

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICO-GEOLÓGICOS DO PROSPECTO NOVO MUNDO,
PROVÍNCIA AURÍFERA DE ALTA FLORESTA – MT**

Monografia

TF 20-03

André Victor Santos Eigenmann

Orientador: Prof. Dr. Vinicius Hector Abud Louro

Co-orientador: Prof. Dr. Rafael Rodrigues de Assis

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a meu pai, André (*in memoriam*), e minha mãe, Rosemary, pelo amor e suporte de sempre. Vocês são meu alicerce.

Ao meu irmão, João, e a toda minha família.

Ao meu orientador, Vinicius, pelos ensinamentos, compreensão e imensa dedicação em responder a todos os meus incontáveis e-mails.

À Karen, pelo amor, cuidado e por me aturar mesmo nos dias em que estive mais mal-humorado. Você tornou esse ano tão duro e cheio de privações muito mais suportável.

Ao Gude, pela amizade, conversas e ajuda em momentos difíceis.

A todos os amigos que a Geologia me deu, mesmo que indiretamente: Asno, Baby, Bart, Bassan, Bisquete, Brit, Bruna, Caípiroto, Célébro, Chris, Ed, Faíxca, Fitinha, Gordão, Guaxu, Kibe, Mika, Minhoquinha, Mortícia, Nena, Samara, Sarjeta, e tantos outros. Foi um prazer dividir todos esses dias e viagens com vocês.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Problemática e justificativa	1
2. OBJETIVOS	2
3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	3
3.1. Contexto geológico	3
4. MATERIAIS E MÉTODOS	8
4.1. Bases de dados	8
4.2. Softwares	9
4.3. Métodos	9
4.3.1 <i>Magnetometria</i>	9
4.3.1.1 Filtragem regional-residual (continuação para cima)	10
4.3.1.2 Delimitação Lateral	11
4.3.1.3 Lineamentos Magnéticos – <i>Tilt Derivative</i>	11
4.3.1.4 Redução ao Polo Magnético	12
4.3.1.5 Deconvolução de Euler	12
4.3.2 <i>Gamaespectrometria</i>	13
4.3.3 <i>Sensoriamento Remoto e Técnica Crósta</i>	14
4.3.3.1 Classificação supervisionada (Máxima Verossimilhança)	17
5. RESULTADOS OBTIDOS	18
5.1. Magnetometria	18
5.2. Gamaespectrometria	23
5.3. Sensoriamento Remoto	27
6. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	31
7. CONCLUSÃO	34
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
ANEXO I	39
ANEXO II	40

RESUMO

A Província Aurífera de Alta Floresta (PAAF), sul do Cráton Amazônico e norte do Estado de Mato Grosso, é majoritariamente composta por granitoides, rochas vulcânicas e vulcano-sedimentares paleoproterozoicas, produtos de magmatismo de arcos continentais juvenis com pequeno aporte de material crustal. Estas rochas são hospedeiras de centenas de ocorrências auríferas ao longo do cinturão NW-SE do Peru-Trairão. Nesse contexto, o Prospecto Novo Mundo (PNM), com área de 25 km², apresenta uma anomalia magnética espacialmente associada aos garimpos do Luizão e da Raimunda, foco deste trabalho. A fonte dessa anomalia de magnetização intensa é controlada por lineamentos magnéticos coerentes com zonas de cisalhamento locais, interpretadas como possíveis fontes e condutos para percolação de fluidos magmático-hidrotermais que culminaram nas mineralizações. Ao integrar dados de campo, petrográficos, radiométricos e imagens ASTER, buscou-se compreender o sistema do PNM e avaliar assinaturas ligadas a alteração hidrotermal que possam indicar regiões de potencial aurífero. Em função do estilo e paragênese do minério, a região do garimpo do Luizão se enquadra como Au±Cu disseminado em granitos, enquanto no da Raimunda, como Au±Cu filonar, encaixado em zonas de cisalhamento que truncam o embasamento e granitoides antigos. Os métodos utilizados permitiram a interpretação de vetores exploratórios, aos quais foi atribuído o mesmo peso na confecção de um mapa de favorabilidade aurífera do PNM. Este mapa indicou duas principais regiões como mais favoráveis: uma a norte, ao redor do próprio garimpo da Raimunda e uma a sudeste, onde até o momento deste trabalho não foram reportadas ocorrências.

ABSTRACT

Alta Floresta Gold Province (AFGP), south of Amazon Craton and north of State of Mato Grosso, is primarily composed by granitoids, volcanic rocks and Paleoproterozoic volcano-sedimentary, magmatism products of young volcanic arcs containing a small part of crustal material. These rocks are hosts of hundreds of auriferous occurrences throughout the NW-SE Peru-Trairão belt. Within this context, Novo Mundo Prospect (NMP), with an area of 25 km², presents a magnetic anomaly spatially associated with Luizão's and Raimunda's artisanal minings (garimpos) — which are the focus of this research. The source of this intense anomaly is controlled by magnetic lineaments matched with local shear zones, interpreted as potential source and conduit to the percolation of magmatic-hydrothermal fluids which resulted in mineralization. By integrating field, petrographic, radiometric and ASTER images, it was sought to comprehend the NMP system and assess signatures which may indicate potentially auriferous zones. According to style and mineral assemblage, Luizão's artisanal mining region fit as Au±Cu disseminated in granites, meanwhile in Raimunda's artisanal mining, as Au±Cu vein-type, fitted in shear zones which truncate the basis and ancient granitoids. Chosen methods allowed to interpret exploration vectors to which it was attributed the same load in production of an auriferous favorability map in NMP. Such map presented two main regions as most favourable: one in the north, around Raimunda's artisanal mining, and one in the southeast, where occurrences were not reported until the moment of this research.

1. INTRODUÇÃO

Métodos geofísicos auxiliam trabalhos de mapeamento e de prospecção mineral quando integrados a dados geológicos. Além disso, seguindo a tendência global de investimentos na área de prospecção mineral, o Brasil, por meio da CPRM, realizou diversos aerolevantamentos em escala regional para coleta de dados geofísicos na primeira década de 2000. Esses fatores permitiram a construção de uma base de dados geofísicos que hoje servem de ferramenta em diversas áreas do conhecimento.

A Província Aurífera de Alta Floresta (PAAF), que inclui o Prospecto Novo Mundo (PNM), área deste estudo, ficou em evidência principalmente entre as décadas de 70 e 90, se consolidando como uma das principais regiões auríferas do Brasil. O minério, explotado principalmente por atividade garimpeira em depósitos de pequeno porte, está associado a *placers* cenozoicos. Ainda que a atividade garimpeira persista até os dias de hoje, a relativa exaustão desses depósitos secundários tem impulsionado a pesquisa por depósitos de ouro primário, foco deste trabalho.

1.1. Problemática e justificativa

A região da PAAF possui tectônica e geologia complexas, tendo sido afetada por pelo menos três grandes eventos magmáticos. Por consequência, não há um consenso a respeito dos processos metalogenéticos que culminaram nas mineralizações da região. A exploração aurífera da região, historicamente, foi realizada em garimpos de pequeno porte associados a *placers* cenozoicos. A medida em que os depósitos de ouro secundário sejam exauridos, será cada vez mais necessário compreender e buscar por depósitos de ouro primário, o maior potencial da região.

Este trabalho buscou por ambientes de alteração hidrotermal favoráveis a presença de sulfetos que hospedam o ouro. Técnicas que avaliam contrastes de suscetibilidade magnética, radiação gama e reflectância espectral foram utilizadas no diagnóstico de áreas afetadas por processos de alteração hidrotermal e, por consequência, de maior potencial aurífero, dado o cenário geológico que se encontra a presença de minério. Estas áreas podem ser consideradas pontos de partida para estudos mais aprofundados de campo e como referências na busca por depósitos análogos na região.

2. OBJETIVOS

O trabalho buscou por assinaturas geofísicas que evidenciassem um cenário de potencial mineralização aurífera com a respectiva correlação com ocorrências e áreas mineralizadas conhecidas na província. Essa análise sistemática propiciou propor de áreas de maior potencialidade à mineralização aurífera.

3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

3.1. Contexto geológico

A Província Aurífera de Alta Floresta (PAAF), extremo norte do Estado de Mato Grosso, é ao sul do Cráton Amazônico. O Cráton é subdividido em Escudo das Guianas, a norte, e Escudo Brasil-Central (EBC), a sul, pela Bacia do Amazonas (Santos, 2003). No Brasil, o EBC hospeda sete províncias minerais, dentre elas, a PAAF (PAAF; Dardenne e Schobbenhaus, 2001). A Província é majoritariamente composta por granitoides, rochas vulcânicas e vulcanossedimentares paleoproterozoicas provenientes de magmatismo cálcio-alcalino oxidado de arcos magnáticos, embora menor volume de granitos e correspondentes vulcânicas alcalinas também estejam presentes (Alves *et al.*, 2019). Regionalmente, a PAAF insere-se entre duas províncias tectônico-geocronológicas, cujos limites variam a depender do modelo adotado para a evolução do Cráton. Enquadra-se, portanto, entre as províncias Ventuari-Tapajós (1,95-1,8 Ga) e Rio Negro Juruena (1,8-1,55 Ga) no modelo de Tassinari e Macambira (1999), ou entre as províncias tectônico-estruturais Tapajós-Parima (2,1-1,87 Ga) e Rio Negro-Juruena (1,82-1,54 Ga) no modelo de Santos *et al.* (2004).

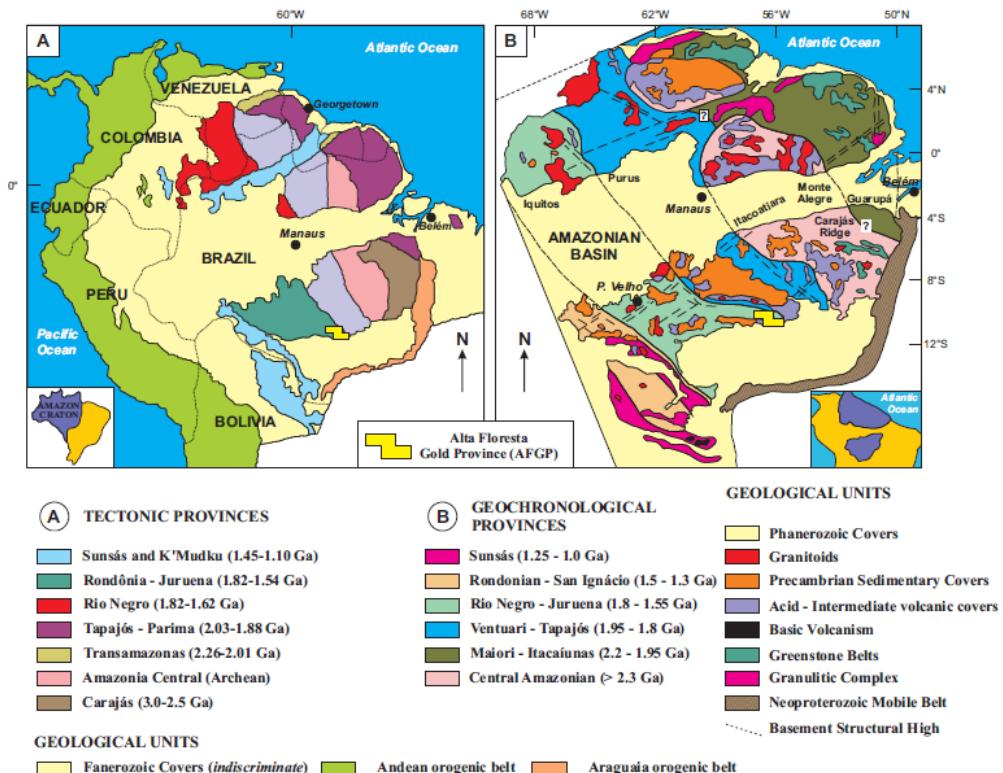


Figura 1: Localização da Província Aurífera de Alta Floresta ao sul do Cráton Amazônico, de acordo com os modelos de (A) Santos *et al.* (2004) e (B) Tassinari e Macambira (1999).

A Província Aurífera de Alta Floresta (Fig. 2) é formada principalmente por unidades graníticas e vulcânicas derivadas de arcos continentais, além de menor volume de rochas vulcanossedimentares e sedimentares detriticas (Souza *et al.*, 2005; Assis, 2015; Alves *et al.*, 2019). Segundo Alves *et al.* (2019), as principais unidades litodêmicas do setor leste da Província, região onde esse estudo está enquadrado, são Domínio Peixoto de Azevedo (2,05-1,85 Ga); migmatito e granulito que compõem o núcleo metamórfico Complexo Nova Monte Verde (1,80-1,76 Ga); rochas ácidas da supersuíte Juruena (1,81-1,77 Ga); rochas vulcânicas ácidas do grupo Colíder (1,81-1,76 Ga); rochas plutônicas e intrusões subvulcânicas ácidas da suíte Teles Pires (1,79-1,75 Ga) (Alves *et al.*, 2019).

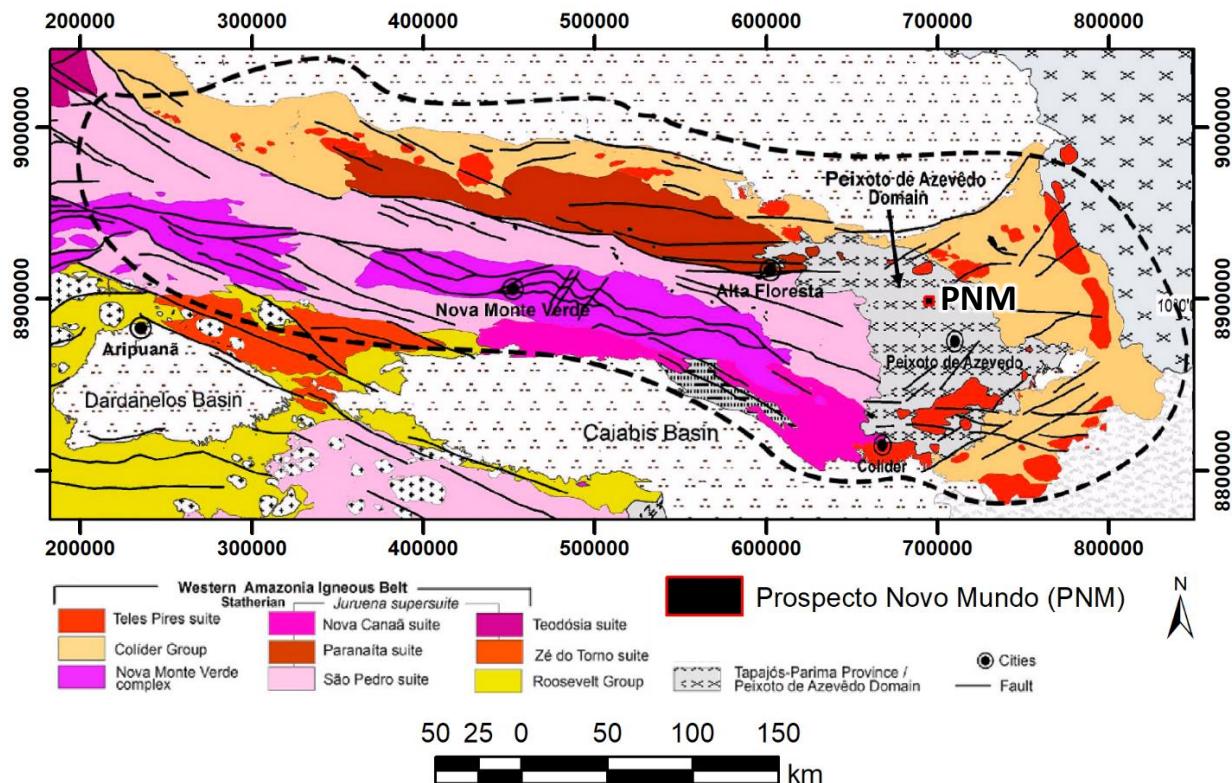


Figura 2: Mapa geológico simplificado da Província Aurífera de Alta Floresta (Alves *et al.*, 2019).

