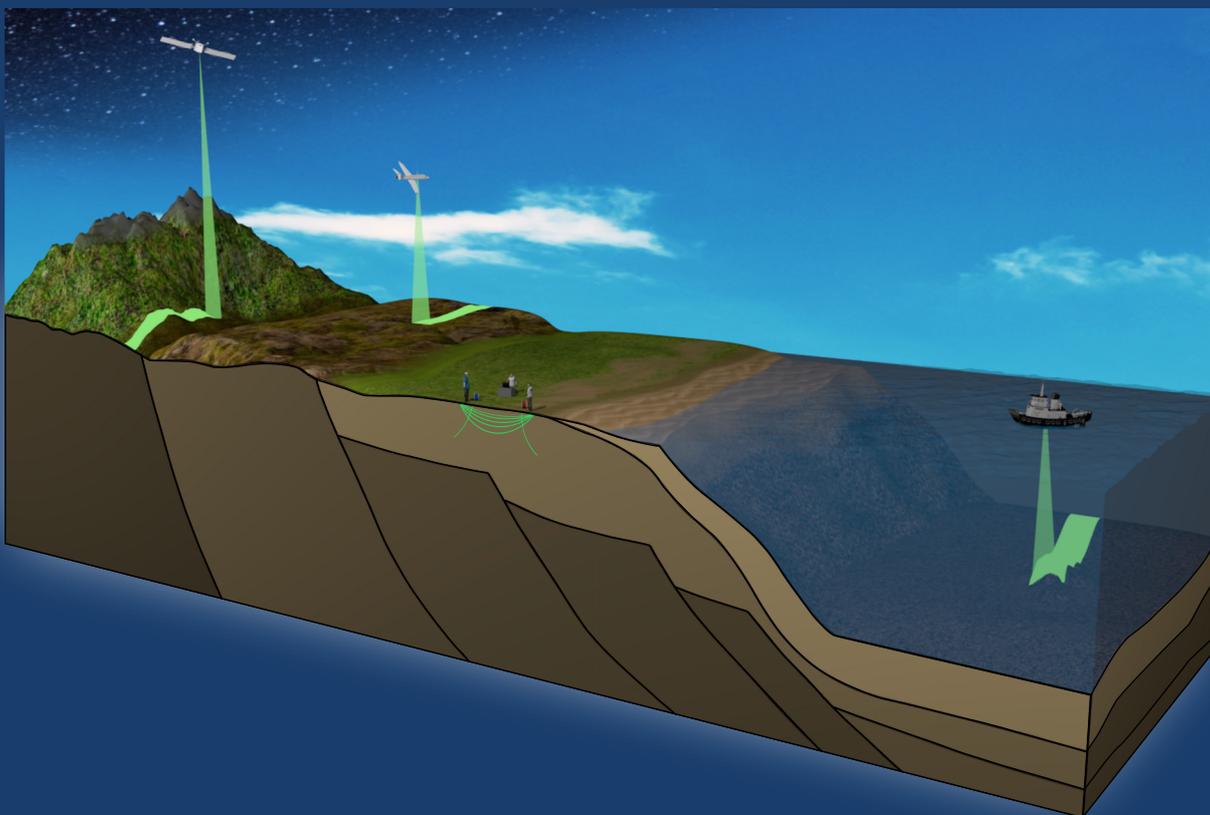


INFORME DE GEOFÍSICA APLICADA Nº4



MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS APLICADOS NA CONFEÇÃO DO MAPA DE INTERPRETAÇÃO DOS TERRENOS PIANCÓ-ALTO BRÍGIDA E ALTO PAJEÚ, ZONA TRANSVERSAL DA PROVÍNCIA BORBOREMA



MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministro de Estado

Bento Albuquerque

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Pedro Paulo Dias Mesquita

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor Presidente

Esteves Pedro Colnago

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

Márcio José Remédio

Diretora de Hidrologia e Gestão Territorial

Alice Silva de Castilho

Diretor de Infraestrutura Geocientífica

Paulo Afonso Romano

Diretor de Administração e Finanças

Cassiano de Souza Alves

COORDENAÇÃO TÉCNICA

Chefe do Departamento de Geologia

Lúcia Travassos da Rosa Costa

Chefe da Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica

Luiz Gustavo Rodrigues Pinto

Chefe da Divisão de Geologia Básica

Vladimir Cruz de Medeiros

Chefe do Departamento de Recursos Minerais

Marcelo Esteves Almeida

Chefe do Departamento de Informações Institucionais

Edgar Shinzato

Chefe da Divisão de Documentação Técnica

Roberta Pereira da Silva de Paula

Chefe do Departamento de Relações Institucionais e Divulgação

Patrícia Durringer Jacques

Chefe da Divisão de Marketing e Divulgação

Washington José Ferreira Santos

Chefe do Departamento de Apoio Técnico

Maria José Cabral Cezar

Chefe da Divisão de Editoração Geral

Valter Alvarenga Barradas

SUPERINTENDÊNCIA DE RECIFE

Chefe da Superintendência

Adriano da Silva Santos

Gerente de Geologia e Recursos Minerais

Cleide Regina Moura da Silva

Responsável Técnico do Produto

Roberto Gusmão de Oliveira

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM
DIRETORIA DE GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS
PROGRAMA GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

**LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS
E INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA REGIONAL**

**MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE DADOS
AEROGEOFÍSICOS APLICADOS NA CONFECÇÃO
DO MAPA DE INTERPRETAÇÃO DOS TERRENOS
PIANCÓ-ALTO BRÍGIDA E ALTO PAJEÚ, ZONA
TRANSVERSAL DA PROVÍNCIA BORBOREMA**

AUTORES

Roberto Gusmão de Oliveira
Marília de Araújo Costa Rodrigues
Nitzschia Regina Rodrigues Domingos

INFORME DE GEOFÍSICA APLICADA

Nº 04



RECIFE
2021

REALIZAÇÃO

Superintendência de Recife

COORDENADOR DO PROJETO

Roberto Gusmão de Oliveira

ELABORAÇÃO DOS TEXTOS E MAPAS

Roberto Gusmão de Oliveira

Marília de Araújo Costa Rodrigues

Nitzschia Regina Rodrigues Domingos

COLABORADOR

Luiz Gustavo Rodrigues Pinto

APOIO TÉCNICO**PROJETO GRÁFICO/EDITORIAÇÃO****Capa (DIMARK)**

Washington Jose Ferreira dos Santos

Dario Dias Peixoto

Miolo (DIEDIG)

Agmar Alves Lopes

Diagramação (DIEDIG)

Agmar Alves Lopes

REVISÃO DE TEXTO

Alexandre Lisboa Lago

Irinéa Barbosa da Silva

NORMALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

Priscila Ururahy

Serviço Geológico do Brasil – CPRM

www.cprm.gov.br

seus@cprm.gov.br

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

O48m	Oliveira, Roberto Gusmão de. Métodos de processamento de dados aerogeofísicos aplicados na confecção do mapa de interpretação dos terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, zona transversal da província Borborema / Roberto Gusmão de Oliveira, Marília de Araújo Costa Rodrigues, Nitzschia Regina Rodrigues Domingos. -- Recife : CPRM, 2021. 1 recurso eletrônico : PDF. -- (Informe de geofísica aplicada ; 4) Levantamentos geológicos e integração geológica regional. ISBN 978-65-5664-162-1 1.Geofísica. I. Oliveira, Roberto Gusmão de. II. Rodrigues, Marília de Araújo Costa. III. Domingos, Nitzschia Regina Rodrigues. IV. Título. V. Série. CDD 550
------	--

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Teresa Rosenhayme CRB 5662

Direitos desta edição: Serviço Geológico do Brasil – CPRM

Permitida a reprodução desta publicação desde que mencionada a fonte.

APRESENTAÇÃO

O conhecimento geológico do território brasileiro constitui um instrumento indispensável para o planejamento e a execução das políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável dos recursos minerais e, simultaneamente, é fonte de dados imprescindível para o conhecimento e gestão do meio físico.

É com esta premissa que o **Serviço Geológico do Brasil – CPRM** tem a grata satisfação de disponibilizar à comunidade técnico-científica, aos empresários do setor mineral e à sociedade em geral mais este produto, o **Informe de Geofísica Aplicada**, vinculado ao **Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral**.

Com os expressivos investimentos realizados nos últimos anos em Geofísica, seja na aquisição de dados aerogeofísicos, seja na aquisição de equipamentos de geofísica terrestre, trabalhos de excelente qualidade de aplicação de dados geofísicos para solução de problemas geológicos vêm sendo desenvolvidos pelos pesquisadores do SGB-CPRM.

Entendendo a importância de divulgar amplamente os trabalhos e as experiências em Geofísica, foi criada esta nova linha editorial, concebida no Departamento de Geologia e na Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica, que permite aos pesquisadores explorar e apresentar de forma mais detalhada os trabalhos realizados em projetos técnicos, demonstrando a diversidade e potencialidade de aplicação da Geofísica.

O Informe de Geofísica Aplicada - **MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS APLICADOS NA CONFECÇÃO DO MAPA DE INTERPRETAÇÃO DOS TERRENOS PIANCÓ-ALTO BRÍGIDA E ALTO PAJEÚ, ZONA TRANSVERSAL DA PROVÍNCIA BORBOREMA** - empregou dados aerogeofísicos de magnetometria e gamaespectrometria para a produção de um mapa de interpretação de dados aerogeofísicos da região dos terrenos Piancó – Alto Brígida e Alto Pajeú, antecipando uma etapa importante de geração de mapas de serviços para trabalhos futuros de levantamentos geológicos-metalogenéticos nesta região da Província Borborema. A interpretação apresentada contribuirá para o aprimoramento da cartografia das unidades geológicas e da compreensão do arcabouço tectônico-estrutural.

Com mais este lançamento, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM dá continuidade à política governamental de atualizar o conhecimento geológico do país, através dos levantamentos geológicos básicos, geoquímicos e geofísicos, e da avaliação integrada das informações, fundamental para o desenvolvimento regional e importante subsídio à formulação de políticas públicas e de apoio à tomada de decisão de investimentos. Este produto está disponível para download no banco de dados corporativo do Serviço geológico do Brasil – CPRM, o GeoSGB (<http://geosgb.cprm.gov.br>), e no Repositório Institucional de Geociências (<http://rigeo.cprm.gov.br/>).

Esteves Pedro Colnago
Diretor-Presidente

Márcio José Remédio
Diretor de Geologia e Recursos Minerais

RESUMO

A região dos terrenos Piancó - Alto Brígida e Alto Pajeú apresenta desafios importantes quanto à cartografia das unidades geológicas e ao entendimento de suas estruturas para o aprimoramento do arcabouço tectônico, além de possuir ocorrências de Fe-Ti (Cr), Au, Pb, Fe, Cu e Ni com um potencial ainda desconhecido. Os terrenos Piancó - Alto Brígida e Alto Pajeú estão localizados na Subprovíncia Transversal da Província Borborema. Esta subprovíncia tem forma alongada de direção E-W e corresponde à região geológica limitada pelas zonas de cisalhamento Patos e Pernambuco. O processamento e a interpretação dos dados magnetométricos, considerando atributos das formas das anomalias e de seus gradientes, permitiu efetuar interpretações de lineamentos e corpos que estão correlacionados com estruturas e rochas magnéticas. A partir dos canais individuais de K, eTh e eU e da composição ternária *RGB* dos dados gamaespectrométricos foi produzida uma interpretação em domínios gamaespectrométricos, que consistiu em uma avaliação discriminatória qualitativa entre concentrações de cada radioelemento em três classes (baixo, médio e alto teor relativo), resultando na separação em 27 classes. A integração de todos os dados resultou no mapa de interpretação, por meio de um método padrão simples que pode ser empregado nas diversas regiões do Brasil. A produção de um mapa de interpretação de dados aerogeofísicos da região dos terrenos Piancó – Alto Brígida e Alto Pajeú antecipou uma etapa importante de geração de mapas de serviços para trabalhos futuros de levantamentos geológicos-metalogenéticos nesta região da Província Borborema. A interpretação apresentada neste trabalho contribuirá para o aprimoramento na cartografia das unidades geológicas e na compreensão do arcabouço tectônico-estrutural.

ABSTRACT

The Piancó - Alto Brígida and Alto Pajeú terranes presented important challenges for the mapping and structural analysis of geological units which contributed to an improved understanding of the tectonic framework. These terranes are located in the Transversal Sub-province of the Borborema Province, and have notable occurrences of Fe-Ti (Cr), Au, Pb, Fe, Cu and Ni with unknown potential. This sub-province has an elongated shape in the E-W direction and corresponds to the geological region limited by the Patos and Pernambuco shear zones. The processing and interpretation of magnetic data, considering shape attributes of the anomalies and their gradients, enabled the interpretation of magnetic lineaments and bodies correlated with magnetic structures and rocks. From the individual K, eTh and eU channels and the RGB ternary composition of the gamma-spectrometric data, an interpretation of the gamma-spectrometric domains was produced which consisted of a qualitative discriminatory evaluation of the relative concentrations of each radio element in three categories, (low, medium and high), resulting in their separation into 27 classes. The integration of all the data, through a simple standard method that can be used in differing Brazilian regions, resulted in an interpretation map. The production of this aerogeophysical data interpretation map for the region of the Piancó - Alto Brígida and Alto Pajeú terranes serves as an initial example for generating service maps for future geological and metallogenic surveys in this region of the Borborema Province. The interpretation presented will contribute to the improved cartography of the geological units and the understanding of the tectonic-structural framework.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	9
2.1. Contexto Geográfico.....	9
2.2. Contexto Geológico.....	9
2.3. Recursos Minerais	10
2.4. Contexto Geofísico.....	12
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.1. Dados Aerogeofísicos	14
3.2. Fundamentos Teóricos do Método Magnetométrico	15
3.3. Fundamentos Teóricos do Método Radiométrico	16
3.4. Processamento dos Dados Aerogeofísicos	16
3.5. Plataforma de Processamento.....	17
3.6. Interpolação	17
3.7. Junção dos Diferentes Projetos	17
3.8. Aplicação de Transformações e Filtros nos Dados Aeromagnetométricos	17
4. RESULTADOS	18
4.1. Mapas Magnetométricos.....	18
4.1.1. Anomalias Magnetométricas	18
4.1.2. Anomalia Magnetométrica Reduzida ao Polo.....	18
4.1.3. Separação das Anomalias Magnetométricas em Rasas e Profundas.....	20
4.1.4. 1ª Derivada Vertical da Anomalia Magnetométrica e Interpretação dos Lineamentos Magnéticos.....	21
4.1.5. Gradiente Total e Interpretação dos Corpos Magnéticos.....	21
4.1.6. Principais Correlações Geológicas dos Dados Magnetométricos	21
4.2. Mapas Aerogamaespectrométricos.....	25
4.2.1. Potássio (K).....	25
4.2.2. Equivalente Tório (eTh)	25
4.2.3. Equivalente Urânio (eU).....	26
4.2.4. Composição Ternária RGB e Separação em Domínios Gamaespectrométricos	26
4.2.5. Principais Correlações Geológicas dos Dados Gamaespectrométricos	27
4.3. Mapa de Interpretação dos Dados Aerogeofísicos.....	29
5. CONCLUSÕES	32
REFERÊNCIAS.....	33

1. INTRODUÇÃO

Os terrenos Piancó - Alto Brígida (TPAB) e Alto Pajeú (TAP) estão localizados na Subprovíncia da Zona Transversal da Província Borborema (PB) (Figura 1). Esta subprovíncia tem forma alongada de direção E-W e corresponde à região geológica limitada pelas zonas de cisalhamento Patos e Pernambuco. A região do mapa de Interpretação de Dados Aerogeofísicos dos Terrenos Piancó - Alto Brígida e Alto Pajeú (área de estudo na Figura 1) apresenta desafios importantes quanto à cartografia das unidades geológicas e ao entendimento de suas estruturas para o aprimoramento

do arcabouço tectônico. Além disso, possui ocorrências de Fe-Ti (Cr), Au, Pb, Fe, Cu e Ni com potencial ainda desconhecido. A aplicação de dados aerogeofísicos para uso em mapeamento geológico representa uma importante ferramenta que proporciona uma melhor compreensão da distribuição das unidades geológicas e feições estruturais, mediante diversos produtos gerados por técnicas de processamento digital de dados aerogeofísicos (MEKKAWI *et al.*, 2017). A interpretação de produtos aerogeofísicos para o uso em cartografia geológica é amplamente relatada na

