrupção de arquivos e manutenção de histórico completo de operações para fins de auditoria.

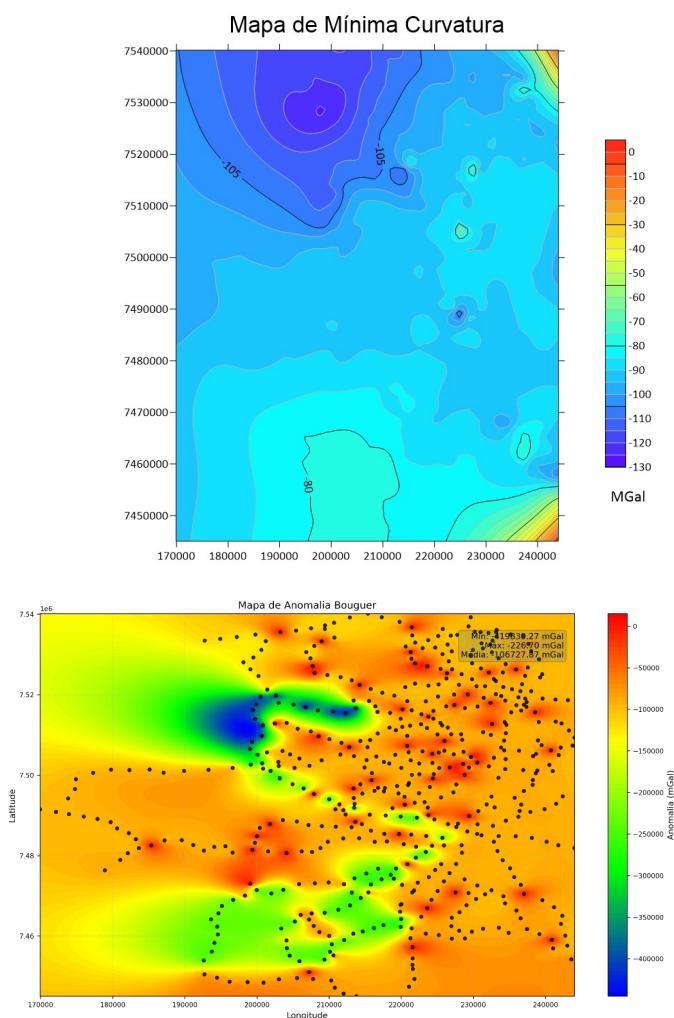
Em comparação com o *Golden Software Surfer*, o *GSearch* destaca-se por sua interface intuitiva especificamente desenhada para análise gravimétrica, eliminando a complexidade desnecessária e oferecendo correções gravimétricas integradas sem exigir plugins adicionais. Embora o *Surfer* mantenha vantagem em variedade de formatos de exportação, o *GSearch* compensa com processamento mais ágil e especializado, particularmente em projetos de pequena e média escala. Frente ao *Geosoft Oasis Montaj*, o *GSearch* oferece uma curva de aprendizado significativamente reduzida e não requer investimentos substanciais em licenças ou hardware especializado, tornando-o acessível para uma gama mais ampla de usuários enquanto mantém capacidades de processamento sofisticadas.

A portabilidade do *GSearch* across múltiplas plataformas (*Windows*, *Linux*, *macOS*) e sua independência de *frameworks* proprietários caros reforçam sua vantagem competitiva, enquanto sua arquitetura modular permite extensões e personalizações futuras.

A combinação única de robustez técnica, desempenho comprovado e acessibilidade financeira posiciona o *GSearch* como uma solução transformadora no

campo da análise gravimétrica, desafiando efetivamente o domínio histórico das soluções estabelecidas e oferecendo uma alternativa tecnologicamente avançada que não compromete a precisão científica nem a confiabilidade operacional. Na Figura 13 apresenta uma comparação do GSearch e o *Surfer* em um dado de campo de (Fries 2008).

Figura 13 comparação do Gsearch e o *Surfer* com *Mínima Curvatura*



Fonte: O autor (2025)

10. CONCLUSÃO

O desenvolvimento do sistema *GSearch* representa um avanço significativo no processamento computacional de dados gravimétricos, oferecendo uma plataforma integrada que combina capacidades analíticas com uma interface

acessível. A arquitetura atual demonstra avanços técnicos na implementação de algoritmos de interpolação espacial, correções gravimétricas padronizadas e visualização multidimensional de dados geofísicos.