O Domínio Peixoto de Azevedo é composto por ortognaisses, migmatitos e granitoides foliados (Complexo Cuiú-Cuiú) intrudidos por rochas granitoides (e. g. suíte Nhandú). Correspondem as rochas mais antigas da PAAF, exceto por raras ocorrências de rochas com idades arqueanas, como o gnaisse Gavião (Paes de Barros, 2007), cujos cristais de zircão indicam idades de cristalização de 2,82-2,70 Ga (Alves *et al.*, 2020). O Complexo Cuiú-Cuiú é intrudido por uma série de plútôns cálcio-alcalinos oxidados do tipo I (Assis, 2011), a exemplo da suíte Pé Quente (Assis, 2011), Nhandú (Souza, 1979), Aragão (Vitório, 2010) e suíte intrusiva

Matupá (Moura, 1998). O Granito Novo Mundo (Paes de Barros, 2007), que aflora no Prospecto Novo Mundo, passou a incluir a suíte Nhandú na proposta de Alves *et al.* (2019), utilizada neste trabalho. Alves *et al.* (2020) propõem que as rochas do Complexo-Cuiú-Cuiú, formação Jarinã (1,99 Ga), suíte intrusiva Pé Quente (2,0-1,97 Ga) e Nhandú (1,97-1,95 Ga) foram originadas em um contínuo processo de subducção que culminou na formação do arco magmático Cuiú-Cuiú (2,04-1,99 Ga).

A oeste do Domínio Peixoto de Azevedo está localizado o Complexo Nova Monte Verde (1,80-1,76 Ga; Rizzoto *et al.*, 2019), um núcleo metamórfico composto por duas unidades principais: uma ortoderivada formada pelo migmatito da Vila Progresso, dominada por diatexito e metatexito de composição que varia de granodiorítica a tonalítica, além de ortognaisse granodiorítico e, subordinadamente, granulitos félsicos e máficos em forma de *boudins*, e uma metassedimentar (unidade Bacaeri-Mogno), formada por migmatitos aluminosos, sillimanita quartzo-xisto bandados, formações ferríferas bandadas e gnaisses calciosilicáticos. Possuem leucossomas com magnetita, responsáveis pela forte anomalia magnética na região. Datações em zircão pelos métodos Pb/Pb e Pb/U registram idades da ordem de 1,7 Ga em cristais de zircão no neossoma. Essas idades são mais um indicativo de um evento térmico posterior a sua formação.

Este núcleo metamórfico exumado é envolvido por uma série de granitoides que incluem os monzogranitos da suíte São Pedro (1,8 Ga; Alves *et al.*, 2019), que variam de isotrópicos (porção distal ao núcleo) a intensamente deformados em suas bordas (Souza *et al.*, 2005), sienogranito leucocrático da suíte Nova Canaã (Souza *et al.*, 2005), biotita-monzogranito da suíte Paranaíta (1,8 Ga; Alves *et al.*, 2019), e sieno a monzogranitos da suíte Zé do Torno e seu par vulcânico de rochas do grupo Roosevelt, rochas que compõem a supersuíte Juruena (Alves *et al.*, 2019).

Os dois últimos eventos magmáticos da Província teriam sido responsáveis pela geração do grupo Colíder (1,7 Ga), constituído pelas formações Bom Jaguar (magmatismo bimodal de rochas ácidas e basalto andesítico), Braço Sul (piroclásticas) e Braço Norte (arenito lítico, conglomerático e pelitos), além da suíte Teles Pires (1,79-1,75 Ga), individualizada em álcalfedspato granitos, granitos subvulcânicos, além de quartzo-sienito e quartzo-monzonito com seus correspondentes vulcânicos (Alves *et al.*, 2019). Por fim, a PAAF foi recoberta por rochas sedimentares clásticas de idade cenozoica.

3.2. Mineralizações

Mais de uma centena de ocorrências auríferas são conhecidas na PAAF, as quais estão concentradas, sobretudo, ao longo de um corredor estrutural de direção NW-SE do Peru-Trairão (Miguel Jr, 2011). Essas ocorrências representam tanto *placers* cenozoicos quanto sistemas hidrotermais paleoproterozoicos hospedados em granitoides, vulcânicas, pórfiros e sequências vulcanossedimentares (Souza *et al.*, 2005; Assis *et al.*, 2014). Em função do estilo e paragênese do minério, os sistemas hidrotermais, amplamente estudados, têm sido individualizados em quatro grupos principais (Xavier *et al.*, 2008; Assis *et al.*, 2014): (1) Au±Cu disseminado em granitos; (2) Au±Cu filonar, encaixado em zonas de cisalhamento que truncam o embasamento e granitoides antigos; (3) Au ± Cu ± Mo disseminado a venular, em granitoides, vulcânicas e pórfiros; e (4) veios polimetálicos de Au + metais hospedados em pórfiros e vulcanossedimentares. No conjunto, esses sistemas têm sido interpretados como um sistema pórfiro-epitermal gerado em ambiente de pós subducção (Alves *et al.*, 2020)

Os depósitos do tipo disseminado, como o do Luizão, possuem diversas semelhanças aos depósitos encontrados ao longo do cinturão Alpino-Himalaiano estudados por Richards (2009), que incluem tendência a especificidade aurífera (com baixos teores de cobre associados) e estão associados a magmatismo interpretado como pórfiro pós-subducção associado a um evento e afinamento crustal. Por ser oriundo de uma crosta refundida, o magma causativo das mineralizações apresenta maior alcalinidade e menor quantidade de água e elementos calcófilos, extraídos durante o processo de subducção e que resultaram em um enriquecimento de minerais siderófilos, como o Au, que posteriormente foram remobilizados por fluidos hidrotermais (Richards, 2009).

As ocorrências de ouro disseminado (e. g. Luizão, Pé Quente, X1) são relativamente comuns na PAAF. Suas zonas mineralizadas estão hospedadas em granitoides e pórfiros não deformados, derivados de magmatismo cálcio-alcalino oxidado, de médio a alto-K, pertencentes à série magnetita (granitos tipo I). Esses sistemas foram submetidos a diversos estágios, estilos e intensidades da alteração hidrotermal, os quais incluem alteração sódica, restrita a alguns depósitos (e.g. depósito Pé Quente), substituída por forte alteração potássica pervasiva com K-feldspato. Esse sistema evoluiu para alterações ácidas, a exemplo da sericítica e/ou com muscovita grossa e radiada, na qual as zonas mineralizadas estão temporal e espacialmente associadas (Assis *et al.*, 2014; Bettencourt *et al.*, 2016). Regionalmente, observa-se um halo de alteração propilítica a clorítica (Assis *et al.*, 2014). O minério é dominado por pirita (até 95% da zona sulfetada), com concentrações subordinadas de hematita e calcopirita. O ouro ocorre como inclusões e/ou em fraturas intracristalinas na pirita (Bettencourt *et al.*, 2016), com concentrações

em prata de até 4,6%. Serrato (2014) e Assis (2015) indicaram que o mesmo evento mineralizante teria sido responsável pelas mineralizações da PAAF em $1786,7 \pm 3$ Ma (Assis, 2015), durante um evento magmático que teria fornecido temperatura e remobilizado fluidos hidrotermais que culminaram na mineralização aurífera da província. Isótopos estáveis de deutério e oxigênio em silicatos hidrotermais, bem como de sulfetos das principais zonas com minério disseminado indicam fluidos e enxofre eminentemente magmáticos, com pequena interação com fluidos meteóricos (Assis, 2015).

As ocorrências auríferas em sistemas $\text{Au} \pm \text{Cu}$ estruturalmente controlados estão usualmente hospedadas em filões controlados por zonas de cisalhamento encaixadas no embasamento granítico, a exemplo de gnaisse e granitoides foliados, e em granitos mais antigos de 1,97-1,96 Ga (Bettencourt *et al.*, 2016; Mesquita *et al.*, 2015). Estão intimamente relacionados a zonas de cisalhamento com *trends* a N-S, NE-SW e E-W. A evolução paragenética da alteração hidrotermal é similar à observada em sistemas disseminados (Assis, 2011). Entretanto, as zonas sulfetadas e mineralizadas estão associadas à silicificação, e de modos menos frequente, às alterações com sericita e/ou com muscovita, que muitas vezes ocorrem como halos proximais dos veios de quartzo \pm carbonato (Mesquita *et al.*, 2015). Contrastante aos sistemas disseminados, o minério exibe elevadas concentrações de pirita e calcopirita, com o ouro incluso em ambos os sulfetos (Assis *et al.*, 2014; Mesquita *et al.*, 2015).

As ocorrências e depósitos auríferos da PAAF estão frequentemente truncadas por diques de rochas sub-vulcânicas maficas a intermediárias, sempre hidrotermalizados (Assis *et al.*, 2014). É o caso do granito Novo Mundo (suíte Nhandú), truncado por diversos diques de rochas vulcânicas maficas a intermediárias, a princípio interpretadas como pertencentes à suíte Flor da Serra (Souza *et al.*, 2005).

3.3. Geologia dos testemunhos

Os testemunhos de sondagem (FNV-01, FNV-02, FNV-03, FNV-09, DNFD-16, DNFD-19, DNFD-20) analisados possuem, em média, valores entre 100 m e 130 m de profundidade. Todos interceptam o granito Novo Mundo (suíte intrusiva Nhandú). Os testemunhos apresentam porções de intensa alteração hidrotermal potássica, alteração sericítica e alteração clorítica. Nos testemunhos FNV-01, FNV-02 e FNV-09 foi possível observar diques maficos (Anexo I), sempre da ordem de centímetros. A maioria dos testemunhos apresenta ouro disseminado, sendo o FNV-09 e o DNFD-16 (Anexo II) os que apresentaram os maiores teores de ouro (até 18 ppm).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Bases de dados

Os materiais e bases de dados utilizados neste trabalho foram:

- Mapa geológico integrado e dados vetoriais SIG: Áreas de relevante interesse mineral ARIM Juruena-Teles Pires 1:300.000, produzido pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil em 2019 (Alves *et al.*, 2019);
- Dados magnetométricos e gamaespectrométricos do Projeto Aerogeofísico 1121 – Norte do Mato Grosso, resultado do Programa Geologia do Brasil (PGB), um convênio de cooperação e apoio técnico-científico da CPRM – Serviço Geológico do Brasil, com a interveniência da Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM/MME). O serviço de aquisição e processamento de dados foi realizado pela empresa Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda. O aerolevantamento tem linhas de voo N-S espaçadas de 500 m, linhas de controle E-W a cada 10000 m e altura de voo nominal de 100 m. Foram utilizadas as aeronaves Piper Navajo PA31-350 de prefixos PR-PEC e PR-PRS da Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda, as quais realizaram o projeto no período de 20/10/2012 a 05/09/2013, totalizando 96.443 km lineares de aquisição. Foram utilizados magnetômetros de bombeamento ótico de vapor de césio da Geometrics, modelo G822-A, e gamaespectrômetros da RADIATION SOLUTIONS, modelo RS-500, com 1024 canais espectrais, sistema de navegação GPS com receptor de 12 canais da marca AG-NAV, modelo Guia. A velocidade de aquisição foi mantida em aproximadamente 280 km/h, com medidas de magnetometria a cada 0,1 s (aproximadamente 8 m) e radiométricas a cada 1 s (aproximadamente 80 m);
- Imagem multiespectral ASTER de código AST L1T 00309222000141605 20150411220424 111534, coletada pelo (EOS)-Terra em setembro de 2000 da região do Prospecto Novo Mundo.
- Descrição de seis testemunhos de sondagem do depósito Luizão, cedidas pelo mestrandinho Andres Isquierdo Perez, integrante do grupo de estudos GEOLIT e orientado pelo coorientador desse trabalho.

4.2. Softwares

Os *softwares* utilizados foram:

- Geosoft Oasis Montaj para tratamento de dados geofísicos;
- ENVI 5.3 para tratamento das imagens ASTER.
- ArcMap 10.5 para integração de dados e confecção de mapas.

4.3. Métodos

Os métodos utilizados foram a magnetometria, gamaespectrometria e sensoriamento remoto, a última incluindo a análise por principais componentes de imagens ASTER, além de classificação supervisionada. Tratam-se de métodos independentes, que revelam contrastes de propriedades físicas presentes em estruturas tectônico-geológicas e processos relacionados a metalogenênese.

4.3.1 Magnetometria

A magnetita possui alta suscetibilidade magnética (κ), o que causa um comportamento anômalo quando inserido em um campo magnético externo. A variação de magnetização e/ou susceptibilidade magnética de uma rocha ocorre de acordo com a concentração, o que permite sua identificação. A magnetização de cada material pode ser induzida (\vec{M}_I ; eq. 1) ou remanente (\vec{M}_R), sendo a primeira produto da susceptibilidade magnética do corpo avaliado com o campo magnético externo (\vec{H} ; geomagnético). A magnetização remanente natural é retida durante o período de cristalização e resfriamento. A magnetização total é equivalente a soma vetorial de ambas.

$$\vec{M}_I = \kappa \cdot \vec{H} \quad (\text{eq. 1})$$

O Campo Magnético Terrestre (CMT) utilizado para calcular a magnetização induzida é gerado pela interação entre o núcleo interno e externo da Terra e sofre variação secular para oeste. Essa variação é calculada e publicada a cada 5 anos pelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF). A magnetização remanente depende do raio atômico, da cristalografia, da composição química, da história termal, da geologia e da tectônica da região que contém magnetita (Blakely, 1995). A área de estudo está situada dentro dos limites da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, onde o CMT é consideravelmente baixo. Por consequência, a magnetização remanente, se presente, pode representar boa parte da magnetização total e este fator foi levado em consideração durante o processamento dos dados magnéticos.

