

UFRRJ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E EVOLUÇÃO
GEOLÓGICA

DISSERTAÇÃO

Processamento e Modelagem Numérica de Dados
Magnetométricos do Morro São João – Casimiro de Abreu - RJ

Tiago José Bandeira Sales

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO INSTITUTO
DE GEOCIÊNCIAS**

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E EVOLUÇÃO
GEOLÓGICA**

**PROCESSAMENTO E MODELAGEM NUMÉRICA DE DADOS
MAGNETOMÉTRICOS DO MORRO SÃO JOÃO – CASIMIRO
DE ABREU - RJ**

TIAGO JOSÉ BANDEIRA SALES

Sob a Orientação do Professor Dr.

Saulo Siqueira Martins

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Curso de Pós-Graduação em Modelagem e Evolução Geológica, Área de Concentração em Modelagem de Processos Geológicos e Geodinâmicos.

Seropédica, RJ

Janeiro de 2024

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

SS163p Sales, Tiago José Bandeira, 1990-
Processamento e Modelagem Numérica de Dados
Magnetométricos do Morro São João - Casimiro de Abreu
RJ / Tiago José Bandeira Sales. - Seropédica, 2024.
61 f.: il.

Orientador: Saulo Siqueira Martins.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro, Programa de pós graduação em
modelagem e evolução geológica, 2024.

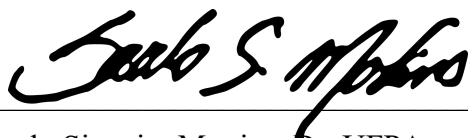
1. Magnetometria. 2. Rochas Alcalinas. 3. Inversão
numérica. 4. Morro São João. 5. Casimiro de Abreu. I.
Martins, Saulo Siqueira, 1983-, orient. II
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
Programa de pós graduação em modelagem e evolução
geológica III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E EVOLUÇÃO
GEOLÓGICA

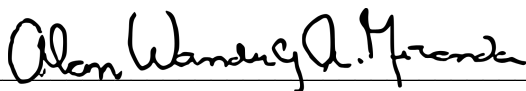
TIAGO JOSÉ BANDEIRA SALES

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Geociências, no Curso de Pós-Graduação em Modelagem e Evolução Geológica, área de Concentração em Modelagem de Processos Geológicos e Geodinâmicos.

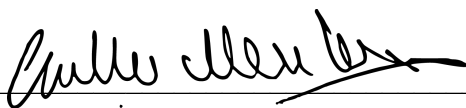
DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 23/02/2024



Saulo Siqueira Martins. Dr. UFPA
(Orientador)



Alan Wanderley Albuquerque Miranda – Dr. UFRRJ
(Membro Interno)



Cristiano Mendel Martins. Dr. UFPA
(Membro Externo)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e com toda a certeza o mais importante dos agradecimentos dedico à Sophia, minha filha, um feixezinho de luz que me inspira todos os dias, mesmo sem saber disso. Tão pequenina e tão imensa na minha vida.

Agradeço ao apoio da minha família:

A Lis, minha mãe, por ter me ensinado valores que ela nem mesmo desconfia e por ousar desafiar o impossível todos os dias.

Ao meu pai, Humberto, por ter me ensinado o valor da educação e principalmente a superar os meus próprios erros, a coisa mais difícil que aprendi. Talvez não saiba, mas você representa muito na minha vida.

Daniela, minha companheira, obrigado por dividir a sua e ser minha vida, e pelo talento de fazer das menores coisas as mais valiosas.

Nila, minha avó, pelo seu bom humor em momentos impossíveis, trazendo doses de alegria nos meus dias difíceis e por ensinar que as minhas dificuldades são infinitamente pequenas perto do que somos.

Agradeço à UFRRJ, seus professores (em especial meu orientador) e demais profissionais que a tornam essa grandiosa mãe que nos ensina e nos acolhe, e gera tantos seres HUMANOS fantásticos que são, sem dúvida, seu maior patrimônio.

**“Somos todos imortais, até o dia em que nós finalmente morremos.
O melhor da vida é viver, um pastel, um suco e o amor da sua vida...”**

Sophia Silva Bandeira

RESUMO

SALES, T. J. B., Processamento e Modelagem Numérica de Dados Magnetométricos do Morro São João – Casimiro de Abreu – RJ. Dissertação de Mestrado em Modelagem e Evolução Geológica. Instituto de Geociências, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

O Maciço São João representa um complexo alcalino (Complexo Alcalino São João - SJAC) composto principalmente de variações de sienitos, exibindo tanto modos melanocráticos quanto leucocráticos de exposição. Está localizado no distrito de Barra de São João, no município de Casimiro de Abreu, na porção sudeste do estado do Rio de Janeiro, Brasil. O complexo representa um dos eventos contemporâneos de magmatismo plutônico básico do Cretáceo Superior na placa Sul-Americana. De modo geral, este maciço básico apresenta uma assinatura magnética divergente em comparação com as rochas de parede circundantes menos básicas. Ao obter dados gerais de suscetibilidade magnética para os componentes rochosos da área, é possível inferir várias características das rochas e a delimitação espacial potencial do corpo subsuperficial por meio de modelagem numérica e inversões matemáticas específicas. Este estudo utiliza dados de suscetibilidade magnética obtidos por meio de levantamentos aéreos usando um magnetômetro à base de cézio, disponibilizados pelo projeto 1117 da CPRM. Os dados foram processados usando o aplicativo Oasis Montaj Student Version. O trabalho inclui modelagem tridimensional da porção não aflorante do SJAC, mapas de suscetibilidade magnética e modelagem digital de terreno usando diferentes processos de tratamento de dados. Este estudo investiga indiretamente a porção subsuperficial do maciço, concentrando-se no evento de geração de magma, utilizando técnicas de inversão e processamento de dados para analisar a suscetibilidade magnética registrada na região. A interpretação das propriedades magnéticas observadas nas camadas subsuperficiais sedimentares e rochosas visa fornecer informações valiosas sobre a composição, história e processos que moldaram o maciço e a região. A interpretação do modelo e dos processos conduzidos permitiu concluir a existência de uma porção subsuperficial do complexo que não era tradicionalmente observada, com um volume de rocha intrusiva muito maior do que o inicialmente esperado ao analisar a morfologia da porção aflorante. Os resultados indicam uma alta amplitude térmica associada ao evento que

gerou o pacote de rochas, possibilitando a compreensão da maturidade térmica dos hidrocarbonetos presentes nas bacias contemporâneas a esta.

Palavras-chave: Magnetometria, Processamento, Inversão, Morro São João, Casimiro de Abreu, Rochas Alcalinas.

ABSTRACT

SALES, T. J. B., **Processing and Numerical Modeling of Magnetometric Data from Morro São João – Casimiro de Abreu - RJ**. Master's Thesis in Modeling and Geological Evolution. Institute of Geosciences, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

The São João Massif represents an alkaline complex (São João Alkaline Complex - SJAC), primarily composed of variations of syenites, exhibiting both melanocratic and leucocratic modes of exposure. It is located in the Barra de São João district, in the municipality of Casimiro de Abreu, in the southeastern portion of the state of Rio de Janeiro, Brazil. The complex represents one of the contemporary events of basic plutonic magmatism during the Upper Cretaceous on the South American plate. Generally, this basic massif shows a divergent magnetic signature compared to the surrounding less basic wall rocks. By obtaining general magnetic susceptibility data for the rock components in the area, it is possible to infer various characteristics of the rocks and the potential spatial delineation of the subsurface body through numerical modeling and specific mathematical inversions. This study uses magnetic susceptibility data obtained through aerial surveys using a cesium-based magnetometer, provided by Project 1117 of CPRM. The data were processed using the Oasis Montaj Student Version application. The work includes three-dimensional modeling of the non-outcropping portion of the SJAC, magnetic susceptibility maps, and digital terrain modeling using different data processing methods. This study indirectly investigates the subsurface portion of the massif, focusing on the magma generation event, using inversion techniques and data processing to analyze the magnetic susceptibility recorded in the region. The interpretation of the magnetic properties observed in the subsurface sedimentary and rocky layers aims to provide valuable information about the composition, history, and processes that shaped the massif and the region. The interpretation of the model and conducted processes led to the conclusion of the existence of a subsurface portion of the complex that was not traditionally observed, with a volume of intrusive rock much larger than initially expected when analyzing the morphology of the

outcropping portion. The results indicate a high thermal amplitude associated with the event that generated the rock package, allowing for an understanding of the thermal maturity of hydrocarbons present in contemporary basins to this event.

Keywords: Magnetometry, Processing, Inversion, Morro São João, Casimiro de Abreu, Alkaline Rocks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Representação do campo magnético terrestre. (Esquerda) O campo magnético de uma barra é revelado pelo alinhamento das limalhas de ferro sobre o papel, (Direita) O campo geomagnético é muito semelhante ao campo que seria produzido se uma gigantesca barra imantada fosse colocada no centro da terra e ligeiramente inclinada 11° a partir do eixo de rotação. Modificado de Press et al, 2006.	18
Figura 1.2. Representação dos dipolos elementares nos domínios. Ferrimagnético, ferromagnético e antiferromagnético.	20
Figura 2.1. Exemplo de filtro ISA aplicado. a) TMI com RTP aplicado; b) TMI com RTP e ISA aplicados. Modificado de Isles & Rankin, 2013.	Erro! Indicador não definido.
Figura 3.1. Geological map. Locating Morro São João and surrounding area geology formations, hydrology and structural/tectonics provinces (modified from Heilbron et al. (2016)).	34
Figura 3.2. The aeromagnetic data of the study area. A represents the Total Magnetic Intensity (TMI), and B showcases the Upward Continuation (UC) results. The processing parameters, including the threshold for Upward Continuation, can be found in the text.	40
Figura 3.3 The results represent the processed Total Magnetic Intensity (TMI) data. In A, it illustrates the combination of upward continuation (UC), reduction to pole (RTP), and total gradient amplitude (TGA). In B showcases a combination of UC, RTP, and Tilt Derivative. Specific processing parameters can be found in the text.....	41
Figura 3.4. The result of the magnetic inversion. In A provides a detailed perspective, revealing two layers and highlighting a red body (indicating higher magnetic susceptibility). The top layer illustrates the magnetic field, the second layer depicts topography, and the red body suggests the shape of a magma chamber. Subfigures B, C, and D offer south, east, and top views, providing additional insights into the inversion results.	45
Figura 3.5. Evolution model block. A theoretical schematic representation illustrating the development of Morro São João and the associated magma chamber (Morro São João). Hotspots at considerable depths facilitate the upward transfer of rock mass from the subcrustal mantle. This process feeds shallower chambers, which are embedded in an interpreted transfer fault, contributing to the complex geological evolution of the region.....	48

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
1.1.	CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE	17
1.2.	MAGNETISMO NAS ROCHAS	20
1.3.	COMPONENTES DO CAMPO MAGNÉTICO.....	22
1.4.	AQUISIÇÃO DE DADOS AEROMAGNÉTICOS E PROCESSAMENTO.....	23
2.	APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	28
3.	ARTIGO CIENTÍFICO	29
3.1.	ABSTRACT	29
3.2.	INTRODUCTION	30
3.3.	GEOLOGICAL CONTEXT	31
3.3.1.	SERRA DO MAR PROVINCE.....	32
3.3.2.	MORRO SÃO JOÃO	33
3.3.3.	MATERIALS AND METHODS	35
3.3.4.	AEROMAGNETIC DATA	35
3.3.5.	PROCESSING 3-D AEROMAGNETIC INVERSION.....	37
3.4.	RESULTS	38
3.4.1.	MORRO SÃO JOÃO INVERSION	43
3.5.	DISCUSSIONS	44
3.5.1.	REGIONAL ANALYSIS.....	44
3.5.2.	MORRO SÃO JOÃO ANALYSIS	45
3.6.	CONCLUSION.....	47
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
5.	REFERÊNCIAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

1.1. Campo magnético terrestre

O campo magnético terrestre, gerado no núcleo do planeta, exerce influência direta sobre as rochas suscetíveis da crosta terrestre, sendo a indução magnética o principal processo em levantamentos aeromagnéticos. A compreensão desse fenômeno é crucial para interpretar as variações magnéticas que se manifestam nos estudos geofísicos.

Segundo Branco (2015), a gênese do campo magnético terrestre e suas implicações para o planeta ainda constituem um domínio de estudo em evolução, embora sua magnitude seja incontestável. Este fenômeno desempenhou papel preponderante na viabilização das grandes navegações, mediante o emprego da bússola. Além disso, o campo magnético exerce papel essencial na mitigação de partículas carregadas eletromagneticamente oriundas do Sol, notadamente o vento solar, cuja velocidade atinge cerca de 700 km/s, bem como de outras provenientes de distintos pontos da galáxia.