O sistema evidencia excelência na implementação de funcionalidades essenciais para análise gravimétrica, particularmente na integração entre processamento numérico e representação cartográfica. A capacidade de processar anomalias *Bouguer*, correções ar-livre e gerar mapas temáticos posiciona o *GSearch* como uma importante ferramenta no cenário de *softwares* para a geofísica. A implementação dos principais métodos de interpolação, incluindo krigagem, mínima curvatura e técnicas determinísticas, atende às necessidades de usuários com diferentes requisitos de precisão e demandas estatísticas.

Entretanto, a análise crítica do código revela oportunidades de aprimoramento em aspectos fundamentais. A gestão de memória durante operações de visualização intensiva, particularmente na manipulação de figuras *matplotlib*, necessita de otimizações para garantir estabilidade em processamentos de longa duração. Da mesma forma, a interface gráfica, embora funcional, apresenta limitações de responsividade durante a execução de algoritmos computacionalmente demandantes, sugerindo a necessidade de implementação de processamento assíncrono.

Do ponto de vista científico, o sistema estabelece bases sólidas para expansões futuras. A arquitetura modular facilita a incorporação de novos algoritmos de processamento e técnicas de análise. A integração com formatos padronizados de dados espaciais, como formato *shapefile* e *GeoJSON*, demonstra atenção às necessidades de interoperabilidade no domínio das geociências.

Perspectivas de evolução técnica incluem a implementação de processamento paralelo para operações de interpolação em grandes volumes de dados, desenvolvimento de capacidades de análise temporal para monitoramento de variações gravimétricas, e integração com técnicas de *machine learning* para identificação automática de anomalias geológicas. Adicionalmente, a adoção de padrões abertos de intercâmbio de dados gravimétricos poderia posicionar o *GSearch* como ferramenta de referência em iniciativas de ciência cidadã e colaborações interinstitucionais.

No contexto educacional, o sistema oferece potencial significativo como ferramenta de ensino em geofísica, particularmente na demonstração prática de

conceitos de processamento de dados gravimétricos e interpretação de anomalias. Futuros desenvolvimentos poderiam incluir modos didáticos com explicações contextualizadas dos algoritmos implementados e tutoriais interativos sobre metodologias de análise.

A sustentabilidade a longo prazo do projeto beneficiar-se-ia do estabelecimento de uma comunidade de desenvolvimento ativa, documentação técnica abrangente, e adoção de práticas de teste sistemáticas. A integração com repositórios públicos de dados gravimétricos e plataformas de processamento em nuvem representaria avanço natural na evolução do sistema.

Em conclusão, o *GSearch* constitui contribuição valiosa para o arsenal de ferramentas computacionais em geofísica, distinguindo-se pela combinação entre capacidades analíticas avançadas e acessibilidade operacional. Sua evolução futura tem potencial para impactar significativamente tanto a prática profissional quanto o ensino especializado, particularmente em contextos onde o acesso a *softwares* comerciais é limitado. O desenvolvimento contínuo, orientado por princípios de código aberto e padrões científicos rigorosos, poderá estabelecer o sistema como referência no processamento de dados gravimétricos.

REFERÊNCIAS

ANALYTICS, SearchBusiness. Predictive analytics. Disponível em: <https://searchbusinessanalytics.techtarget.com/definition/predictive-analytics>. Acesso em: 28 abr. 2025.

CAMACHO, A. G. et al. GROWTH-23: An integrated code for inversion of complete Bouguer anomaly (CBA) and temporal gravity changes (dg). *Computers & Geosciences*, 2024.

CATALÃO, J.; ANTUNES, C. Gravimetria. 27 p. 2012. Apostila. Disponível em: <https://webpages.ciencias.ulisboa.pt>. Acesso em: 4 mar. 2025.

CENTRAL, DataScience. Top 20 Python libraries for data science in 2018. Disponível em: <https://www.datasciencecentral.com/profiles/blogs/top-20-python-libraries-for-data-science-in-2018>. Acesso em: 25 abr. 2025.

CHEN, Y.; LI, W. Learning on the correct class for domain inverse problems of gravimetry. *arXiv preprint*, arXiv:2403.07393, 2024.

COCKETT, R.; KANG, S.; HEAGY, L. J.; PIDLISECKY, A.; OLDENBURG, D. W. SimPEG: An open source framework for simulation and gradient based parameter estimation in geophysical applications. *Computers & Geosciences*, v. 85, p. 78–90, 2015.

COURSE, Numerical Python. NumPy tutorial. Disponível em: <https://www.python-course.eu/numpy.php>. Acesso em: 15 abr. 2018.

CUDRÉ-MAUROUX, S.; KANG, S. et al. SimPEG: Simulation and Parameter Estimation in Geophysics. ResearchGate, 2023. Disponível em: <https://simpeg.xyz>. Acesso em: 2025.