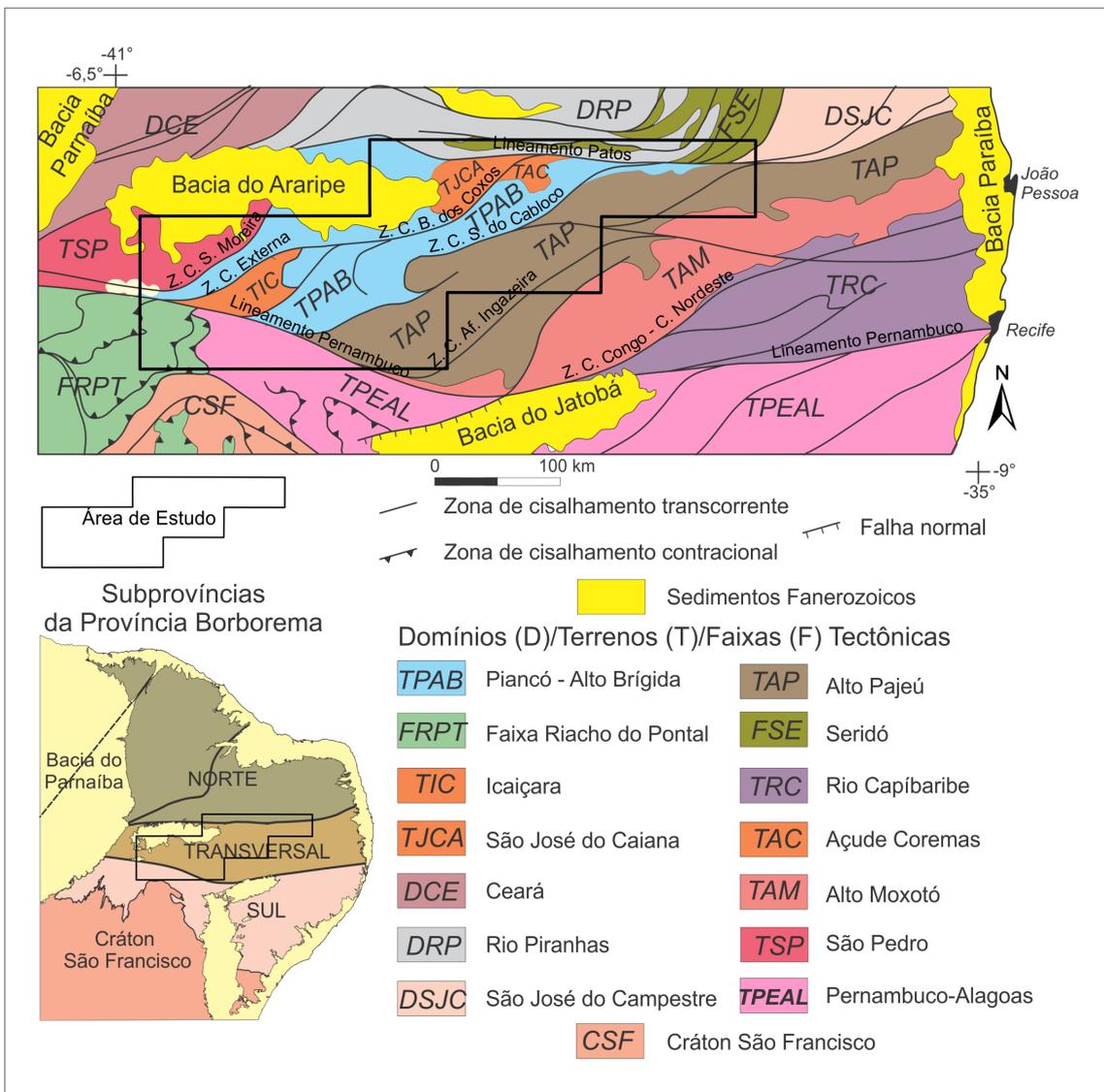


Figura 1 - Contexto geológico-tectônico da Subprovíncia Transversal da Província Borborema e de seus limites com as subprovíncias adjacentes reproduzido de Santos *et al.* (2014). O polígono da área de estudo localiza a região do Mapa de Interpretação de Dados Aerogeofísicos dos Terrenos Piancó - Alto Brígida e Alto Pajeú.

literatura técnico-científica, tendo sido Boyd (1976) um dos precursores dessa metodologia.

Face ao exposto, uma grande contribuição dos dados aerogeofísicos será na atualização da cartografia geológica, considerando a expansão para leste da área de estudo do Projeto Ouro e Metais Bases do Oeste de Pernambuco (SANTOS *et al.*, 2018). A produção de um mapa de interpretação de dados aerogeofísicos antecipou uma etapa importante da geração de mapas de serviços para trabalhos

futuros de levantamentos geológicos-metalogenéticos nessa região da Província Borborema. Portanto, esta interpretação dos dados aeromagnetométricos e aerogamaespectrométricos contribuirá para o aprimoramento da cartografia das unidades geológicas por meio dos domínios gamaespectrométricos e dos corpos magnéticos, e ajudará na compreensão do arcabouço tectônico-estrutural por meio da integração dos lineamentos magnéticos com as zonas de cisalhamentos, falhas e foliações.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. Contexto Geográfico

A área de estudo está localizada na região nordeste do Brasil e tem uma área de 45.000 km² que abrange 15 folhas geográficas na escala 1:100.000, divididas entre os estados de Pernambuco, Paraíba e Ceará (figuras 1 e 2). Está climaticamente inserida na região semiárida, apresentando predominantemente temperaturas altas, podendo variar no quadro climático devido à interferência do relevo e das massas de ar. Apresenta vegetação com predominância da caatinga, porém com vestígios de áreas florestadas na Serra dos Cariris Velhos e de cerrados na Chapada do Araripe. Possui uma rede hidrográfica com rios intermitentes com muitas barragens de contenção para abastecimento populacional e irrigação. Os principais rios são o Brígida e o Pajeú, que desaguam no Rio São Francisco (Fonte: <http://www.pe.gov.br/conheca/geografia/>).

Segundo Ferreira *et al.* (2014), a área de estudo apresenta grande variedade de formas de relevo, esculpidas em terrenos cristalinos e sedimentares. A diversidade das paisagens foi condicionada por um conjunto de fatores que interferiram na geomorfogênese, tais como estrutura geológica, evolução morfoclimática e processos atuais. Também, segundo Ferreira *et al.* (2014), a evolução dos eventos geológicos que resultou na atual configuração do relevo está fortemente associada ao processo de abertura do Oceano Atlântico durante o Cretáceo, em um sistema de falhamentos e instalação de bacias sedimentares implantadas sobre o Escudo Pré-Cambriano da Província Borborema (BRITO NEVES *et al.*, 2000). Posteriormente, durante o

Cenozoico ocorreu o soerguimento epirogenético da Chapada do Araripe e da Serra dos Cariris Velhos, alçados a cotas superiores a 1.000 m de altitude.

2.2. Contexto Geológico

O Terreno Piancó-Alto Brígida (TPAB) apresenta uma história evolutiva ao longo do Criogeniano-Ediacarano (630–580 Ma) associado à inversão de uma bacia preenchida por sedimentos marinhos costeiros (BARBOSA, 1970; SILVA FILHO, 1985; BITTAR, 1998; MEDEIROS, 2004; BRITO NEVES *et al.*, 2018). Está limitado ao norte pelo Lineamento Patos e o ao sul pelo Lineamento Pernambuco (Figura 3). Apresenta pelo menos três fases de deformação acompanhadas de metamorfismo variando de muito baixo, baixo a médio grau, seguidos de uma importante fase de tectônica de extrusão tardia (MEDEIROS, 2004; BRITO NEVES *et al.*, 2018). O empilhamento metassedimentar é formado pelo Grupo Cachoeirinha (BARBOSA, 1970), composto por quartzitos, metapelitos e metacalcários com grande ritmicidade que constituem a Formação Santana dos Garotes. Nas proximidades do contato com o embasamento, ao longo da Z.C. Serra do Caboclo, ocorrem brechas e metaconglomerados polimíticos, meta-arenitos imaturos, metagrauvacas e metaacórseos da Formação Serra do Olho d'Água. Brito Neves *et al.* (2016) interpretaram que a bacia original do Grupo Cachoeirinha foi instalada em uma zona de subducção entre a placa superior (Subprovíncia Transversal) e a placa inferior (Domínio Rio Piranhas da Subprovíncia Norte),

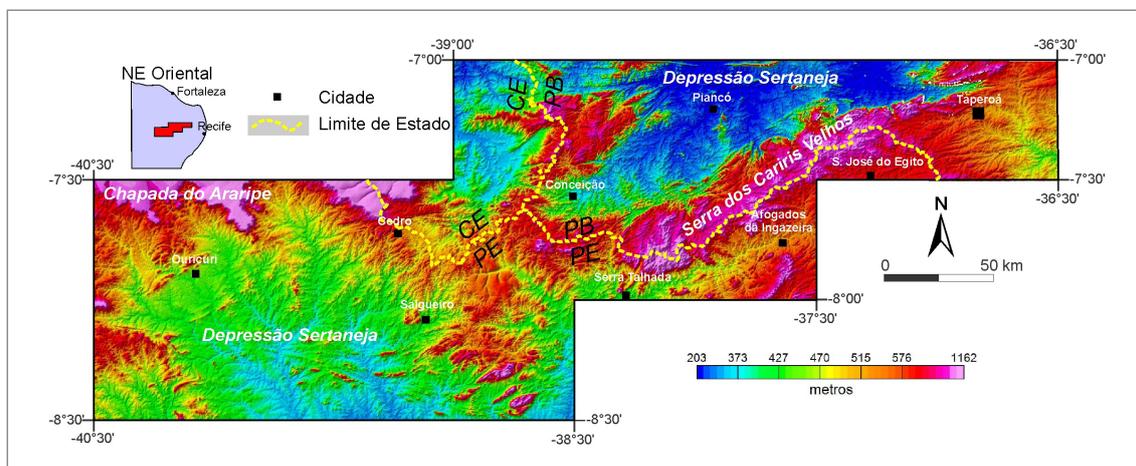


Figura 2 - Relevo digital (SRTM- Shuttle Radar Topography Mission - NASA) da área do Mapa de Interpretação de Dados Aerogeofísicos dos Terrenos Piancó - Alto Brígida e Alto Pajeú.

com um substrato oceânico ocupando a parte central e norte. Propostas de modelos de tectônica de placas para explicar o contexto e metassedimentar, deformacional e magmático desse terreno também foram propostos por Medeiros (2004) e Caxito *et al.* (2021). O TPAB foi largamente intrudido por *stocks* e batólitos de granitoides no Ciclo Brasileiro e apresenta ramificações geográficas em várias faixas separadas pelas ilhas/terrenos de embasamentos paleoproterozoicos (BRITO NEVES; PASSARELLI, 2020): Açude Coremas (TAC), São José do Caiana (TJCA) e Icaçara (TIC) (Figura 3). Esses altos do embasamento, constituídos de gnaisses graníticos e paragnaisses micáceos, migmatizados, com intercalações de supracrustais, são considerados *disrupted terranes* por Brito Neves e Passarelli (2020). O limite oeste do TPAB ocorre mediante a Zona de Cisalhamento Sítio do Moreiras em relação ao Terreno São Pedro (TSP) (Figura 3). Segundo Brito Neves (2020), o TSP é constituído por rochas de alto grau, ortognaisses (meta *TTG*) com intercalações de quartzitos, calciossilicáticas e formações ferríferas, além de rochas máficas e ultramáficas justapostas a ortognaisses e migmatitos cataclásticos e uma de faixa de metassedimentos psamo-pelíticos e metavulcânicas ácidas.

O Terreno Alto Pajeú (TAP) constitui uma longa faixa na direção NNE-SSW, composta de metassedimentos, metavulcânicas, orto e paragnaisses frequentemente migmatizados e intrudidos por granitoides no Ciclo Brasileiro (SANTOS; MEDEIROS, 1999; SANTOS *et al.*, 2010). Está limitado a norte pelo Terreno Piancó-Alto Brígida mediante a zona de cisalhamento Serra do Caboclo (ZCSC). O limite sul com o Domínio Alto Moxotó foi definido com base em contraste de propriedades magnéticas e gravimétricas (MEDEIROS, 2004; OLIVEIRA; MEDEIROS, 2018). Segundo Brito Neves (2020), a ordenação litoestratigráfica do TAP ainda demanda muitos trabalhos em escalas de detalhe. Entretanto, é possível separá-lo em quatro domínios principais: Complexo Riacho Gravatá, Complexo São Caetano, Complexo Salgueiro e Terreno Icaçara. No Complexo Riacho Gravatá ocorrem rochas psamítico-pelíticas, com intercalações de muscovita clorita xistos, xistos biotíticos, granada xistos, calciossilicáticas, calcários metavulcânicas ácidas/intermediárias e anfíbolitos com sobreposição da intensa deformação por cisalhamento da Orogênese Brasileira (BITTAR, 1998; SANTOS *et al.*, 2010). No Complexo São Caetano predominam biotita gnaisses, anfíbolitos, metachertes e vulcânicas félsicas com grau elevado de metamorfismo e migmatização (MEDEIROS, 2004; SANTOS *et al.*, 2010). Na porção sul do TAP, em contiguidade com o Complexo São Caetano, ocorre o Complexo Lagoa das Contendas (SANTOS, 1995), formado por meta-andesitos, metabasaltos, metadacitos, metatufos, meta-chertes e metagrauvacas, carbonatos e metagranitoides. No contexto geral do TAP, destaca-se uma

série de granitoides atribuídos ao Ciclo Tectonomagmático Cariris Velhos, cujos dados geocronológicos forneceram idade Eotoniana (SANTOS *et al.*, 2010; VAN SCHMUS *et al.*, 2011) e uma sequência de arco vulcânico denominada Complexo Irajá (WANDERLEY, 1990).

Além dos terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, no norte da área de estudo ocorrem quartzitos e micaxistos do Grupo Seridó, sotopostos nos complexos de rochas gnáissicas-migmatíticas do Domínio Rio Piranhas (RP na Figura 1), vergados e estiradas ao longo do Lineamento Patos (Figura 3). Bem como, no sudoeste da área afloram quartzitos do Grupo Casa Nova da Faixa Riacho do Pontal (FRPT), empurrados sobre gnaisses-migmatitos arqueanos do Complexo Entremontes, que embasam metassedimentos Mesoproterozoicos do Complexo Cabrobó e ortognaisses tonianos do Complexo Belém do São Francisco, pertencentes ao extremo oeste do Terreno Pernambuco-Alagoas (TPEAL) (Figura 3).

2.3. Recursos Minerais

Depósitos de Fe-Ti±V±Cr±Cu: segundo a classificação de Santos *et al.* (2014), na área de estudo ocorrem dois tipos de jazimentos de Fe-Ti: i) tipo Serrote das Pedras Pretas, formado por depósitos de Fe-Ti±V encaixados em rochas metamáficas-ultramáficas da sequência metavulcanossedimentar toniana localizados ao sul da cidade de Mirandiba (PE), nas proximidades do limite entre o TAP e o TAM (Figura 3); e ii) tipo Fazenda Esperança, formado por depósitos de Fe-Ti-V±Cr±Cu em complexos metamáficos-ultramáficos localizados a oeste da cidade de Bodocó (PE), no limite entre o TPAB e o TIC (Figura 3). Segundo Beurlen *et al.* (1992) e Almeida *et al.* (1997), as rochas encaixantes dos minérios de Fe-Ti são retroeclogitos de tipo C, formados por processos de subducção de uma crosta oceânica neoproterozoica.

Formações Ferríferas Bandadas Ediacaranas: ocorrem na forma de corpos alongados de minério puro (hematita) e minérios silicosos (itabiritos), com extensões que variam de 200 a 400 m encaixadas nos filitos do Grupo Cachoeirinha (SANTOS, 1967) (Figura 3). O minério ocorre de forma lenticular e estratiforme, concordante com as encaixantes e formam serrotes que se destacam na topografia.

Tungstênio (W) e Estanho (Sn): as ocorrências de W e Sn ocorrem na região norte da área de estudo, hospedadas em rochas do Grupo Seridó (Figura 3). As mineralizações de W são do tipo scheelita em *skarns* associados aos mármorees da Formação Jucurutu, estruturalmente controlados por dobras e zonas de cisalhamento, tendo os granitos neoproterozoicos especializados como fonte dos fluidos (e.g., SANTOS *et al.*, 2014). As mineralizações de Sn são do tipo cassiterita em pegmatitos heterogêneos encaixados na Formação Seridó.

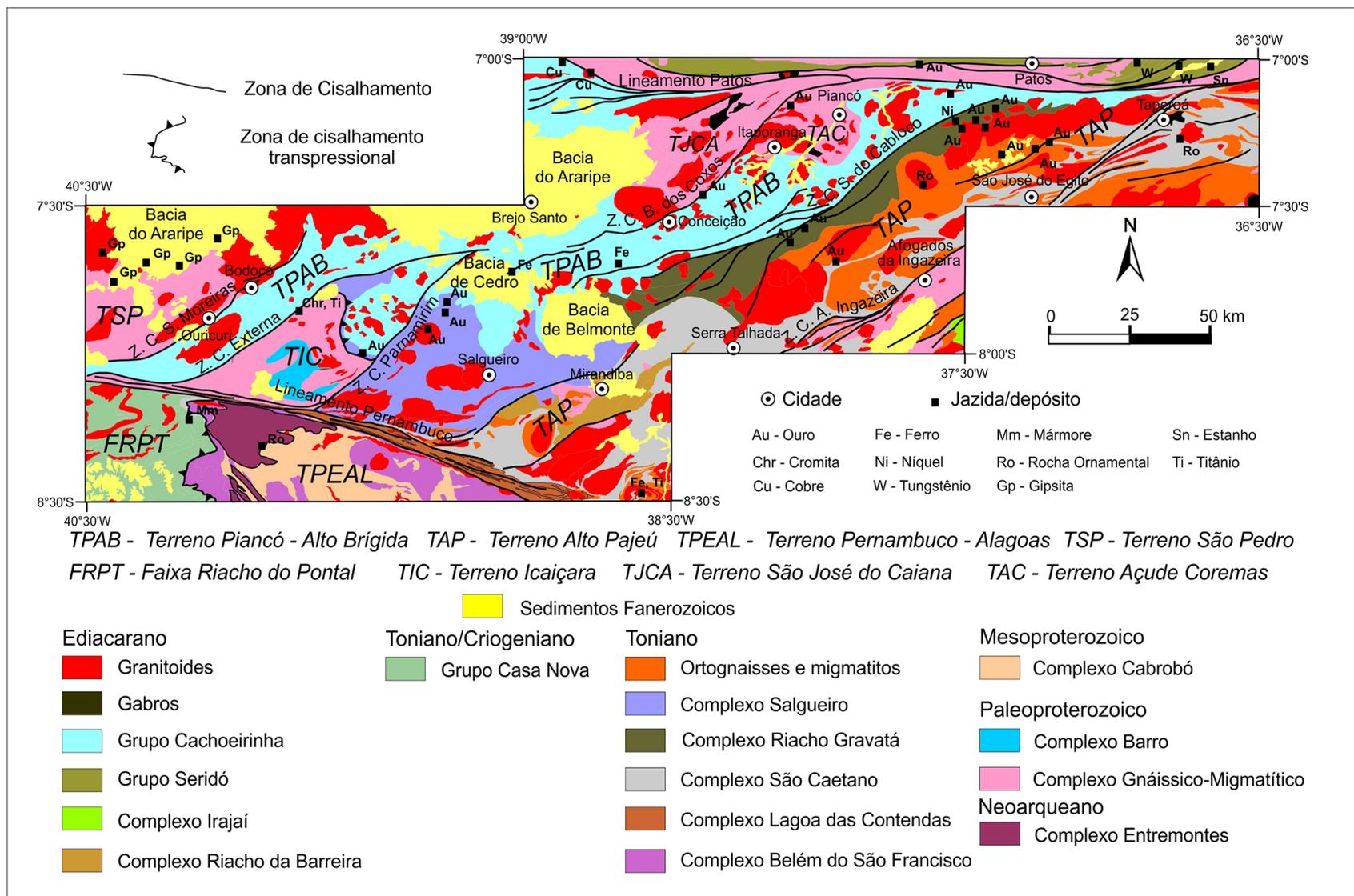


Figura 3 - Contexto geológico e de recursos minerais simplificado da região do Mapa de Interpretação de Dados Aerogeofísicos dos Terrenos Piancó - Alto Brígida e Alto Pajeú. A cartografia geológica foi simplificada a partir de Santos, Ferreira e Silva Júnior (2002) e Gomes (2001). Os recursos minerais foram obtidos em <https://geoportal.cprm.gov.br/geosgb/>, acesso em novembro/2020.