No núcleo externo terrestre, localizado a aproximadamente 3 mil km de profundidade, presume-se a existência de uma fusão de ferro e níquel. Este fluido, em estado de movimento perpétuo, induz correntes elétricas e, por conseguinte, um campo magnético (Figura 1.1). A explicação preponderante para a geração do campo magnético do planeta é a teoria do dínamo. Nesse contexto, as elevadas temperaturas no núcleo terrestre, substancialmente superiores ao ponto Curie, inviabilizam a solidificação do ferro e do níquel, excluindo, dessa forma, sua potencial função como ímã. (Branco, 2015)

O Campo Magnético Referencial Internacional (International Geomagnetic Reference Field IGRF) atua como referência para o campo magnético interno da Terra ao longo de um determinado período de tempo, derivado da soma de dados harmônicos esféricos obtidos de vários Observatórios Magnéticos ao redor do mundo, seja em terra, no mar, a bordo de aeronaves ou por meio de satélites. O IGRF pode ser utilizado para discernir distorções no campo magnético causadas por estruturas geológicas e depósitos minerais, servindo como um padrão para delinear anomalias no campo magnético, excluindo correntes induzidas e campos

externos. Campos externos não estão associados ao IGRF, mas seus efeitos são cruciais para caracterizar materiais subsuperficiais com base no campo magnético. Variações diurnas contribuem para mudanças magnéticas devido ao movimento da ionosfera ao longo do dia, influenciado pelas flutuações de temperatura do planeta causadas pelo Sol. Tempestades magnéticas estão relacionadas a correntes elétricas anômalas geradas na ionosfera, resultantes de ejeções de massa coronal solar e sua interação aperiódica com o campo magnético da Terra. (Alken et al., 2021)

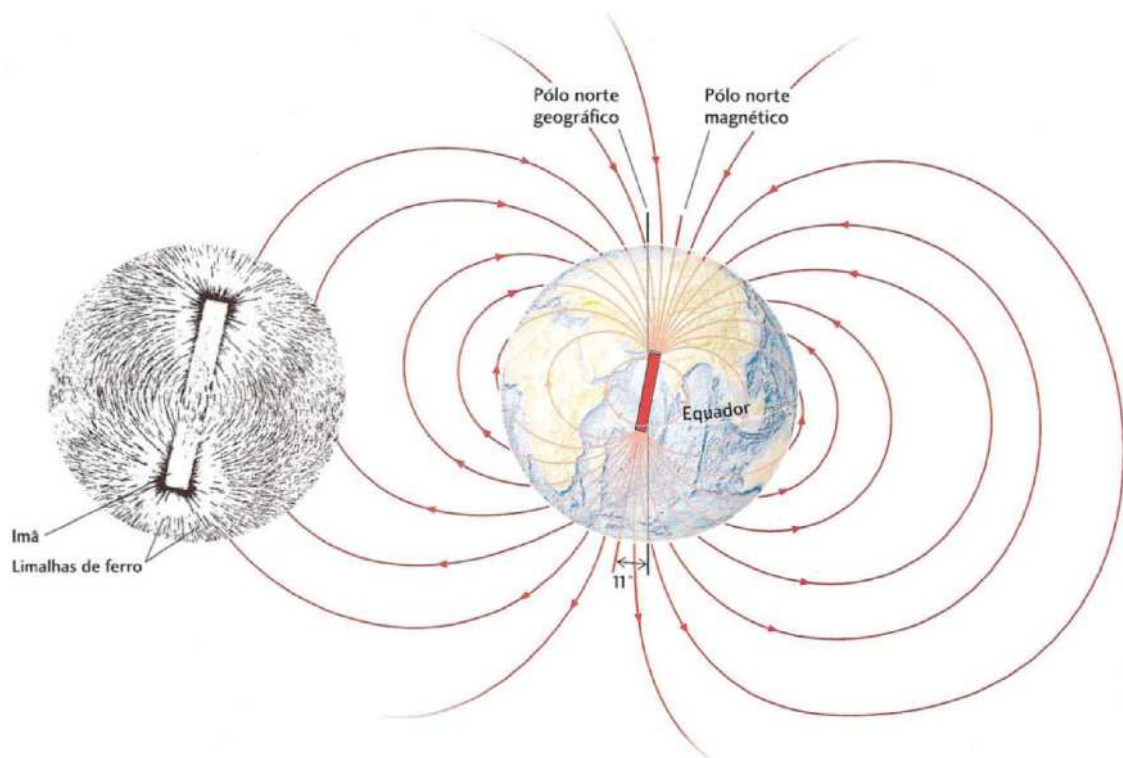


Figura 1.1. Representação do campo magnético terrestre. (Esquerda) O campo magnético de uma barra é revelado pelo alinhamento das limalhas de ferro sobre o papel, (Direita) O campo geomagnético é muito semelhante ao campo que seria produzido se uma gigantesca barra imantada fosse colocada no centro da terra e ligeiramente inclinada 11° a partir do eixo de rotação. Press et al, 2006.

O Ponto de Curie de uma rocha é um ponto de temperatura/pressão no qual ocorre uma alteração no comportamento magnético do material. Principalmente determinada pela temperatura, a superfície do Ponto de Curie dentro da crosta terrestre é comumente

caracterizada como uma isoterma; este fenômeno ocorre em profundidades de dezenas de quilômetros na crosta, onde as temperaturas em torno de 580°C prevalecem. Acima do Ponto de Curie, as rochas perdem suas propriedades magnéticas; quando mais frias do que o Ponto de Curie, tornam-se suscetíveis e podem, inclusive, adquirir uma magnetização 'remanente' permanente. Em regiões com um fluxo de calor excepcionalmente elevado, o Ponto de Curie pode manifestar-se em profundidades inferiores a 10 km, enquanto sob gradientes geotérmicos normais, pode situar-se a até 40 km de profundidade. (Frost e Shive, 1986)

Em escala atômica, todas as substâncias são magnéticas. A teoria admite que dois elétrons coexistem em um mesmo estado atômico (casca eletrônica), desde que possuam rotação (spin) opostos. Duas configurações são comumente possíveis, no primeiro caso as cascas eletrônicas possuem elétrons pareados e os pares eletrônicos agem como dipolos que por possuírem spins contrários, se anulam magneticamente possuindo pouca susceptibilidade à variação de campo externo presente. Estas são as substâncias classificadas como diamagnéticas. Num segundo caso, há os materiais paramagnéticos onde o material apresenta elétrons desemparelhados, a atuação de um campo externo faz com que os dipolos dos elétrons não pareados sofram rotação, gerando um campo no mesmo sentido do campo aplicado, assim a susceptibilidade do material é positiva. Este efeito ainda é considerado relativamente fraco (Kearey, 2002).

Nos materiais paramagnéticos ocorre ainda a superposição de orbitais atômicos durante a interação cristalina interna, que pode ocorrer de três formas distintas (Figura 1.2). Nos materiais ferromagnéticos os orbitais se sobrepõem de modo em que seus dipolos são orientados paralelamente e com mesma intensidade, gerando uma magnetização espontânea forte com alta susceptibilidade, porém por estar associada à presença de ferro, cobalto e níquel elementar, ocorre em poucos casos de forma natural (Dentith, 2014). Segundo Reynolds (2014) nos materiais antiferromagnéticos o acoplamento dos dipolos é antiparalelo, com igual número de dipolos em cada sentido, os campos magnéticos dos dipolos se anulam, de forma que não há efeito magnético externo, tendo como exemplo a hematita com baixa susceptibilidade. Já nos materiais ferrimagnéticos os dipolos se apresentam antiparalelos porém com intensidade diferente, não se anulando e podendo apresentar forte magnetização espontânea e

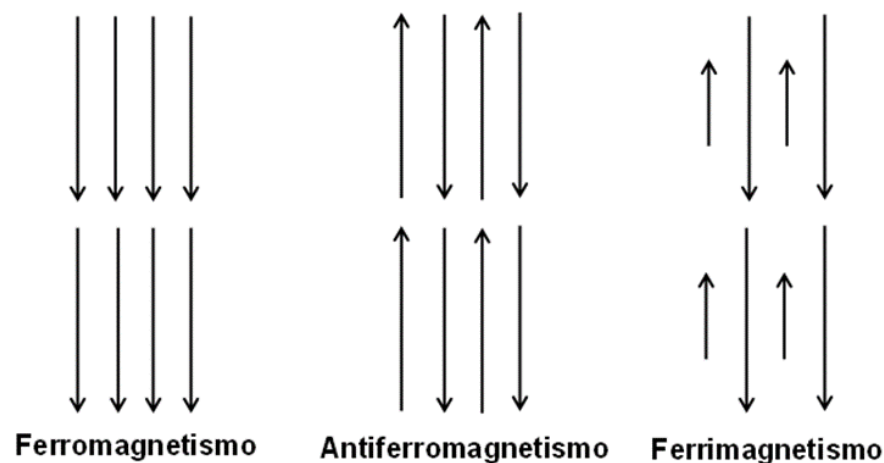


Figura 1.2. Representação dos dipolos elementares nos domínios. Ferrimagnético, ferromagnético e antiferromagnético.

susceptibilidade, como exemplo temos a magnetita. Praticamente todos os materiais atuantes nas propriedades magnéticas das rochas se incluem nesta última categoria. (Sales, 2019)

A suscetibilidade magnética é uma medida da resposta de uma rocha a um campo magnético aplicado. Em aplicações de mapeamento geológico, o campo magnético terrestre influencia todas as rochas crustais e gera campos magnéticos em rochas suscetíveis magneticamente que se encontram em profundidades menos profundas do que a isoterma do Ponto de Curie. Em uma pesquisa aeromagnética típica, a maioria das respostas magnéticas medidas está associada a minerais específicos (ferromagnéticos). No entanto, em regiões de caráter magnético mais sutil, contrastes na suscetibilidade magnética de minerais paramagnéticos e diamagnéticos podem ser identificados.

1.2. Magnetismo nas rochas

No âmbito laboratorial, o comportamento magnético das rochas é complexo, mas, na escala dos levantamentos aeromagnéticos, a suscetibilidade magnética das rochas se destaca como uma propriedade mensurável que permite a magnetização sob a influência do campo magnético terrestre. Essa suscetibilidade é uma indicação confiável do conteúdo mineral

magnético nas rochas. A Intensidade Magnética Total (TMI), medida nos levantamentos aeromagnéticos, é um componente crucial, onde, observados estes valores (explícitos em nT) e aplicando-se a diferença do Campo de Referência Geomagnética Internacional (IGRF) revelam-se as anomalias magnéticas essenciais para interpretações geofísicas e geológicas. A resolução eficaz das anomalias magnéticas está diretamente ligada à distância entre o sensor magnético e a fonte rochosa. A seleção cuidadosa da altitude de voo em levantamentos aeromagnéticos é, portanto, crítica para garantir dados precisos e interpretações confiáveis.

A aeromagnetometria, como uma técnica valiosa, permite investigar a composição e estrutura da crosta terrestre. As anomalias magnéticas capturadas nesses levantamentos fornecem informações significativas sobre a geologia subjacente, desempenhando um papel crucial em diversas aplicações geocientíficas. Os levantamentos aeromagnéticos, com sua capacidade de mapear variações magnéticas na crosta, tornaram-se uma ferramenta padrão na exploração geofísica. Esses estudos contribuem para descobertas significativas, incluindo a identificação de depósitos minerais e a compreensão da tectônica das placas. Em resumo, a aeromagnetometria oferece uma visão única e abrangente da dinâmica geológica da Terra, desempenhando um papel fundamental tanto na pesquisa científica quanto na aplicação prática, com implicações diretas em diversas áreas, desde exploração de recursos naturais até estudos fundamentais sobre a estrutura do planeta. (Kearey, 2002)

Lidar com rochas magnéticas e não magnéticas em levantamentos aeromagnéticos envolve, em grande parte, simplificações úteis, permitindo a integração com a cartografia geológica convencional. Entender essas simplificações é crucial, assim como reconhecer quando elas podem não se aplicar. O caráter magnético de uma rocha depende de fatores como geoquímica, minerais ricos em ferro, tipos de magnetização e o campo magnético local. Esses fatores refletem processos geológicos desde a formação até os eventos subsequentes.

A distribuição de minerais magnéticos é influenciada por diferentes processos geológicos, sendo os minerais ferromagnéticos um grupo significativo. No passado, houve a concepção equivocada de que grupos específicos de rochas apresentavam valores ou faixas características de susceptibilidade magnética (k) que permitiriam a identificação dessas

litologias em levantamentos magnéticos. Atualmente, compreende-se que todos os grupos litológicos podem conter minerais magnéticos em quantidades variáveis, sendo a assembléia mineral magnética em uma rocha resultado tanto de sua composição primária quanto, possivelmente de forma mais crucial, de sua história geológica.

As rochas sedimentares exibem ampla variação no teor de Fe, influenciando diretamente na susceptibilidade magnética. A presença de magnetita e pirrotita, minerais com alta susceptibilidade magnética, é influenciada por processos como a incorporação de grãos de magnetita detrital de rochas pré-existentes, a precipitação química de óxidos de Fe a partir de solução e o crescimento diagenético de magnetita e/ou pirrotita associado a armadilhas de hidrocarbonetos e migração de hidrocarbonetos. (Press et al, 2006)

Os processos metamórficos podem levar à formação de magnetita durante a transformação de silicatos ricos em Mg-Fe, resultando em um aumento na susceptibilidade magnética com o aumento do grau metamórfico. A introdução de fluidos de alteração também pode afetar significativamente a susceptibilidade magnética das rochas, aumentando-a ou diminuindo-a.

Deformações , como dobras, podem concentrar magnetita e pirrotita em zonas de baixa deformação, resultando em aumento de k. Além disso, a recristalização dinâmica da magnetita durante o cisalhamento pode alterar o tamanho dos grãos, influenciando a susceptibilidade magnética. Em resumo, a interpretação de dados aeromagnéticos deve considerar a complexidade das interações entre composição litológica, história geológica, processos metamórficos, alteração metassomática e deformação mecânica para compreender adequadamente a distribuição de minerais magnéticos nas rochas.