4.3.1.1 Filtragem regional-residual (continuação para cima)

Comprimentos de onda curtos estão associados a altas frequências e altas taxas de dissipação de energia, enquanto comprimentos de onda longos estão associados a baixas frequências e uma menor taxa de dissipação de energia. Com base nesse princípio físico é possível associar comprimentos de ondas longos a corpos que alcançam maiores profundidades e, portanto, de caráter regional. Comprimentos de onda curtos, ao contrário, se relacionam a corpos restritos a horizontes mais superficiais, consequentemente de expressão mais local. Por ser um método de campo potencial, a magnetometria possui uma ambiguidade quanto a determinação de profundidade de corpos não aflorantes. Essa ambiguidade é caracterizada pela possibilidade de que fontes magnéticas anômalas profundas e de magnetização intensa, e fontes mais próximas da superfície e de menor amplitude possam apresentar respostas similares.

A técnica de continuação para cima consiste em um filtro no domínio de Fourier que simula uma altura de voo mais alta que a original. Dessa forma, o decaimento do campo torna possível que todas as anomalias de curto comprimento de onda sejam ignoradas, restando somente as anomalias de longo comprimento de onda. A subtração do *grid* de continuação para cima do *grid* de campo de intensidade magnética total, dessa forma, realça as anomalias locais.

4.3.1.2 Delimitação Lateral

Métodos potenciais como a magnetometria são excelentes para diferenciar lateralmente corpos geológicos com propriedades físicas contrastantes. Foram utilizadas as filtragens de Sinal Analítico 3D (ASA - Nabighian, 1972; Roest *et al.*, 1990; eq. 2) e de Gradiente Horizontal Total (GHT – Cordell e Graunch, 1985; eq. 3).

$$ASA = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2} \quad (\text{eq. 2})$$

$$GHT = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2} \quad (\text{eq. 3})$$

4.3.1.3 Lineamentos Magnéticos – *Tilt Derivative*

Lineamentos magnéticos estão normalmente associados a falhas e fraturas em regiões onde houve a formação de magnetita. A técnica utilizada para realçar os pontos referentes aos lineamentos foi a fase do sinal analítico (*Tilt Derivative*; Miller e Singh, 1994; eq. 4). Suas vantagens incluem a normalização do campo magnético e a distinção entre sinais e ruídos (Verduzco *et al.*, 2004)

$$Tilt = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial H}{\partial z}}{\sqrt{\frac{\partial H^2}{\partial x} + \frac{\partial H^2}{\partial y}}} \right) \quad (\text{eq. 4})$$

O Sinal Analítico 3D, o gradiente horizontal total, bem como o *Tilt Derivative* são técnicas com pouca dependência da direção do campo magnético (Verduzco *et al.*, 2004). O *Tilt Derivative* produz lineamentos coerentes com estruturas geológicas com valores próximos a zero em latitudes próximas ao equador magnético (Verduzco *et al.*, 2004).

4.3.1.4 Redução ao Polo Magnético

O caráter dipolar de anomalias magnetométricas faz com que sua interpretação não seja intuitiva. A redução ao polo transforma respostas de magnetização inclinadas de regiões não-polares em respostas equivalentes as de um corpo com magnetização de inclinação vertical. Isso ocorre pela simulação da transposição da área de estudo para uma região polar, onde apenas o polo positivo fica visível. O método possui complicações, visto que o algoritmo de redução ao polo magnético, disponível no *software* utilizado neste trabalho, assume que a direção da magnetização utilizada é paralela ao campo magnético local, ou seja, prioritariamente induzida (Grant e Dodds, 1972; Dentith e Mudge, 2014). Sabe-se que a magnetização remanente e o processo de desmagnetização natural podem desviar a magnetização total da direção do Campo Geomagnético, o que implica que quanto mais significativas elas forem, maior será o erro associado ao método. O Brasil está inserido na Anomalia Magnética do Atlântico Sul (Hartmann e Pacca, 2009), uma região que possui intensidade de campo geomagnético muito menor do que a média atuante sobre o resto do planeta e, portanto, torna a magnetização remanente um fator que não pode ser desprezado.

$$L(\theta) = \frac{[\sin(I) - i \cdot \cos(I) \cdot \cos(D - \theta)]^2}{[\sin^2(Ia) + \cos^2(Ia) \cdot \cos^2(D - \theta)] \cdot [\sin^2 + \cos^2(I) \cdot \cos^2(D - \theta)]}, \text{ se } |Ia| < |I|, Ia = I \quad (\text{eq. 5})$$

4.3.1.5 Deconvolução de Euler

Ainda que métodos potenciais não sejam especializados em calcular profundidades, é possível obter estimativas a partir da Deconvolução de Euler (Thompson, 1982). Esta é calculada a partir da equação diferencial homogênea de Euler (eq. 6), onde x_0 , y_0 e z_0 são as coordenadas da fonte do sinal magnético, M é a anomalia magnética e n o índice estrutural.

$$(x - x_0) \frac{\partial M}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial M}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial M}{\partial z} = n(R - M) \quad (\text{eq. 6})$$

Com base na correlação entre índice estrutural e modelo geológico proposta por Reid *et al.* (1990) e a disposição geométrica dos corpos intrusivos dessa área da PAAF, o índice estrutural usado neste trabalho foi 1 (corpo intrusivo análogo a um cilindro vertical).

4.3.2 Gamaespectrometria

Levantamentos gamaespectrométricos avaliam a radiação gama emitida pela superfície terrestre gerada pela desintegração natural do ^{40}K e de elementos das séries do ^{238}U e ^{232}Th . Os elementos responsáveis por emitir radiação gama nas séries do ^{238}U e ^{232}Th são seus respectivos elementos filhos, ^{214}B e ^{208}TI , respectivamente. O radônio (^{222}Rn) originado pelo decaimento de ^{238}U presente na atmosfera, radiação cósmica e acidentes nucleares também gera sinais radiométricos que devem ser eliminados para possibilhar uma investigação exploratória (Dentith e Mudge, 2014). Estes, bem como a correção do tempo morto, a correção do efeito Compton, a correção altimétrica e posterior conversão para concentração de elementos foram previamente realizados pela CPRM.

Elementos como o U e o Th formam ligações fortes. Com a geração de um campo elétrico forte, tendem a não se desprenderem da estrutura cristalina. Estes podem ser absorvidos por argilominerais e co-precipitados com óxido de ferro. O ^{40}K possui baixa energia de ligação e raio iônico grande, tornando o elemento bastante móvel, principalmente em climas tropicais. Estes elementos possuem mobilidades distintas quando submetidos a processos hidrotermais. Porções que sofreram hidrotermalização tendem a apresentar enriquecimento de potássio e urânio (este último principalmente havendo a presença de Fe no sistema) em relação à concentração de tório (Wilford et. al, 1997), evidenciados na razão tório/potássio (Ribeiro et al., 2014) e no Fator F (eq. 7; Gnojek e Prichystal, 1985).

$$\text{Fator F} = K \cdot \frac{eU}{eTh} \quad (\text{eq. 7})$$

Dados gamaespectrométricos representam profundidades de até 40 cm (Minty, 1998), visto que a radiação gama interage com a matéria através de produção de pares, efeito Compton e efeito fotoelétrico, sendo parcial ou totalmente absorvida. Isso implica que o sinal detectado na superfície não representa materiais em maior profundidade, impossibilitando sua detecção. As contagens de raios gama são obtidas através de um espectrômetro gama e posteriormente corrigidas para concentrações.

4.3.3 Sensoriamento Remoto e Técnica Crósta

O primeiro satélite desenvolvido com a finalidade de atuar em pesquisas minerais (LANDSAT-1) foi lançado em 1972. Após seu lançamento, técnicas como a Análise por Principais Componentes (APC) e razões de banda foram aplicadas a esses tipos de dados e utilizadas com fins de exploração mineral (Sabins, 1999). O lançamento do satélite Terra, em 1999, e seu sensor multiespectral ASTER, permitem a avaliação do espectro de ondas eletromagnéticas em 14 bandas, tornando a técnica ainda mais atrativa. Isso porque a análise dos espectros nas porções do SWIR permite identificar regiões superficiais com predomínio de alguns minerais, que incluem filossilicatos (argilominerais), sulfatos e carbonatos característicos de processos de alteração hidrotermal (Crósta *et al.*, 2003).

A maior parte dos minerais presentes na crosta terrestre não apresentam feições diagnósticas quanto a sua reflectância e absorção de ondas eletromagnéticas. Por consequência, a maior parte das rochas, que possuem respostas espectrais determinadas a partir da combinação dos minerais que a constituem, não podem ser distintas por essas propriedades físicas. Porém, alguns óxidos e hidróxidos de Fe, argilominerais e sulfatos possuem resposta espectral diagnóstica. A presença desses minerais em depósitos de natureza magmático-hidrotermal permite que técnicas de sensoriamento remoto sejam utilizadas de modo eficaz. Este trabalho utilizou como referência a metodologia de Crósta *et al.* (2003), fazendo adequações necessárias dada a mineralogia esperada para a região do PNM. A illita possui espectro conhecido e é comumente encontrada como mineral acessório em alterações hidrotermais do tipo sericito-clorítica, adulária-sericita (*low sulfidation*) e argílica intermediária em sistemas pórfiro-epitermais. A muscovita foi utilizada por estar frequentemente associada as zonas mineralizadas em região de alteração hidrotermal sericítica. A presença de muscovita grossa radiada está associada a sulfetação com maiores teores auríferos em corpos mineralizados em ocorrências no setor leste da PAAF (Stabile Jr., 2012).

Assim como a gamaespectrometria, o imageamento por sensoriamento remoto também é limitado a regiões superficiais. Em regiões com condições ideais, que incluem rochas expostas, pouco intemperismo e ausência de cobertura vegetal, estes métodos são amplamente utilizados com sucesso. A área do PNM praticamente não possui vegetação nativa preservada e apresenta regiões com rochas aflorantes, porém, está localizada em região tropical com estação de chuvas bem definida e intensa, que favorece o intemperismo e forma uma cobertura de latossolo que bastante espessa em algumas áreas. Este fato que foi considerado um fator limitante ao estudo,

mas não impeditivo. Como qualquer método de sensoriamento remoto, a APC deve ser vista como complementar a outras técnicas utilizadas no processo de exploração.

Crósta e Moore (1989) desenvolveram a APC para delimitar regiões ricas em óxidos e hidróxidos relacionados a sulfatos de mineralizações em terrenos *greenstone belt*. A técnica leva em consideração a variação de fluxo de radiação espectral, de modo a suprimir efeitos de radiação que dominam todas as bandas para realçar as características de reflectância dos minerais analisados. Loughlin (1991) propôs que a técnica fosse realizada separadamente em conjuntos de bandas, de modo a garantir as informações relacionadas aos minerais de interesse ficassem concentradas na mesma imagem gerada (PC). Esta ficou conhecida como Técnica Crósta. De modo análogo, a técnica aplicada neste trabalho buscou por áreas ricas em muscovita (Fig. 3a; APC entre as bandas ASTER 1, 4, 6, 7) e illita (Fig. 3b; APC entre bandas ASTER 1, 3, 5 e 6).

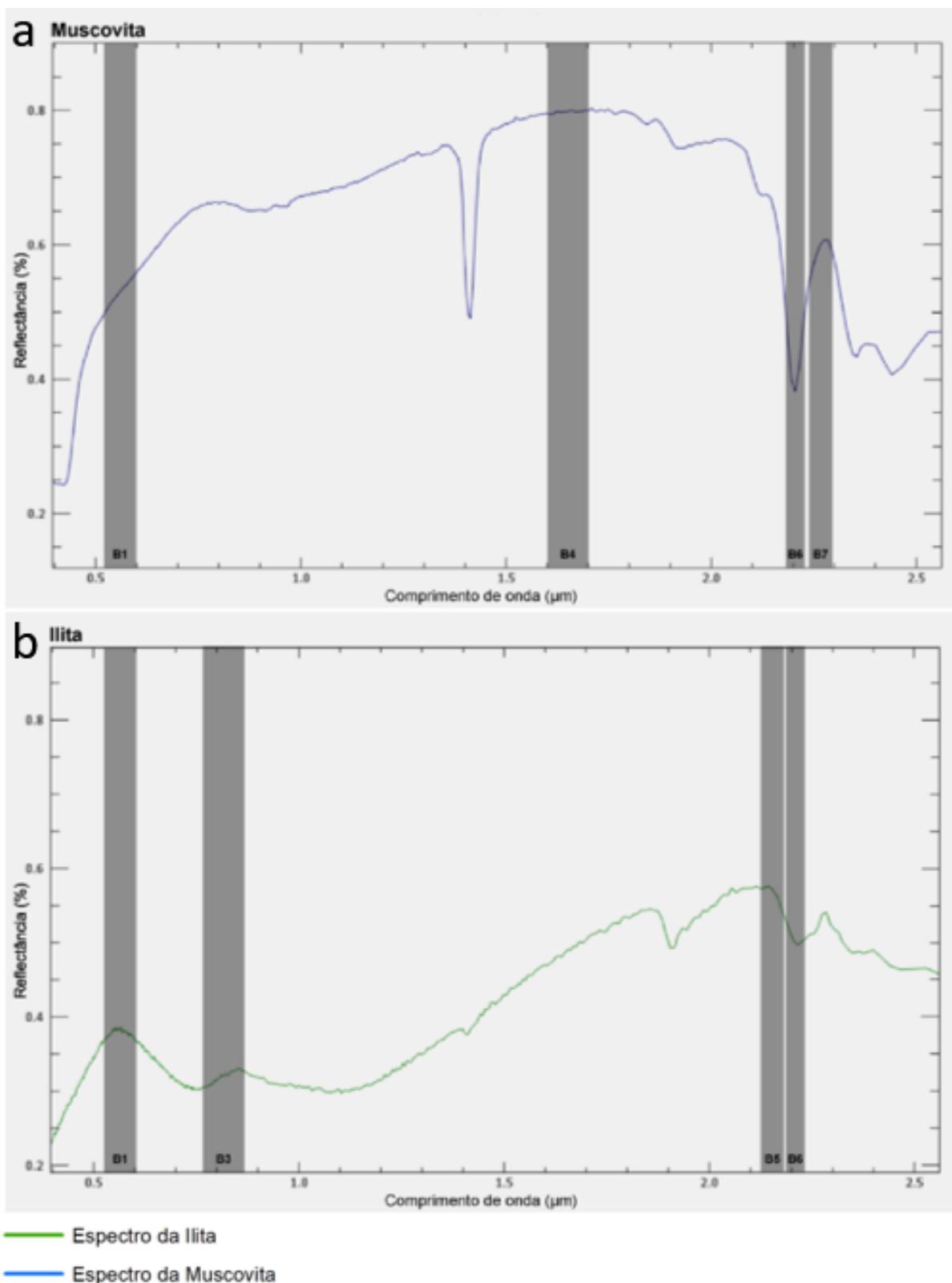


Figura 3: Espectro de (a) muscovita e (b) illita retirados da biblioteca da USGS.