Ouro (Au): são mineralizações filonianas associadas às zonas de cisalhamento transcorrentes do limite dos terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú (COUTINHO; ADHERTON, 1998; MARINHO, 2012). Destacam-se três distritos: Serrita (PE), Itapetim (PE) e Cachoeira de Minas (PB). No Distrito de Serrita, as ocorrências estão encaixadas em metassedimentos do Grupo Salgueiro e em quartzo-monzodioritos da Suíte Serrita. As estruturas associadas foram formadas em um regime frágil-dúctil, controladas por sistemas de fraturas E-W/ESE-WNW e N-S/NNW-SSE nos metassedimentos e NW-SE nos quartzo-monzodioritos. Foram observadas alterações hidrotermais que produziram halos de carbonatação nos metassedimentos e sericitização, silicificação e sulfetação nos quartzo-monzodioritos (MARINHO, 2012). Segundo Gomes (2001), no Distrito de Itapetim, as mineralizações auríferas associadas aos sulfetos estão relacionadas a hidrotermalismo com filões de quartzo em zonas de cisalhamento que deformam ortognaisses, e em *boudins* e filonetes de quartzo encaixados em gnaisses xistosos e xistos grafitosos. Foram observadas evidências de alteração hidrotermal e processos de greisenificação, turmalinização e carbonatação. No distrito de Cachoeira de Minas ocorrem filões de quartzo-ouro-sulfetos encaixados em metavulcânicas e metassedimentos do Complexo Riacho Gravatá, aparentemente controlados por zonas de cisalhamento transtracionais.

Níquel (Ni): as ocorrências de Ni hospedadas em rochas ultramáficas são compostas por dunitos e piroxênitos bastante serpentinizados encaixados em filitos, quartzitos e micaxistos do Complexo Riacho Gravatá (Complexo Cachoeirinha, denominação antiga) (FARINA, 1969). O teor de Ni nessas rochas intemperizadas está principalmente entre 1.500 e 2.000 ppm (com teores de até 18.000 ppm) e de 11,56% em garnieritas preenchendo sistemas de fraturas (FARINA, 1969). Os corpos formam relevos expressivos, cujos topos desprovidos de vegetação são evidentes em imagens de satélites.

Cobre (Cu): as ocorrências de Cu ocorrem na região do Prospecto Aurora (CE) no norte da área de estudo, na região de influência do Lineamento Patos (Figura 3). São hospedadas por rochas metavulcano-sedimentares do Grupo Cachoeirinha. Segundo Huhn *et al.* (2011),

associado às mineralizações de Cu ocorre cisalhamento e brechação hidrotermal, além de cloritização e albitização, em veios e zonas com sulfetos disseminados. A paragênese, a intensa alteração hidrotermal e o estilo de mineralização, permitem classificá-lo como semelhante aos depósitos da classe de óxido de ferro-cobre-ouro (IOCG) de idade Brasileira ou pós-Brasileira.

Gipsita (Gp), Rochas Ornamentais (Ro) e Mármore (Mm): depósitos de gipsita estão situados na Bacia do Araripe (Figura 3) e constituem uma das vocações econômicas da área do projeto por causa do volume elevado das reservas, qualidade e posição geográfica. As jazidas de rocha ornamental compreendem granitoides, ortognaisses e migmatitos de variadas composições. As ocorrências de mármore estão hospedadas em rochas metassedimentares do Grupo Casa Nova na Faixa Riacho do Pontal e do Complexo São Caetano no Terreno Alto Pajeú (Figura 3).

2.4. Contexto Geofísico

Segundo Oliveira (2008) e Oliveira e Medeiros (2018), o padrão magnetométrico da Subprovincia Transversal (Figura 4A) é definido por um zoneamento com alternância de faixas magnéticas e não magnéticas, com forma de sigmoides de direção NE-SW, limitados por zonas de cisalhamentos. As amplitudes das anomalias têm uma média de 50 nT com comprimento de onda em torno de 50 km. Também, segundo Oliveira e Medeiros (2018), esse padrão tem correspondência nos dados gravimétricos que apresentam o mesmo zoneamento, com uma alternância de anomalias positivas e negativas com amplitude média de 10 mGal (Figura 4C). Medeiros (2004) associou os contrastes magnéticos mais importantes com zonas de cisalhamentos profundas que podem representar os limites atuais de terrenos alóctones que colidiram durante a Orogênese Brasileira. Nos dados gamaespectrométricos (Figura 4B), os teores altos de K, eTh e eU estão associados com as intrusões de rochas granitoides do Ciclo Brasileiro, enquanto teores médios correspondem a metagranitoides, gnáisses e migmatitos. Os sienitos destacam-se por um expressivo enriquecimento em K, enquanto os metassedimentos apresentam empobrecimento nos três radioisótopos.

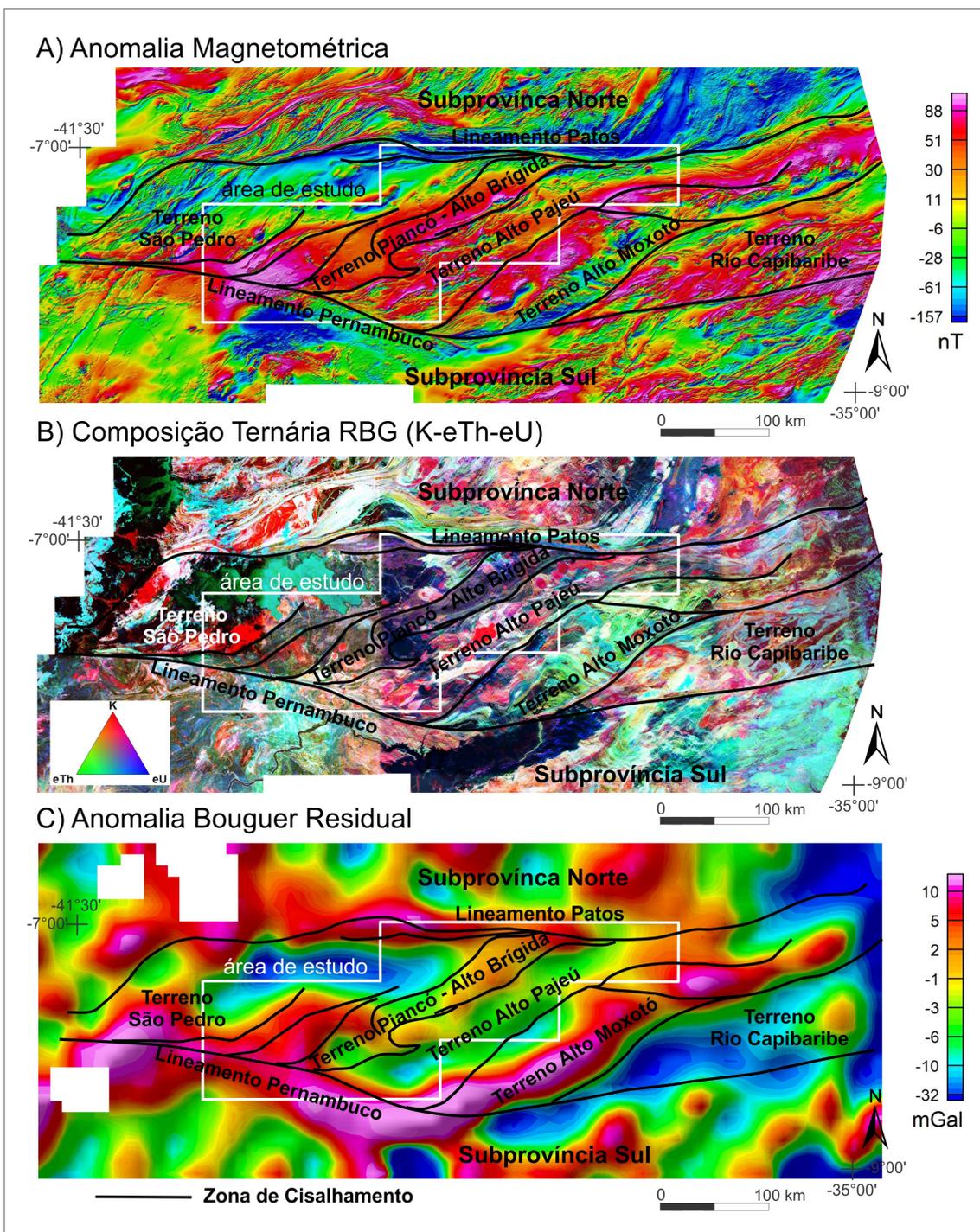


Figura 4 - Contexto geofísico da Subprovincia Transversal da Província Borborema e de seus limites com as subprovincias adjacentes. A área de estudo (polígono de cor branca) localiza a região do Mapa de Interpretação de Dados Aerogeofísicos dos Terrenos Piancó - Alto Brígida e Alto Pajeú. Os dados magnetométricos e gamaespectrométricos foram levantados em vários projetos pelo Serviço Geológico do Brasil (<https://geoportal.cprm.gov.br/porta/home/index.html>). Os dados gravimétricos foram compilados por Oliveira (2008).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Dados Aerogeofísicos

Os dados aeromagnetométricos e gamaespectrométricos utilizados neste trabalho foram levantados nos projetos aerogeofísicos Pernambuco - Piauí (CPRM, 2006), Centro Sudoeste do Ceará (CPRM, 2010a) e Pernambuco-Paraíba e Paraíba-Rio Grande do Norte (CPRM, 2010b) (Figura 5). Estes projetos levantaram perfis com linhas de voo e

controle espaçadas de 500 m e 5.000 m, orientadas nas direções N-S e E-W, respectivamente. A altura de voo foi fixada em 100 metros sobre o terreno. As aeronaves foram posicionadas pelo sistema de observação de satélite GPS, com precisão de 1 m. O magnetômetro com sensor de vapor de césio foi montado na cauda da aeronave (tipo *stinger*) (Fotografia 1). As medidas foram realizadas a cada 0,1 s, o que equivale, dependendo da velocidade média da aeronave

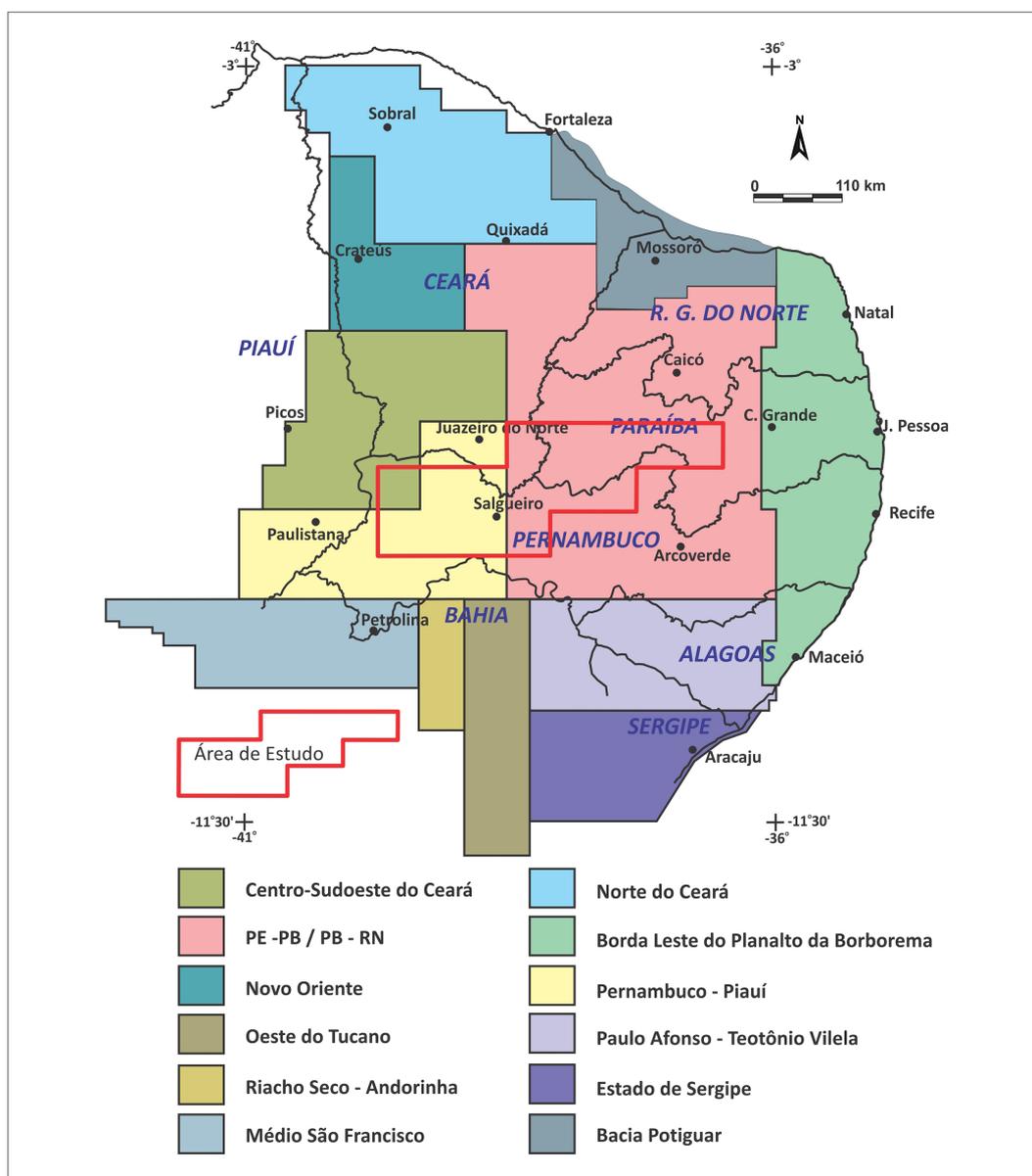


Figura 5 - Localização dos levantamentos aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria) realizados na Região do Nordeste Oriental do Brasil entre 2006 e 2010 com linhas de voo N-S espaçadas de 500 m e altura de voo igual a 100 m. A área de estudo localiza a região do Mapa de Interpretação de Dados Aerogeofísicos dos Terrenos Piancó - Alto Brígida e Alto Pajeú.

a uma medida a cada 7,7 m. O gamaespectrômetro com detectores de cristais de iodeto de sódio (NaI) (Fotografia 2) permitiu a análise individual e precisa dos fotopicos de potássio (K), equivalente urânio (eU) e equivalente tório (eTh). As medidas foram efetuadas a cada 1,0 s, representando medições a intervalos de amostragem média de aproximadamente 77,0 m.



Fotografia 1 - Avião equipado com magnetômetro do tipo vapor de céσιο montado na cauda da aeronave (tipo *stinger*). Um magnetômetro deste tipo mediu o campo magnético total da Terra a cada 0,1 s.



Fotografia 2 - Avião equipado com gamaespectrômetro com detector de cristal de iodeto de sódio. Um gamaespectrômetro desse tipo mediu a radioatividade natural a cada 1,0 s.

3.2. Fundamentos Teóricos do Método Magnetométrico

O método magnetométrico é um dos mais antigos métodos geofísicos. Desde o seu início foi muito utilizado nos estudos exploratórios de recursos minerais metálicos. A indústria de exploração de petróleo também fez e ainda faz intenso emprego dessa metodologia. Na pesquisa de minerais metálicos, sobretudo àqueles portadores de ferro, a importância e a relação direta com jazidas são bastante evidentes. Em outros casos, como o do petróleo, a magnetometria permite

a identificação de estruturas, tais como domos e falhas, que podem condicionar a formação de jazidas.

O método magnetométrico mede o campo magnético total da Terra. O campo magnético terrestre pode ser considerado como produzido por um momento de dipolo localizado no centro da Terra e apontando para o sul e formando um ângulo em relação ao eixo de rotação. Os pontos em que o eixo do dipolo intercepta a superfície da Terra são denominados polos geomagnéticos (Figura 6). As linhas de força que atravessam a esfera terrestre ficam paralelas com a superfície nas proximidades do Equador geográfico. Ele é composto por três partes: o campo principal que tem origem no núcleo externo da Terra; o campo externo produzido por correntes elétricas que circulam na ionosfera e varia rapidamente e, variações do campo principal que são constantes no tempo e são causadas por anomalias magnéticas locais geradas por rochas e minerais magnéticos localizados na superfície e no interior da Terra (TELFORD *et al.*, 1990).