1.3. Componentes do Campo Magnético

Na análise do campo geomagnético de uma dada região, são consideradas tanto a intensidade por meio da força magnética (F), quanto a direção por meio das grandezas de inclinação (I) e declinação (D) (Figura 1.3). O ponto de referência para definir o equador

magnético ocorre naqueles locais em que não há inclinação e as linhas do campo são paralelas à superfície da Terra. Embora esteja próximo ao equador geográfico, esse lugar revela desvios impressionantes em relação à latitude, podendo chegar até aproximadamente 15° .

Na região ao Norte do equador magnético, o campo está orientado para dentro da Terra e apresenta um ângulo de inclinação positivo (também conhecido como latitude Magnética Norte). Na região ao sul do equador magnético, a direção do campo é voltada para fora da Terra, o que resulta em uma inclinação negativa (ou latitude magnética sul). Identifica-se os polos magnéticos na Terra como sendo as regiões onde o campo apresenta uma direção vertical e perpendicular à superfície. O valor da inclinação chega a $+90^\circ$ no polo magnético norte e a -90° no polo magnético sul. Vale ressaltar que estes polos não se confundem com os polos geomagnéticos ou geográficos. A direção na qual o componente horizontal se encontra dentro de um plano horizontal é conhecida como declinação. Essa inclinação também pode ser representada como um valor positivo quando medido seguindo o sentido horário em relação ao norte geográfico. (Reynolds, 2011)

Assim como o campo magnético terrestre, os campos magnéticos em corpos rochosos serão dipolares. Portanto, o campo magnético medido na superfície sobre um corpo rochoso em subsuperfície terá porções positivas e negativas. O grau de assimetria nesse perfil medido dependerá da orientação do corpo em relação ao campo magnético local da Terra e da orientação do campo magnético terrestre.

1.4.Aquisição de dados aeromagnéticos e processamento

Cuidado e atenção ao planejamento são cruciais para o sucesso de qualquer projeto de levantamento aeromagnético. Além das condições locais, como clima, topografia e questões políticas, é fundamental abordar antecipadamente a segurança da tripulação e o bem-estar dos ocupantes da área de levantamento. Do ponto de vista da interpretação, o primordial é ter-se um conjunto de dados que permita atingir o propósito do levantamento. Os parâmetros críticos que determinam a interpretabilidade de um conjunto de dados são o espaçamento entre linhas

e a altura de voo e, em menor grau, a orientação das linhas e o formato do contorno do levantamento.

Segundo Reeves (2005) a tarefa de controle de qualidade em um levantamento aeromagnético requer experiência geofísica especializada e raramente é realizada pela pessoa responsável pela interpretação dos dados. As questões-chave para o intérprete são que os níveis de ruído nos dados sejam aceitavelmente baixos e que os esquemas de supressão de ruído adotados durante a fase básica de processamento não afetem adversamente o sinal geológico. É essencial que os profissionais de controle de qualidade estejam totalmente cientes da sensibilidade final necessária para atingir os objetivos do levantamento. Por exemplo, os requisitos em ambientes de bacias sedimentares são consideravelmente mais rigorosos do que, por exemplo, em um ambiente dominado por rochas ígneas e metamórficas.

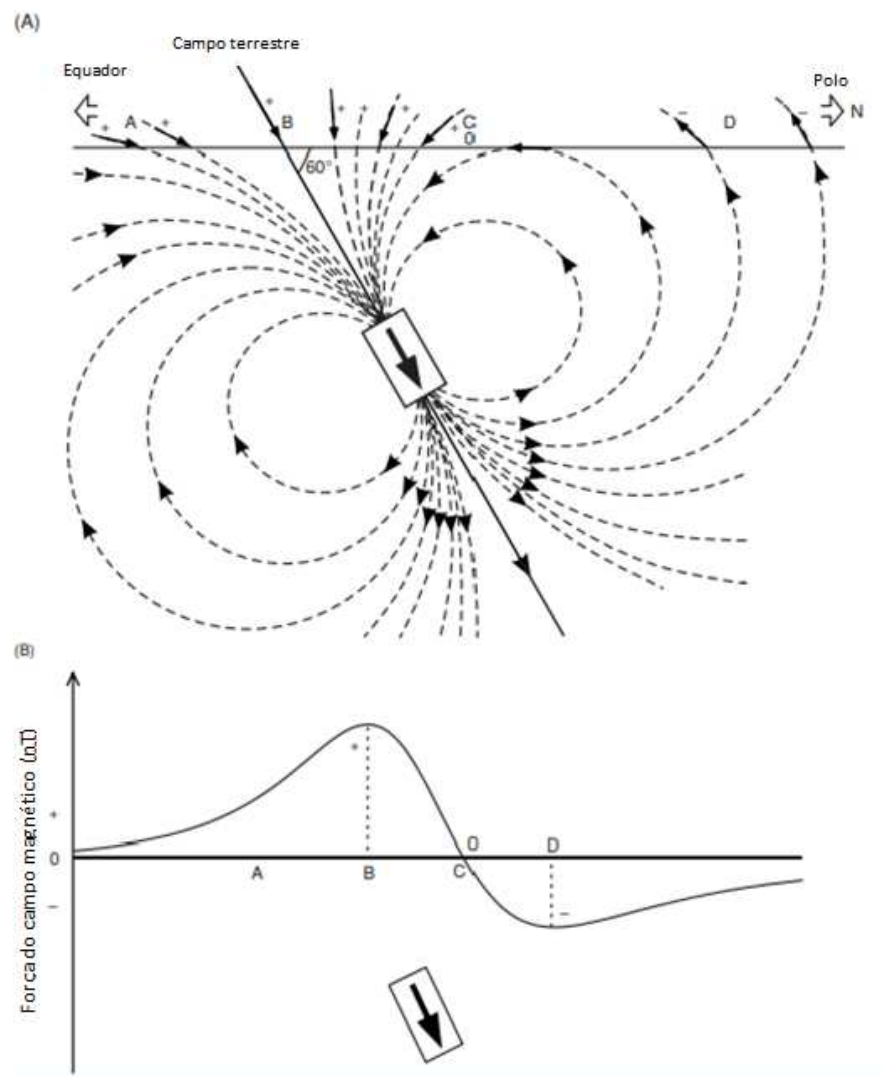


Figura 1.3. Exemplo de Campo magnético gerado. A partir de corpo magnetizado inclinado em 60° paralelo (declinação 0°) ao campo terrestre (A) produzindo um perfil de anomalia dos pontos A-D como mostrado em (B) (Modificado de Reynolds, 2011).

Após a aplicação das correções básicas apropriadas às medições do TMI ao longo das linhas, os dados devem ser interpolados em uma grade quadrada e o tamanho da célula da grade idealmente é cerca de 1/4 do espaçamento entre linhas. O método de interpolação pode ser, dentre vários possíveis, escolhido com cuidado tendo a finalidade de representar uma continuidade provável entre as unidades de terreno magneticamente não amostradas.

Após a interpolação e geração de uma malha de pontos continuamente interpolados é gerado, como resultado, um mapa de contraste em cores ou escala de cinza que representará a diferença de magnetização entre os pacotes do terreno de interesse. É possível que o mapa gerado inicialmente não seja suficiente para uma interpretação eficaz, ou até mesmo contenha informações em demasia ou necessárias de transformações ou filtragens que possam corrigir estas correções indesejáveis. As aplicações destas transformações são cruciais à eficaz interpretação. Alguns dos mais comuns filtros e transformações possíveis de serem utilizados, bem como sua função são, segundo Isles & Rankin (2013):

RTP (reduction to the Pole) - A técnica de RTP (Redução ao Polo) converte os dados TMI, inicialmente medidos em qualquer inclinação do campo magnético terrestre, para a condição que seria observada nos polos magnéticos ($I = 90^\circ$). Essencialmente, a transformação visa eliminar a natureza dipolar das anomalias magnéticas. Contudo, em situações em que os corpos rochosos exibem uma marcante magnetização remanente, a aplicação da RTP a essas anomalias é teoricamente questionável. Isso se deve à suposição da técnica de que a direção de magnetização em toda a área a ser transformada é conhecida e igual à do campo magnético local da Terra. Em ambientes onde a magnetização é predominantemente não induzida, a determinação da direção de magnetização é uma informação raramente disponível.

Sinal analítico - De maneira matemática, esta transformação representa a magnitude da soma vetorial das derivadas direcionais de três componentes e, de forma abrangente, acompanha as localizações das bordas mais rasas de um corpo magnético, independentemente da orientação da magnetização desse corpo. Em outras palavras, mapeia efetivamente essas localizações de borda, especialmente em inclinações baixas do campo magnético e na presença de magnetização remanente.

Primeira derivada vertical – Trata-se de um filtro passa alta que podemos interpretar de maneira simples como o gradiente magnético vertical que seria observado a partir de dois sensores de magnetômetro montados um acima do outro. Essencialmente, consiste na emulação matemática que simula diferença nas medições do campo magnético entre esses dois sensores hipotéticos.

Segunda derivada vertical - É, efetivamente, a primeira derivada vertical da primeira derivada vertical. Como esperado, este filtro reduz ainda mais a largura da anomalia e, teoricamente, deve refletir de maneira mais próxima a largura do corpo rochoso causador desta anomalia. Apesar de a teoria e o cálculo desta derivada serem fundamentados na física do campo potencial, na prática, este tende a apresentar bastante ruído embutido no resultado final.

Continuação descendente (Downward continuation) - A continuação descendente, na qual o campo abaixo da superfície de medição é calculado, oferece outra opção de filtragem. No contexto de aprimorar as respostas magnéticas e proporcionar uma visão mais clara da estrutura geológica, a continuação descendente não apresenta vantagens distintas em relação à 1ª e 2ª derivadas verticais.

Continuação ascendente (Upward continuation) - Visa suprimir fontes de sinais localizadas em porções menos profundas e volumosas, tendo o objetivo de realçar porções mais profundas e significativas à interpretação.

Inclinação do sinal analítico (ISA ou GHT) – Gera padrões semelhantes à 1ª derivada vertical, mas retrata respostas de fontes mais profundas e rasas de maneiras análogas, como exemplificado na figura 1.4.

Filtragem de comprimento de onda - Uma estratégia adicional de filtragem de baixa frequência consiste na segregação dos comprimentos de onda mais extensos do sinal em relação aos mais curtos. Embora apresente simplicidade na aplicação numérica e coerência intuitiva, a filtragem de comprimento de onda não conduz a uma distinção clara entre fontes de diferentes profundidades

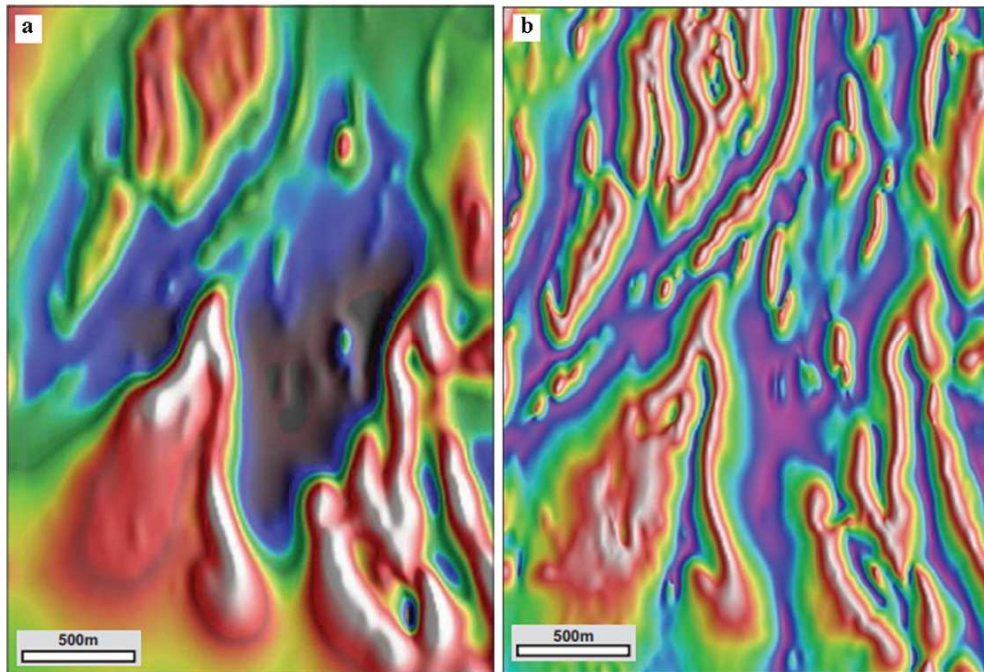


Figura 1.4. Exemplo de filtro ISA aplicado. a) TMI com RTP aplicado; b) TMI com RTP e ISA aplicados. Modificado de Isles & Rankin, 2013.

2. APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O modelo proposto para a dissertação atende aos requisitos estabelecidos pelo Programa de Pós-graduação em Modelagem e Evolução Geológica da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (PPGMEG/UFRRJ) e será formatado como um artigo científico. A redação e apresentação do escopo da dissertação em inglês são fundamentais, uma vez que a pesquisa e seus resultados serão submetidos ao "Journal South America of Earth Science", classificado como A2 no índice da plataforma Sucupira, conforme requisito do PPGMEG/UFRRJ.

O artigo apresentado no capítulo 3 desta dissertação segue a seguinte sequência:

Abstract: Este item consiste em um resumo da pesquisa realizada.

Introduction: Nesta seção, é apresentada uma revisão bibliográfica abrangente sobre estudos conduzidos nos complexos alcalinos do sudeste brasileiro, além de uma revisão bibliográfica sobre estudos geofísicos aplicados em maciços análogos.