4.3.3.1 Classificação supervisionada (Máxima Verossimilhança)

O método da máxima verossimilhança é um método estatístico supervisionado e, portanto, requer amostras de treinamento para definir classes. O método busca por valores de modo a maximizar a probabilidade de que os valores escolhidos por ele pertençam às classes pré-definidas na fase de treinamento. É assumido que as estatísticas para cada classe em cada banda possuem distribuição normal e são calculadas as probabilidades de um determinado pixel pertencer a uma classe definida. A implementação utilizada no *software* ENVI foi proposta por Richards (1999; eq. 8).

$$g_i(x) = \ln p(\omega_i) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_i| - \frac{1}{2} (x - m_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - m_i) \quad (\text{eq. 8}),$$

sendo i a classe definida; x o número de bandas; $p(\omega_i)$ a probabilidade da classe ω_i ocorrer na imagem e ser assumida para todas as classes; $|\Sigma_i|$ a determinante de matriz de covariância para os dados na classe; e Σ_i^{-1} a matriz inversa; m_i a média dos vetores.

5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1. Magnetometria

Os resultados de magnetometria permitiram a delimitação do corpo de anomalia magnética, bem como a interpretação de lineamentos magnéticos marcados pela presença de magnetita. Todos os grids utilizados neste trabalho foram confeccionados a partir de uma interpolação pelo método da mínima curvatura. O tamanho das células foi definido em 100, referente a 1/5 do espaçamento entre as linhas de voo (500 m).

O campo magnético total do PNM (Fig. 4) indica uma anomalia magnética na região com amplitude de cerca de 215 nT, sem permitir uma interpretação direta sobre a existência de remanência significativa. Os *grids* obtidos a partir separações regionais-residuais utilizando filtros do tipo polinomial, passa-banda e por *upward continuation* obtiveram resultados semelhantes, sendo o último o escolhido por ser considerado o que melhor suavizou as feições de borda interpretadas como interferências de caráter regional, ao passo que minimizou a perda de amplitude da anomalia-alvo.

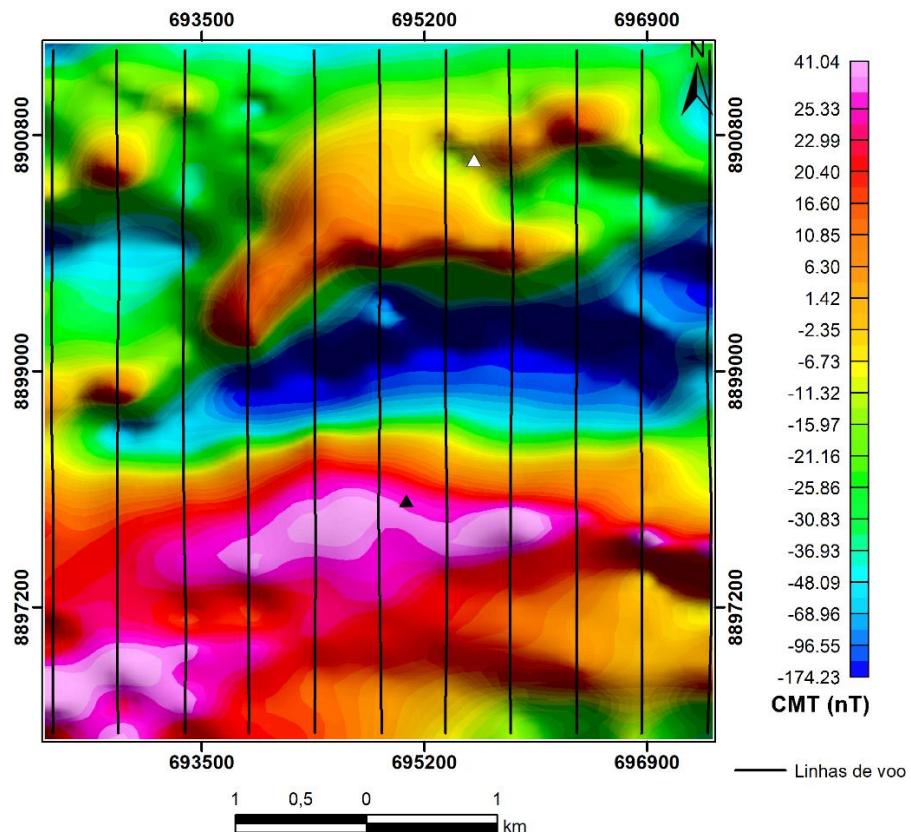


Figura 4: Campo magnético total (CMT) do Prospecto Novo Mundo e linhas de voo do aerolevantamento.

A remoção regional-residual via *upward continuation* (Fig. 5) buscou enfatizar a resposta magnética local, removendo sua componente regional. A altura de 420 m foi escolhida de maneira iterativa, sendo considerada a primeira altura de voo onde apenas a anomalia regional era observada. Este *grid* foi subtraído do *grid* de CMT, resultando Campo Magnético Residual (CMR) da PNM. O caráter dipolar das anomalias magnéticas faz com que a identificação do corpo causador da anomalia, por vezes, não é direta. Assim como a maioria das anomalias da região, a anomalia do PNM possui magnetização normal, embora corpos de magnetização reversa também sejam encontrados. Ela apresenta amplitude magnética variando de -149 nT a 54 nT, aproximadamente. A inclinação do IGRF na área para a data média do levantamento (06/03/2013) foi -8,1° e declinação média -17,7°.

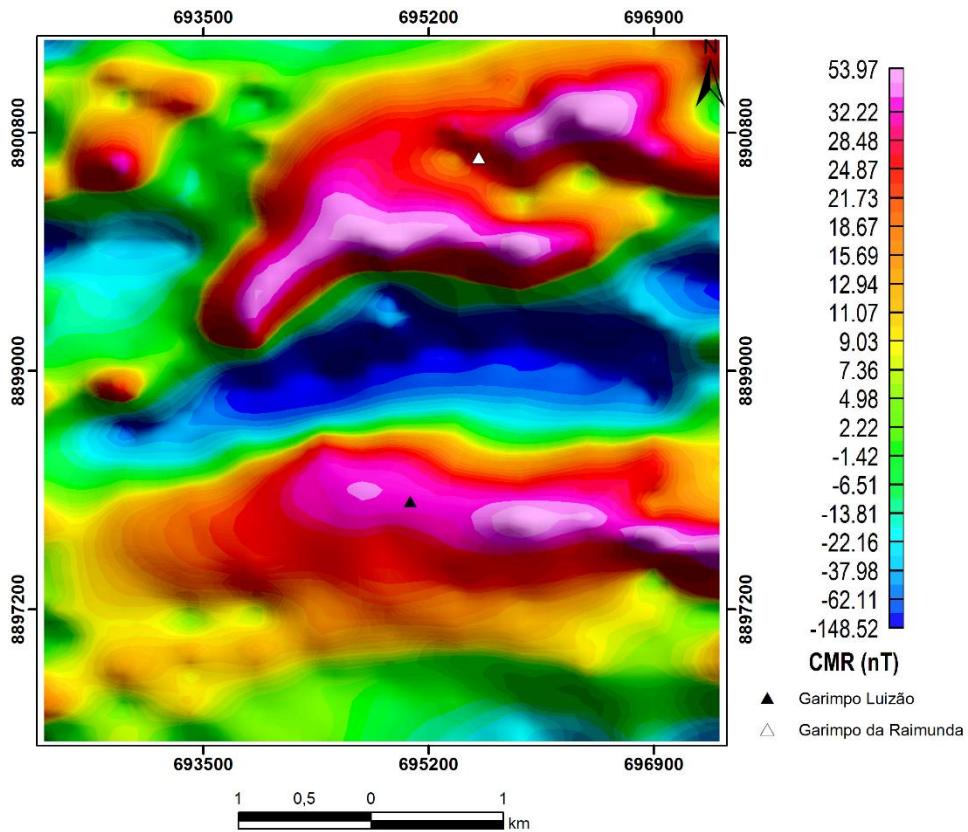


Figura 5: CMR apóis filtragem Regional-Residual (*upward continuation* de 420 m).

A delimitação lateral do corpo causador da anomalia magnética é uma das especialidades do método magnetométrico. O resultado obtido pelo filtro de Gradiente Horizontal Total (Fig. 6a), que utiliza gradientes de duas direções, e pela Amplitude do Sinal Analítico (Fig. 6b), que utiliza gradientes de três direções, obtiveram respostas semelhantes. Por se tratar de uma área de

cerca de 25 km², o primeiro foi considerado mais claro para definir os limites da fonte magnética. A fonte da anomalia apresenta forma lenticular e extensão de aproximadamente 4x3 km, com direção preferencial no sentido E-W. No limite norte, apresenta gradiente mais suave (Fig. 6b), o que, assumindo a ausência de magnetização remanente, sugere um leve mergulho no sentido N.

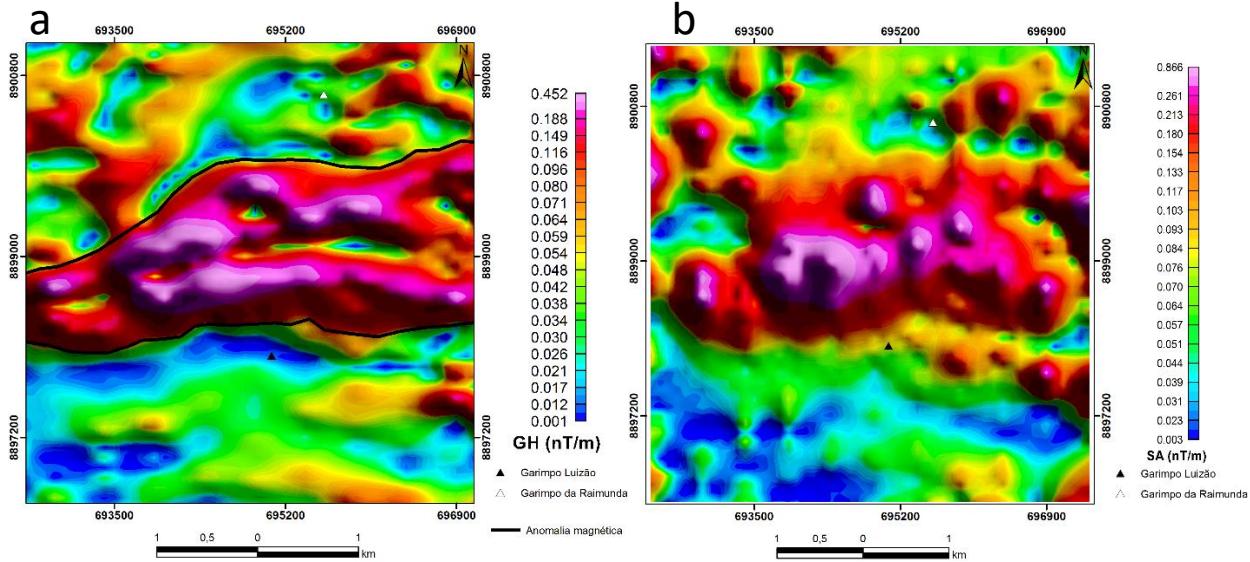


Figura 6: (a) Gradiente Horizontal Total e (b) Sinal Analítico 3D do Prospecto Novo Mundo – MT.

A técnica de redução ao polo magnético adaptada a baixas latitudes foi realizada utilizando o Oasis Montaj. O algoritmo possui um artifício de correção baseado na inclinação complementar da anomalia, sendo considerado adaptado para regiões de baixa latitude magnética. A inclinação complementar (média) da anomalia magnética do PNM é de - 81,9°. Ressalta-se que o corpo obtido a partir desta filtragem (Fig. 7) é condizente com o GHT, indicando que a redução ao polo permitiu o refinamento da delimitação do corpo causador da anomalia magnética e, por consequência, indica que a presença de magnetização remanente, se existente, é incipiente.

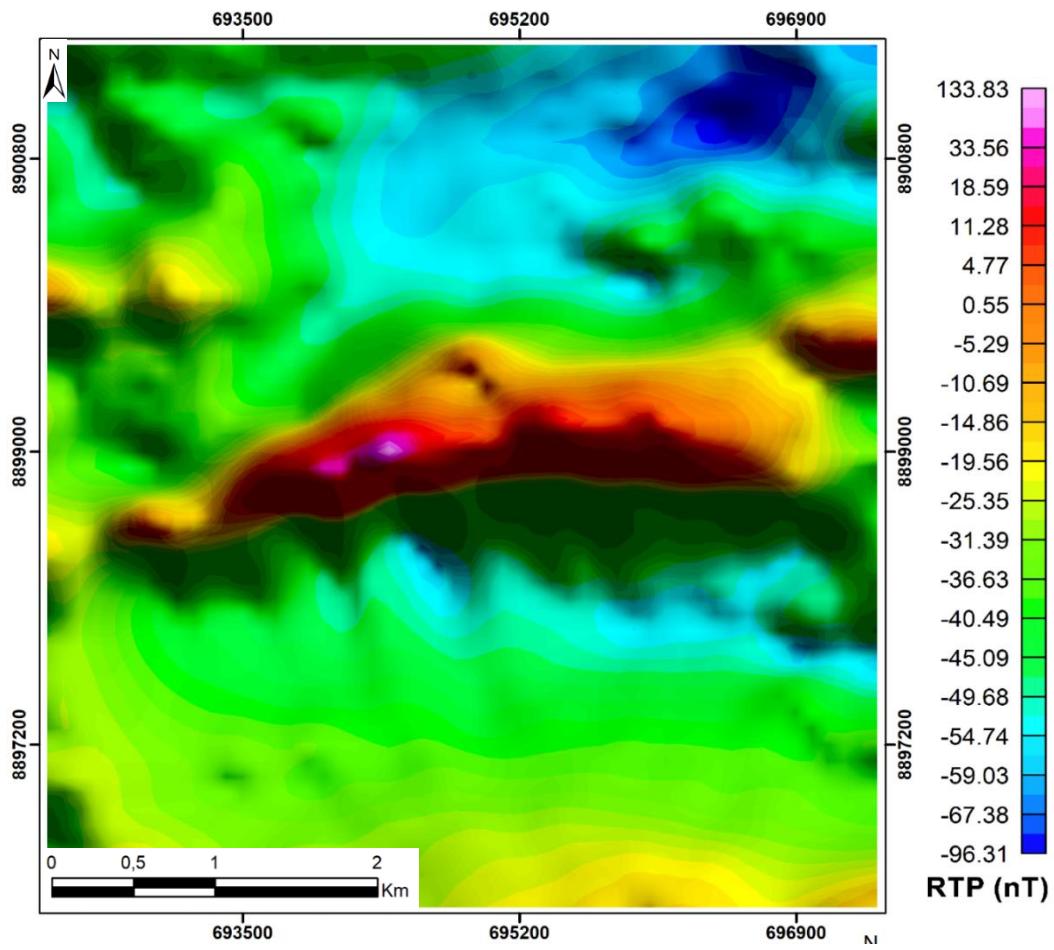


Figura 7: Redução ao polo magnético da anomalia presente no Prospecto Novo Mundo.