De acordo com Telford *et al.* (1990), todos os materiais podem ser classificados em três grupos de acordo com as suas propriedades magnéticas: diamagnético, paramagnético e ferromagnético. As substâncias diamagnéticas apresentam susceptibilidade magnética (μ) negativa. Isso significa que a magnetização induzida (B) por um campo externo (H) apresenta direção oposta à do campo H . As substâncias que não são diamagnéticas são denominadas paramagnéticas; ou seja, apresentam susceptibilidade magnética positiva. Os ferromagnéticos são materiais paramagnéticos no qual a interação entre os átomos é tão forte que ocorre um alinhamento de momentos magnéticos em grandes domínios das substâncias. A temperatura Curie é a temperatura a partir da qual um material

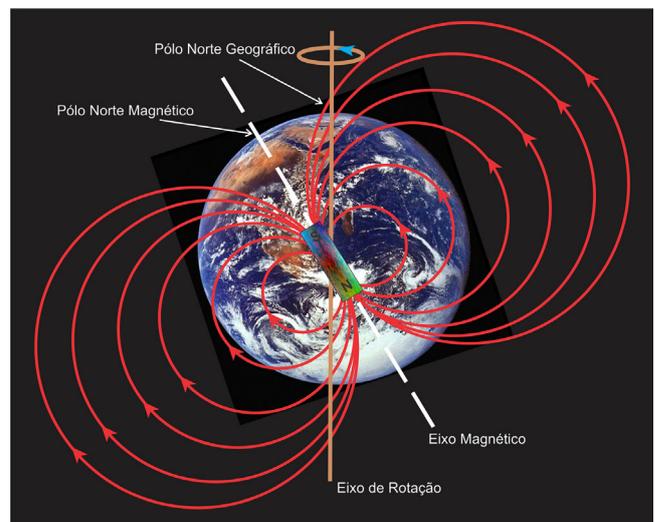


Figura 6 - Representação esquemática do Campo Magnético da Terra. Ele pode ser comparado com um grande ímã cuja direção forma um ângulo agudo com o eixo de rotação.

perde as suas características ferromagnéticas e passa a se comportar como paramagnético (Fe 750°C, Ni 310°C, magnetita 515°C).

A susceptibilidade magnética é um parâmetro adimensional que define a intensidade da magnetização induzida em uma rocha ($H = \mu B$). Ela tem relação direta com a quantidade e dimensão dos minerais magnéticos contidos nas rochas. Os principais minerais magnéticos são magnetita, ilmenita e pirrotita. Entre eles, a magnetita é o que apresenta os maiores valores de susceptibilidade. Entre as rochas, os basaltos e peridotitos são as que têm maiores susceptibilidades (TELFORD *et al.*, 1990).

3.3. Fundamentos Teóricos do Método Radiométrico

O método radiométrico é baseado na detecção da emissão natural de raios gama produzida pelo decaimento radioativo de isótopos. Alguns isótopos são instáveis e se tornam estáveis pela emissão de radiação energética ionizada. Estes isótopos são denominados radioisótopos (KEAREY *et al.*, 2002).

O decaimento radioativo que leva a formação de elementos estáveis é exponencial e sua taxa de decaimento segue a fórmula: $N = N_0 e^{-\lambda t}$, onde N é o número de átomos restantes após um tempo t , a partir de um número inicial N_0 a um tempo $t = 0$ e λ é a constante de decaimento característica de cada elemento (KEAREY *et al.*, 2002).

A importância do método radiométrico nas últimas décadas se deve à grande demanda de minerais radioativos provocado pela necessidade de combustíveis nucleares (KEAREY *et al.*, 2002). Entretanto, levantamentos

radiométricos também são muito úteis no mapeamento geológico, para o reconhecimento e diferenciação de diversos tipos de rochas (PIRES; HARTHILL, 1989).

Na natureza ocorrem em torno de 50 isótopos radioativos, mas a maioria é rara ou fracamente radioativa. Os elementos com interesse principal em radiometria são urânio (^{238}U), tório (^{232}Th) e potássio (^{40}K). Eles são os únicos elementos com radioisótopos que produzem raios gama com energia suficiente para serem medidos em levantamentos aéreos (MINTY, 1997). O fotopico mais energético da série de decaimento do Th é emitido pelo isótopo ^{208}Tl , enquanto o U é detectado pelo fotopico emitido pelo isótopo ^{214}Bi (MINTY, 1997). Em média, a crosta superior da Terra contém 2,35 % de K, 12 ppm de Th e 3,0 ppm de U (DICKSON; SCOTT, 1997). Existe um grande número de minerais radioativos, porém os mais comuns são aqueles apresentados na Tabela 1.

3.4. Processamento dos Dados Aerogeofísicos

Neste item estão descritas as metodologias utilizadas para o tratamento dos dados magnetométricos objetivando sua apresentação em formatos adequados para os trabalhos de interpretação e integração geológica. De acordo com Isles e Rankin (2013), a tarefa de controle de qualidade de um levantamento aeromagnetométrico requer experiência geofísica especializada e nem sempre é realizada pela pessoa responsável pela interpretação dos dados. Os principais problemas para o intérprete são os níveis de ruído nos dados. Eles precisam ser baixos e sua remoção não deve afetar os objetivos dos trabalhos de interpretação e correlação geológica.

Tabela 1 - Minerais radioativos de acordo com Telford *et al.* (1990).

Mineral	Ocorrência
POTÁSSIO	
Feldspatos (ortoclásio, microclinas)	Rochas ígneas ácidas e pegmatitos
Alunita	Rochas ígneas ácidas e pegmatitos, alterações em ácidas vulcânicas
Silvita, carnalita	Depósitos salinos em sedimentos
TÓRIO	
Monazita	Granitos, pegmatitos, gnaisses
Torianita	Granitos, pegmatitos, aluviões
Torita, uranotorita	Granitos, pegmatitos, aluviões
URÂNIO	
Uraninita	Granitos, pegmatitos
Carnotita	Arenitos
Gumita	Associadas com uraninita

Nos levantamentos aerogeofísicos contratados pelo Serviço Geológico do Brasil, as companhias contratadas entregam os resultados com os dados corrigidos e nivelados em malhas interpoladas e, no caso dos dados magnetométricos, com o efeito do campo magnético da Terra removido por meio de um modelo atualizado denominado *International Geomagnetic Reference Field (IGRF)*.

3.5. Plataforma de Processamento

Nos trabalhos de processamento foram empregadas ferramentas disponíveis no *Oasis Montaj* da *Seequent*, versão 9.0 ou superior. Entre as várias ferramentas disponíveis, as mais usadas foram: *Geophysic Leveling* para nivelamento, *Grid and Image* para interpolação e apresentação dos resultados, *GridKnit* para junção de diferentes projetos em uma mesma malha e *2D Filtering* para aplicação de transformações e filtragens nos dados.

3.6. Interpolação

Os dados são entregues pelas companhias de aerolevantamentos já interpolados. Entretanto, pode ser necessária, de acordo com a necessidade do geofísico a repetição do processo em diferentes etapas do seu projeto de trabalho. A interpolação é o processo em que se determina o valor de uma função em um ponto interno de um intervalo a partir dos valores dessa função nas fronteiras desse intervalo. Esse procedimento é executado com o objetivo de transformar dados discretos em um mapa de registro contínuo, mais adequado à interpretação. A partir do banco de dados produzido pelos levantamentos aerogeofísicos, os dados corrigidos e nivelados são interpolados em uma malha de 125 x 125 m pelo método *Bi-directional*. Este método produz malhas interpoladas em duas etapas de processamento: a) cada linha é interpolada ao longo da linha original de levantamento produzindo valores na intersecção de cada linha da malha com o valor observado; b) os pontos de intersecção para cada linha são interpolados na direção ortogonal para produzir valores em cada ponto requerido da malha.

3.7. Junção dos Diferentes Projetos

A área de estudo engloba partes de três diferentes projetos aerogeofísicos (Figura 5). Portanto, uma das tarefas mais importantes deste trabalho foi conectar os dados magnetométricos e gamaespectrométricos de cada projeto em malhas individuais para toda a área de estudo. Essa tarefa implicou algumas vezes na necessidade do reprocessamento e nivelamento dos dados brutos. Para junção dos projetos foi empregada a ferramenta *GridKnit*, que utiliza técnicas de fusão de malhas que reduzem o efeito de artefato que ocorre geralmente nas interfaces entre dados de diferentes projetos. Essa tarefa foi muito mais complicada quando aplicada nos dados gamaespectrométricos. Isso decorreu por causa das diferenças nos sensores utilizados em cada levantamento. Neste trabalho, o principal problema de junção de dados ocorreu com o canal de contagem total e equivalente urânio. Por causa da baixa qualidade do resultado da junção do canal de contagem total ele não será apresentado neste informe.

3.8. Aplicação de Transformações e Filtros nos Dados Aeromagnetométricos

Os procedimentos de filtragens dos dados aeromagnetométricos foram efetuados por meio do *2D Filtering*. Esse sistema é constituído por um grupo de programas que aplicam filtragens bidimensionais em dados interpolados de campo potencial (magnéticos e gravimétricos) no domínio do número de onda. As técnicas utilizadas são adaptadas dos trabalhos de Bhattacharyya (1966) e Spector e Grant (1970). Os filtros são aplicados nos dados após um pré-processamento para remover tendências, preenchimento de espaços vazios e sua transformação para o domínio do número de onda por meio da técnica de *Fast Fourier Transform (FFT)*. Após a filtragem, a malha de dados é transformada de volta para o domínio do espaço. Nos itens a seguir serão apresentados os resultados dos processamentos e transformações aplicados nos dados aerogeofísicos. Para cada produto resultante de uma transformação ou filtragem existe uma breve descrição dos fundamentos teóricos e utilidades práticas dos resultados.

4. RESULTADOS

4.1. Mapas Magnetométricos

Uma das principais finalidades do uso de dados magnetométricos é encontrar corpos de minério. Só com uma extensa cobertura de dados magnetométricos é possível descobrir novas jazidas de minerais metálicos. De acordo com Isles e Rankin (2013), sem os extensos levantamentos magnetométricos realizados na Austrália e Canadá, grandes minas de classe mundial não teriam sido encontradas.

Uma das mais importantes contribuições dos dados magnetométricos é sua potencialidade para desvendar a terceira dimensão dos dados geológicos. Feições geológicas como corpos e estruturas podem ser inferidas em profundidade por meio de interpretações e modelagens. As zonas de cisalhamento são as estruturas mais evidentes na magnetometria; contudo, sua contribuição para a delimitação tridimensional de formações vulcânicas, intrusões de rochas básicas e de granitoides magnéticos também é fundamental.

No início das pesquisas para localização de jazidas de petróleo e antes do advento e avanços nas técnicas do método sísmico, a magnetometria foi uma ferramenta importante. Entretanto, a mesma técnica aplicada com dados magnetométricos na pesquisa de petróleo pode ser empregada para estudos de água subterrânea. Estruturas, tais como zonas de cisalhamento, facilmente identificadas pelo método, podem condicionar depressões tectônicas com maior acúmulo de água ou barreiras hidráulicas, que dificultam o fluxo da água e compartimentam bacias sedimentares. Nas rochas cristalinas, lineamentos magnéticos são correlacionados com falhas ou zonas de fraturas regionais, com importância na identificação de áreas de detalhes para prospecção de aquíferos fraturados.

Para a interpretação de dados magnetométricos regionais e sua aplicação em estudos geológicos é necessária a remoção de um modelo de campo magnético da Terra (*International Geomagnetic Reference Field - IGRF*). O resíduo resultante é empregado na interpretação de anomalias, domínios, lineamentos e modelagens dos dados para integração com informações geológicas e de recursos minerais.

4.1.1. Anomalias Magnetométricas

A anomalia magnetométrica resultante da remoção do *IGRF* na latitude magnética deste projeto apresenta

um emparelhamento de positivos e negativos, com o positivo a norte e o negativo a sul (Figura 7A). A relação frequência-amplitude das anomalias permite interpretá-las qualitativamente em termos de dimensão e profundidade. Nos trabalhos de mapeamento e prospecção devem ser destacadas as anomalias cuja relação frequência-amplitude indique profundidades rasas. Nas latitudes magnéticas atuais da área deste estudo (Figura 7A), as fontes das anomalias magnéticas devem ser procuradas próximas dos centros dos dipolos. Variações no formato desses dipolos são importantes, e podem indicar diferenças quanto à forma, sentido de mergulho e profundidade do corpo magnético.

Para Isles e Rankin (2013), embora a anomalia magnetométrica sem aplicação de transformações ou filtros possa não ser a forma de dados mais usada na interpretação, deve sempre ser considerada como o passo inicial na interpretação, além de constituir um ponto de referência essencial em relação aos produtos transformados ou filtrados.

A observação da Figura 7A demonstra que ocorrem dois fortes lineamentos magnéticos, um no Norte, outro no Sudoeste, relacionados com as zonas de cisalhamento dos lineamentos Patos e Pernambuco, respectivamente. Estes lineamentos estruturais separam as três subprovíncias da Província Borborema: Norte, Transversal e Sul (Figura 1). Entre os dois principais lineamentos são observados a dominância de *trends* magnéticos que caracterizam o padrão NE-SW dos terrenos, corpos e zonas de cisalhamento da Subprovíncia Transversal.

4.1.2. Anomalia Magnetométrica Reduzida ao Polo

A Figura 7B apresenta a anomalia magnetométrica reduzida ao polo. Essa transformação produz uma nova versão dos dados de anomalias magnetométricas. Ela é utilizada para centralizar os picos das anomalias sobre suas fontes, sem perder significado geofísico, tornando os dados mais fáceis de serem interpretados. O seu operador matemático é expresso da seguinte maneira:

$$L(\theta) = \frac{1}{[\text{sen}(I_a) - i \cos I \cdot \cos(D + \theta)]^2},$$

onde, I_a é a inclinação geomagnética, I é a inclinação para a correção da amplitude e D é a declinação.

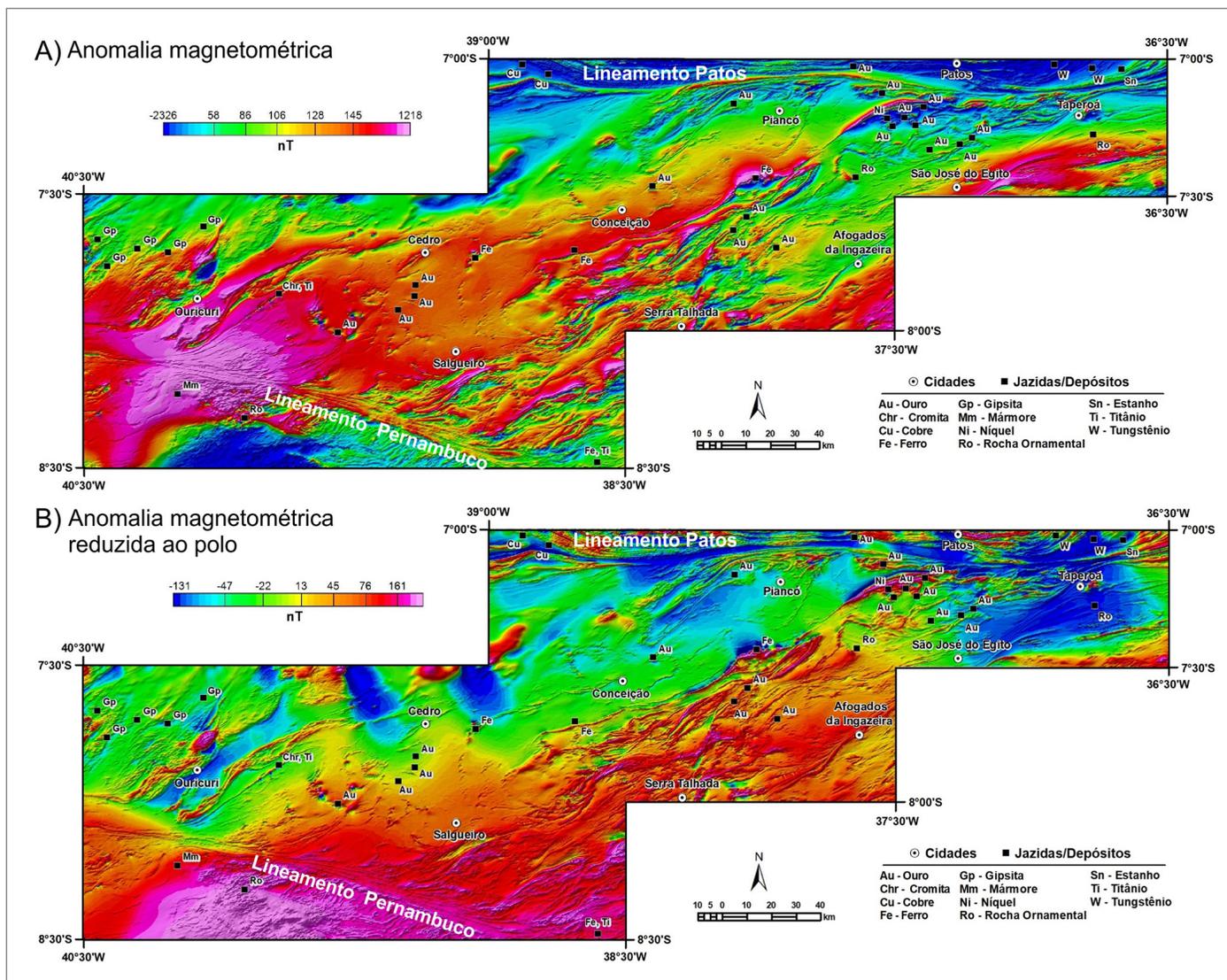


Figura 7 - A) Anomalia magnetométrica; e B) Anomalia magnetométrica reduzida ao polo. Imagens sombreadas (declinação=315°, Inclinação=35°) com localização dos recursos minerais e dos dois lineamentos tectônicos principais.