Geological Context: Aqui, é realizada uma breve revisão bibliográfica sobre a geologia regional e local onde o Complexo Alcalino São João está situado.

Materials and Methods: Este item descreve o tipo de dado geofísico utilizado na pesquisa e o procedimento adotado para processar e interpretar esses dados.

Results and Discussions: Na seção de resultados, é conduzida uma análise detalhada sobre os resultados apresentados na seção de Materials and Methods. Além disso, discute-se a possível morfologia da porção subsuperficial do Complexo Alcalino São João, sugerindo interpretações possíveis sobre a gênese do complexo e do próprio maciço aflorante.

Conclusions: Na conclusão, é apresentado um apanhado geral do trabalho realizado.

Este formato estruturado e a escolha da língua inglesa visam atender aos critérios de qualidade e internacionalização exigidos pelo periódico científico e contribuir para a ampla disseminação dos resultados da pesquisa.

3. ARTIGO CIENTÍFICO

3.1. Abstract

The alkaline massifs, such as Morro São João within the Serra do Mar Igneous Province, present a geological challenge through geophysical exploration. In this work, the geophysical investigation primarily employs aeromagnetic data processing techniques, unveiling subsurface structures and shedding light on the magmatic evolution of the region. The observed NW-SE and NE-SW magnetic lineaments in the broader region are crucial indicators of structural complexities. These contours, reflective of tectonic influences, highlight the significance of the regional geological context in deciphering magnetic anomalies.

The geophysical anomaly associated with Morro São João is not merely a magnetic expression. The rounded shape and eccentricity of the anomaly align seamlessly with the lithological variations documented in the region. Moreover, the incorporation of remanent magnetization in the interpretation further enhances our understanding of the magnetic character of Morro São João. The main geophysical result lies in the 3D inversion model, a

sophisticated tool unraveling the subsurface architecture of Morro São João. This model unveils a magmatic chamber nestled at an approximate depth of 4 km beneath the surface. Beyond a static representation, the model portrays conduits from the chamber, providing a dynamic perspective on the processes shaping the hill's morphology.

In essence, the geophysical results suggest the presence of a magmatic chamber beneath Morro São João and offer a nuanced portrayal of its geometry and interconnections with surface features. The integration of regional magnetic lineaments, lithological variations, and the 3D inversion model elevates our comprehension of the geophysical intricacies of the Morro São João alkaline complex.

Keywords: Morro São João, Alkaline massif, Magnetic anomalies, Aeromagnetic inversion, Magma chamber model.

3.2. Introduction

Alkaline massifs, with their distinctive mineralogical composition and geochemical attributes, hold a significant position in global geological research. These geological formations, distributed across diverse terrestrial landscapes, offer invaluable insights into magmatic differentiation, lithospheric evolution, and tectonic activities. The Serra do Mar Igneous Province in Brazil, intruding into metamorphic rocks of the Brasiliano (Pan-African) Ribeira belt, is a focal point, especially the complexes with an age range of approximately 80 to 50 million years (Ma). (Almeida, 1983)

The plutonic complex in focus primarily features felsic lithotypes, such as those found in Poços de Caldas and Itatiaia, with minor intrusions in Passa Quatro, Morro Redondo, Tinguá, Tanguá, Rio Bonito, and Arraial do Cabo. Morro de São João and Campos do Jordão within the province are characterized by nepheline syenites and alkali syenites, along with granites and quartz-syenites. This study specifically concentrates on the Morro de São João alkaline complex, situated near the Atlantic Ocean and the limit of the Brazilian continental shelf. (Heilbron, 2016)

Research on alkaline plutonic complexes in southeastern Brazil has been a recurrent theme in specialized scientific literature. The geological and structural context of the Ribeira Belt region has garnered attention in numerous studies, with extensive petrographic, geochemical, and geochronological investigations contributing to our understanding. Recent studies suggest that these complexes may originate from volcanic plumbing systems, challenging traditional views of magma chamber dominance.

The traditional view of a melt-dominated magma chamber has shifted in recent decades, recognizing that a magma chamber represents only the summit of a more extensive magmatic system extending through the crust. This system is predominantly crystalline, consisting of melt, crystals, and exsolved volatiles distributed heterogeneously in space and time. Geophysical methods, including InSAR, GPS, GNSS, seismic imaging, gravimetry, and electromagnetic data, provide a comprehensive structural context for understanding the chemical evolution of these systems.

This study aims to estimate the morphology and shape of the magma chamber beneath Morro São João by employing a magnetic inversion algorithm on aeromagnetic data. Magnetic inversion techniques, as outlined in prior works, contribute to a comprehensive understanding of the subsurface structure of Morro São João, offering valuable insights for advancing the field of geophysics and subsurface characterization.

3.3. Geological Context

The Ribeira Belt, spanning 150–200 km in width along the southeastern coast of Brazil from Rio de Janeiro to Paraná, trends ENE. It connects with the NS-trending Araçuaí and Brasília belts to the north and is separated from the southern Dom Feliciano Belt by the Luís Alves cratonic fragment. Toward Rio de Janeiro, it transitions from the NS-trending Araçuaí Belt colliding with the São Francisco Craton to the ENE-trending transpressional Ribeira Belt. Moving south involves oblique collisional events among the São Francisco, Paranapanema, and Luís Alves cratons (Hasui and Sadowski, 1976; Almeida, 1977).

Initially, the Ribeira Belt was a 2500 km long NNE-striking fold belt along Brazil and Uruguay's southeastern and southern coast. However, studies suggest its continuity as the Brasiliano–Panafrican age Damara–Ribeira fold belt on the African side (Porada, 1979). Later, it was divided into the Dom Feliciano Belt, Luis Alves Craton, and Araçuaí Belt. Presently, the Ribeira Belt is generally limited to the deformation province along the coast of southeastern Brazil (Heilbron et al., 2004, 2017, 2020a).

Tectonic interpretations propose southeastern Brazil's amalgamation from distinct tectonic terranes during the Neoproterozoic. Alternative models for intracontinental tectonic evolution have been suggested (Faleiros et al., 2011; Campanha et al., 2015, 2023; Heilbron et al., 2017, 2020a,b; Brito Neves et al., 2021; Caxito et al., 2021).

The Inner Magmatic Arc System in the Ribeira Belt overrides the São Francisco paleocontinent's passive margin. The dismembered geometry results from the late orogenic folding of previously accreted terranes and Phanerozoic brittle faults (Heilbron et al., 2004, 2017, 2020a). Magmatic arc rocks include deformed plutons and stocks in the central Ribeira belt, such as the Divino and Serra do Valentim plutons, Carangola pluton, Serra da Bolívia Complex, and Muriaé, Leopoldina, and Marceleza stocks (Tedeschi et al., 2016; Heilbron et al., 2017; Gonçalves et al., 2018; Corrales et al., 2020).

The mineralogy comprises quartz, plagioclase, K-feldspar, clinopyroxene, orthopyroxene, hornblende, and biotite, with accessory minerals like ilmenite, apatite, and zircon. Metamorphic conditions reach the granulite facies, and geochemical analysis indicates subduction-related magmatism and differentiation trends toward A-type granitoid rocks (Corrales et al., 2020). Basic rocks show tholeiitic signatures for Island Arc Tholeiite (IAT) tectonic environments, and some suggest enriched Ocean Island Basalt (OIB) type sources (Corrales et al., 2020). The geochemical characteristics reflect the complex interplay of magmatic processes and tectonic evolution.

3.3.1. Serra do Mar Province

The Serra do Mar province, spanning 500 km along the southeast Brazilian coast, features a diverse magmatic suite initiated around 85 Ma. The magmatism, migrating progressively ESE, involves complexes, volcanic remnants, and dike swarms from Poços de Caldas to Cabo Frio. It is linked to a Brasiliano (Pan-African) Ribeira mobile belt where a mantle plume impacted at 85 Ma. The primarily sub-lithospheric magmas exhibit ocean-plume heads expanded rapidly beneath the thick continental island basaltic-like characteristics with sporadic lithospheric metasomite influence. The complex magmatic evolution involves fractional crystallization and/or open system processes, culminating in distinct potassic to ultrapotassic melts sourced from an enriched, heterogeneous mantle (Montes-Lauar et al., 1995; Thompson et al., 1998).

Mineralogy, petrography, and geochemistry of the Late Cretaceous-Eocene (80-55 Ma) alkaline magmatism in SE Brazil's Serra do Mar Igneous Province are discussed. Dike swarms and syenitic complexes emplaced into Proterozoic terrains of the Ribeira mobile belt reveal a magmatic evolution dominated by fractional crystallization and/or open system processes. The diverse suite includes strongly silica-undersaturated rocks (SUS) like basanites and phonolites and weakly silica-undersaturated rocks (WUS) like alkali basalts. The magmas are believed to originate from an enriched, heterogeneous mantle with contributions from mica and scattered LREE-Zr-Nb-P-Ti-rich phases. The complex magmatic processes shaped the landscape from Poços de Caldas to Cabo Frio, with a notable transfer of magmatism to the Abrolhos Platform around 52 Ma (Brotzu et al., 2005, 2007; Gomes et al., 2017; Rosa and Ruberti, 2018).

3.3.2. Morro São João

Morro São João, part of the Early Cenozoic alkaline complex along the Rio de Janeiro coastline, exhibits a diverse range of rock types, including melanocratic nepheline syenites, nepheline syenites, clinopyroxenites, shonkinites, and alkali gabbros (Figure 3.1). The intrusive complex, characterized by chemical and modal analyses, primarily comprises felsic rocks, with mafic and ultramafic lithologies found in certain intrusions, like Campos do Jordão and Morro de São João. Notable features include dominant alkali syenites and nepheline syenites, weakly

peralkaline rocks, and diverse mineralogical compositions such as hastingsite amphibole, salitic-ferrosalitic pyroxene, biotite, titanite, and apatite (Brotzu et al., 2005, 2007).

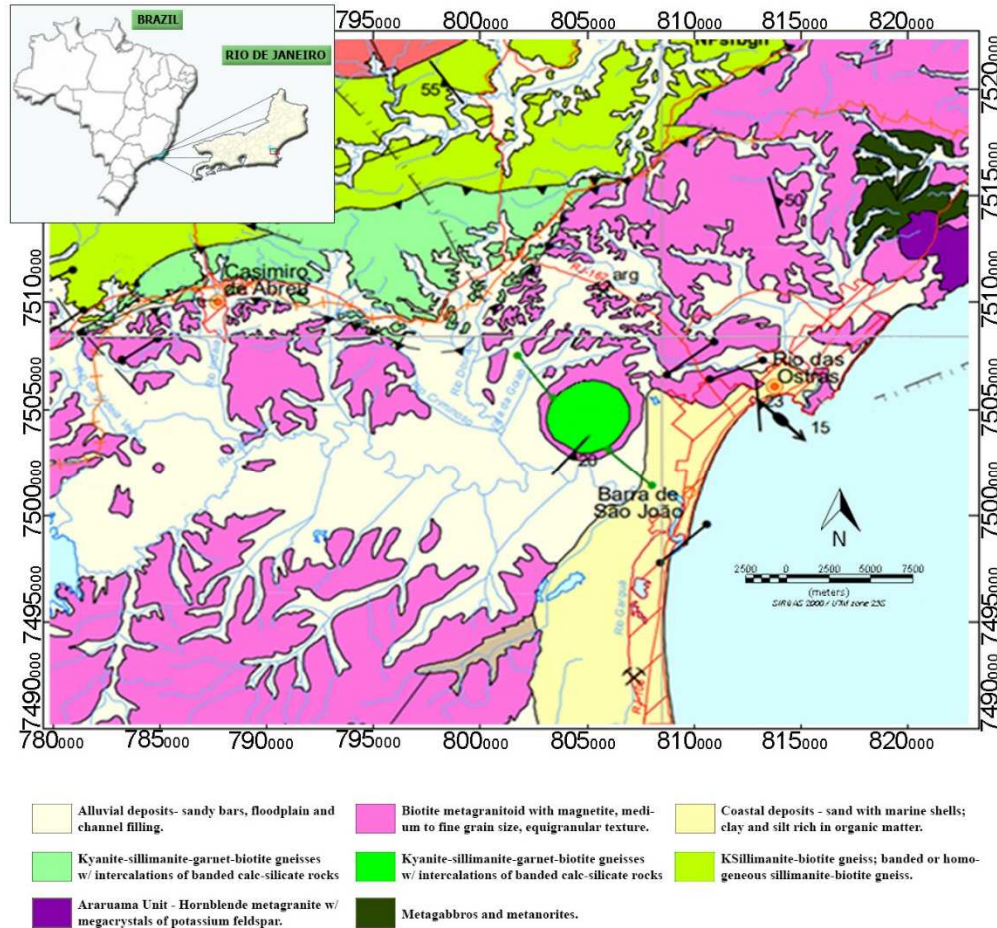


Figura 3.1. Geological map. Locating Morro São João and surrounding area geology formations, hydrology and structural/tectonics provinces (modified from Heilbron et al. (2016)).

Morro São João consists of mafic-ultramafic rocks described as meso to orthocumulates, suggesting crystallization from moderately evolved magmas. The melanocratic nepheline syenites and nepheline syenites may represent magma-crystal mixtures. Alkali syenites, typical cumulitic rocks, reflect the complex genesis of clinopyroxenitic to shonkinitic rocks evolving from tephritic parental magmas toward phonotephritic and phonolitic

compositions. Initial isotopic ratios overlap those of the broader Serra do Mar province, indicating a shared genesis from similar parental magmas and source mantle. The lithospheric components are implicated in the potassic affinity and strongly incompatible element enrichment of the derived melts (Brotzu et al., 2007).