O corpo de magnetização anômala não aflora, e não foram identificadas anomalias de amplitude semelhante próximas a região do PNM. O *Tilt Derivative* (Fig. 8) mostra lineamentos seguindo dois *trends* preferenciais na região do PNM: SW-NE e E-W. Existe ainda um outro *trend*, mais incipiente, na direção NW-SE. Esses lineamentos magnéticos são interpretados como falhas, fraturas e zonas de cisalhamento. Os lineamentos de direção E-W parecem ser mais jovens, já que cortam os lineamentos SW-NE. Os dois lineamentos bem ao centro do PNM parecem ter forte relação com o corpo de maior magnetização. O caráter estruturalmente controlado da maioria das ocorrências de ouro da região (em filões) pode estar relacionado aos lineamentos que cortam a região, visto que falhas e fraturas favorecem a percolação de fluidos hidrotermais e, por consequência, a formação de zonas mineralizadas.

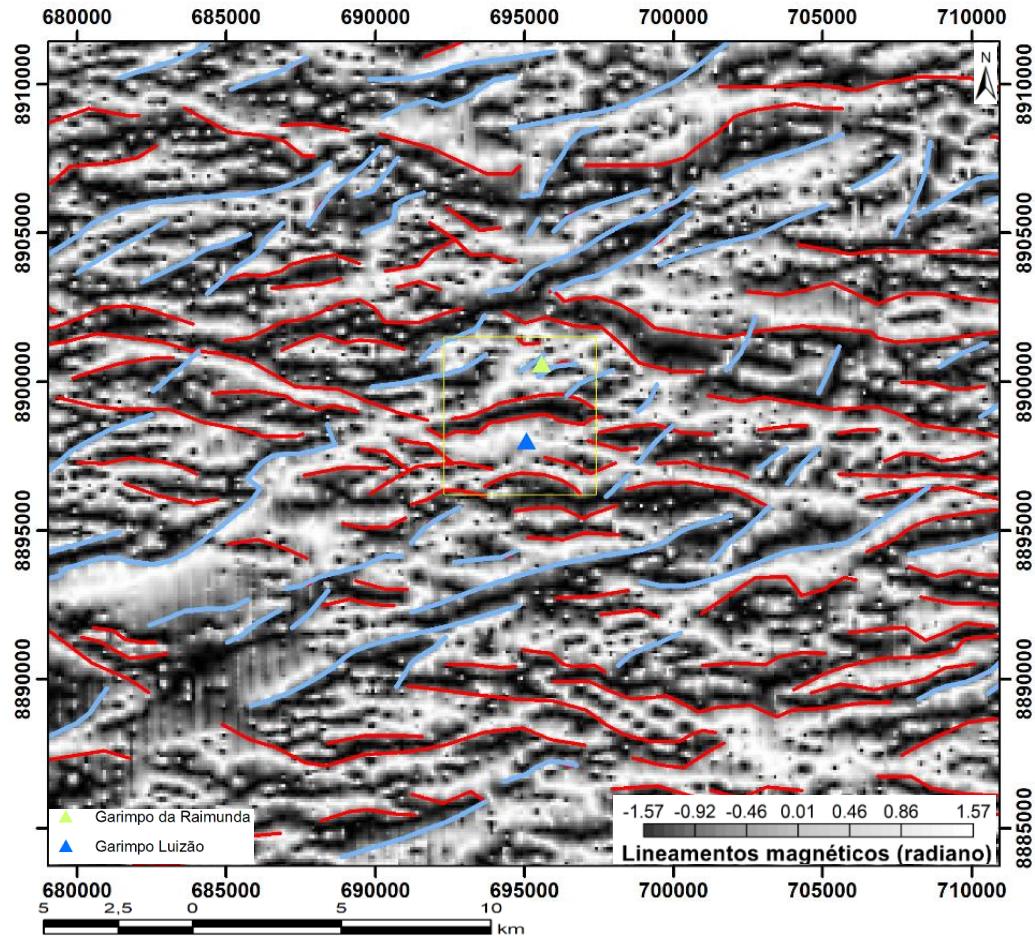


Figura 8: *Tilt Derivative* com a interpretação dos lineamentos magnéticos (escala regional), garimpos e o PNM.

A possibilidade de magnetização remanente baixa ou incipiente permitiu que fosse realizada a técnica da Deconvolução de Euler, a qual seria afetada negativamente por sua presença. A técnica indicou que o topo do corpo de alto magnético possui profundidades que variam entre aproximadamente 100 a 250 metros (Fig. 9). Foram analisados seis testemunhos de sondagem relativamente próximos ao corpo de alto magnético, sendo que em três deles foram observadas rochas maficas, possivelmente diques. Estes diques podem ter causado interferência na análise, representados por pontos dispersos de baixa profundidade em porções dominadas por pontos que indicam maior profundidade média.

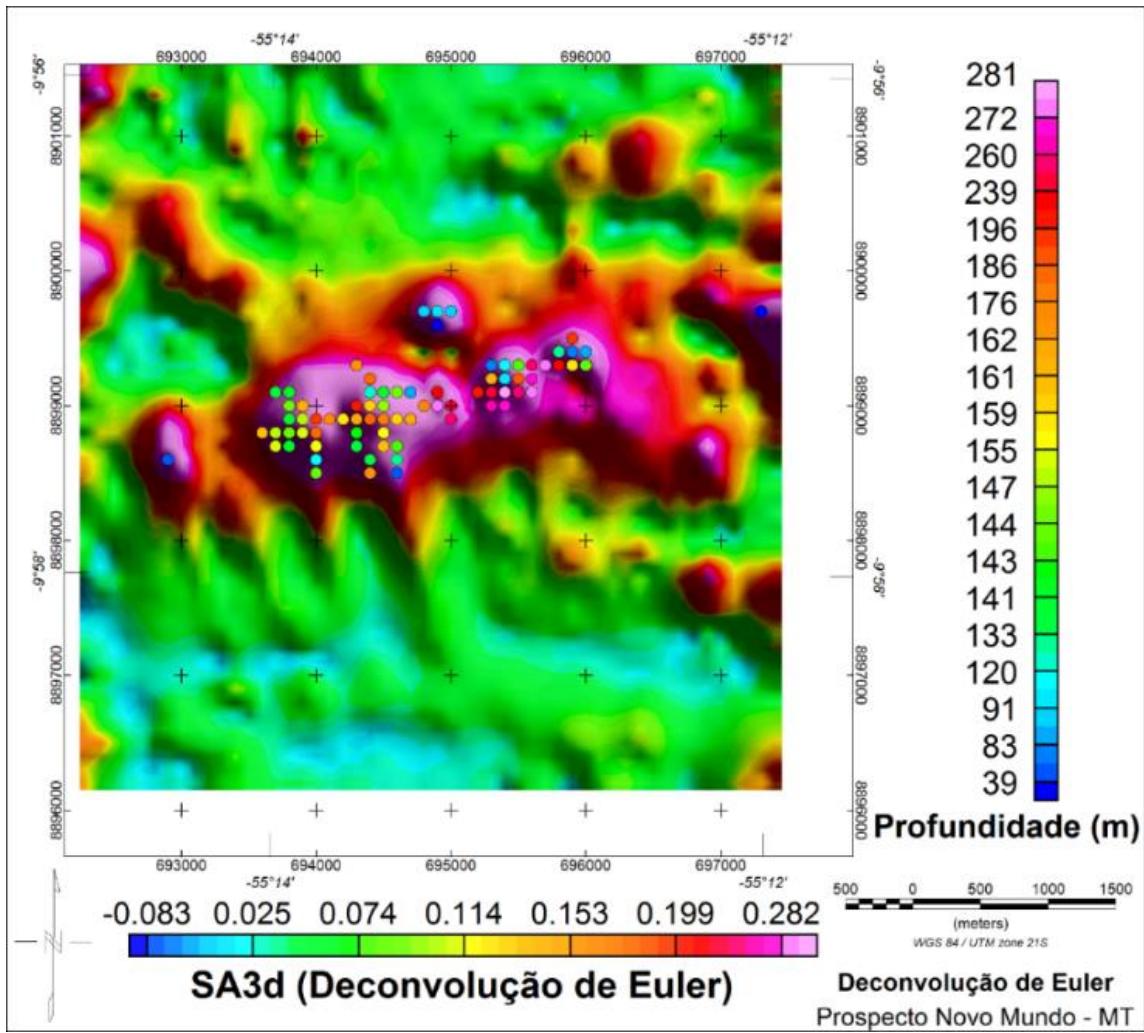


Figura 9: Profundidades do topo do corpo anômalo por Deconvolução de Euler.

5.2. Gamaespectrometria

Os resultados gamaespectrométricos permitiram a interpretação de regiões superficiais associadas a processos de alteração hidrotermal.

Altas concentrações de K estão restritas a topos de morros dissecados nas porções sul e noroeste do PNM (Fig. 10a), ainda em processo de erosão. Nas porções de menor altitude, que representam a maior parte da área, observam-se baixas concentrações de K (2,4 a 4,7%). Considerando a litologia da região, essa baixa concentração pode ser interpretada como resultado de processos intempéricos superficiais, ou por processos de alteração hidrotermal, como a alteração hidrotermal argilica com caulinita.

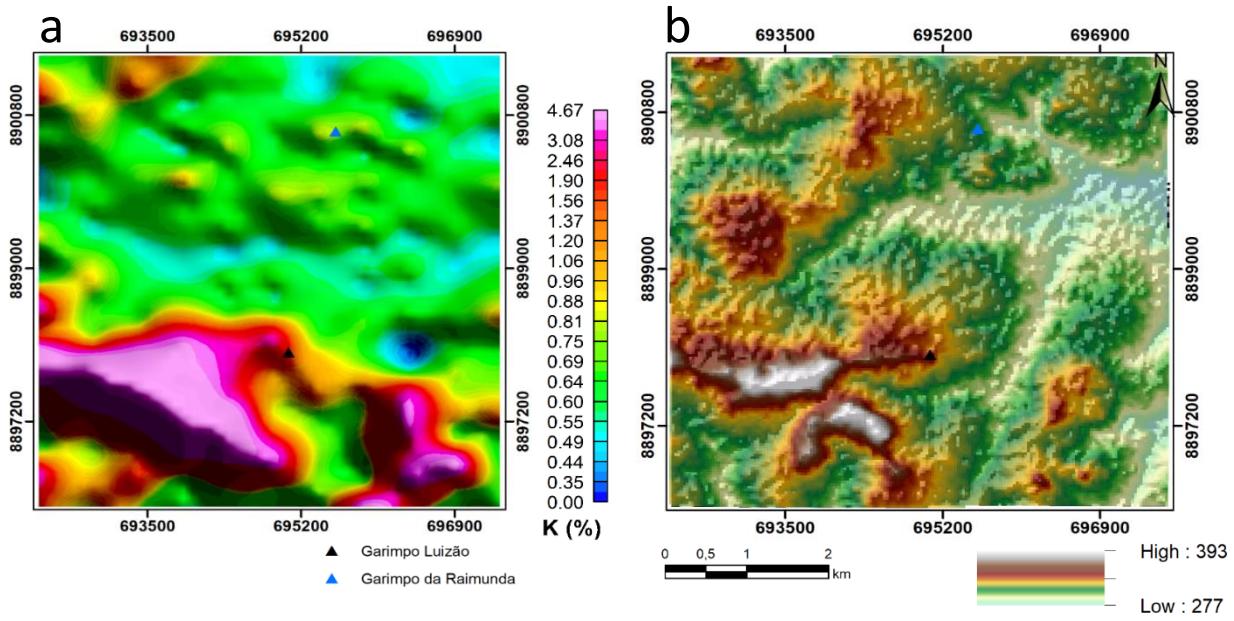


Figura 10: (a) Concentração de K e (b) modelo digital de terreno com a localização dos garimpos.

As maiores concentrações de eTh chegam a 48,17 ppm (Fig. 11a) e estão concentradas na porção intermediária da área de estudo, enquanto as de eU (Fig. 11b) estão na porção noroeste e chegam a 10,41 ppm. Observou-se que as ocorrências auríferas estão principalmente sobre regiões de baixo eU e eTh. Essa relação pode estar associada a alterações ácidas, a exemplo da sericítica e/ou com muscovita grossa e radiada a qual as zonas mineralizadas estão associadas.

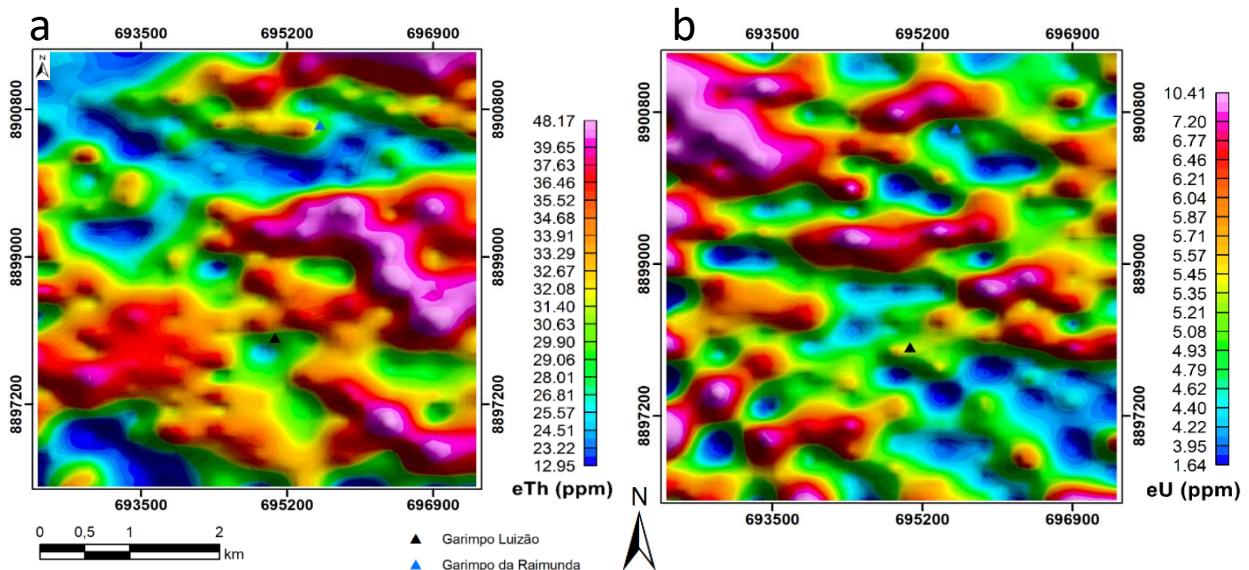


Figura 11: Concentração de (a) tório, (b) de urânio e localização dos garimpos.