A redução ao polo é efetuada na malha de dados das anomalias magnetométricas com o objetivo de restaurar diretamente sobre o corpo causador uma assinatura de amplitude positiva, ajudando na interpretação qualitativa dos dados. Esse procedimento é inspirado no conceito de anomalia pseudo-gravimétrica desenvolvido por Baranov (1957), visando simplificar a forma complexa apresentada pelos dados magnéticos, de maneira que eles simulem um comportamento semelhante ao de corpos com contrastes de densidade. O emprego do parâmetro de inclinação para a correção da amplitude é empregado para minimizar os efeitos causados pelo crescimento da instabilidade no uso dos operadores matemáticos nas regiões próximas ao Equador magnético.

4.1.3. Separação das Anomalias Magnetométricas em Rasas e Profundas

Dados magnetométricos fornecem uma visão em profundidade que corresponde à terceira dimensão simplificada dos dados geológicos, sendo imprescindível em áreas de escudos e faixas dobradas pré-cambrianas pouco conhecidas ou parcialmente encobertas por sedimentos fanerozoicos. Em razão disto, na interpretação geológica de dados magnetométricos é necessário discriminar as anomalias causadas por fontes

rasas das anomalias causadas por fontes profundas. As fontes magnéticas profundas podem estar associadas com corpos e estruturas geológicas, tornando-se importantes para a compreensão do arcabouço geotectônico; as fontes rasas podem ser de interesse prospectivo nas pesquisas de minerais metálicos, restritas aos níveis crustais rasos. Para a interpretação das fontes rasas e profundas é necessário a aplicação de filtros no domínio do número de onda objetivando separá-las. Com essa intenção foi empregado o filtro gaussiano regional/residual.

O filtro gaussiano permite a separação regional/residual de dados de métodos potenciais (magnetométricos e gravimétricos). Ele funciona como um passa banda, porém os dados de saída apresentam uma distribuição gaussiana (normal) e o ponto de corte (*cutoff point*) escolhido é o desvio padrão da função gaussiana.

O operador matemático do filtro gaussiano é dado pela equação:

$$L(r) = 1 - e^{-\frac{r}{r_0}}^2$$

onde r_0 é o desvio padrão da função gaussiana em ciclos/metros.

A escolha do ponto de corte r_0 foi efetuada a partir da análise do espectro de potência (Figura 8) de acordo com o método desenvolvido por Spector e Grant (1970).

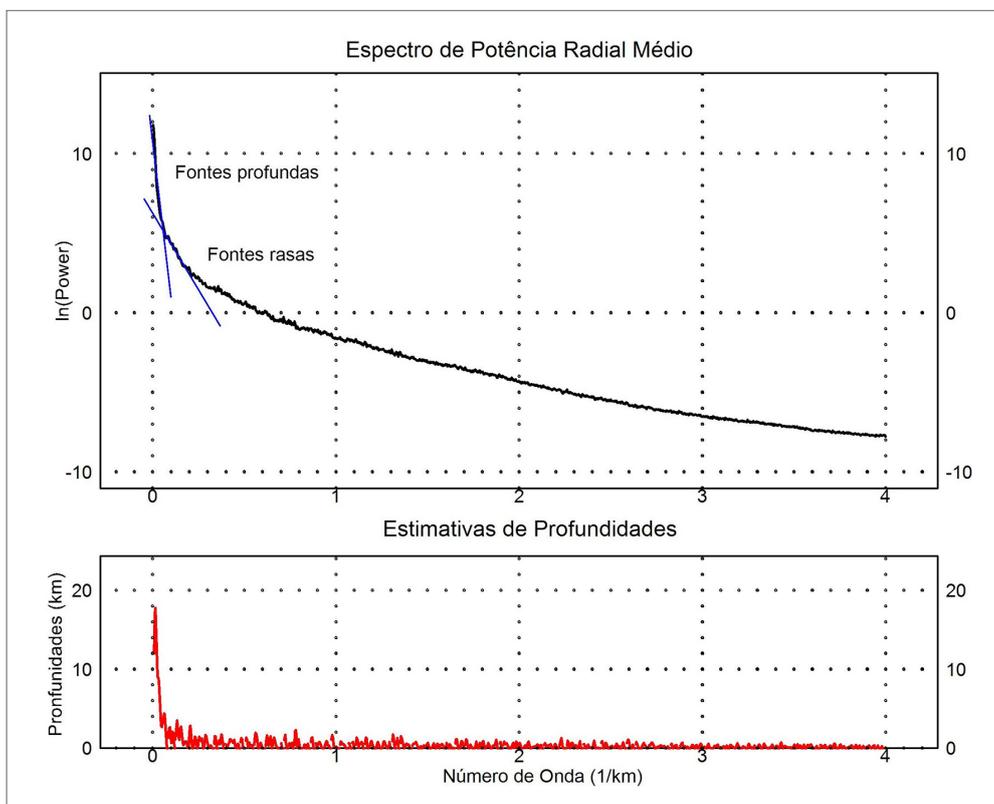


Figura 8 - Espectro de potência radial médio com estimativas de profundidades médias do topo das fontes magnéticas da área de estudo. Este espectro foi empregado para separar fontes magnéticas rasas (componente residual – Figura 9A) e fontes profundas (componente regional -- Figura 9B) por meio do filtro gaussiano de separação regional-residual.

Observa-se que o número de onda correspondente ao limite entre fontes profundas (profundidades entre 4 e 18 km) e as fontes rasas (profundidades médias do topo entre 0 e 4 km) é 0,060 ciclos/km. O operador gaussiano residual foi utilizado nos dados reduzidos ao polo para passar frequências espaciais maiores que 0,060 ciclos/km, gerando o mapa representativo das fontes rasas e anomalias com comprimentos de onda menores que 17 km (Figura 9A). O operador gaussiano regional foi aplicado nos dados reduzidos ao polo para passar frequências espaciais menores que 0,060 ciclos/km, gerando, teoricamente, uma malha de dados com assinaturas causadas apenas por fontes profundas e anomalias com comprimentos de onda maiores que 17 km (Figura 9B).

4.1.4. 1ª Derivada Vertical da Anomalia Magnetométrica e Interpretação dos Lineamentos Magnéticos

As derivadas são filtros empregados para enfatizar fonte rasas e são muito utilizados para interpretar lineamentos magnéticos. Pela sua capacidade de remover fontes profundas apresentam boa aplicabilidade no entendimento da tectônica rasa e em trabalhos de prospecção. O operador matemático da 1ª derivada é definido pela seguinte expressão:

$$L(r) = r^n,$$

onde $n=1$ é a ordem de diferenciação aplicada.

A imagem da 1ª derivada vertical (Figura 10A) foi a ferramenta principal para a interpretação dos lineamentos magnéticos (Figura 10B). Na posição geomagnética da área do projeto, lineamentos magnéticos interpretados na imagem da 1ª derivada vertical são traçados no ponto médios entre o positivo e o negativo. Para facilitar a interpretação, reduzir ambiguidades e fazer comparações, também foi empregada a componente residual da redução ao polo (Figura 9A), onde o alinhamento deve ser interpretado exatamente sobre o eixo positivo. A observação dos lineamentos magnéticos interpretados (Figura 10 B) e gráfico de roseta demonstra que ocorre uma predominância de lineamentos na direção NE-SW.

Lineamentos geofísicos podem revelar aspectos tectônicos e litológicos importantes de uma área de estudo porque eles contêm informações da subsuperfície. Os lineamentos foram interpretados segundo três diferentes atributos: i) eixos localizados entre positivos e negativos ou eixos positivos na anomalia reduzida ao polo; iii) gradientes entre anomalias; e iii) truncamentos. Os eixos identificam fontes magnéticas alongadas que podem representar diques ou estruturas. Os gradientes podem representar contatos normais ou tectônicos entre rochas com magnetização

diferentes. Por fim, truncamentos são feições importantes para a identificação de estruturas rúptil ou dúctil-rúptil.

4.1.5. Gradiente Total e Interpretação dos Corpos Magnéticos

Anteriormente denominado amplitude do sinal analítico (MACLEOD *et al.*, 1993), o gradiente total é uma técnica de filtragem muito eficiente na localização de limites e na profundidade dos corpos. Sua função é expressa por um vetor de adição de duas componentes reais nas direções (X e Y) e por uma imaginária na direção Z. O gradiente total é uma opção alternativa muito boa à redução ao polo para o problema de localização de fontes magnéticas em baixas latitudes. Por causa do emprego de derivadas, este filtro remove fontes profundas. Porém, define muito bem a localização das fontes rasas, tendo um emprego bastante eficiente em estudos de prospecção e na definição de locais para perfuração de corpos magnéticos. O operador matemático da 1ª derivada é definido pela seguinte expressão:

$$GT = \sqrt{\frac{\partial M^2}{\partial x} + \frac{\partial M^2}{\partial y} + \frac{\partial M^2}{\partial z}}$$

onde M é a anomalia magnetométrica e x e y são direções horizontais e z é a direção vertical.

Por causa da transformação nos dados que permite a localização precisa das fontes magnéticas por meio de uma anomalia monopolar positiva, a imagem do gradiente total (Figura 11A) foi a ferramenta principal para a interpretação dos corpos magnéticos (Figura 11B). Para facilitar a interpretação, reduzir ambiguidades e fazer comparações, também foi empregada a componente residual da redução ao polo (Figura 9A), onde a fonte magnética deve ser interpretada também sobre o eixo positivo.

4.1.6. Principais Correlações Geológicas dos Dados Magnetométricos

As principais assinaturas magnéticas da área de estudo são os lineamentos associados com as extensas zonas de cisalhamento de Pernambuco e Patos que separam feições magnéticas com diferentes padrões que correspondem às variações de domínios tectônicos e tipos litológicos (figuras 7, 8, 9 e 10). Ramificando-se a partir destes lineamentos principais ocorrem outros lineamentos secundários com direções predominantemente NE-SW, a maioria correlacionada com zonas de cisalhamento. No mapa da anomalia magnetométrica (Figura 7A) destacam-se as anomalias com grandes amplitudes e grandes comprimentos de onda que são produzidas por fontes magnéticas com profundidades média dos topos de até 17 km.

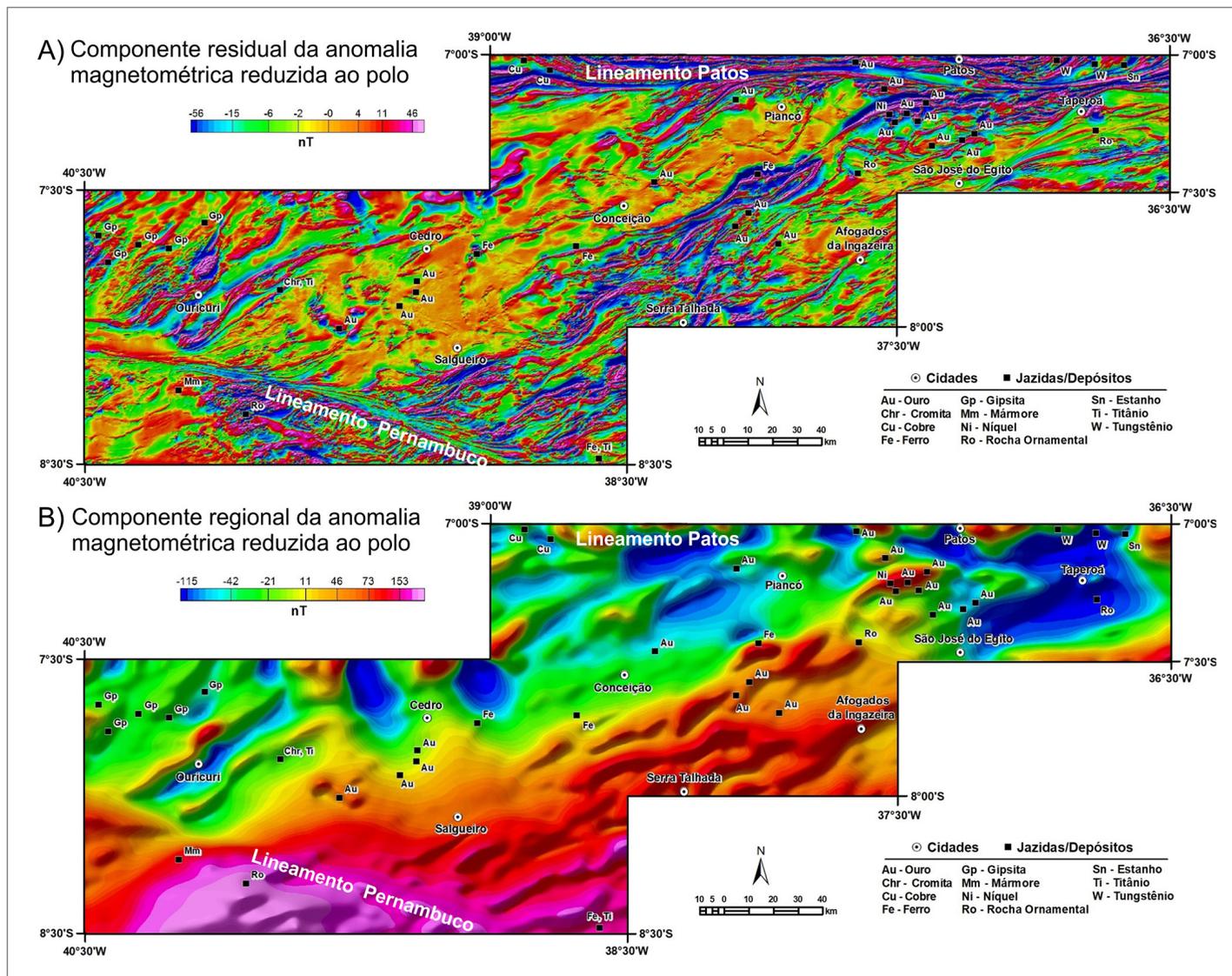


Figura 9 - (A) Componente residual da anomalia magnetométrica; e (B) Componente regional da anomalia magnetométrica reduzida ao polo (B). Imagens sombreadas (declinação=315°, inclinação=35°) com a localização dos recursos minerais e dos dois lineamentos tectônicos principais.

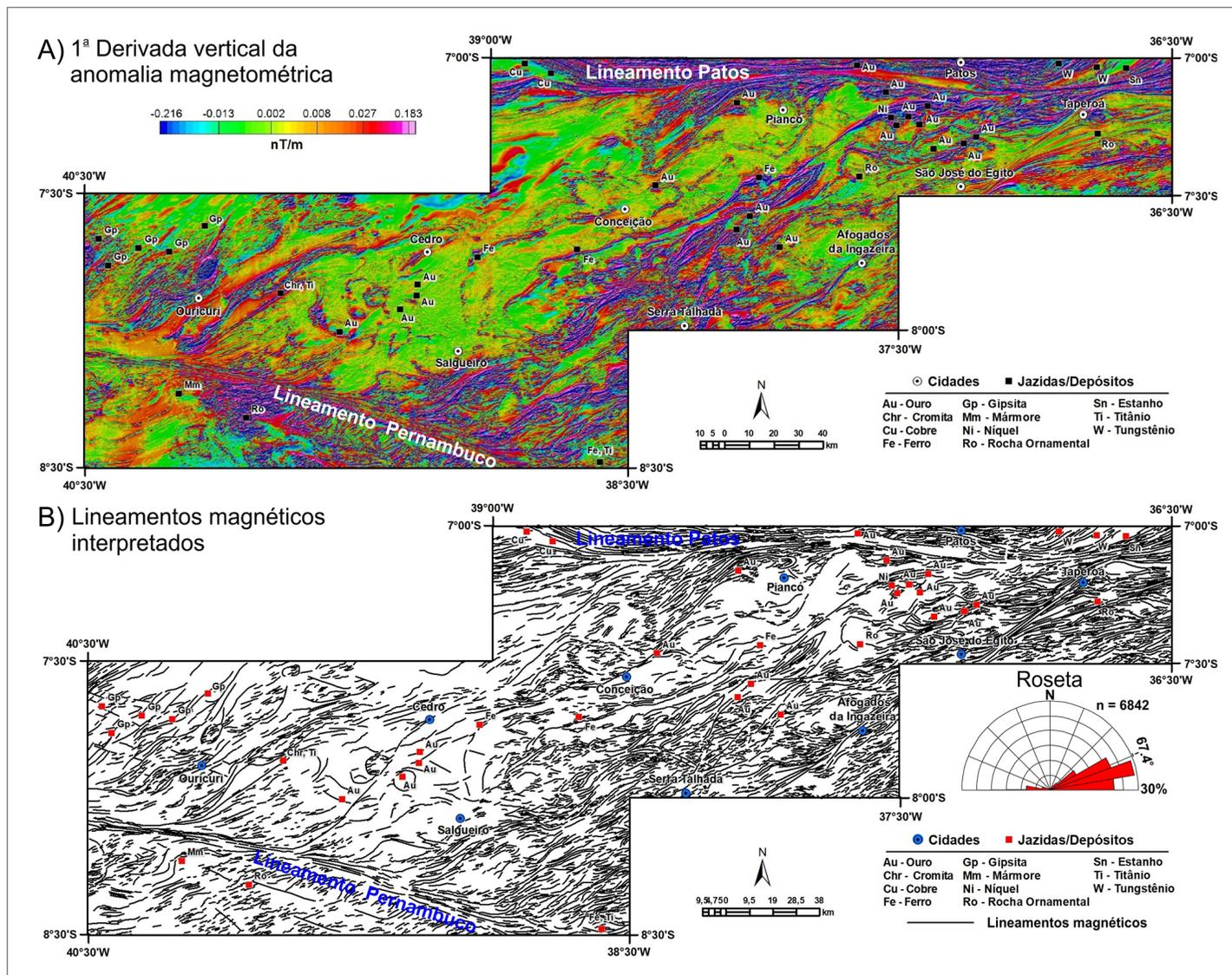


Figura 10 - A) Primeira derivada vertical da anomalia magnetométrica. Imagem sombreada (declinação=315°, inclinação=35°); e B) Lineamentos magnéticos interpretados com a localização dos recursos minerais e dos dois lineamentos tectônicos principais.