FRIES, Maximilian. Estudo dos altos estruturais de Pitanga, Artemis, Pau D'Alho e Jibóia (flanco nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná), através dos métodos geofísicos da gravimetria e magnetometria terrestres. 2008. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2008.

GAGG, G.; SOUZA, S. F. Geração de mapas de anomalia Bouguer a partir de dados gravimétricos terrestres e do EGM2008. *Revista Brasileira de Geomática*, Curitiba, v. 5, n. 2, p. 186–201, abr./jun. 2016. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo/article/download/5510/367>. Acesso em: 1 mar. 2025.

HALE, Jeff. The most in-demand skills for data scientists in 2021. *Towards Data Science*, 2021. Disponível em: <https://towardsdatascience.com>. Acesso em: 24 abr. 2025.

HISTORY OF PYTHON, The. Personal history of Python. Disponível em: <http://python-history.blogspot.com/2009/01/personal-history-part-1-cwi.html>. Acesso em: 14 abr. 2025.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ, H. *Physical Geodesy*. Wien; New York: Springer, 2005.

ISMAIL, I. A. et al. Gravimetric determination of sulphate. *Indonesian Journal of Chemical Connections*, v. 1, n. 1, p. 30–35, 2023.

JACOBY, Wolfgang; SMILDE, Peter L. *Gravity interpretation: fundamentals and application of gravity inversion and geological interpretation*. Springer Science & Business Media, 2009.

LI, Y.; OLDENBURG, D. W. 3-D inversion of gravity data — a method for depth weighting. *Geophysics*, v. 63, n. 1, p. 109–119, 1998.

LOBIANCO, Maria Cristina Barboza. Determinação das alturas do geóide no Brasil. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. DOI: 10.11606/T.3.2005.tde-21022006-162205. Acesso em: 21 jun. 2025.

MARK, H. F. et al. shipgrav: A Python package for marine gravimetry. *Journal of Open Source Software*, v. 9, n. 103, p. 7358, 2024.

MATPLOTLIB. Disponível em: <https://matplotlib.org/>. Acesso em: 10 maio 2025.

McCUBBINE, J. et al. Gsolve: A Python computer program with a graphical user interface for relative gravity measurement processing. *SoftwareX*, v. 7, p. 1–7, 2018.

MCKINNEY, Wes. About Wes McKinney. Disponível em: <http://wesmckinney.com/pages/about.html>. Acesso em: 6 maio 2025.

NUMPY. Disponível em: <http://www.numpy.org/>. Acesso em: 1 maio 2025.

ORACLE BRASIL. Banco de dados definido. Disponível em: <https://www.oracle.com/br/database/what-is-database/#link1>. Acesso em: 10 maio 2025.

PORTO, Universidade do. Disponível em: <https://www.dcc.fc.up.pt/~nam/aulas/0001/pi/trabalho2/trab2/>. Acesso em: 15 abr. 2025.

PYDATA. Disponível em: <https://pydata.org/>. Acesso em: 24 abr. 2025.

PYGMI — PyGMI 3.2.8.21 documentation. Modelagem e interpretação de geociências. Council for Geoscience. Acesso em: 10 mar. 2025.

PYPI. Disponível em: <https://pypi.org/>. Acesso em: 24 abr. 2025.

PYTHON. Python documentation. Disponível em: <https://docs.python.org>. Acesso em: 18 abr. 2025.

SÁ, N. C. de. Redução de observações gravimétricas: teoria e prática. São Paulo: IAG/USP, 1994. Apostila. 12 p. Disponível em: https://www.iag.usp.br/~eder/agg0333/reducoes_gravimetricas.pdf. Acesso em: 10 jan. 2025.

SUPLEMENTOS DO OFFICE. Definir relações entre tabelas usando o Access SQL. 2021. Disponível em: <https://docs.microsoft.com/pt-br/office/vba/access/concepts/structured-query-language/define-relationships-between-tables-using-access-sql>. Acesso em: 10 maio 2025.

TELFORD, William Murray; GELDART, Lloyd P.; SHERIFF, Robert E. *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

THE HISTORY OF PYTHON: Introduction and Overview. Disponível em: <https://python-history.blogspot.com>. Acesso em: 10 mar. 2025.

UIEDA, L. et al. Harmonica and Boule: Modern Python tools for geophysical gravimetry. *EGU General Assembly*, 2021.

VIRTANEN, Pauli et al. SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, v. 17, n. 3, p. 261–272, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>.

YANG, F. et al. PyGLDA: a fine-scale Python-based Global Land Data Assimilation system for integrating satellite gravity data into hydrological models. *Geoscientific Model Development*, 2024.