3.3.3. Materials and Methods

All geophysical data used in this study were acquired by the Geological Survey of Brazil (formerly CPRM). The dataset is publicly accessible and can be downloaded from its official website [1]. This study specifically utilizes data from the Rio de Janeiro Aerogeophysics Project number 1117, acquired in 2011. The airborne survey covered the region at an elevation of 100 meters, employing flight lines spaced 0.5 km apart in the north-south (NS) direction, with ten measurements acquired at 0.1-second intervals. Control lines, positioned at 5 km intervals in the east-west (EW) direction, were implemented for calibration-data pre-processing procedures, encompassing correcting parallax errors, diurnal variations, and profile-leveling and micro-leveling.

The International Geomagnetic Reference Field (IGRF) was calculated in 2011 and subsequently removed. The bidirectional interpolation method was employed with a 125 m x 125 m grid spacing. Given the proximity of the survey line direction to the north-south axis, this approach is conducive to accentuating geological trends perpendicular to the line direction. To optimize the enhancement of features orthogonal to the survey line, it is imperative to specify this angle as perpendicular to the line direction.

3.3.4. Aeromagnetic Data

The resulting data from pre-processing is the Total Magnetic Intensity - TMI (Figure 3.2A). The processing sequence involves upward correction, reduce to pole, tilt derivative, and Total Gradient Amplitude.

Upward continuation (UC) is frequently preferred as it diminishes the signal from shallower materials, with smaller volume or linear dimensions, more rapidly than that from deeper, larger-volume sources. However, it's crucial to note that while this approach generally yields satisfactory results, the shallow sources are suppressed, not eliminated, in the filtered data. In cases where the shallow signal exhibits high intensity or substantial linear dimensions, its presence is likely to persist even with upward continuation to significant heights (Isles and Rankin, 2013).

Reduce to Pole (RTP), rooted in potential field theory, enhances the depiction of magnetic rock unit geometry, surpassing Total Magnetic Intensity (TMI) data. Its transformative effect eliminates the dipolar nature of magnetic anomalies, improving the delineation of magnetic rock bodies. Peak RTP magnetic values align closely with body centers, offering more precise insights. Model studies underscore the challenge of interpreting magnetic rock body geometry using TMI data as field inclination decreases (Isles and Rankin, 2013).

The Total Gradient Amplitude (TGA), often colloquially termed "3-D Analytic Signal" or "ASA," is a 2-D transformation extended to 3-D. TGA effectively maps the shallowest edges of a magnetic body, resilient to orientation changes and applicable at low field inclinations and in the presence of remanent magnetization (Isles and Rankin, 2013).

The potential field "Tilt" is calculated as the arctan of the ratio of the 1st vertical derivative (VD) to the modulus of the total horizontal derivative. This calculation results in a normalized data intensity range. Tilt patterns resemble the 1st VD but may pose challenges for interpreters, as they similarly portray responses from deeper and shallower sources (Isles and Rankin, 2013).

The processing involves a combination of the procedures mentioned above. The TMI data was processed using Geosoft Oasis Montaj software by Seequent under an educational license. Figure 3.2B illustrates the outcomes of Upward Continuation for 200 meters and Reduce to Pole with inclination and declination based on the day of acquisition data. Figure 3.3A displays the UC, RTP, and TGA results. Furthermore, Figure 3.3B depicts the outcomes

of integrating UC, RTP, and Tilt Derivative. The discussion for each result will be presented in further sections.

3.3.5. Processing 3-D Aeromagnetic Inversion

Aeromagnetic surveying, offering extensive area coverage, provides valuable data for mapping geological structures, particularly in initial exploration. However, detailed prospecting demands robust inversion algorithms (Li and Oldenburg, 1996). Lelièvre and Oldenburg (2006, 2009) have developed algorithms to address the challenges of inverting geophysical magnetic data collected above regions with high magnetic susceptibility. The complexity arises due to remanent magnetization, leading to the inversion of magnetic data for a three-component subsurface magnetization vector instead of magnetic susceptibility.

Works introduce a statistical and quantitative approach to delineate and differentiate various magnetization domains within a comprehensive 3D Magnetization Vector Inversion (MVI) voxel model. The significance of considering remanent magnetization in 3D voxel-based inversion is emphasized, highlighting potential pitfalls in interpretations when this factor is overlooked (Ellis et al., 2012). The MVI technique applied in the studies addresses the incorporation of both remanent and induced magnetization, eliminating the need for prior knowledge of the direction or strength of remanent magnetization (MacLeod and Ellis, 2016; Sousa et al., 2019a,b; Soulaïmani et al., 2020).

The present work utilizes VOXI EarthModelling™, a component of Geosoft OasisMontaj, for 3D inversion of geophysical data to estimate the volume and shape of the magmatic chamber that originates from Morro São João. An interested reader can find the theory and all tests conducted for MVI for cartesian coordinate inversion in Lelièvre and Oldenburg (2009) and for spherical coordinate approximation in Fournier et al. (2020).

For generating the 3D magnetic susceptibility model, integrating aeromagnetic survey data into the inversion software geodatabase involves a systematic process. Initially, the

geographic coordinate system adjustments are made to align with the mesh nodes. The next step is data correction to eliminate dummies and negative values, resulting in new data with corrected values. Data interpolation is then performed, generating a new Total Magnetic Intensity (TMI) grid. The transformation into Reduced to Pole (RTP) is suggested for cases where remanent magnetization is not inherent to the observed rock body.

Careful application of filters is considered for noise removal without compromising the nature of the TMI. In contrast, creating a PLY cut mask facilitates 3D model coordination with intended coordinates.

To achieve the 3D model, the process continues, creating an initial VOXEL mesh for the defined area, adhering to geographic coordinate parameters and processing considerations. The mesh is tailored using a previously generated cut mask. Subsequently, the VOXI model undergoes processing with defined parameters for obtaining magnetic field data and selecting a numerical inversion method.

The result is a 3D model as a potential solution to the magnetic data, allowing for adjustments in susceptibility cutting and manipulation of the X, Y, and Z axes. The flexibility extends to modifications in the color scheme used for model generation, providing a comprehensive approach to geophysical data integration and 3D modeling.

3.4. Results

The study area comprises eight geological units, as illustrated in Figure 1. Analysis of magnetic anomalies reveals variations compared to the geological mapping presented in the same figure. In Figure 3.2A, the Total Magnetic Intensity results are displayed, although caution is warranted in their interpretation due to the dipole nature of magnetic sources. Figure 3.2B depicts outcomes following processing via Upward Continuation with a 200-meter threshold, chosen to mitigate interference from shallow magnetic sources and noise. Additionally, Pole Reduction was applied with Declination (D) = -22.46° and Inclination (I) = -37.45° , matching the local magnetic conditions at data acquisition. Figure 3.2B unveils distinctive features

labeled 1 to 4 and a significant NE-SW lineament. This lineament may indicate a dike or a boundary between geological units. Labeled SJ corresponds to Morro São João, the primary focus of this study. Magnetic anomaly label 1 aligns with metagabbros and metanorites. Labeled 2's magnetic anomaly is linked to a region rich in Biotite; it is a divergence from the depiction in Figure 3.1, possibly due to underlying alluvial deposits. Anomaly labeled 3 poses

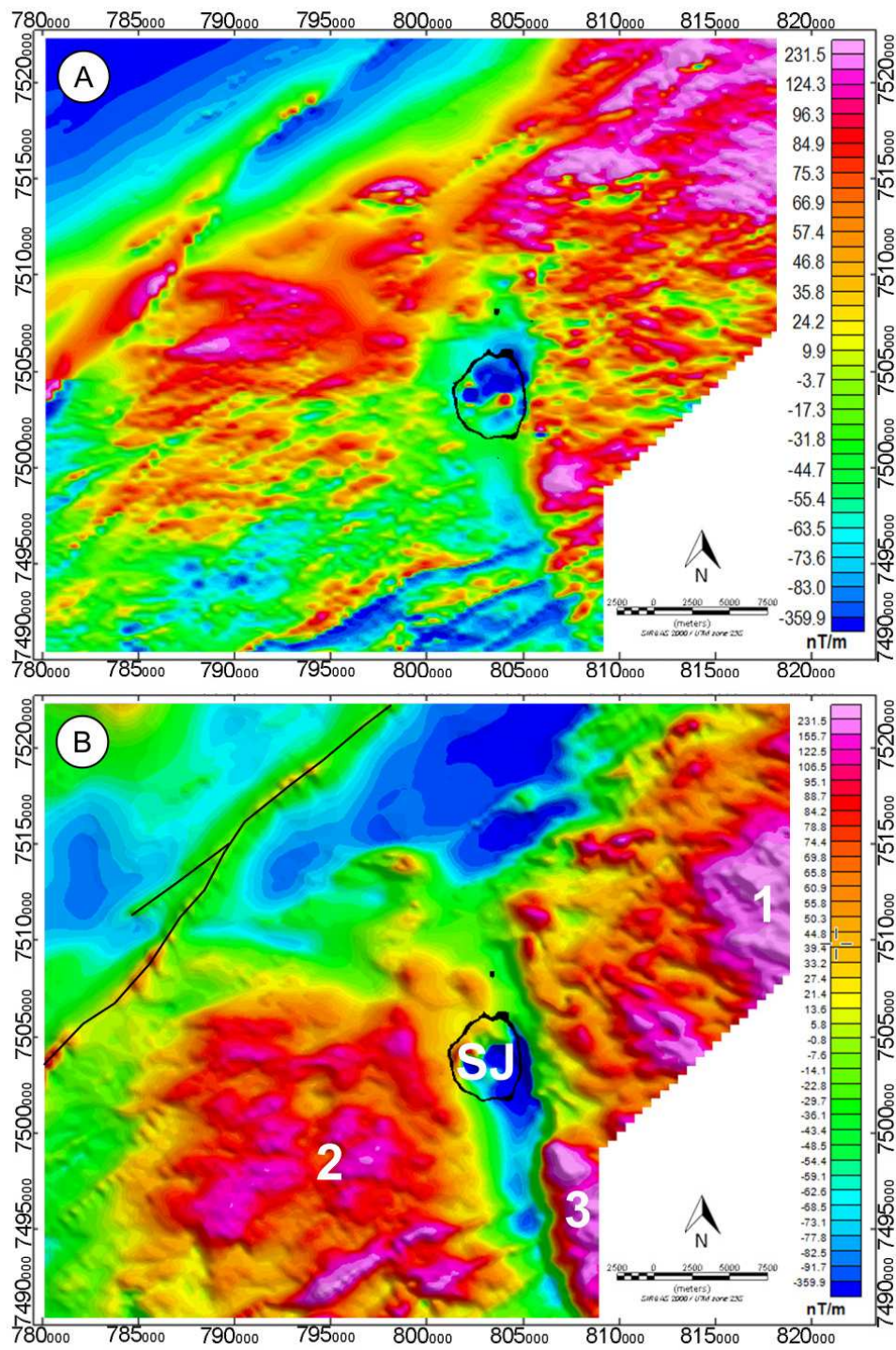


Figure 3.2. The aeromagnetic data of the study area. A represents the Total Magnetic Intensity (TMI), and B showcases the Upward Continuation (UC) results. The processing parameters, including the threshold for Upward Continuation, can be found in the text.