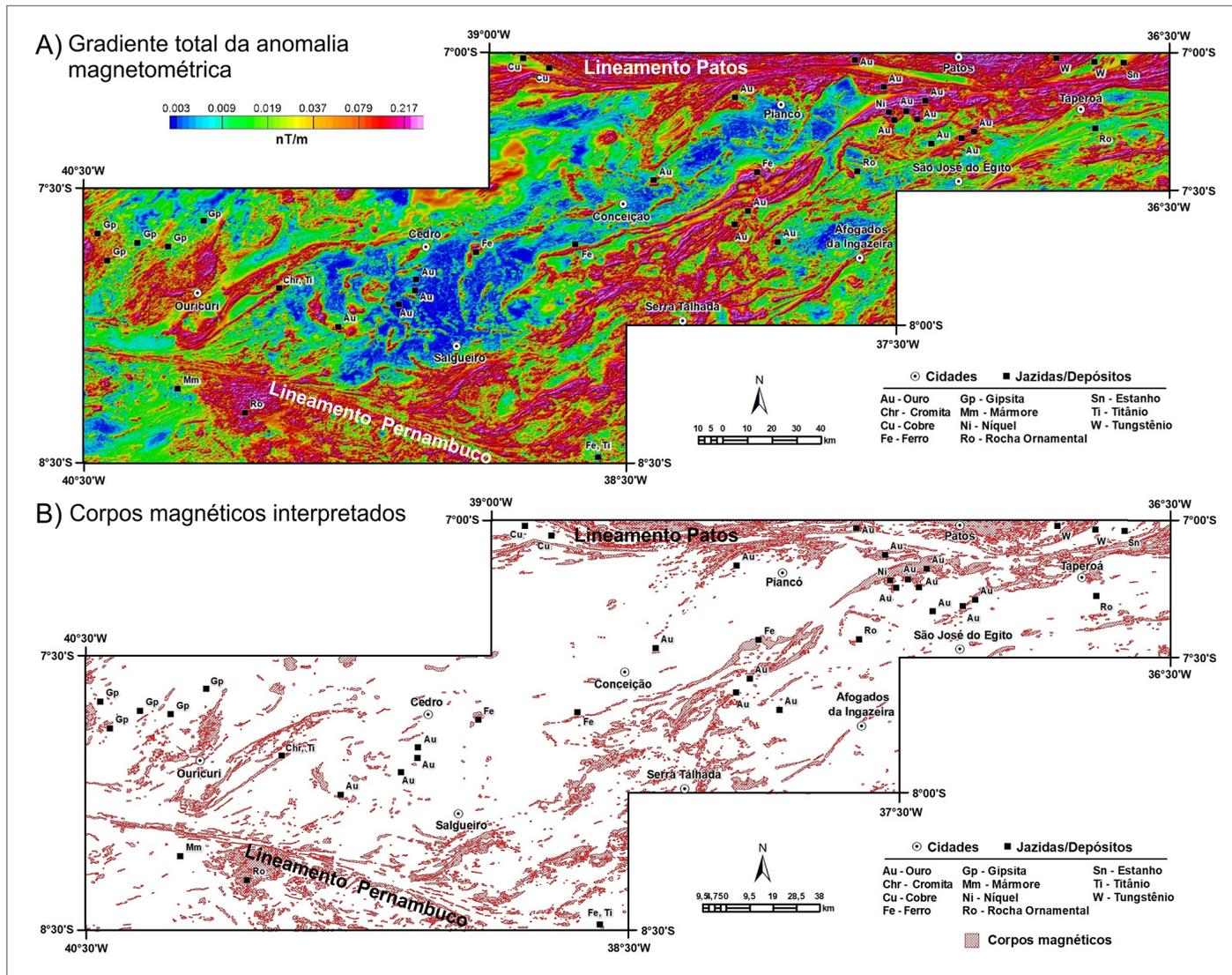


Figura 11 - A) Gradiente total da anomalia magnetométrica. Imagem sombreada (declinação=315°, inclinação=35°); e B) Corpos magnéticos interpretados com localização dos recursos minerais e dos dois lineamentos tectônicos principais.

No sudoeste destaca-se uma dessas anomalias, representada por um polo negativo que ocorre no mapa de anomalias magnetométricas (Figura 7A) e por um polo positivo no mapa da redução ao polo (Figura 7B). Ela tem fonte profunda e está associada à existência de um grande volume de rochas magnéticas localizadas nos limites entre os domínios geológicos do Terreno Pernambuco-Alagoas e do Cráton São Francisco (Figura 3). Neste caso também se observa uma correspondência com fontes magnéticas mais rasas no mapa de gradiente total (Figura 11A). A correlação geológica principal dessa anomalia é com rochas arqueanas do Complexo Entremontes (Figura 3).

Em diversas regiões da área de estudo ocorrem anomalias magnéticas com menores comprimentos de onda relacionadas com fontes rasas, algumas com causa conhecida, outras ainda necessitando a investigação de campo. Entre elas se destaca o *trend* de anomalias magnéticas na região central da área de estudo, de pequeno comprimento de onda e alongadas na direção NE-SW (figuras 10A e 11A), correlacionadas com formações ferríferas hospedadas nos metassedimentos do Grupo Cachoeirinha no Terreno Piancó Alto Brígida (Figura 3). Destaca-se também um expressivo volume de anomalias magnéticas no interior do Terreno Alto Pajeú, associadas com metavulcânicas ácidas/intermediárias e anfíbolitos do Complexo Riacho Gravatá, bem como, com granitoides magnéticos (Figura 3).

Nos domínios das rochas metassedimentares do Grupo Cachoeirinha o relevo magnético é suave por causa da ausência de minerais ou rochas magnéticas intercaladas. O mesmo ocorre com a Bacia Araripe que comporta uma espessura grande de sedimentos não magnéticos (figuras 3 e 7). Contudo, os dados magnetométricos são importantes na interpretação de estruturas associadas com evolução tectônica dessas bacias e na identificação de rochas magnéticas encobertas pelos sedimentos.

4.2. Mapas Aerogamaespectrométricos

O método gamaespectrométrico mede a taxa e a energia da radiação gama proveniente do potássio, tório e urânio contido nas rochas (MINTY, 1997). Nos levantamentos são empregados cristais detectores (geralmente de iodeto de sódio). Eles absorvem a radiação gama e a cintilação dessa radiação no cristal que pode ser medida em contagem por segundo (cps). Quando existem sistemas calibradores é possível quantificar o potássio (em porcentagem), o equivalente tório (em ppm) e o equivalente urânio (em ppm). Contudo, não é medida diretamente a intensidade da energia desses radioisótopos, e sim, dos radioisótopos filhos ^{40}K para o potássio, ^{208}Tl para o tório e ^{214}Bi para o urânio. Por este motivo, foi convencionado o uso de “e” antes dos símbolos do urânio (eU) e do tório (eTh), para indicar que as concentrações são equivalentes. É importante enfatizar que o método

radiométrico é empregado para investigação de variações que ocorrem apenas na superfície da rocha. Qualquer obstáculo não radioativo sobre a rocha causa supressão do sinal. Por exemplo, uma cobertura de 20 cm de areia quartzosa é capaz de suprimir metade da radiação da rocha. Por esse motivo, é necessário ao intérprete levar em consideração o efeito causado por coberturas sedimentares alóctones, vegetação densa e corpos de água que ocorrem na área de levantamento. Neste último caso, rios que carregam muito material erodido em suspensão na água, podem apresentar sinal radioativo, como é o caso dos rios da Região Amazônica. Por outro lado, os rios secos da região semiárida do Nordeste do Brasil podem apresentar aluviões com sinal radioativo de material que foi carregado por longas distâncias.

O potássio, o tório e o urânio aumentam nas rochas ácidas e diminuem nas rochas básicas. Entre eles, o tório tem o comportamento menos móvel, enquanto o urânio é o mais móvel. Comumente, o urânio quando liberado das rochas hospedeiras tende a ser absorvido pelos minerais argilosos formados pelo intemperismo. De outra forma, nas rochas sedimentares arenosas, a existência de anomalias radiométricas indica a presença de minerais pesados, tais como, zircão e monazita, ricos em tório. Também, é possível inferir pela observação prática e como regra geral que nos granitoides o aumento de concentração desses radioisótopos pode ser também uma indicação do aumento da alcalinidade.

4.2.1. Potássio (K)

Na área de estudo o K apresenta uma média de 2,3 % (Figura 12A). Esta média está muito próxima dos valores médios informados em Dickson e Scott (1997) para a crosta superior (2,35%). O K é um metal alcalino, bom condutor de calor e eletricidade que se oxida facilmente. Em virtude de sua alta reatividade não é encontrado livre na natureza. É um dos constituintes maiores dos minerais formadores de rocha e o sexto mais comum na natureza. Durante a diferenciação magmática o mesmo se concentra progressivamente em K-feldspatos, como o ortoclásio e microclina, e outros silicatos, entre eles alunita, leucita e muscovita, o que faz com que fique mais enriquecido nas rochas ácidas do que nas básicas (DICKSON; SCOTT, 1997). Pode também estar presente em soluções hidrotermais associado a mineralizações de cobre pórfiro e em pegmatitos (AIRO, 2002). Formam depósitos químicos em evaporitos (BIONDI, 2003) e o principal uso do K é como fertilizante na agricultura, na forma de sulfatos e cloretos, em complementação ao uso de nitratos e fosfatos.

4.2.2. Equivalente Tório (eTh)

Na área de estudo o eTh apresenta uma média de 8,2 ppm (Figura 12B), muito abaixo dos valores médios

informados em Dickson e Scott (1997) para a crosta superior (12 ppm). As principais características do tório de acordo com o Atlas Geoquímico de Roraima (FREITAS; MARMOS, 2017) são apresentadas a seguir. O Th é um metal da série dos actínídeos e em condição ambiente é sólido, de cor branca brilhante a prateada. É um condutor intermediário de calor e corrente elétrica. Possui forte caráter litófilo, concentrando-se nas partes superiores da litosfera, sendo sua distribuição fortemente controlada pelos estados de oxidação e pelo sistema Eh-pH (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001). Os minerais de tório e os enriquecidos em tório são geralmente resistatos e possuem mobilidade reduzida no intemperismo, concentrando-se assim nos sedimentos residuais em regiões de clima tropical, ou em areias e *placers* como minerais pesados (DICKSON; SCOTT, 1997). Os minerais de minério são monazita, thorita, euxenita, sendo também encontrado em outros minerais, associado a ETR e urânio, bem como a esfalerita, apatita e zircão. Formam depósitos em veios de rochas alcalinas e são utilizados como fonte de energia nuclear, em ligas metálicas com o Mg, como catalisador de reações, na fabricação de filamentos de W e células fotoelétricas.

4.2.3. Equivalente Urânio (eU)

Na área de estudo o eU apresenta uma média de 1,7 ppm (Figura 12C), muito abaixo dos valores médios informados em Dickson e Scott (1997) para a crosta superior (3,0 ppm). As principais características do urânio de acordo com o Atlas Geoquímico de Roraima (FREITAS; MARMOS, 2017) são apresentadas a seguir. O U é um metal do grupo dos actínídeos, não possui cor característica, é denso, reativo, dúctil, maleável, oxida-se facilmente e possui como característica principal ser altamente radioativo. O íon U^{+4} concentra-se nos últimos estágios de diferenciação magmática, nas estruturas do zircão, allanita, esfalerita, apatita, monazita e minerais de tório, ítrio e lantanídeos. O U é comumente enriquecido nos granitos, pegmatitos e depósitos hidrotermais (DICKSON; SCOTT, 1997). Suas associações metalogenéticas são com V, As, P, Mo, Se, Pb e Cu. Em condições de intemperismo, forma complexos orgânicos facilmente solúveis e móveis, relativamente estáveis em condições áridas. Na litosfera sua distribuição é controlada pelos estados de oxidação e pelo sistema Eh-pH. Os minerais de minério são uraninita, pechblenda (variedade impura e amorfa da uraninita), carnotita, euxenita, autunita, torbenita, samarskita, margaritasita, lantinita e albertita. É usado principalmente como combustível nuclear para geração de energia elétrica, explosivos nucleares e produção de raios X. Forma depósitos relacionados com vulcânicas félsicas e máficas subaéreas; associado aos

depósitos de Au em rochas sedimentares clásticas, tipo folhelhos negros ou conglomerados e arenitos, em rochas metamórficas regionais junto com o Au; em rochas alcalinas (carbonatitos) e depósitos do tipo *IOCG*; relacionados a inconformidades (e.g. BIONDI, 2003).

4.2.4. Composição Ternária RGB e Separação em Domínios Gamaespectrométricos

Este mapa é resultante de uma composição em falsa cor dos canais de K, eTh e eU, em que para cada radioelemento é atribuída uma cor (Figura 13A). Na Composição Ternária RGB, a cor é vermelha (*R-red*) para as rochas ricas em K; verde (*G-green*) para as rochas ricas em eTh; e azul (*B-blue*) para as rochas ricas em eU. Quando os três são altos, a soma das cores resulta na cor branca. Quando os três são baixos a cor é preta. Porém, corpos d'água quando não possuem muito material em suspensão também apresentam cor preta porque na água limpa a radioatividade é baixa para os três radioelementos.

A interpretação dos domínios gamaespectrométricos consistiu em uma avaliação discriminatória qualitativa entre concentrações de cada radioelemento em três classes, de baixo, médio e alto teor relativo. De acordo com esse critério foram separadas 27 classes que estão apresentadas na Figura 13B. Esta forma de separação em domínios produziu uma imagem simplificada da distribuição dos radioelementos, porém com as propriedades necessárias para permitir uma boa integração com dados geológicos.

A composição ternária tem o potencial de distinguir muito bem as unidades geológicas a partir da análise combinada dos três radioelementos (Figura 14). Contudo, alguns cuidados são necessários na sua interpretação, sobretudo pela ambiguidade associada ao processo de interpretação e correlação geológica de dados geofísicos. Como exemplos, a cor vermelha que deve representar teores alto de K e baixos teores de eTh e eU pode estar correlacionada com granitos ou sedimentos imaturos como grauvas. A cor branca pode ser produzida por sienitos ou vulcânicas ácidas. A cor preta pode ser rochas ultramáficas ou arenitos puros quartzosos. A cor verde pode ser associada com metassedimentos ou lateritas. Portanto, a interpretação de dados gamaespectrométricos requer a adição de informações complementares para que seja consistente no seu emprego em mapeamentos geológicos e na pesquisa de recursos minerais. A Figura 14 apresenta as diversas possibilidades de correlações geológicas que podem ser feitas a partir da composição ternária RGB. Contudo, além de demonstrar o seu potencial, também revela as muitas possibilidades de interpretações ambíguas que podem ocorrer quando apenas os dados gamaespectrométricos são utilizados como ferramenta de mapeamento geológico.

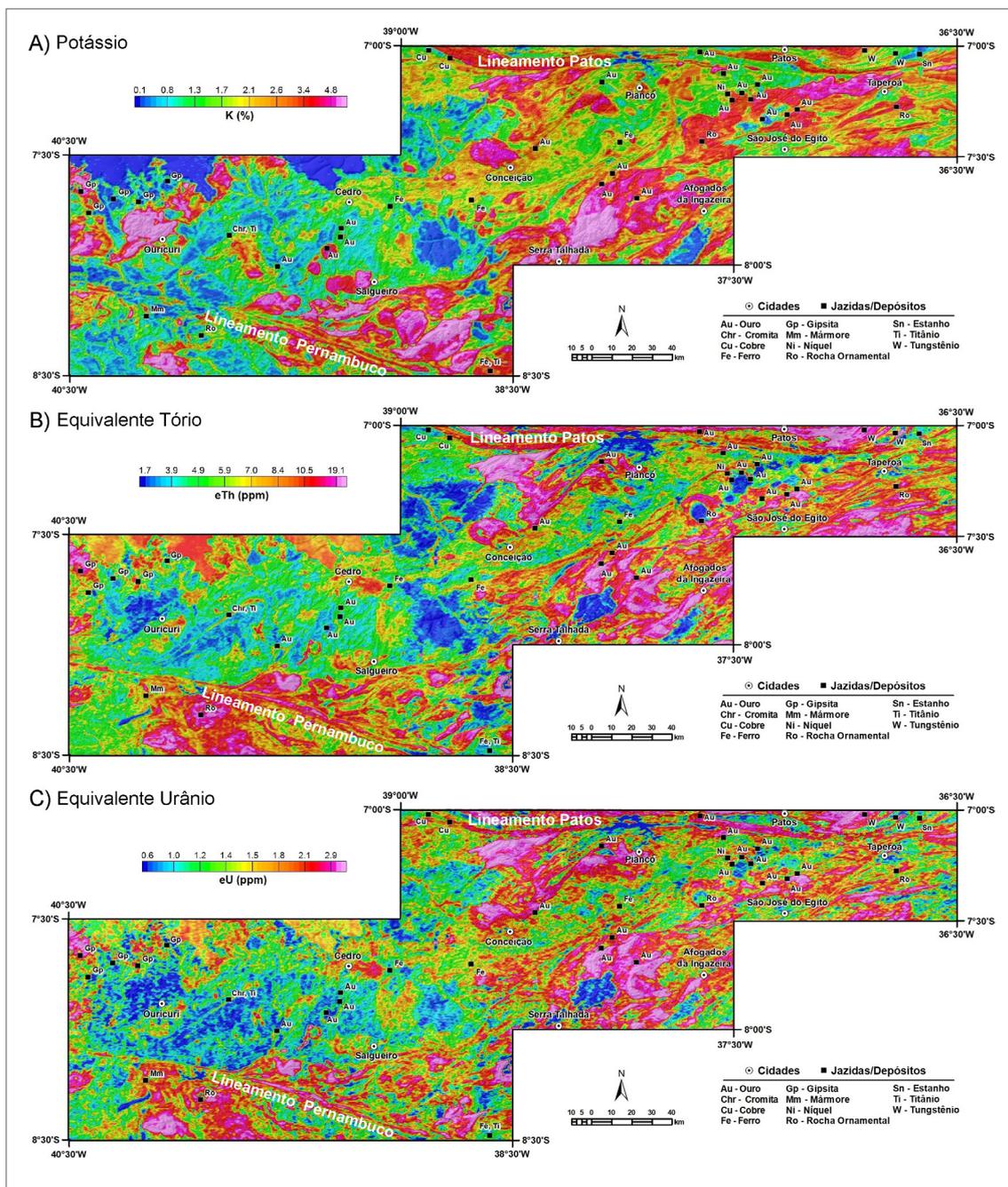


Figura 12 - Concentrações de K (A), eTh (B) e eU (C) com localização dos recursos minerais e dos dois lineamentos tectônicos principais.