O mapa ternário (Fig. 12) permitiu associar a porção a sul à suíte intrusiva Nhandú (granito Novo Mundo), com concentrações de K e eTh mais elevadas, enquanto a porção rica apenas em eTh indica correlação com rochas gnáissicas a migmatíticas do Complexo Cuiú-Cuiú. A porção

NW, com alto de K e eU, está possivelmente associada a processos de intensa alteração hidrotermal, em paragênese de alteração hidrotermal potássica.

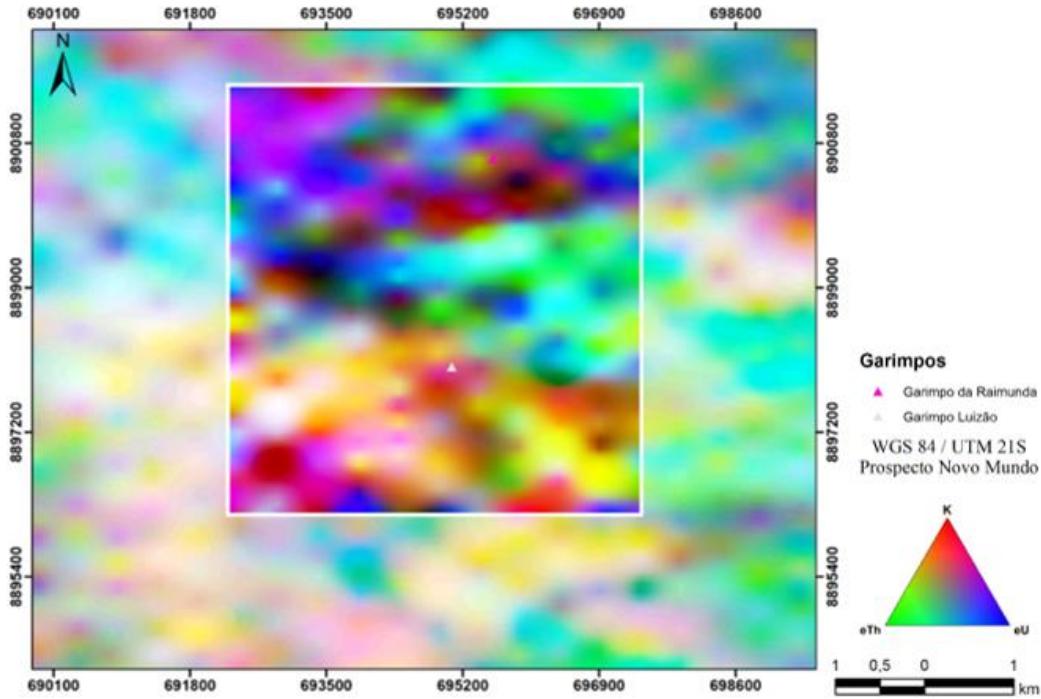


Figura 12: Mapa ternário da região do Prospecto Novo Mundo e localização dos garimpos.

O Fator F (Fig. 13) apresenta picos nas porções noroeste e sul do PNM. As áreas destacadas possuem forte correlação com as contagens de K (Figs. 10a e 14). A porção SW do mapa apresenta valores de fator F da ordem de 1%, provavelmente relacionados tanto a composição natural da rocha, onde aflora o granito Novo Mundo, quanto de alterações hidrotermais vinculadas a minerais com este elemento (e.g. alterações potássica e sericítica). A razão entre eTh e K (Fig. 14), de maneira análoga ao Fator F, indica regiões de possível alteração hidrotermal, comparando um elemento de alta mobilidade (K) com um de baixa (Th). Na porção NE, porém, o realce se dá pela presença K associada a altas concentrações de eU (aproximadamente 10 ppm) e baixas de eTh (aproximadamente 13 ppm), sugerindo forte alteração hidrotermal potássica, como observado no setor SE da área em trabalhos de campo do grupo GEOLIT e nas concentrações de K (Fig. 10a), além dos altos de K e eU do mapa ternário (Fig. 12). Altos de Fator F a norte indicam relações com lineamentos SW-NE, enquanto na porção mais a sul sugerem estar relacionada a lineamentos, de escala regional, W-E.

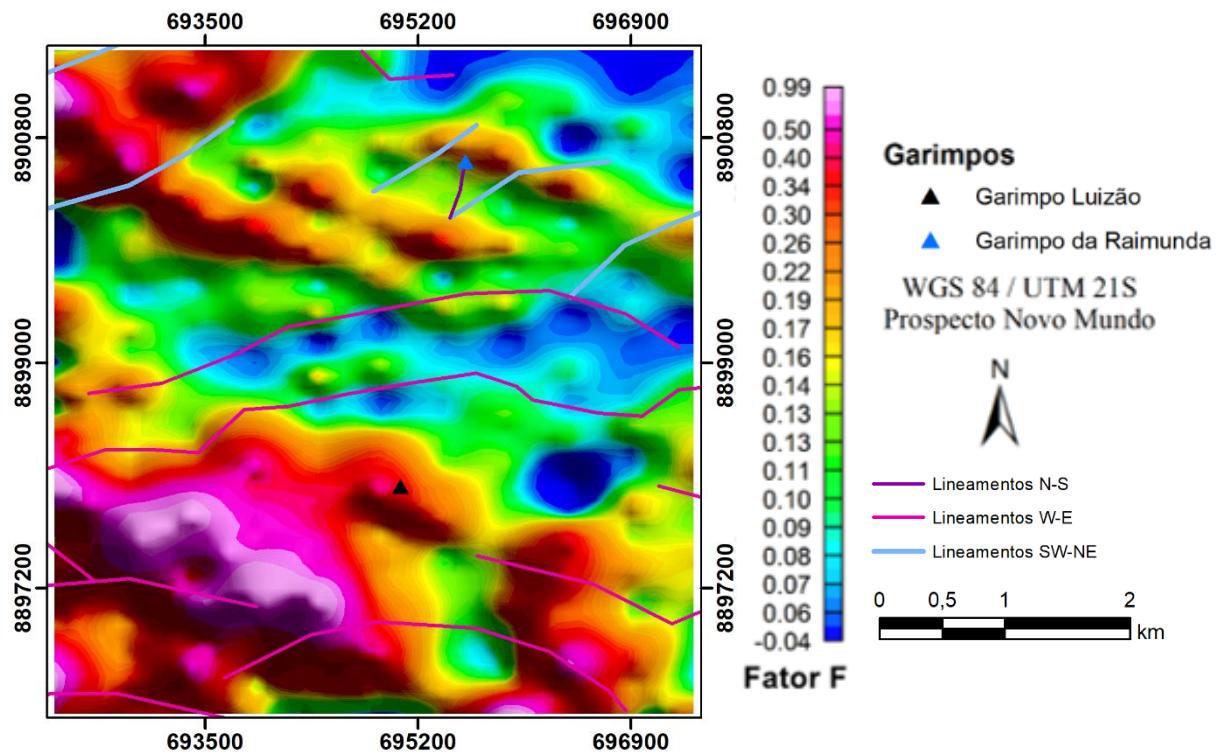


Figura 13: Mapa de fator F e sobreposição com os lineamentos interpretados

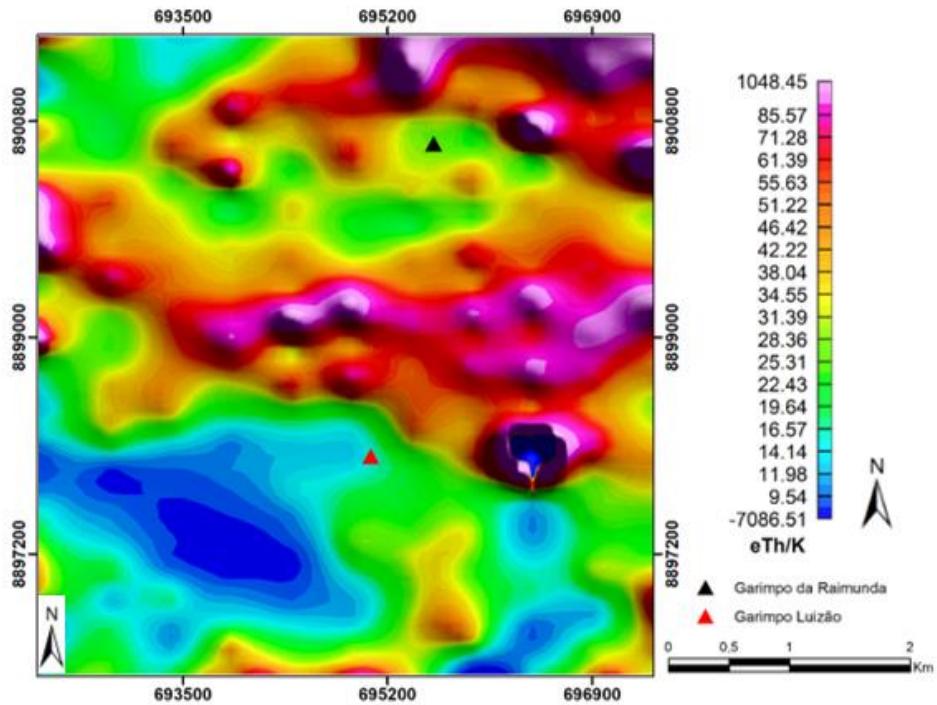


Figura 14: Razão eTh/K e localização dos garimpos do Prospecto Novo Mundo.

5.3. Sensoriamento Remoto

As técnicas de sensoriamento remoto foram utilizadas para auxiliar na interpretação de áreas de alteração hidrotermal em regiões superficiais.

A APC foi realizada a partir de imagens ASTER de setembro de 2000, período historicamente menos chuvoso na região. O autovetor da PC4, para a APC das bandas 1, 3, 5 e 6 voltada a detecção da illita (Tabela 1), apresentou o valor de aproximadamente -0,77 na banda 5 (2.145 μm – 2.185 μm) e o valor de aproximadamente 0,63 na banda 6 (2.185 μm – 2.225 μm), correlações esperadas para bandas de maior absorção e de maior reflectância, respectivamente (Fig. 3b). A illita, porém, apresenta maior reflectância e maior absorção, respectivamente, nas bandas analisadas e por esse motivo foi realizado o produto entre a PC por -1, de modo este mineral fosse evidenciado.

Tabela 1: Matriz de autovetores entre as bandas 1, 3, 5 e 6.

Matriz de autovetores para APC do mineral Illita				
Autovetores	Banda 1	Banda 3	Banda 5	Banda 6
PC 1	-0.183934	0.116029	-0.633708	-0.742375
PC 2	-0.162932	-0.982859	-0.059533	-0.062428
PC 3	-0.965594	0.143054	0.062970	0.207845
PC 4	0.085152	-0.007816	-0.768703	0.633864

O autovetor da PC4, para a APC entre as bandas 1, 4, 6 e 7 voltada a detecção da muscovita (Tabela 2), apresentou um valor de aproximadamente -0,70 na banda 6 (2.185 μm – 2.225 μm) e de aproximadamente 0,71 para a banda 7 (2.235 μm – 2.285 μm). Estas correlações são esperadas para bandas de maior absorção e reflectância, respectivamente (Fig. 3a), e por este motivo foi considerado representativo da muscovita.

Tabela 2: Matriz de autovetores entre as bandas 1, 4, 6 e 7.

Matriz de autovetores para APC do mineral muscovita				
Autovetores	Banda 1	Banda 4	Banda 6	Banda 7
PC 1	-0.142454	-0.628700	-0.576181	-0.502453
PC 2	-0.989407	0.075430	0.105657	0.064970
PC 3	0.017119	-0.769920	0.408879	0.489641
PC 4	-0.022092	0.079185	-0.699765	0.709628

A partir das imagens produzidas pela APC, foi realizada uma classificação supervisionada utilizando o algoritmo de Máxima Verossimilhança do software ENVI. Antes, foi realizada uma filtragem gaussiana passa-baixa com o intuito de reduzir ruídos, com tamanho do *kernel* igual a 5. Posteriormente, foram selecionadas manualmente porções interpretadas como região onde havia respostas espectrais que indicassem a presença de muscovita – tonalidades claras (Fig. 15a) e de illita. A partir das áreas de treinamento, a execução do algoritmo de máxima verossimilhança permitiu a identificação de todas as áreas com respostas semelhantes às fornecidas durante o treinamento, para muscovita (Fig. 15b), para illita e para ambos os minerais. A integração das áreas de interesse dos minerais avaliados foi considerada de intensa alteração hidrotermal e nela foi realizada uma composição ternária. A composição ternária realizada a partir de três canais considerados índices de minerais hidrotermais (Fig. 16) permitiu a delimitação de potenciais alterações hidrotermais.

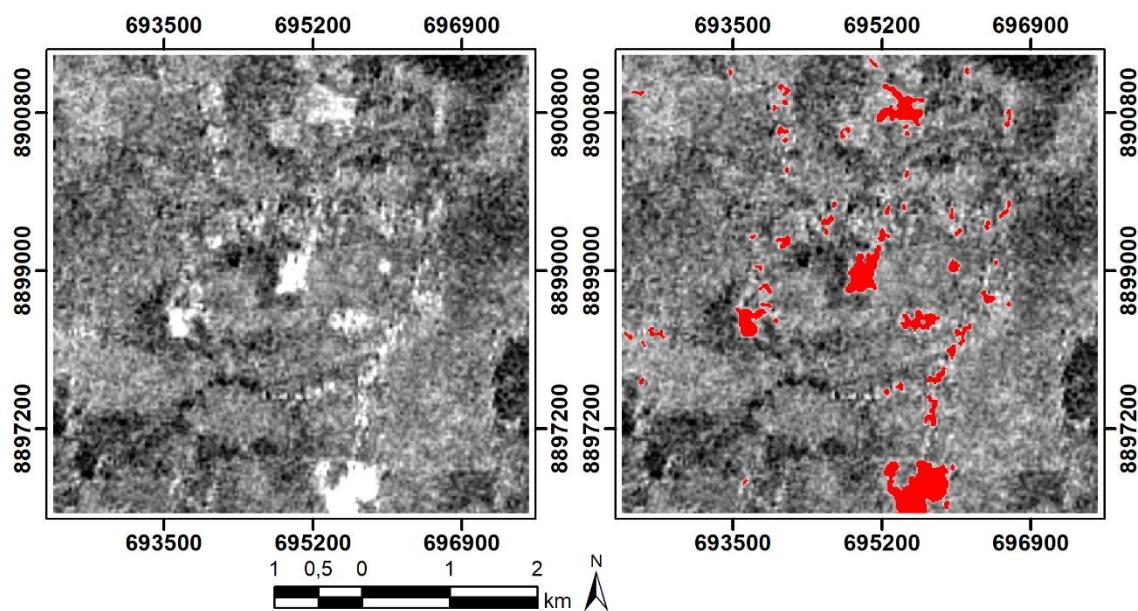


Figura 15: (a) PCA representativa da muscovita e (b) resultado da classificação supervisionada.