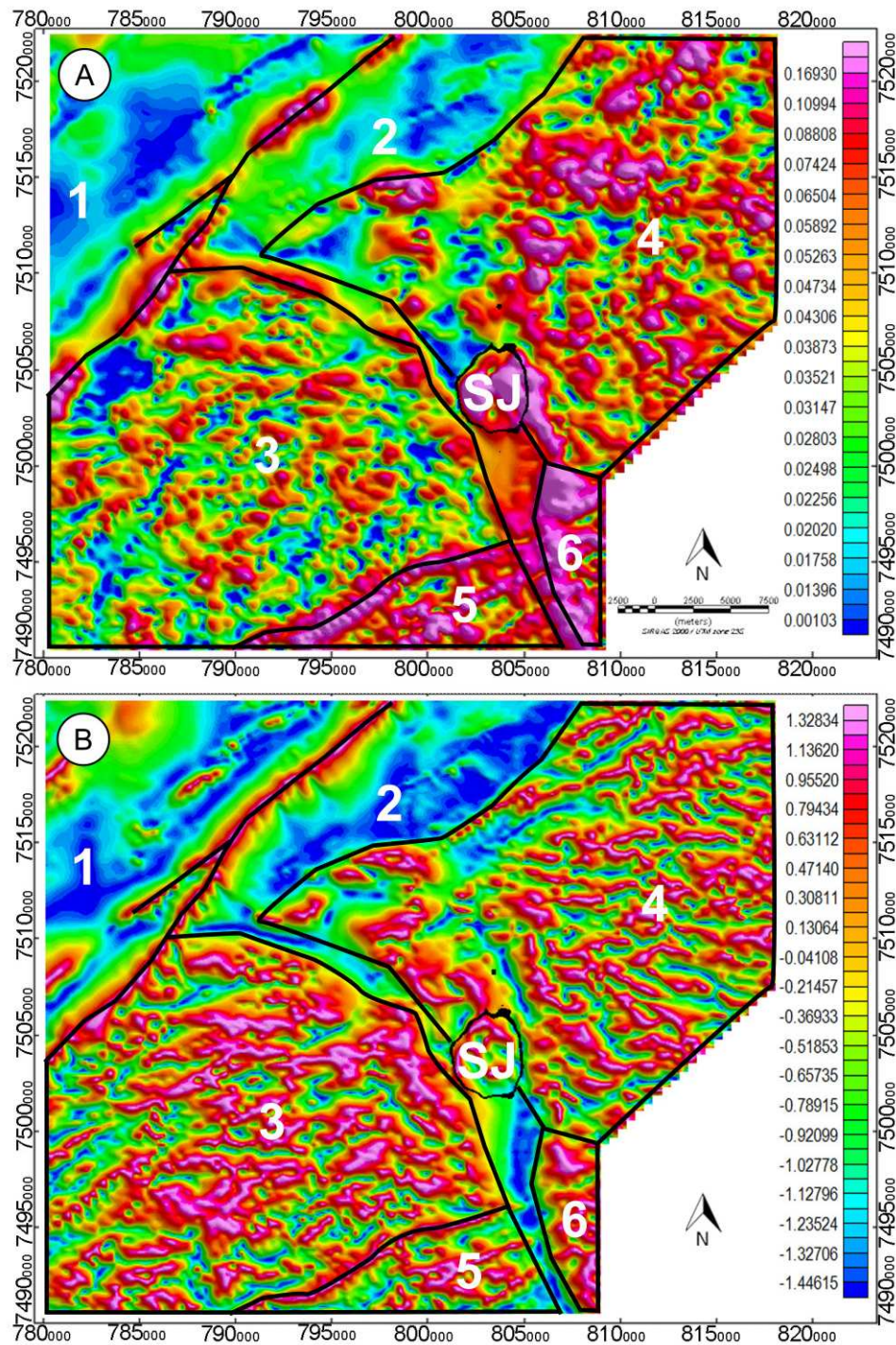


Figure 3.3 The results represent the processed Total Magnetic Intensity (TMI) data. In A, it illustrates the combination of upward continuation (UC), reduction to pole (RTP), and total gradient amplitude (TGA). In B showcases a combination of UC, RTP, and Tilt Derivative. Specific processing parameters can be found in the text.

an incognito as the map designates this area as a coastal deposit, which typically lacks such magnetic responses. This anomaly may be attributed to a deeper source, potentially a magmatic chamber or structural fault.

Notably, the magnetic anomaly associated with Morro São João did not undergo successful pole reduction during processing, as evident in the results presented in Figure 3.2B, where the magnetic anomaly persists in a dipolar form. This observation concludes that the source body generating the magnetic anomaly possesses remanent magnetism.

Figure 3.3 delineates two processes: Figure 3.3A represents the Total Gradient Amplitude from Upward Continuation with Reduction to the Pole (UC with RTP), while Figure 3.3B illustrates the outcome of the Tilt Derivative from UC with RTP. These processes reveal features not discernible in Figure 3.2. Notably, the division into distinct terrains or areas, totaling six, is observed, with the study area being Morro São João. It is important to emphasize that these divisions highlight variations in rock magnetization rather than lithological differences. Rocks of the same lithology may exhibit distinct magnetization due to variations in the abundance of magnetic minerals.

In Figure 3.3A, terrains 1 and 2 exhibit similar magnetization but are separated by an NE-SW lineament. Terrains 3 and 4 display substantial magnetization, with terrain 4 exhibiting a higher magnetization than terrain 3. Terrains 5 and 6 show even higher magnetization than the terrains mentioned above. Figure 3.3A further reveals that this magnetization is associated with ENE-WSW lineaments, potentially extending into terrain 6. Morro São João is positioned between terrains 3 and 4, suggesting a fit between the hill and these two lithological units.

Figure 3.3B essentially conveys the same information as 03A. However, this processing accentuates magnetic anomalies from shallower bodies while attenuating magnetic sources originating from greater depths. It is possible to acknowledge that a deeper source was attenuated in the M region.

3.4.1. Morro São João Inversion

After processing magnetic field data, numerical inversion was used to create a detailed three-dimensional (3D) Morro São João rock formation model, as illustrated in Figure 3.4. The result of the inversion is a body with a higher magnetic susceptibility than the host rock. Figure 3.4A offers insight, showcasing two layers and a red body (body with higher magnetic susceptibility). The top layer represents the magnetic field, the second layer depicts the topography, and the red body suggests the shape of a magmatic chamber. Figure 3.4b provides a south view, 4c an east view, and 4d a top view.

In the 3D model, a significant observation emerges a shallow subsurface area with elevated susceptibility primarily occupies the eastern part of the massif. As we delve deeper, a substantial portion extends into the western/southwestern sector, hinting at the presence of the magmatic chamber. This aligns with the spatial arrangement observed in the 3D model, as discussed earlier. In building the model, susceptibility values exceeding a threshold of 0.018 (in relation to host rock) were incorporated post-numerical inversion. This selection aimed to produce a model more coherent in alignment with the structural characteristics of the investigated region.

In the model's shallower and less profound layers, approximately around $Z=+500\text{m}$ and $Z=-100\text{m}$, one can quickly identify volumetric voids associated with Morro São João. These voids indicate a different magnetic susceptibility in the magmatic chamber rather than an absence of rock material. As we explore deeper into the model, precisely down to a depth of approximately $Z=-1000\text{m}$, the morphology demonstrates a gradually reduced horizontal extent, evolving consistently with increasing depth.

From a top-down perspective, a noticeable east-west elongation trend extends towards the southwest as the model delves into deeper strata. The spatial arrangement within the model aligns closely with the geographical locations of surface exposures, as depicted

From a top-down perspective, a noticeable east-west elongation trend extends towards the southwest as the model delves into deeper strata. The spatial arrangement within the model

aligns closely with the geographical locations of surface exposures, as depicted in the digital elevation model, and corresponds with the positions of anomalies observed in the aeromagnetic maps.

3.5. Discussions

3.5.1. Regional Analysis

Two main magnetic structural directions have been identified in the region surrounding Morro São João. The southeastern region exhibits NE-SW-oriented tectonic lineaments on the continental margin associated with pre-existing structures. Additionally, transverse orientations NW-SE and NNW-SSE extend into the basin, suggesting possible transfer faults.

The first primary observed structure extends from the continental slope (N65-70W) for about 20 km, entering the continental portion, splitting Morro São João, and altering its inclination to N45-50W. This magnetic feature divides the study area into two main sections: 3-5 to the SW and 4-5 to the NE, as seen in Figure 3.3.

The observed magnetic structures align predominantly with NW-SE directions, N26-84W, corresponding to joints and faults in the Campos and Santos Basins region. These directions also coincide with the Volta Redonda Transtension and Funil Transfer Zone (Souza, 2008).

Similar NW-SE structures are characteristic of the Cabo Frio terrain, associated with the Búzios Orogeny (530-480 Ma). Significant magnetic lineaments in the surrounding area exhibit a preferred NE-SW direction, resulting from the amalgamation of various terranes with σ_1 in NW-SE during the formation of Gondwana.

The analysis of the TGA result (Figure 3.3A) reveals a significant difference in magnetic character between the SW and NE portions of Morro São João, indicating an abrupt change in present lithologies. This alteration in magnetization is likely caused by a lower

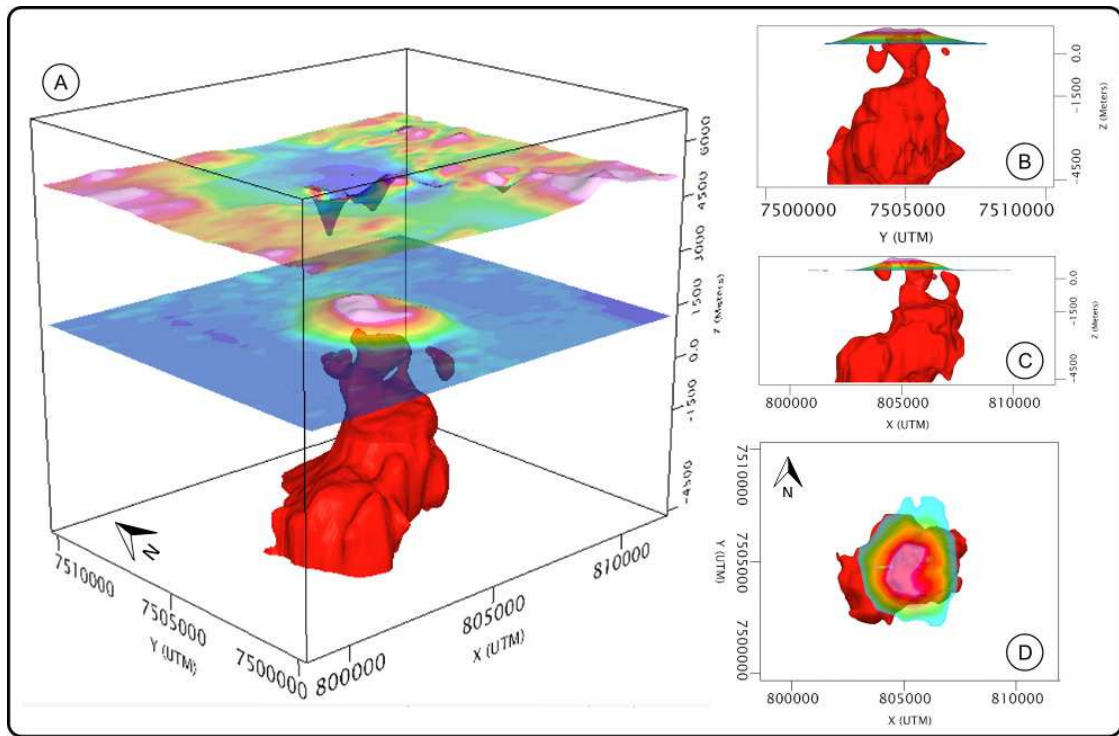


Figura 3.4. The result of the magnetic inversion. In A provides a detailed perspective, revealing two layers and highlighting a red body (indicating higher magnetic susceptibility). The top layer illustrates the magnetic field, the second layer depicts topography, and the red body suggests the shape of a magma chamber. Subfigures B, C, and D offer south, east, and top views, providing additional insights into the inversion results.

proportion of alluvial deposits and an increase in granitoids, as proposed by (Heilbron et al., 2016). The predominant NW-SE magnetic lineaments suggest a possible orientation or structural horizon for present lithological boundaries. (Heilbron et al., 2016) proposed lithological differentiation with no well-defined horizon between alluvial and sin-collisional granitoid deposits in clear contact with coastal deposits of marine origin. The proposed lithologies are minimally structurally controlled or affected by the observed magnetic structure.

3.5.2. Morro São João Analysis

The magnetic anomaly associated with Morro São João exhibits a distinctive character compared to the surrounding terrains, primarily explained by the observed lithology in Morro

São João. This anomaly deviates from the elongated NW-SE and NE-SW structures, standing out with a rounded shape. The eccentricity of the anomaly suggests a fixation of the magnetic character under global magnetism conditions different from the surrounding regions, possibly due to the remanent magnetization character inferred for Morro São João.

Fagundes (2020) conducted petrographic and lithogeochemical analyses of Morro São João rocks, highlighting igneous variations, especially between syenitic and phonolitic rocks in the central portions. The significant percentage of magnetite and its abrupt variation along the massif, coupled with geochronological data dating the massif at approximately 59 Ma, suggest a remanent magnetization character for Morro São João.

The inversion model, combined with relevant information about the massif and the region, suggests a magma chamber model at a depth of approximately 4 km (Figure 3.5). The inversion result indicates that the magma chamber has a higher magnetic susceptibility than the host rock, making it responsible for the magnetic anomaly observed in the geophysical data.

Another notable observation from the inversion result is the presence of conduits with the same magnetic susceptibility as the magma chamber, implying a possible extrusion of this material to the surface. This body's existence shapes Morro São João's morphology; in other words, the hill exists due to the presence of this intrusion. To understand the origin of the observed lithotypes' magmas, studies on similar alkaline massifs in the Serra do Mar Alkaline Province (SMAP) were considered:

- Brotzu et al. (2007) suggest peridotitic source magmatism in the subcontinental lithospheric mantle for SMAP alkaline bodies.
- Sonoki and Gardá (1988) argue that despite temporal differences, the genesis of alkaline rocky massifs in PASM cannot be attributed to isolated events.
- Fagundes (2020) proposes a magmatic evolution model for Morro São João involving partial melting of a peridotite source, magmatic differentiation, and integration with a liquid of distinct characteristics.

The widely accepted hypothesis for the genesis of the mafic precursor liquid of the magmas forming felsic rocks involves the fusion of metasomatized materials from the lithospheric mantle. This process, possibly originating from a mantle source, supports the inference of a deep-seated magma chamber, aligning with the proposed vertical development model.

3.6. Conclusion

This study comprehensively explores the Morro São João alkaline complex, employing an integrated geophysical approach. The amalgamation of aeromagnetic data processing, magnetic inversion algorithms, and 3D modeling has proven instrumental in unraveling the intricate subsurface structures beneath Morro São João.

Our findings contribute to a nuanced understanding of the Morro São João complex and offer broader implications for geophysics. The challenges in magnetic anomaly interpretation, highlighted in this research, underscore the necessity for sophisticated processing techniques in complex geological settings.

The 3D inversion model not only reveals the depth of the magmatic chamber beneath Morro São João but also provides insights into its morphology, emphasizing the complex nature of volcanic plumbing systems. Regional tectonic analyses unveil significant magnetic lineaments, contributing to our understanding of the region's broader tectonic processes, fault systems, and lithological boundaries.