4.2.5. Principais Correlações Geológicas dos Dados Gamaespectrométricos

Na área do projeto observa-se que a grande maioria das anomalias de K apresentam formas circulares ou elípticas alongadas (Figura 12A). Isto decorre da forte correlação deste elemento com intrusões de rochas ácidas de composição granítica. Destaca-se a linha de intrusões de sienitos que formam um alinhamento na região entre Taperoá (PB), Serra Talhada e Salgueiro (PE) (SIAL, 1986).

Nesse alinhamento ocorrem rochas ultrapotássicas com teores de K de até 10,0 %. Outras assinaturas de alto K ocorrem ao longo dos lineamentos Patos e Pernambuco, na região de Conceição (PB) e Ouricuri (PE). No contexto metalogenético, o K é um elemento importante na localização de mineralizações associadas com processos de hidrotermalismo, como ocorre na forte correlação de granitos ricos em K e zonas de cisalhamento com mineralizações de Au localizados a norte de Salgueiro (PE) [Distrito de Au de Serrita (e.g. TORRES *et al.*, 1986; MARINHO, 2012)

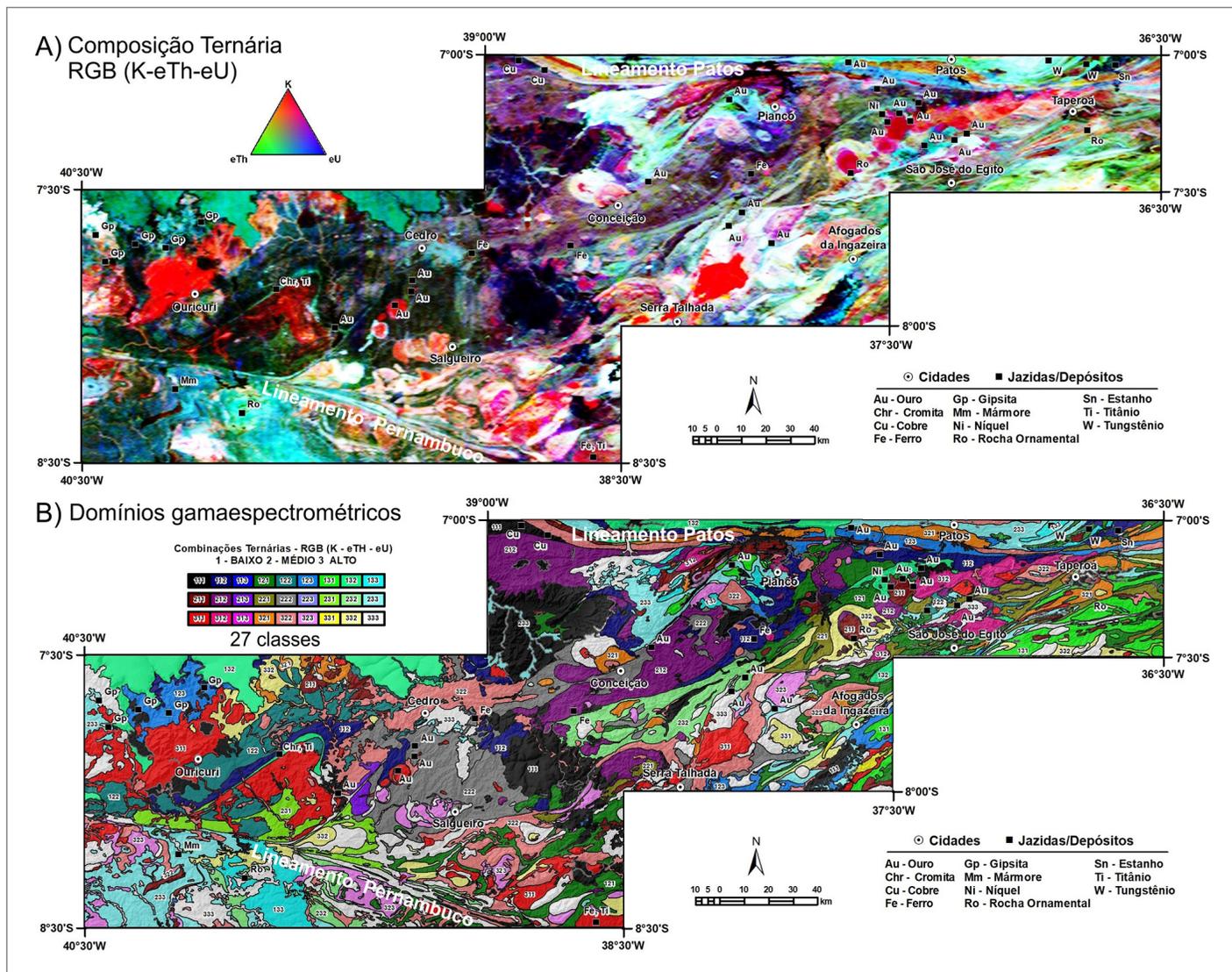


Figura 13 - A) Composição ternária RGB (K-eTh-eU) com transparência para o relevo digital; e B) Interpretação da composição ternária em 27 classes de altos, médios e baixos teores de K, eTh e eU, com transparência para o relevo digital. Estão localizados os recursos minerais e os dois lineamentos tectônicos principais.

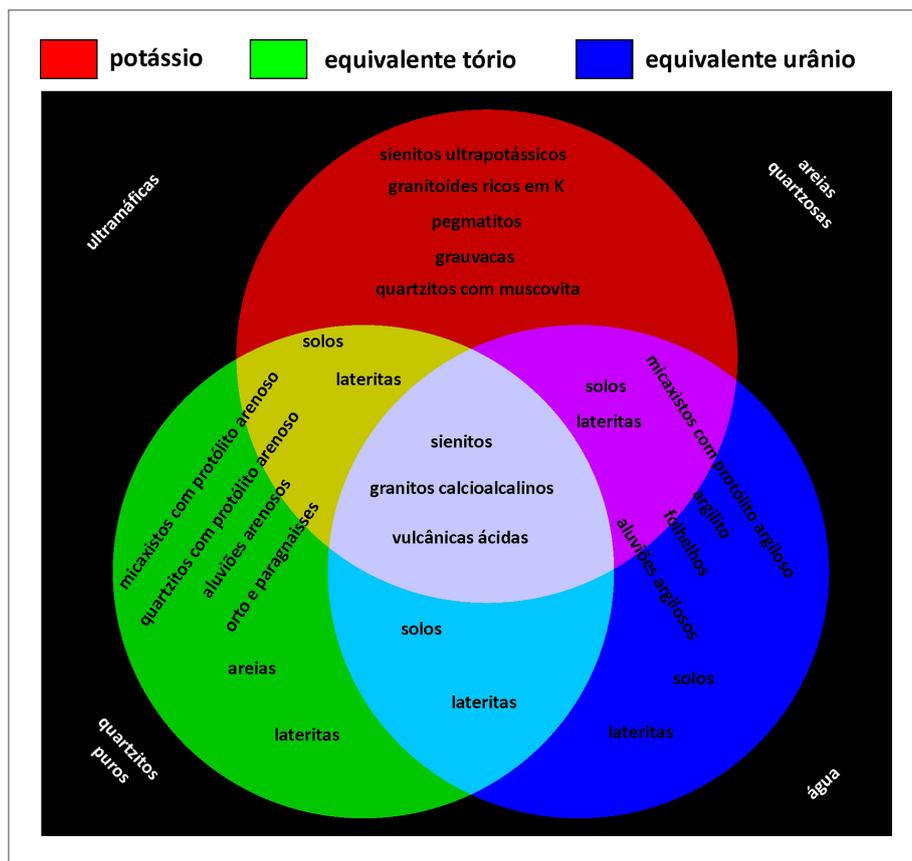


Figura 14 - Possibilidades de correlação entre tipos litológicos e tonalidades de cores em uma composição radiométrica ternária RGB (K-eTh-eU).

e Distrito de Au de Itapetim (e.g. COUTINHO e ADHERTON, 1998). Os sedimentos das bacias são empobrecidos em K (< 1,0%), como pode ser observado pela coloração azulada associada com a Bacia do Araripe apresentada no mapa de K (Figura 12A).

No mapa de Equivalente Tório (eTh), em comparação com o mapa de K, observa-se que apenas algumas assinaturas radiométricas apresentam o sinal de eTh com a mesma intensidade do K (Figura 12B). Isto pode indicar variações de composição entre as diversas intrusões que ocorrem nesses batólitos. Alguns dos corpos mais ricos em eTh possuem teores em torno de 100 ppm. As rochas metassedimentares das faixas dobradas Riacho do Pontal e Piancó-Alto Brígida apresentam baixos teores de eTh. Isto possivelmente decorre da composição argilosa original dos micaxistos. Algumas regiões com metassedimentos podem apresentar teores altos de eTh, sugerindo que nesses locais da bacia sedimentar original ocorreu a predominância de uma sedimentação arenosa cujos derivados metamórficos mantiveram os minerais pesados e resistentes ricos em eTh, como por exemplo, monazita e zircão. No contexto metalogênico, as regiões onde houve hidrotermalismo com aumento de K e diminuição de eTh são consideradas favoráveis para mineralizações de metálicos como Cu e Au. Nas bacias

sedimentares observa-se uma tendência de diminuição dos teores de eTh (< 5,0 ppm), da mesma maneira como ocorre com o K., contudo, como no caso da Bacia do Araripe (Figura 12B), a diminuição de intensidade é menor, sobretudo pela possibilidade de alguns sedimentos conterem minerais ricos em tório, ou por processo da laterização dos solos, porque o tório é menos móvel que o potássio e urânio. Portanto, o seu equilíbrio geoquímico lhe dá uma condição de bom marcador litológico (DICKSON; SCOTT, 1997).

Como esperado, o mapa de eU tem muitas semelhanças com o mapa eTh. Apesar de ser o mais móvel dos três radioelementos, ele tem um padrão de distribuição nas rochas muito semelhante ao eTh. Inclusive, com crescimento nas rochas portadoras de monazita e zircão. No contexto metalogênico é uma ferramenta fundamental na localização de jazidas de U e de fosfato. Além de ajudar a rastrear Elementos Terras Raras (ETR) e depósitos do tipo IOCG (*Iron Oxide Copper Gold ore deposits*).

4.3. Mapa de Interpretação dos Dados Aerogeofísicos

A Figura 15 apresenta o resultado final da integração de todos os dados apresentados ao longo deste trabalho a

partir de um método padrão simples de interpretação que pode ser empregado nas diversas regiões brasileiras. O mapa de interpretação apresentado deve servir de subsídio inicial para o mapeamento geológico tradicional com os seguintes objetivos: i) ampliar o entendimento do potencial de recursos minerais da área de trabalho mediante uma avaliação consistente e detalhada dos dados geofísicos e geológicos, e da relação com ocorrências e depósitos minerais conhecidos; ii)

melhorar a compreensão do arcabouço tectônico-estrutural da área de trabalho por meio de uma interpretação consistente dos lineamentos magnéticos; iii) gerar um produto que permita a seleção de áreas para detalhamentos geológicos e pesquisas de novos recursos minerais, e por consequência, a diminuição dos custos e prazos; iv) acelerar o conhecimento e a integração geológica de alvos e assinaturas geofísicas observadas nos aerolevantamentos.

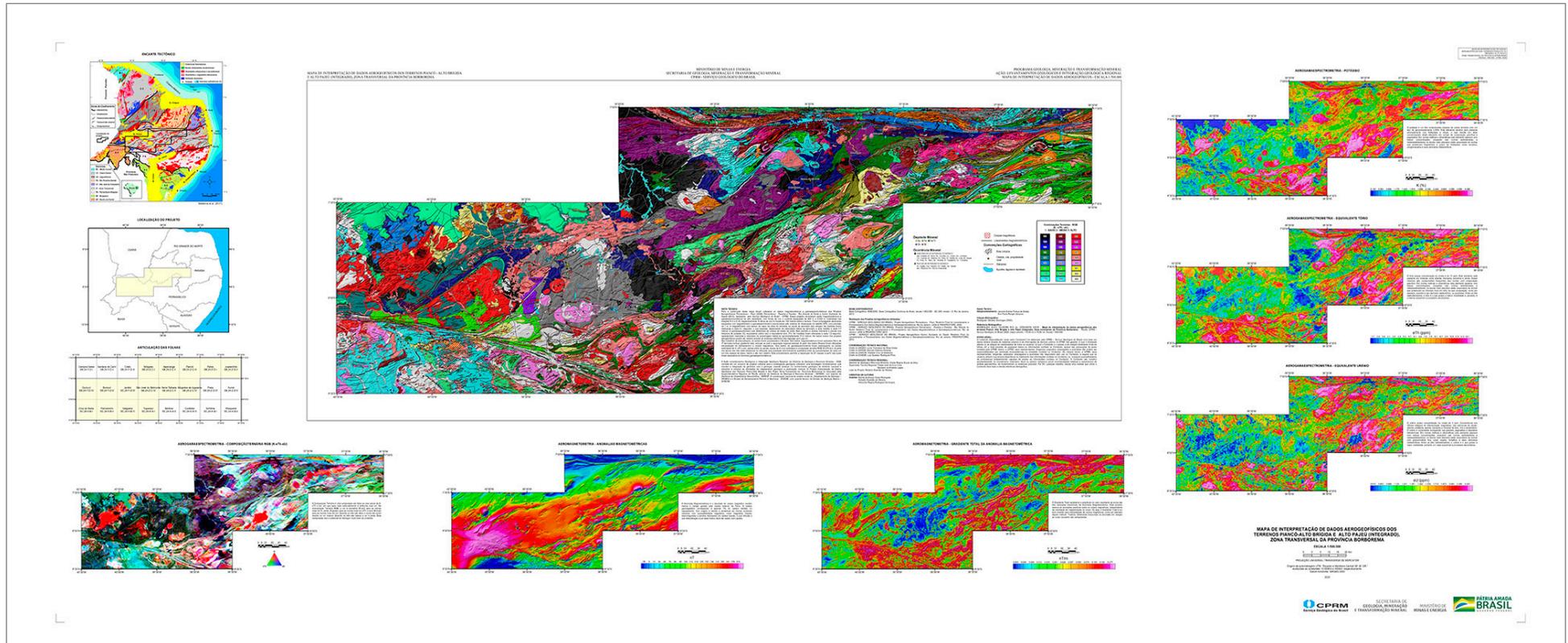


Figura 15 - Mapa de Interpretação de Dados Aerogeofísicos dos Terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú (Integrado), Zona Transversal da Província Borborema. O mapa na escala real pode ser acessado no RIGEO (<https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/21771>) ou no GEOSGB (http://geosgb.cprm.gov.br/downloads/index.php?dir=Levantamentos_Geofisicos&widget=1), acessando a pasta Mapas Aerogeofísicos.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, o processamento e a interpretação dos dados magnetométricos, considerando atributos das formas das anomalias e de seus gradientes, indicaram lineamentos e corpos que estão correlacionados com as estruturas e as rochas magnéticas. A partir dos canais individuais de K, eTh e eU e da composição ternária RGB dos dados gamaespectrométricos foi produzida uma interpretação dos domínios gamaespectrométricos, que consistiu em uma avaliação discriminatória qualitativa entre as concentrações de cada radioelemento em três classes (baixo, médio e alto teor relativo), resultando na separação em 27 classes. A integração de todos os dados resultou em um mapa de interpretação a partir de um método padrão simples que pode ser empregado nas diversas regiões do Brasil.

A produção de um mapa de interpretação de dados aerogeofísicos da região dos terrenos Piancó – Alto Brígida e Alto Pajeú antecipou uma etapa importante de geração de mapas de serviços para trabalhos futuros de levantamentos geológicos-metalogenéticos nesta região da Província Borborema. A interpretação apresentada contribuirá para o aprimoramento da cartografia das unidades geológicas e da compreensão do arcabouço tectônico-estrutural. Os resultados ampliarão as possibilidades de seleção de áreas para detalhamentos geológicos e pesquisas de novos recursos minerais, reduzindo prazos, custos e acelerando o conhecimento e a integração geológica de alvos e assinaturas geofísicas observadas nos aerolevantamentos.