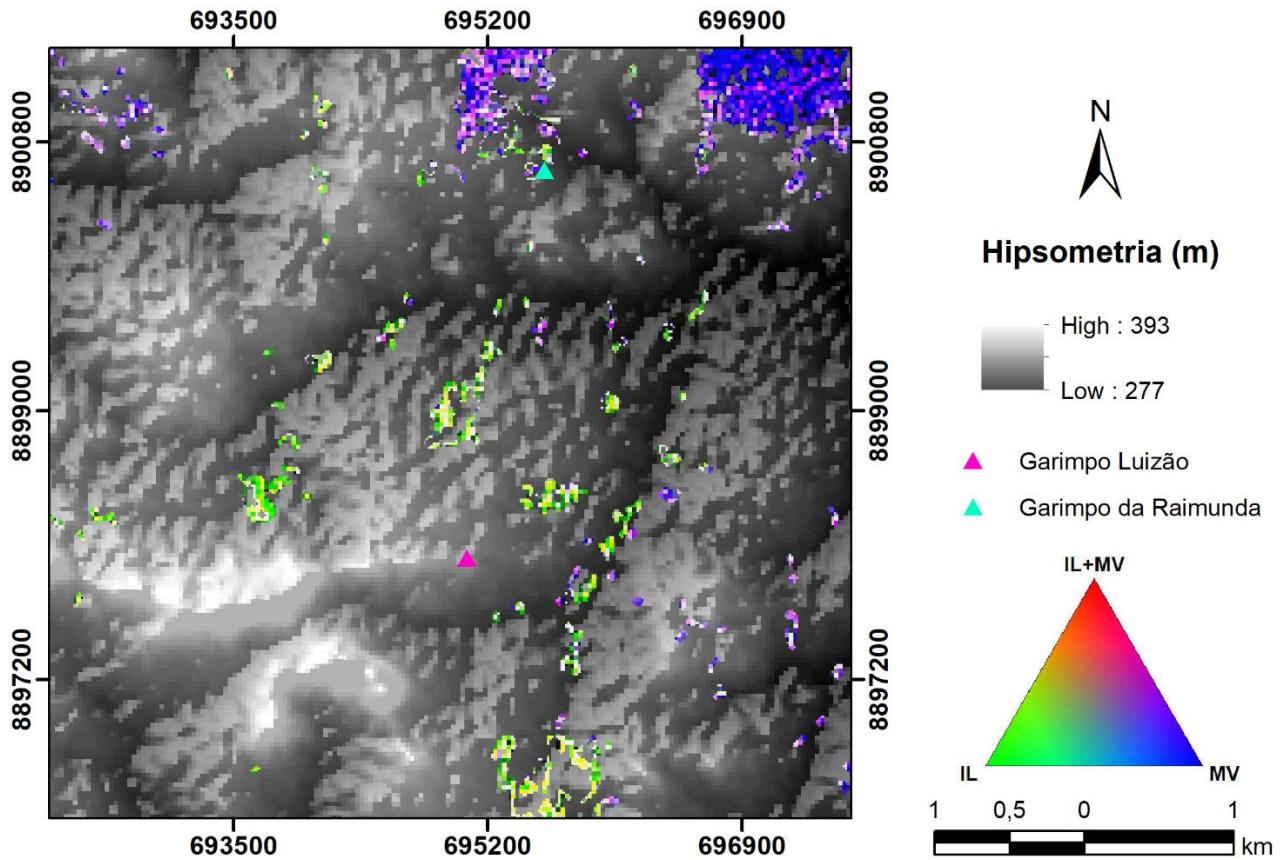


Figura 16: Composição ternária da análise por principais componentes no Prospecto Novo Mundo.

A APC permitiu com que fossem selecionadas áreas de interesse (Fig. 17a). De maneira análoga, foram selecionadas áreas de baixa concentração de eU (Fig. 17b) e de altos valores de fator F (Fig. 17c), uma vez que as ocorrências auríferas estão principalmente sobre regiões de baixo eU e eTh. Foi considerado que todas as áreas de interesse selecionadas a partir dos vetores exploratórios definidos possuem o mesmo peso. A sobreposição dessas áreas de interesse permitiu identificar intersecções de vetores exploratórios, que foram consideradas mais favoráveis a presença de rochas mineralizadas.

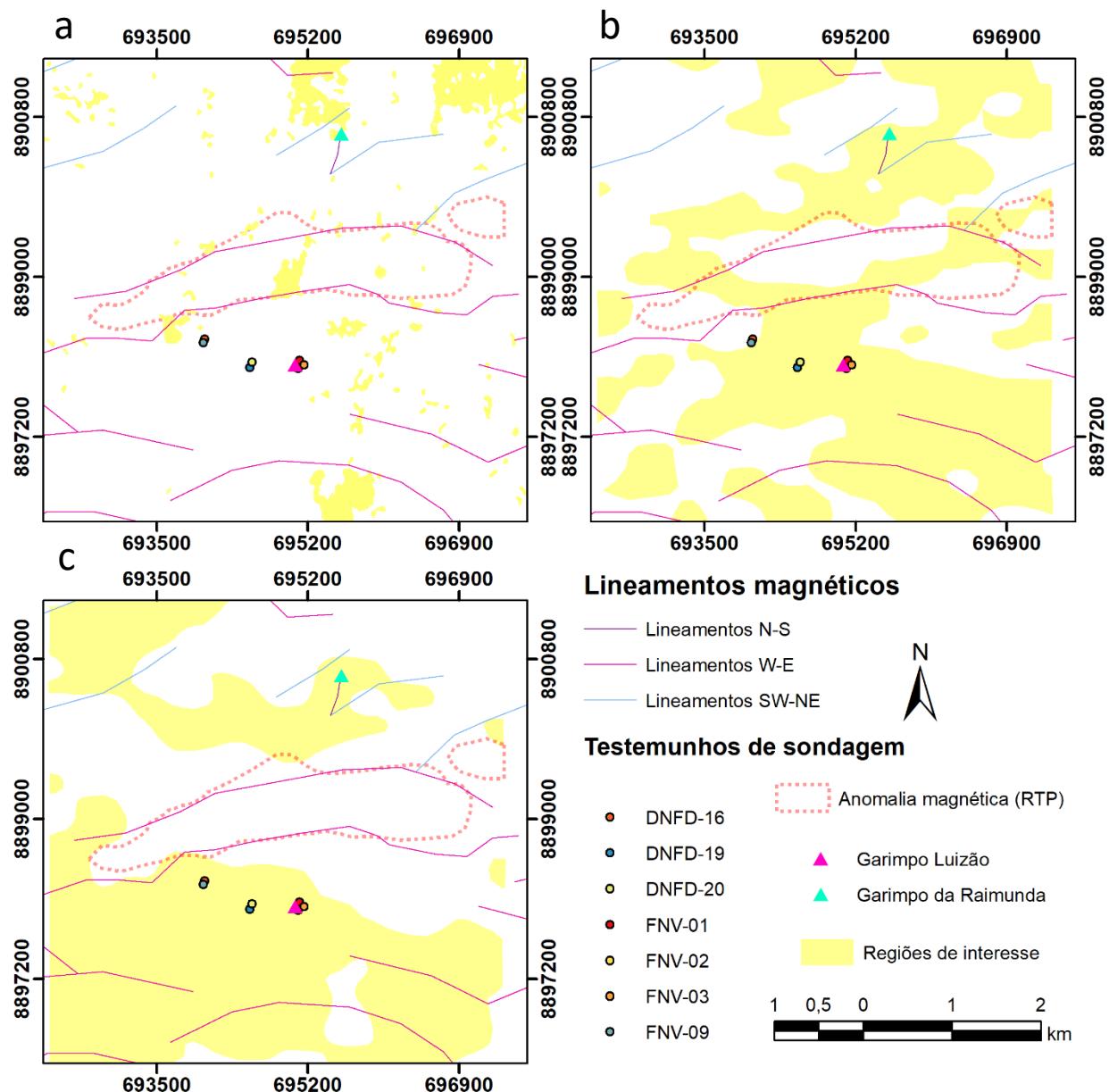


Figura 17: Integração de dados para definição de regiões de potencial exploratório: (a) PCA definindo áreas de assinaturas espectrais típicas de illita e muscovita; (b) Baixas concentrações de eU; (c) Altos valor de fator F (baixa razão eTh/K).

6. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A magnetometria permitiu uma boa definição do corpo de magnetização mais intensa situado no centro do Prospecto Novo Mundo. Os lineamentos magnéticos da porção norte do PNM pertencem a uma sequência de direção SW-NE, enquanto os a sul estão relacionados a uma sequência que, em escala regional, possui direção e E-W. Na porção central do PNM, existem dois lineamentos paralelos que estão limitando a fonte da anomalia magnética definida pelo GHT (Fig. 6a). Ocorrências em filão tendem a se associar a zonas de alteração hidrotermal concentradas em estruturas geológicas, como falhas e fraturas, representadas por sequências de lineamentos magnéticos. O filão da Raimunda ocorre justamente sobre um lineamento interpretado. Tanto ocorrências em estilo disseminado como as estruturalmente controladas estão geneticamente e espacialmente associados a zonas de alteração hidrotermal.

Emissões gama mostram que as regiões com alto K, de alto fator F e baixa razão eTh/K, coincidem com lineamentos magnéticos a sul e a norte do PNM, podendo ter funcionado como facilitadores a percolação de fluidos, sin-genéticos ou posteriores a essas zonas de fraqueza. Sua composição ternária pode sugerir os limites entre o granito Novo Mundo (suíte intrusiva Nhandú) e as rochas do Complexo Cuiú-Cuiú. As ocorrências auríferas do PNM estão em regiões de baixo eU local, possivelmente atrelados a alteração ácida sericítica e/ou com muscovita grossa e radiada. Essa associação das zonas mineralizadas com baixos de eU foi considerada um vetor exploratório, já que as alterações associadas ao minério são de ambiente ácido e remobilizam esses elementos.

O terceiro vetor exploratório considerado neste trabalho foi resultado do produto da análise por principais componentes, que indicam assinaturas potencialmente associadas a minerais de interesse. Estas zonas, porém, não estão restritas as áreas indicadas pela APC. Isso ocorreu porque altos valores, como encontrados na APC (Fig. 16), tendem a mascarar regiões de alteração de menor escala e/ou dispersas. É importante ressaltar que os espectros utilizados como referência referem-se a espectros de minerais puros, que tendem a variar quando os minerais são submetidos a processos intempéricos (Fig. 18) como o da área de estudo. A região do garimpo do Luizão é marcada por forte alteração sericítica pervasiva associada ao minério, porém essa feição não foi evidenciada pela APC. Portanto, os resultados obtidos pela APC podem estar relacionados a outros argilominerais de espectros semelhantes (e. g. caulinita, paragonita) que não illita ou muscovita, mas ainda assim argilominerais oriundos de processos de alteração hidrotermal. Isso ocorre já que outros argilominerais associados a esse processo possuem regiões de alta reflectância e alta absorção nas mesmas bandas que permitem

evidenciar a illita e a muscovita, apenas diferindo na quantidade de energia refletida, fator que tende a variar com os processos intempéricos.

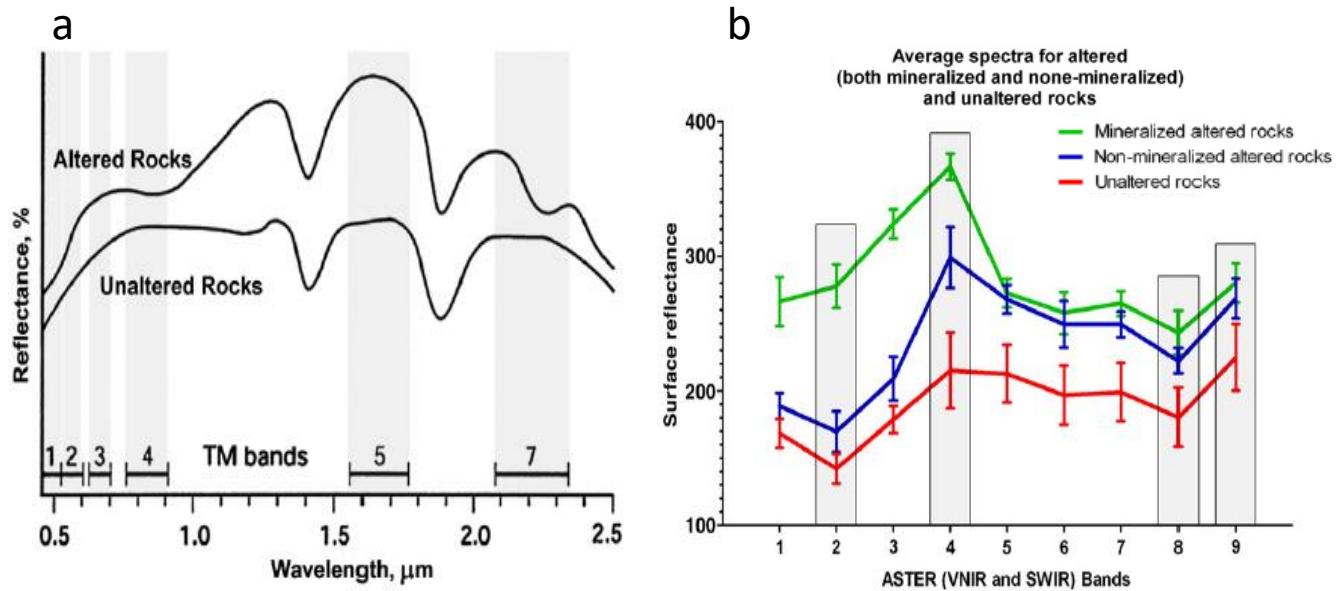


Figura 18: Espectros médios de rochas alteradas e não alteradas dos trabalhos de (a) Sabins (1997) e (b) Gabr *et al.* (2010).

A integração dos vetores exploratórios analisados permitiu a confecção de um mapa de favorabilidade aurífera (Fig. 19). Áreas onde nenhum vetor exploratório ocorre foram interpretadas como sem potencial aurífero. Regiões onde apenas um vetor é satisfeito foram consideradas de baixa favorabilidade aurífera, já que a presença de alteração hidrotermal é suportada por apenas um método. Áreas onde existe a intersecção de dois quaisquer vetores indicam a presença de áreas de alteração hidrotermal por dois métodos distintos, e foram consideradas de média favorabilidade aurífera. Por fim, áreas onde três ou mais condições foram satisfeitas foram consideradas de alta favorabilidade aurífera. Quando existe a correlação entre lineamento e região com favorabilidade aurífera, é esperado que, se existente, o estilo da mineralização seja filonar. Quando não existem lineamentos próximos, mas existe uma área de favorabilidade ao redor do corpo anômalo (que abrange praticamente todo o PNM), é esperado que, se existente, o estilo da mineralização encontrada seja disseminado.