Furthermore, the study showcases the efficacy of geophysical methods in lithological differentiation, emphasizing the variations in magnetic character between different terrains. The Total Gradient Amplitude (TGA) map is valuable in discerning lithological differences, aiding geological mapping, and enhancing our understanding of subsurface geology.

The magnetic inversion results, highlighting variations in magnetic susceptibility, contribute to petrophysical studies, offering insights into the composition and mineralogy of geological formations. This study thus advocates for integrating diverse geophysical techniques

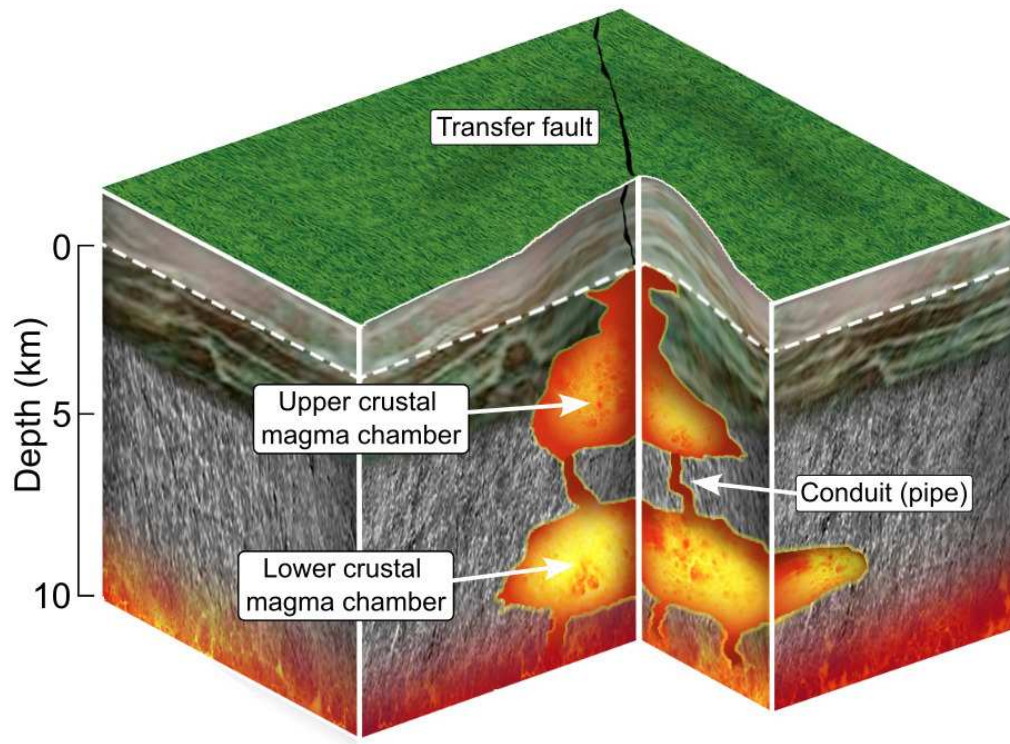


Figura 3.5. Evolution model block. A theoretical schematic representation illustrating the development of Morro São João and the associated magma chamber (Morro São João). Hotspots at considerable depths facilitate the upward transfer of rock mass from the subcrustal mantle. This process feeds shallower chambers, which are embedded in an interpreted transfer fault, contributing to the complex geological evolution of the region.

as a powerful tool for unraveling geological complexities and understanding the dynamics of magmatic systems in both local and regional contexts.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Utilizando uma abordagem geofísica integrada, este estudo examina detalhadamente o complexo alcalino de Morro São João. A integração das técnicas de processamento de dados aeromagnéticos, algoritmos de inversão magnética e modelagem tridimensional se tornou essencial no desvendar das intrincadas estruturas subsuperficiais sob Morro São João.

Os resultados obtidos contribuem para uma melhor compreensão do complexo de Morro São João e trazem implicações significativas para a área da geofísica. Em ambientes geológicos complexos, os desafios na interpretação de anomalias magnéticas destacados nesta pesquisa evidenciam a necessidade de técnicas de processamento sofisticadas.

Além de mostrar a profundidade da câmara magmática sob o Morro São João, o modelo de inversão tridimensional também oferece insights sobre sua morfologia, enfatizando a complexidade dos sistemas vulcânicos. A compreensão dos processos tectônicos mais amplos da região, assim como dos sistemas de falhas e limites litológicos, é aprimorada graças à revelação de lineamentos magnéticos significativos pelas análises tectônicas regionais.

Ademais, é destacado no estudo a eficiência dos métodos geofísicos na diferenciação litológica, ressaltando as diferenças em termos magnéticos entre diferentes terrenos. Para um mapeamento geológico preciso e uma melhor compreensão da geologia subsuperficial, é fundamental usar o mapa de Amplitude Total do Gradiente (TGA), que possibilita distintas análises das diferenças litológicas.

A análise dos resultados da inversão magnética traz informações cruciais para os estudos petrológicos, especialmente ao mostrar as variações na susceptibilidade magnética. Com isso, é possível obter melhores entendimentos sobre a composição e mineralogia das formações geológicas. A proposta deste estudo é a defesa da utilização integrada de múltiplas técnicas geofísicas como meio eficiente para desvendar as complexidades geológicas e melhor compreender a dinâmica dos sistemas magmáticos em níveis territoriais.

5. REFERÊNCIAS

ALKEN, P.; THÉBAULT, E.; BEGGAN, C. D. ET AL. **International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation**. Earth Planets Space, v. 73, p. 49, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>. Acesso em: 12 fev. 2024.

ALMEIDA, F. F. M. **O cráton do São Francisco**. Revista Brasileira de Geociências, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002962915>. Acesso em: 12 fev. 2024.

ALMEIDA, F. F. M., **Relações tectônicas das rochas alcalinas Mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-Americana**. Revista Brasileira de Geociências 13(3), p.139-158, sep. 1983. DOI:10.25249/0375-7536.1983133139158. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.1983133139158>>. Acesso em: 14 jan 2024.

BRANCO, P. M. **Serviço Geológico do Brasil (SGB)**. Magnetismo Terrestre. 2015 Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Magnetismo-Terrestre-2623.html>. Acesso em: 12 fev. 2024.

BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A.; CAMPANHA, G. A. C. **Basement inliers of the Brasileiro structural provinces of South America**. Journal of South American Earth Sciences, v. 110, p. 103392, out. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089598112100239X>. DOI: 10.1016/j.jsames.2021.103392. Acesso em: 12 fev. 2024.

BROTZU, P.; MELLUSO, L.; BENNIO, L.; GOMES, C. B.; LUSTRINO, M.; MORBIDELLI, L.; MORRA, V.; RUBERTI, E.; TASSINARI, C.; D'ANTONIO, M. **Petrogenesis of the Early Cenozoic potassic alkaline complex of Morro de São João, southeastern Brazil**. Journal of South American Earth Sciences, v. 24, n. 1, p. 93-115, jun. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981107000338>. DOI: 10.1016/j.jsames.2007.02.006. Acesso em: 12 fev. 2024.

BROTZU, P.; MELLUSO, L.; D'AMELIO, F.; LUSTRINO, M. **Mafic/ultramafic dykes and felsic intrusions with potassic to ultrapotassic affinity in the Serra do Mar province: a review**. Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform, p. 443-472, jan. 2005.

CABRITA, D. I. G.; FALEIROS, F. M.; RIBEIRO, B. V.; MENEGON, L.; CAWOOD, P. A.; CAMPANHA, G. A. C. **Deformation, thermochronology and tectonic significance of the crustal-scale Cubatão Shear Zone, Ribeira Belt, Brazil.** *Tectonophysics*, v. 828, p. 229278, abr. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195122000725>. DOI: 10.1016/j.tecto.2022.229278. Acesso em: 12 fev. 2024.

CAMPANHA, G. A. C.; FALEIROS, F. M.; BASEI, M. A. S.; TASSINARI, C. C. G.; NUTMAN, A. P.; VASCONCELOS, P. M. **Geochemistry and age of mafic rocks from the Votuverava Group, southern Ribeira Belt, Brazil: Evidence for 1490Ma oceanic back-arc magmatism.** *Precambrian Research*, v. 266, p. 530-550, set. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301926815001758>. DOI: 10.1016/j.precamres.2015.05.026. Acesso em: 12 fev. 2024.

CAMPANHA, G. A. C.; FALEIROS, F. M.; CABRITA, D. I. G.; RIBEIRO, B. V.; CAWOOD, P. A. **The southern Ribeira Belt in Western Gondwana: a record of a long-lived continental margin and terrane collage.** *Journal of South American Earth Sciences*, v. 127, p. 104404, jul. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981123002158>. DOI: 10.1016/j.jsames.2023.104404. Acesso em: 12 fev. 2024.

CASHMAN, K. V.; SPARKS, R. S. J.; BLUNDY, J. D. **Vertically extensive and unstable magmatic systems: A unified view of igneous processes.** *Science*, v. 355, n. 6331, p. eaag3055, mar. 2017. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aag3055>. DOI: 10.1126/science.aag3055. Acesso em: 12 fev. 2024.

CAXITO, F. A.; BASTO, C. F.; SANTOS, L. C. M. da L.; DANTAS, E. L.; MEDEIROS, V. C.; DIAS, T. G.; BARROTE, V.; HAGEMANN, S.; ALKMIM, A. R.; LANA, C. **Neoproterozoic magmatic arc volcanism in the Borborema Province, NE Brazil: possible flare-ups and lulls and implications for western Gondwana assembly.** *Gondwana Research*, v. 92, p. 1-25, apr. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1342937X20303312>. DOI: 10.1016/j.gr.2020.11.015. Acesso em: 12 fev. 2024.

CORRALES, F. F. P.; DUSSIN, I. A.; HEILBRON, M.; BRUNO, H.; BERSAN, S.; VALERIANO, C. M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; TEDESCHI, M. **Coeval high Ba-Sr arc-related and OIB Neoproterozoic rocks linking pre-collisional magmatism of the Ribeira and Araçuaí orogenic belts, SE-Brazil.** *Precambrian Research*, v. 337, p. 105476, fev. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301926819302608>. DOI: 10.1016/j.precamres.2019.105476. Acesso em: 12 fev. 2024.

ELLIS, R. G.; DE WET, B.; MACLEOD, I. N. **Inversion of Magnetic Data from Remanent and Induced Sources**. ASEG Extended Abstracts, v. 2012, n. 1, p. 1-4, dez. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/ASEG2012ab117>. DOI: 10.1071/ASEG2012ab117. Acesso em: 12 fev. 2024.

ENRICH ROJAS, G.; AZZONE, R.; RUBERTI, E.; GOMES, C.; COMIN-CHIARAMONTI, P. **Itatiaia, Passa Quatro and São Sebastião island, the major alkaline syenitic complex from the Serra do Mar region**. Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform, p. 419-441, jan. 2005.

FAGUNDES, M. B. **Caracterização petrográfica e geoquímica do Complexo Alcalino do Morro de São João, Casimiro de Abreu-RJ**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, mar. 2020. Disponível em: <https://www.bdttd.uerj.br:8443/handle/1/16859>.

FALEIROS, F. M.; FERRARI, V. C.; COSTA, V. S.; CAMPANHA, G. A. C. **Geoquímica e petrogênese de metabasitos do grupo Votuverava (Terreno Apiaí, Cinturão Ribeira Meridional): evidências de uma bacia retroarco calimiana**. Geologia USP. Série Científica, v. 11, n. 2, p. 135-155, ago. 2011. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/guspsc/article/view/27511>. DOI: 10.5327/Z1519-874X2011000200008. Acesso em: 12 fev. 2024.

FINN, C. A.; BEDROSIAN, P. A.; HOLBROOK, W. S.; AUKEN, E.; BLOSS, B. R.; CROSBIE, J. **Geophysical imaging of the Yellowstone hydrothermal plumbing system**. Nature, v. 603, n. 7902, p. 643-647, mar. 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-021-04379-1>. DOI: 10.1038/s41586-021-04379-1. Acesso em: 12 fev. 2024.

FOURNIER, D.; HEAGY, L. J.; OLDENBURG, D. W. **Sparse magnetic vector inversion in spherical coordinates**. GEOPHYSICS, v. 85, n. 3, p. J33-J49, maio 2020. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/geo2019-0244.1>. DOI: 10.1190/geo2019-0244.1. Acesso em: 12 fev. 2024.

FROST, B. R., SHIVE, P. N., **Magnetic mineralogy of the lower continental crust**. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, v. 91, Issue B6 p. 6513-6521, may. 1986. DOI: 10.1029/JB091iB06p06513. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/JB091iB06p06513>> . Acesso em: 01 fev. 2024.

GIRALDO-ARROYAVE, M. I.; VLACH, S. R. F.; VASCONCELOS, P. M. **New high-precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages for the Serra do Mar alkaline magmatism in the São Sebastião Island, SE Brazil, and implications.** Brazilian Journal of Geology, v. 51, e20210046, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/bjgeo/a/pLBNSCZc9MT48B6g3F5J5pt/>. DOI: 10.1590/2317-4889202120210046. Acesso em: 12 fev. 2024.

GOMES, C. D. B.; ALVES, F. R.; AZZONE, R. G.; ROJAS, G. E. E.; RUBERTI, E. **Geochemistry and petrology of the Búzios Island alkaline massif, SE, Brazil.** Brazilian Journal of Geology, v. 47, p. 127–145, mar. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/bjgeo/a/5GdZLMr5sc9vN8wQXq3sFJG/>. DOI: 10.1590/2317-4889201720160121. Acesso em: 12 fev. 2024.