REFERÊNCIAS

- AIRO, M.-L. Aeromagnetic and aeroradiometric response to hydrothermal alteration. **Surveys in Geophysics**, 23: 273-302. 2002.
- ALMEIDA, C.N.; BEURLEN, H.; GUIMARÃES, I.P.; SAMPAIO, A. High pressure metamorphosed Fe-Ti ore hosting island arc tholeiites at Itatuba - PB, as indication of a Proterozoic suture in the Pajeu-Paraíba Foldbelt in the Borborema Province, Northeastern Brazil. **International Geology Reviews**, 39(7):589-608, 1997.
- BARANOV, V. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies. **Geophysics**, 1957. 22:359-383.
- BARBOSA, O. Geologia Econômica da Parte da Região do Médio São Francisco, Nordeste do Brasil. Rio de Janeiro: DNPM-DFPM., **Boletim** 140, 1970, 97p.
- BEURLEN, K.; SILVA FILHO, A.F.; GUIMARÃES, I.P.; BRITO, S.P. Proterozoic C-type eclogites hosting unusual Ti ± Fe ± Cr mineralizations in Northeastern Brazil. **Precambrian Research**, 58:195-214, 1992. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(92\)90119-9](https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90119-9).
- BHATTACHARYYA, B.K. Continuous spectrum of the total magnetic field anomaly due to a rectangular prismatic body. **Geophysics**, 31:97-121. 1966.
- BIONDI, J. C. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos. 528 p., il. color. 2003.
- BITTAR, S. M. B. **Faixa Piancó Alto Brígida: Terrenos Tectono-estratigráficos com regimes metamórficos e deformacionais contrastantes**. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP, 1998, <https://doi.org/10.11606/T.44.1999.tde-18112015-101917>.
- BOYD, D. The contribution of airborne magnetic surveys to geological mapping. In: MORLEY, L. A. (Ed.). Mining and Groundwater Geophysics. Ottawa: Geological Survey of Canada, 1967. p. 2013-227. **Economic Geology Report**, 26, 1967.
- BRITO NEVES, B.B. **Província Borborema, síntese retrospectiva do conhecimento**. In: BARTORELLI, A.; TEIXEIRA, W.; BRITO NEVES, B.B. (orgs) **Geocronologia e evolução tectônica do Continente Sul-Americano: a contribuição de Giuseppe Umberto Cordani**. 1. ed., São Paulo: Solaris Edições Culturais, 2020. ISBN 978-65-991526-0-3.
- BRITO NEVES, B.B.; PASSARELLI, C.R. Terrenos tectonoestratigráficos dispersos do embasamento pré-Brasiliano (São José do Caiana, Açude Coremas e Icaçara) na porção centro-oeste da Zona Transversal (Paraíba, Ceará e Pernambuco). **Geol. USP, Sér. cient.**, São Paulo, v. 20, n. 3, p. 8-105, Setembro 2020. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095>, v20-159425.
- BRITO NEVES, B.B., SANTOS, E.J., FUCK, R.A., SANTOS, L.C.M.L. A preserved early Ediacaran magmatic arc at the northernmost portion of the Transversal Zone, central subprovince of the Borborema Province, Northeastern South America. **Brazilian Journal of Geology**, 46(4), 491-508, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/2317-4889201620160004>.
- BRITO NEVES, B.B.; SANTOS, E.J.; VAN SCHMUS, W.R. Tectonic history of the Borborema Province, NW Brazil. In: CORDANI, U.G., MILANI, E.J., THOMAZ-FILHO, A., CAMPOS, D.A. (Eds.), **Tectonic Evolution of South America**, 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, 2000, p. 151-182.
- BRITO NEVES, B.B.; VAN SCHMUS, W.R.; CAMPOS NETO, M. Sistema de dobramentos Piancó-Alto Brígida (PE-PB-CE), Regionalização geotectônica e geocronologia. **Geol. USP, Sér. cient.**, São Paulo, v. 18, n. 4, p. 14-171, dezembro 2018. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-142182>.
- CAXITO, F.A.; BASTO, F.A.; SANTOS, L.C.M.L.; DANTAS, E.L.; MEDEIROS, V.C.; GONÇALVES DIAS, T.; BARROTE, V.S. HAGEMANN, S.; ALMIM, 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 Res.**, 91 (2021), pp. 1-25, 10.1016/j.gr.2020.11.015.
- COUTINHO M.G.N.; ALDERTON D.H.M. Proterozoic Lode Gold Deposits in the Borborema Province NE Brazil and their Exploration Significance. **Anais Acad. Brasil. Ciências**, 70(3):429-439, 1998.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto Aerogeofísico Pernambuco-Piauí**: Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos. Rio de Janeiro: LASA; PROSPECTORS, 2006.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projetos Aerogeofísicos Pernambuco - Paraíba e Paraíba - Rio Grande do Norte**: Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos. Rio de Janeiro: LASA; PROSPECTORS, 2010a.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto Aerogeofísico Centro Sudoeste do Ceará**: Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados Magnetométricos e Gamaespectrométricos. Rio de Janeiro: PROSPECTORS, 2010b.

- DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors. **Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, p. 187–200, Australian government publishing service, 1997.
- FARINA, M. **Ultrabásitos Niquelíferos de Catingueira - Paraíba: considerações sobre a geoquímica e a geologia econômica**. SUDENE, Departamento de Recursos Naturais, Divisão de Geologia, Recife, 1969, 53 p.
- FERREIRA, R.V.; DANTAS, M.E.; SHINZATO, E. **Origens das Paisagens**. In: TORRES, F.S.M; PFALTZGRAFF, P.A.S. (ogs.). **Geodiversidade do Estado de Pernambuco**. CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Recife, 2014, 282 p.
- FREITAS, A.F.; MARMOS, J.L. **Atlas geoquímico do Estado de Roraima**: Projeto levantamento geoquímico de baixa densidade do Estado de Roraima. CPRM. ISBN 978-85-7499-357-7. 2017, 227 p.
- GOMES, H. A. (Org.). **Geologia e Recursos Minerais do Estado de Pernambuco**. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Projeto de Mapeamento Geológico/Metalogenético Sistemático, CPRM-Serviço Geológico do Brasil/DIEDIG/DEPAT, Recife, 198 p. 2001.
- HUHN, S.R.B.; JUSTO, A.P.; SOUZA FILHO, C.R.; MONTEIRO, L.V.S. Caracterização geológica do prospecto de óxido de ferro-cobre-ouro (IOCG), Aurora, Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, 41(3): 525-538, 2011.
- ISLES, D. J.; RANKIN, L. R. Geological Interpretation of Aeromagnetic Data. Aeromagnetic prospecting - Data processing. **Australian Society of Exploration Geophysicists**, Australia, 2013, 365 p.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3rd. ed., Boca Raton: CRC Press, 331 p., 2001.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**. London: Blackwell Science, 2002, 281 p.
- MACLEOD, I.N.; JONES, K.; DAI, T.F. 3-D Analytic Signal in the interpretation of Total Magnetic Field Data at Low Magnetic Latitudes. **Exploration Geophysics**, 24:679-688. 1993.
- MARINHO, M.S. **Evolução Estrutural e Aspectos Petrológicos das Ocorrências Auríferas de Serrita e Parnamirim, Pernambuco**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais do Departamento de Geologia da Escola de Minas da UFOP, Ouro Preto, 2012, 169 p.
- MEDEIROS, V.C. **Evolução geodinâmica e condicionamento estrutural dos terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, Domínio Zona Transversal, NE do Brasil**. Tese (Doutorado). Natal: Centro de Ciências Exatas e da Terra – URRN, 2004, 185p.
- MEKKAWI, M.M.; FERGANI, E.S.A; ABDELLA, K.A. Seismic Risk Zones and Faults Characterization using Geophysical Data. **Journal of Geology & Geophysics**, 6:311, 2017. <https://doi.org/10.4172/2381-8719.1000311>.
- MINTY, B. R. S. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17 (2), 39–50, Australian government publishing service, 1997.
- OLIVEIRA R.G. **Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozoico da Província Borborema e de sua Margem Continental (Nordeste do Brasil)**. PhD Thesis, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008, 411 p.
- OLIVEIRA, R.G.; MEDEIROS, W.E. Deep crustal framework of the Borborema Province, NE Brazil, derived from gravity and magnetic data. **Precambrian Research**, 315:45-65, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.precamres>.
- PIRES, A. C. B.; HARTHILL, N. Statistical analysis of airborne gamma-ray data for geologic mapping purposes: Crixás-Itapaci area, Goiás, Brazil. **Geophysics**, 54, 1326–32. 1989.
- SANTOS, C.A.; PEREIRA, C.S.; PALMEIRA, L.C.M.; LIMA, F.J.C.; LAGES, G.A. CUNHA, A.C. **Avaliação do potencial mineral do Oeste de Pernambuco para ouro e metais base. Estados de Pernambuco e Ceará**. Mapa Geológico Preliminar. Recife: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2018. 1 mapa color. 136 cm X 85 cm, Escala 1:250.000. Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Ação: Avaliação dos Recursos Minerais do Brasil.
- SANTOS, E. J. **O complexo granítico Lagoa das Pedras: acreção e colisão na região de Floresta (Pernambuco), Província Borborema**. São Paulo, 1995. 220p. Tese (Doutoramento) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1995.
- SANTOS, E.J.; MEDEIROS V.C. Constraints from granitic plutonism on proterozoic crustal growth of the Transverse Zone, Borborema Province, NE-Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, 29:73-84, 1999.
- SANTOS, E.J.; FERREIRA, C.A.; SILVA JÚNIOR, J.M.F. **Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba**. Texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do Estado da Paraíba. Recife: CPRM, 2002. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).
- SANTOS, E.J., VAN SCHMUS, W.R., KOZUCH, M., BRITO NEVES, B.B. The Cariris Velhos tectonic event in Northeast Brazil. **J. South Am. Earth Sci.** 29, 61–76, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.07.003>.
- SANTOS, E. J. dos; SOUZA NETO, J. A.; SILVA, M. R. R. da; BEURLIN, H.; CAVALCANTI, J. A. D; SILVA, M. da G. da; DIAS, V. M.; COSTA, A. F.; SANTOS, L. C. M. de L.; SANTOS, R. B. Metalogênese das porções norte e central da província Borborema. In: SILVA, M. da G. da; ROCHA NETO, M. B. da; JOST, H.; KUYUMJIAN, R. M. (org.). **Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras**. Belo Horizonte: CPRM, 2014. p. 343-388. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/19389>. Acesso em: 29 set. 2021.
- SANTOS, J.P. Geologia da região ferrífera de São José do Belmonte - PE. Recife: SUDENE, 1967, **Série Geologia Econômica**, 5.

SIAL, A.N. Granite-types in Northeastern Brazil: current knowledge. **Revista Brasileira de Geociências**, 16: 52-72, 1986.

SILVA FILHO, M. A. (Coord.). **Projeto Cachoeirinha**. Relatório Final. Texto. Recife: Companhia de Pesquisas de Recurso Minerais (CPRM), Superintendência Regional do Recife (SUREG-Recife). v. 1, 1985.

SPECTOR, A.; GRANT, F.S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. **Geophysics**. 35(2):293- 302. 1970.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E.; KEYS, D.A. **Applied Geophysics**. 2.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 770 p. 1990.

TORRES, H. H. F., BARROS, F. A. R., SANTOS, E. J., FARINA, M., MARANHÃO, R. J. L. **Projeto Serrita – Relatório Final de Pesquisa, alvarás 3176/85, 4193/85, 4910/85 e 27 50/86**. Recife, CPRM. 1 v., 1986.

VANSCHMUSW.R., KOZUCHM., BRITONEVESB.B. Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 31:227-252, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.02.010>.

WANDERLEY, A.A. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil; carta geológica, carta metalogenética/previsional**. Escala 1:100.000. (Folha SC.24-Z-D-IV-Monteiro). Estados da Paraíba e Pernambuco. Brasília: DNPM/CPRM, 1990. 100p. il. 2 mapas (in bolso) 29,5cm.

O SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM E OS OBJETIVOS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - ODS

Em setembro de 2015 líderes mundiais reuniram-se na sede da ONU, em Nova York, e formularam um conjunto de objetivos e metas universais com intuito de garantir o desenvolvimento sustentável nas dimensões econômica, social e ambiental. Esta ação resultou na *Agenda 2030*, a qual contém um conjunto de *17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS*.

A Agenda 2030 é um plano de ação para as pessoas, para o planeta e para a prosperidade. Busca fortalecer a paz universal, e considera que a erradicação da pobreza em todas as suas formas e dimensões é o maior desafio global, e um requisito indispensável para o desenvolvimento sustentável.

Os 17 ODS incluem uma ambiciosa lista 169 metas para todos os países e todas as partes interessadas, atuando em parceria colaborativa, a serem cumpridas até 2030.



O **Serviço Geológico do Brasil – CPRM** atua em diversas áreas intrínsecas às Geociências, que podem ser agrupadas em quatro grandes linhas de atuação:

- Geologia
- Recursos Minerais;
- Hidrologia; e
- Gestão Territorial.

Todas as áreas de atuação do SGB-CPRM, sejam nas áreas das Geociências ou nos serviços compartilhados, ou ainda em seus programas internos, devem ter conexão com os ODS, evidenciando o comprometimento de nossa instituição com a sustentabilidade, com a humanidade e com o futuro do planeta.

A tabela a seguir relaciona as áreas de atuação do SGB-CPRM com os ODS.

Áreas de atuação do Serviço Geológico do Brasil – CPRM e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS

ÁREA DE ATUAÇÃO GEOCIÊNCIAS

LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS



LEVANTAMENTOS AEROGEOFÍSICOS



AVALIAÇÃO DOS RECURSOS MINERAIS DO BRASIL



LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS MARINHOS



LEVANTAMENTOS GEOQUÍMICOS



LEVANTAMENTOS BÁSICOS DE RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS



SISTEMAS DE ALERTA HIDROLÓGICO



AGROGEOLOGIA



LEVANTAMENTOS BÁSICOS DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS



RISCO GEOLÓGICO



GEODIVERSIDADE



PATRIMÔNIO GEOLÓGICO E GEOPARQUES



ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO



GEOLOGIA MÉDICA



RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO



ÁREA DE ATUAÇÃO SERVIÇOS COMPARTILHADOS

GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO



TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO



LABORATÓRIO DE ANÁLISE MINERAIS



MUSEU DE CIÊNCIAS DA TERRA



PALEONTOLOGIA



PARCERIAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS



REDE DE BIBLIOTECAS



REDE DE LITOTECAS



GOVERNANÇA



ÁREA DE ATUAÇÃO PROGRAMAS INTERNOS

SUSTENTABILIDADE



PRÓ-EQUIDADE



COMITÊ DE ÉTICA



PROGRAMA GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

INFORME DE GEOFÍSICA APLICADA Nº4

O conhecimento geológico do território brasileiro constitui um instrumento indispensável para o planejamento e a execução das políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável dos recursos minerais, e simultaneamente é fonte de dados imprescindível para o conhecimento e gestão do meio físico.

É com essa premissa que o Serviço Geológico do Brasil – CPRM tem a grata satisfação de disponibilizar à comunidade técnico-científica, aos empresários do setor mineral e à sociedade em geral mais este produto, o Informe de Geofísica Aplicada, vinculado ao Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral.

Com os expressivos investimentos realizados nos últimos anos em Geofísica, seja na aquisição de dados aerogeofísicos, seja na aquisição de equipamentos de geofísica terrestre, trabalhos de excelente qualidade de aplicação de dados geofísicos para solução de problemas geológicos vêm sendo desenvolvidos pelos pesquisadores do SGB-CPRM.

Entendendo a importância de divulgar amplamente os trabalhos e experiências em Geofísica, foi criada esta nova linha editorial, concebida no Departamento de Geologia e na Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica, que permite aos pesquisadores explorar e apresentar de forma mais detalhada os trabalhos realizados em projetos técnicos, demonstrando a diversidade e potencialidade de aplicação da Geofísica.

Com mais este produto, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM dá continuidade à política governamental de atualizar o conhecimento geológico do país, através dos levantamentos geológicos básicos, geoquímicos e geofísicos, e da avaliação integrada das informações, fundamental para o desenvolvimento regional e importante subsídio à formulação de políticas públicas e de apoio à tomada de decisão de investimentos. Este produto está disponível para download no banco de dados corporativo do Serviço geológico do Brasil – CPRM, o GeoSGB (<http://geosgb.cprm.gov.br>), e no Repositório Institucional de Geociências-RIGEO (<http://rigeo.cprm.gov.br>)

MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS APLICADOS NA CONFEÇÃO DO MAPA DE INTERPRETAÇÃO DOS TERRENOS PIANCÓ-ALTO BRÍGIDA E ALTO PAJEÚ, ZONA TRANSVERSAL DA PROVÍNCIA BORBOREMA



SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

Sede Brasília

Setor Bancário Norte - SBN - Quadra 02, Asa Norte
Bloco H - Edifício Central Brasília - Brasília - DF - Brasil
CEP: 70040-904
Tel.: (61) 2108-8400

Escritório do Rio de Janeiro

Avenida Pasteur, 404 - Urca - Rio de Janeiro - RJ - Brasil
CEP: 22290-255
Tel.: (21) 2295-0032

Diretoria de Geologia e Recursos Minerais

Tels: (21) 2546-0212 • (61) 3223-1166

Departamento de Geologia

Tels: (91) 3182-1326

Departamento de Recursos Minerais

Tel.: (21) 2295-4992

Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica

Tel.: (11) 3775-5123

www.cprm.gov.br

Assessoria de Comunicação

Tels: (61) 2108-8400 • (21) 2295-4641
email: asscomdf@cprm.gov.br

Ouvidoria

Tel.: (21) 2295-4697
email: ouvidoria@cprm.gov.br

Serviço de Atendimento a Usuários – SEUS

Tel.: (21) 2295-5997
email: seus@cprm.gov.br