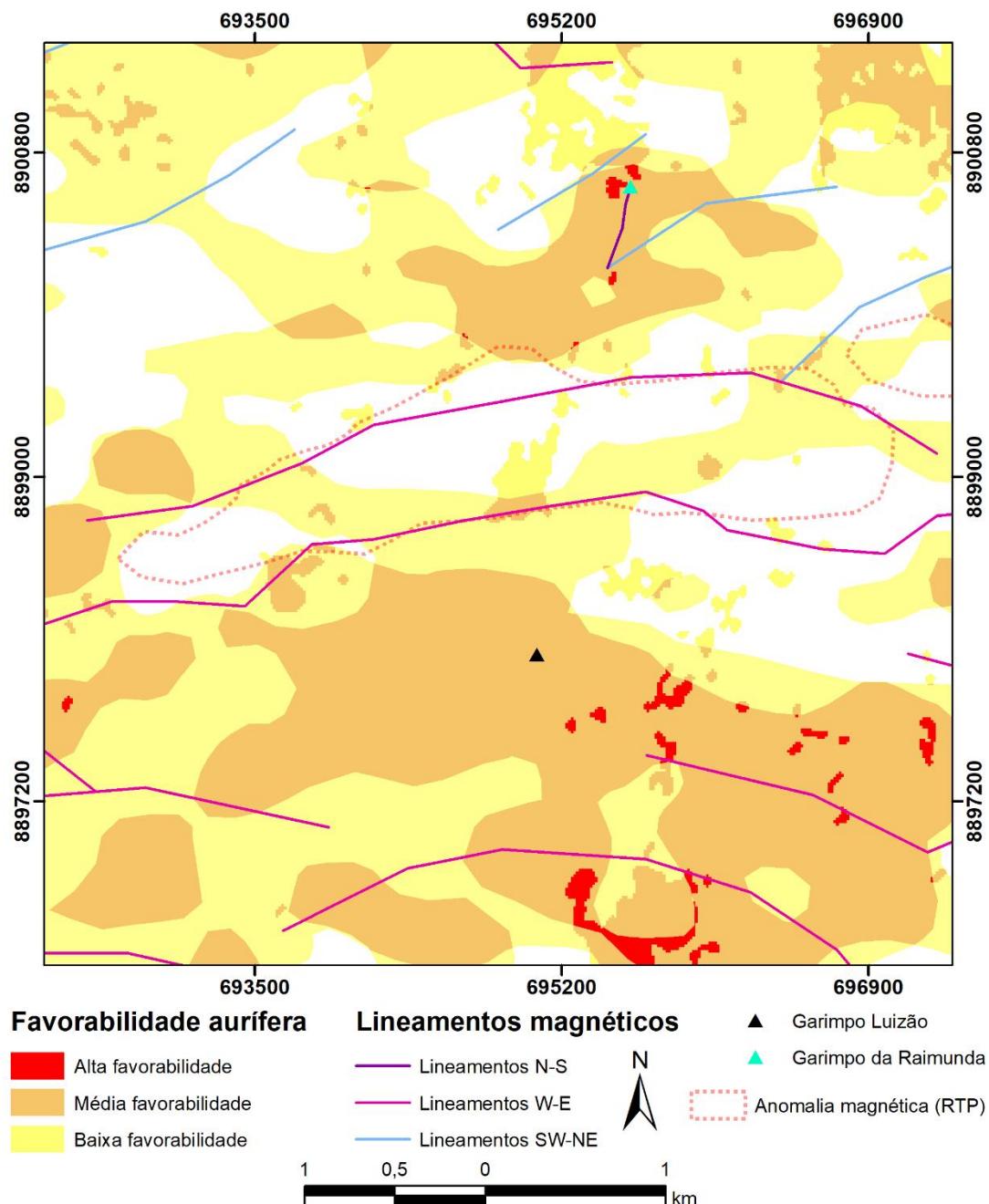


Figura 19: Mapa de favorabilidade aurífera do Prospecto Novo Mundo.

7. CONCLUSÃO

Os garimpos no PNM estão localizados nas bordas do corpo de alto contraste magnético, possivelmente controlado por estruturas associadas a lineamentos magnéticos. Este trabalho considerou cada um dos vetores exploratórios: limites do corpo magnetizado, lineamentos magnéticos, fator F, regiões de baixo eU e áreas de maior favorabilidade a apresentarem argilominerais de interesse, - illita, associada a alteração hidrotermal associada a presença de minério, e muscovita, frequentemente encontrada em zonas sulfetadas - dando a todos o mesmo peso. Áreas onde apenas um vetor exploratório definido foi encontrado foram definidas como de baixa favorabilidade aurífera e predominam nas porções sudoeste e noroeste do PNM, onde apenas altos fatores F foram encontrados. Áreas formadas pela intersecção de dois vetores exploratórios foram consideradas de média favorabilidade aurífera e predominam no centro e no sudeste do PNM, áreas que possuem alto fator F e baixa concentração de eU, dois vetores que corroboram processos hidrotermais. A região do garimpo Luizão está inserida na região caracterizada como de média favorabilidade aurífera. Isso ocorreu porque a técnica Crósta não detectou respostas de muscovita e illita (minerais puros). É esperado que a realização de espectroscopia de amostras mineralizadas da região forneça dados mais acurados para a realização de uma nova técnica Crósta, que certamente definirá melhor as áreas de alta favorabilidade. Áreas que correspondem a intersecção de todos os vetores analisados foram consideradas como de alta favorabilidade aurífera e predominam em duas regiões principais do PNM: uma a norte, ao redor do próprio garimpo da Raimunda e uma a sudeste, onde até o momento deste trabalho não foram investigadas e/ou reportadas ocorrências. Praticamente toda a área do PNM está ao redor do corpo de anomalia magnética (possível fonte). É esperado que as regiões de favorabilidade associadas a lineamentos magnéticos hospedem, se existentes, mineralizações auríferas em estilo filoniano. Nas áreas onde não existem lineamentos magnéticos, mas apenas de favorabilidade aurífera, é esperado que, se existentes, as mineralizações ocorram em estilo disseminado. A espectroscopia de amostras mineralizadas da região estava prevista, mas foi impossibilitada devido à crise sanitária (COVID-19), ficando, junto a levantamentos por métodos eletromagnéticos e de polarização induzida, como recomendações para investigações mais aprofundadas e delimitação de possíveis áreas sulfetadas associadas às mineralizações, especialmente na porção sudeste do PNM. É esperado que essa metodologia possa ser aplicada em regiões com anomalias magnéticas semelhantes na região leste da PAAF.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, C. L., Rizzotto, G. J., Rios, F. S., Barros, M. A. S., 2019, The Western Amazonian Igneous Belt. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 96, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102326>.
- Alves, C. L., Rizzotto, G. J., Rios, F. S., Barros, M. A. S., 2020, The Orosirian Cuiú-Cuiú magmatic arc in Peixoto de Azevedo domain, Southern of Amazonian craton. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 102. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102648>.
- Assis, R. R., 2011, Depósitos auríferos associados ao magmatismo granítico do setor leste da Província de Alta Floresta (MT), Craton Amazônico: tipologia das mineralizações, modelos genéticos e implicações prospectivas, Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.
- Assis, R. R., 2015, Depósitos auríferos associados ao magmatismo félscico da Província Aurífera de Alta Floresta (MT), Craton Amazônico: Litogegeoquímica, idade das mineralizações e fonte dos fluidos. Tese de doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.
- Assis, R. R., Xavier, R. P., Paes de Barros, A. J., Barbuena, D., Trevisan, V. G., Ramos, G., Teixeira, R. V., Miguel-Jr., E., Rodrigues, R. M., Stabile, A., Santos, T. J. S., Miranda, G. M. T., Barros, M. A. S., Pinho, F. E. C., 2014, Metalogênese do setor leste da Província de Alta Floresta (MT), Cráton Amazônico. In: M. G. S. Silva, M. B. Rocha Neto, H. Jost, R. M. Kuyumjian (Eds.), Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras (v. 1, 305-340). Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil.
- Bettencourt, J. S., Juliani, C., Xavier, R. P., Monteiro, L. V. S., Bastos Neto, A. C., Klein, E. L., 2016, Metallogenetic systems associated with granitoid magmatism in the Amazonian Craton: an overview of the present level of understanding and exploration significance. *Journal of South American Earth Sciences*, 68, 22-49, doi: 10.1016/j.jsames.2015.11.014
- Cordell, L., Graunch, V. J. S., 1985, Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. In: Hinze WJ (ed). *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomalies Maps*. Society of Exploration Geophysicists, p. 181-197.
- Crósta, A. P., Moore, J. M., 1989, Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain. *Proceedings of the 9th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration*

Geology, Calgary (Ann Arbor, MI: Environmental Research Institute of Michigan), p. 1173–1187.

Crósta, A. P., De Souza Filho, C. R., Azevedo, F., Brodie, C., 2003, Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 24:21, doi: 10.1080/0143116031000152291

Dardenne, M. A., Schobbenhaus, C., 2001, Metalogênese do Brasil. Brasília: Editora Universidade de Brasília.

Dentith, M., Mudge, S., 2014, Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist. Cambridge: Cambridge University Press, p. 193-234, doi:10.1017/CBO9781139024358.006

Gnojek, I., Prichystal, A., 1985, A new zinc mineralization detected by airbone gamma-ray spectrometry in Northern Moravia (Czechoslovakia), *Geoexploration* 23 (4) p. 491-502.

Grant, F. S., Dodds, J., 1972, MAG MAP FFT processing system development notes, Paterson Grant and Watson Limited.

Hartmann, G. A., Pacca, I. G., 2009, Time evolution of the South Atlantic Magnetic Anomaly. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 81(2), 243-255. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652009000200010>

Loughlin, W., 1991, Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57, p.1163–1169.

Mesquita, M. J., Teixeira, R., Trevisan, V. G., Xavier, R. P., Assis, R. R., Quispe, P., Moreto, M., Schmidit, V., Matos, J. H. S. N., Agnoletto, E., Paes de Barros, A. J., Miguel Jr, E., 2015, Gold deposits in ductile shear zone of the Paleoproterozoic Alta Floresta Province (Brazil), 13th SGA Biennial Meeting.

Miguel Jr, E., 2011, Controle Estrutural das mineralizações auríferas e idades U-Pb das rochas encaixantes ao longo do Lineamento Peru-Trairão: Província Aurífera de Alta Floresta, Mato Grosso, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

Miller, H. G., Singh, V., 1994, Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources, *Journal of Applied Geophysics*, 32, p. 213-217. doi: [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1).

Minty, B.R.S., 1988, A review of airbone gamma-ray spectrometric data-processing techniques, Canberra: Australian Government Publishing Service, 48 p.

Moura M.A. 1998, O Maciço Granítico Matupá e o Depósito de Ouro Serrinha (MT): Petrologia, Alteração Hidrotermal e Metalogenia. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 238 p

Nabighian, M., 1972, The analytic signal of twodimensional magnetic bodies with polygonal crosssection: Its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics*, 37 (3), pp 507-517.

Paes de Barros, A. J., 2007, Granitos da região de Peixoto de Azevedo - Novo Mundo e mineralizações auríferas relacionadas - Província Aurífera de Alta Floresta (MT), Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, 171 p. <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/287713>.

Ribeiro, V. B., Mantovani, M. S. M., Louro, V. H. A., 2014, AeroGama-espectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico, *Revisa Terra Didática*, 10, p. 29-51, http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v10_1/PDF10_1/Td%20v10-96-Vanessa.pdf.

Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, A. J., Somerton, I. W., 1990, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55, p. 80-91.

Rizzoto, G. J., Alves, C. L., Rios, F. S., Gonçalves, G. F., Lopes, L. L., 2019, Áreas de relevante interesse mineral – ARIM, Projeto evolução crustal e metalogenia da Província Mineral Juruena-Teles Pires. Carta de Integração Geológica-Geofísica – Escala 1:300.000, CPRM: Serviço Geológico do Brasil.

Roest, W. R., Verhoef, J., Pilkington, M., 1991, Magnetic interpretation using 3-D analytic signal. *Geophysics* 57 (1), p. 116-125. doi: 10.1190/1.1443174

Santos, J. O. S., 2003, Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central, *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais*, p. 169-195.

Santos, J. O. S., Breemen, O.B.V., Groves, D.I., Hartmann, L.A., Almeida, M.E., McNaughton, N.J., Fletcher, I.R., 2004, Timing and evolution of multiple Paleoproterozoic magmatic arcs in the Tapajós Domain, Amazon Craton: constraints from SHRIMP and TIMS zircon, baddeleyite and titanite U-Pb geochronology. *Precambrian Res.* 131, p. 73–109.

Sabins, F.F., 1997, *Remote Sensing Principles and Interpretation*. W. H. Freeman Company, New York. 494 p.

Sabins, F.F., 1999, Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews* 14, p.157–183.

Stabile Jr, A., 2012, Tipo e alteração hidrotermal no depósito aurífero Pé Quente, setor leste da Província Aurífera de Alta Floresta (MT). Trabalho de conclusão de curso, Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências.

Serrato, A. A. A., 2014. Geocronologia e Evolução do Sistema Hidrotermal do Depósito Aurífero de Juruena, Província Aurífera de Alta Floresta (MT), Brasil, Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

Souza, A. M. M., 1979, Projeto São Manuel, Reconhecimento geológico do limite Pará - Mato Grosso. DNPM, p. 27p.

Souza, J.P., Frasca, A.A.S., Oliveira, C.C., 2005, Geologia e Recursos Minerais da Província Mineral de Alta Floresta. Relatório Integrado. Brasília, Serviço Geológico Brasileiro, CPRM, 164p.

Tassinari, C.C.G., Macambira, M.J.B., 1999, Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes* 22, p. 174–182.

Thompson, D. T., 1982, EULDPh: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, v. 47, p. 31–37, <http://dx.doi.org/10.1190/1.1441278>

Verduzco, B., Fairhead, J., Green, C., MacKenzie, C., 2004, New insights into magnetic derivatives for structural mapping, *The leading edge* (February).

Vitório, J. A., 2010, A suite granítica Teles Pires da Província Aurífera de Alta Floresta: Características petrográficas, geoquímicas e implicações metalogenéticas, Instituto de geociências, Universidade Estadual de Campinas.

Wilford, J. R., Bierwith P. N., Craig, M. A., 1997, Application of airbone gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology, *Journal of Australian Geology and Geophysics*, v. 17, no 2, p. 201-206.

ANEXO I



ANEXO II