GONÇALVES, L.; ALKMIM, F. F.; PEDROSA-SOARES, A.; GONÇALVES, C. C.; VIEIRA, V. **From the plutonic root to the volcanic roof of a continental magmatic arc: a review of the Neoproterozoic Araçuaí orogen, southeastern Brazil.** International Journal of Earth Sciences, v. 107, n. 1, p. 337-358, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00531-017-1494-5>. DOI: 10.1007/s00531-017-1494-5. Acesso em: 12 fev. 2024.

GUEVARA-BETANCOURT, R.; YUTSIS, V.; VARLEY, N.; ALMAGUER, J.; ALVAREZ, R.; CALDERÓN-MOCTEZUMA, A.; SIECK, P. **Insights into the plumbing system of Colima Volcanic Complex from geophysical evidence.** Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 433, p. 107711, jan. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027322002426>. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2022.107711. Acesso em: 12 fev. 2024.

HASUI, Y.; SADOWSKI, G. R. **Evolução geológica do Precambriano na região sudeste do estado de São Paulo.** Revista Brasileira de Geociências, v. 6, p. 182–200, 1976. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001815913>. Acesso em: 12 fev. 2024.

HEILBRON, M.; MORISSON VALERIANO, C.; PEIXOTO, C.; TUPINAMBÁ, M.; NEUBAUER, F.; DUSSIN, I.; CORRALES, F.; BRUNO, H.; LOBATO, M.; HORTA, A. J. C.; GUILHERME, E. S. L. **Neoproterozoic magmatic arc systems of the central Ribeira belt, SE-Brazil, in the context of the West-Gondwana pre-collisional history: A review.** Journal of South American Earth Sciences, v. 103, p. 102710, nov. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981120302534>. DOI: 10.1016/j.jsames.2020.102710. Acesso em: 12 fev. 2024.

HEILBRON, M.; EIRADO, L. G.; ALMEIDA, J. C. H. **Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Rio de Janeiro.** CPRM. 2016. Disponível em: <http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/18458>.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; CAMPOS NETO, M. D. C.; SILVA, L. C. D.; TROUW, R. A. J.; JANASI, V. D. A. **Província Mantiqueira.** Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. 2004. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001417383>.

HEILBRON, M.; RIBEIRO, A.; VALERIANO, C. M.; PACIULLO, F. V.; ALMEIDA, J. C. H.; TROUW, R. J. A.; TUPINAMBÁ, M.; EIRADO SILVA, L. G. **The Ribeira Belt.** In: Heilbron, M.; Cordani, U. G.; Alkmim, F. F. (Eds.). São Francisco Craton, Eastern Brazil: Tectonic Genealogy of a Miniature Continent. Regional Geology Reviews. Springer International Publishing, Cham, pp. 277–302, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-01715-015.

HEILBRON, M.; SILVA, L. G. D. E.; ALMEIDA, J. C. H. D.; TUPINAMBÁ, M.; PEIXOTO, C.; VALERIANO, C. D. M.; LOBATO, M.; RODRIGUES, S. W. D. O.; RAGATKY, C. D.; SILVA, M. A.; MONTEIRO, T.; FREITAS, N. C. D.; MIGUENS, D.; GIRÃO, R. **Proterozoic to Ordovician geology and tectonic evolution of Rio de Janeiro State, SE-Brazil: insights on the central Ribeira Orogen from the new 1:400,000 scale geologic map.** Brazilian Journal of Geology, v. 50, e20190099, abr. 2020b. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjgeo/a/5d4VCzVqGVRKttNYLNhn8Pf/?lang=en>. DOI: 10.1590/2317-4889202020190099.

IBANEZ, K.; GARCIA, M. G. M.; MAZOCA, C. E. M. **Tectonic Geoheritage as Records of Western Gondwana History: a Study Based on a Geosite's Potential in the Central Ribeira Belt, Southeastern Brazil.** Geoheritage, v. 13, n. 1, p. 9, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00533-3>. DOI: 10.1007/s12371-021-00533-3. Acesso em: 12 fev. 2024.

ISLES, D. J.; RANKIN, L. R. **Data acquisition and processing.** In: **Geological Interpretation of Aeromagnetic Data. Geophysical Monograph Series.** Society of Exploration Geophysicists and Australian Society of Exploration Geophysicists, pp. 94–132, jan. 2013. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/10.1190/1.9781560803218.ch5>. DOI: 10.1190/1.9781560803218.ch5. Acesso em: 12 fev. 2024.

KEAREY, P., BROOKS, M. AND HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**. Wiley-Blackwell Science Ltd., Oxford. 288 Pages, 2002.

LELIÈVRE, P. G.; OLDENBURG, D. W. **Magnetic forward modelling and inversion for high susceptibility**. *Geophysical Journal International*, v. 166, n. 1, p. 76–90, 2006. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-246X.2006.02964.x>. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.02964.x. Acesso em: 12 fev. 2024.

LELIÈVRE, P. G.; OLDENBURG, D. W. **A 3D total magnetization inversion applicable when significant, complicated remanence is present**. *GEOPHYSICS*, v. 74, n. 3, p. L21-L30, maio 2009. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/10.1190/1.3103249>. DOI: 10.1190/1.3103249. Acesso em: 12 fev. 2024.

LI, Y.; OLDENBURG, D. W. **3-D inversion of magnetic data**. *GEOPHYSICS*, v. 61, n. 2, p. 394–408, mar. 1996. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/10.1190/1.1443968>. DOI: 10.1190/1.1443968. Acesso em: 12 fev. 2024.

MA, G., ZHAO, Y., XU, B., LI, L., WANG, T. **High-Precision Joint Magnetization Vector Inversion Method of Airborne Magnetic and Gradient Data with Structure and Data Double Constraints**. *Remote Sensing*, v. 14, n. 10, p. 2508, jan. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/10/2508>. DOI: 10.3390/rs14102508. Acesso em: 12 fev. 2024.

MACLEOD, I. N.; ELLIS, R. G. **Quantitative Magnetization Vector Inversion**. *ASEG Extended Abstracts*, v. 2016, n. 1, p. 1–6, dez. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/ASEG2016ab115>. DOI: 10.1071/ASEG2016ab115. Acesso em: 12 fev. 2024.

MAGEE, C.; STEVENSON, C. T. E.; EBMEIER, S. K.; KEIR, D.; HAMMOND, J. O. S.; GOTTSMANN, J. H.; WHALER, K. A.; SCHOFIELD, N.; JACKSON, C. A.-L.; PETRONIS, M. S.; O'DRISCOLL, B.; MORGAN, J.; CRUDEN, A.; VOLLGGER, S. A.; DERING, G.; MICKLETHWAITE, S.; JACKSON, M. D. **Magma Plumbing Systems: A Geophysical Perspective**. *Journal of Petrology*, v. 59, n. 6, p. 1217–1251, jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/petrology/egy064>. DOI: 10.1093/petrology/egy064. Acesso em: 12 fev. 2024.

MONTES-LAUAR, C. R.; PACCA, I. G.; MELFI, A. J.; KAWASHITA, K. **Late Cretaceous alkaline complexes, southeastern Brazil: Paleomagnetism and geochronology.** Earth and Planetary Science Letters, v. 134, n. 3, p. 425–440, set. 1995. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0012821X9500135Y>. DOI: 10.1016/0012-821X(95)00135-Y. Acesso em: 12 fev. 2024.

PORADA, H. **The damara-ribeira orogen of the Pan-Africanbrasiliano cycle in Namibia (Southwest Africa) and Brazil as interpreted in terms of continental collision.** Tectonophysics, v. 57, n. 2, p. 237–265, ago. 1979. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0040195179901501>. DOI: 10.1016/0040-1951(79)90150-1. Acesso em: 12 fev. 2024.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Para Entender a Terra.** Bookman, 2006, Ciências da Terra - Geologia.

REEVES, C. **Aeromagnetic Surveys: Principles, Practice, and Interpretation.** Earthworks, Washington DC, 2005, 155 p.

REYNOLDS, J. M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics.** 2nd Edition. John Wiley and Sons Ltd, 710p, 2011.

RIBEIRO, B. V.; FALEIROS, F. M.; CAMPANHA, G. A. C.; LAGOEIRO, L.; WEINBERG, R. F.; HUNTER, N. J. R. **Kinematics, nature of deformation and tectonic setting of the Taxaquara Shear Zone, a major transpressional zone of the Ribeira Belt (SE Brazil).** Tectonophysics, v. 751, p. 83–108, jan. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195118304360>. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.12.025. Acesso em: 12 fev. 2024.

ROSA, P. A. D. S.; RUBERTI, E. **Nepheline syenites to syenites and granitic rocks of the Itatiaia Alkaline Massif, Southeastern Brazil: new geological insights into a migratory ring Complex.** Brazilian Journal of Geology, v. 48, p. 347–372, maio 2018. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/bjgeo/a/dnRDsTTfJfjVZx3xDRFMDvS/?lang=en>. DOI: 10.1590/2317-4889201820170092. Acesso em: 12 fev. 2024.

SHI, X.; GENG, H.; LIU, S. **Magnetization Vector Inversion Based on Amplitude and Gradient Constraints**. *Remote Sensing*, v. 14, n. 21, p. 5497, jan. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/21/5497>. DOI: 10.3390/rs14215497. Acesso em: 12 fev. 2024.

SONOKI, I. K.; GARDA, G. M. **Idades K-Ar de rochas alcalinas do Brasil meridional e Paraguai oriental: compilação e adaptação às novas constantes de decaimento**. *Boletim IG-USP. Série Científica*, v. 19, p. 63–85, jan. 1988. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/bigsc/article/view/45074>. DOI: 10.11606/issn.2316-8986.v19i0p63-85. Acesso em: 12 fev. 2024.

SOULAIMANI, S.; CHAKIRI, S.; MANAR, A.; SOULAIMANI, A.; MIFTAH, A.; BOUIFLANE, M. **Potential-field geophysical data inversion for 3D modelling and reserve estimation (Example of the Hajjar mine, Guemassa massif, Morocco): magnetic and gravity data case**. *Comptes Rendus. Géoscience*, v. 352, n. 2, p. 139–155, 2020. Disponível em: <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/geoscience/item/CRGEOS202035221390/>. DOI: 10.5802/crgeos.10. Acesso em: 12 fev. 2024.

SOUSA, F. R. F. R. O.; FRÜCHTING, A.; SILVA, A. M.; TOLEDO, C. L.; AISENGART, T. **3D Magnetization Vector Inversion applied to the Rio Capibaribe Terrain, Borborema Province, NE / Brazil: Modeling Ni-Cu-PGE ore bodies and proposing new exploratory targets**. En: *International Workshop on Gravity, Electrical & Magnetic Methods and Their Applications*, Xi'an, China, 19-22 May 2019. SEG Global Meeting Abstracts. Society of Exploration Geophysicists and Chinese Geophysical Society, pp. 460–463, sep. 2019a. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/10.1190/GEM2019-117.1>. DOI: 10.1190/GEM2019-117.1. Acesso em: 12 fev. 2024.

SOUSA, F. R. F. R. O.; SILVA, A. M.; TOLEDO, C. L.; AISENGART, T.; SAMPAIO, J. M. S. **Inversion of Magnetic Data applied to the characterization of the IOCG prospect in Aurora, Ceará State - NE / Brazil**. En: *International Workshop on Gravity, Electrical & Magnetic Methods and Their Applications*, Xi'an, China, 19-22 May 2019. SEG Global Meeting Abstracts. Society of Exploration Geophysicists and Chinese Geophysical Society, pp. 189–192, sep. 2019b. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/GEM2019-048.1>. DOI: 10.1190/GEM2019-048.1. Acesso em: 12 fev. 2024.

SOUZA, I. A. D. **Falhas de transferência da porção norte da Bacia de Santos interpretadas a partir de dados sísmicos: sua influência na evolução e deformação da bacia**. Ph.D. thesis, Universidade Estadual Paulista (UNESP), nov. 2008. Disponível em: <http://acervodigital.unesp.br/handle/11449/102986>. Acesso em: 12 fev. 2024.

TEDESCHI, M.; NOVO, T.; PEDROSA-SOARES, A.; DUSSIN, I.; TASSINARI, C.; SILVA, L. C.; GONCALVES, L.; ALKMIM, F.; LANA, C.; FIGUEIREDO, C.; DANTAS, E.; MEDEIROS, S.; DE CAMPOS, C.; CORRALES, F.; HEILBRON, M. **The Ediacaran Rio Doce magmatic arc revisited (Araçuaí-Ribeira orogenic system, SE Brazil)**. Journal of South American Earth Sciences, v. 68, p. 167–186, jul. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981115300912>. DOI: 10.1016/j.jsames.2015.11.011. Acesso em: 12 fev. 2024.

THOMPSON, R. N.; GIBSON, S. A.; MITCHELL, J. G.; DICKIN, A. P.; LEONARDOS, O. H.; BROD, J. A.; GREENWOOD, J. C. **Migrating Cretaceous–Eocene Magmatism in the Serra do Mar Alkaline Province, SE Brazil: Melts from the Deflected Trindade Mantle Plume?** Journal of Petrology, v. 39, n. 8, p. 1493–1526, ago. 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/petroj/39.8.1493>. DOI: 10.1093/petroj/39.8.1493. Acesso em: 12 fev. 2024.