



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

**GERAÇÃO DE CENÁRIOS
PROSPECTIVOS PARA O
MAPEAMENTO DE REGIÕES
POTENCIAIS PARA MINERALIZAÇÕES
AURÍFERAS NA REGIÃO DO DISTRITO
JUMA, SUDESTE AMAZONAS**

*Mestranda
Lila Costa Queiroz*

Dissertação de Mestrado em Geologia
nº 446
Brasília

Setembro de 2019
Lila Costa Queiroz

GERAÇÃO DE CENÁRIOS PROSPECTIVOS PARA O MAPEAMENTO DE REGIÕES POTENCIAIS PARA MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS NA REGIÃO DO DISTRITO JUMA, SUDESTE AMAZONAS

Dissertação de Mestrado n° 446

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao curso de Pós-graduação em Geologia (Área de concentração em Prospecção e Geologia Econômica) do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília - IG/UnB, como requisito para obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Adalene Moreira Silva

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Adalene Moreira Silva (IG/UnB)

Prof.^a Dr.^a Marcia Abrahão Moura (IG/UnB)

Prof.^a Dr.^a Sílvia Beatriz Alves Rolim (UFRGS)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha mãe, Eliege, o meu muito obrigada por todo o amor do mundo! A meu pai, Augusto, agradeço por me inspirar a amar o planeta e a mim mesma. Sem vocês nada disso seria possível. A minha orientadora, Adalene, muito obrigada pelos anos de amizade e por abrir os caminhos da prospectividade mineral em minha carreira como geóloga.

Agradeço imensamente a toda equipe do Serviço Geológico do Brasil que contribuiu para que, de alguma forma, este trabalho acontecesse. Alguns amigos foram especialmente importantes nessa jornada... Frederico Ricardo tem minha gratidão infinita pelas horas de dedicação e paciência dando suporte com as inversões. O trabalho com certeza não seria o mesmo sem sua ajuda preciosa. Vanessa Oliveira, minha querida amiga geofísica que sempre, sempre, sempre me ajuda. Espero que um dia eu consiga retribuir tudo isso. Gratidão infinita a você! Mika, Michele Pitarello, obrigada por me auxiliar na geoquímica e em tantas outras coisas. Marina Ramos, agradeço muito o trabalho criterioso de descrição de testemunhos, foi muito importante para realização desta pesquisa. Tomás e Marion, vocês são tão incríveis que tudo se torna mais fácil sendo amiga de vocês. Cotoco, Leonardo Aguiar, é sempre bom ter um amigo que entende de tudo, na geologia e fora dela! Raul Meloni, obrigada pela dedicação ao projeto e pelo trabalho sempre muito bem feito que foi fundamental para este estudo. Lucas Balsini, meu brother, agradeço demais por toda a dedicação e amor contagiante à geologia.

Agradeço também a ajuda que recebi de Mariana Bandeira para finalizar este trabalho em Belo Horizonte.

Por fim, esta dissertação é fruto de todo o suporte que recebo da minha família: Guilherme, meu marido, que me permite concretizar meus sonhos profissionais e de vida e minha filha Ísis, que nasceu junto com este estudo. Obrigada filha, por generosamente dividir sua mãe com o mestrado.

Dedicado a Ísis

RESUMO

Esta dissertação de mestrado tem como tema central o estudo da favorabilidade para ocorrências de ouro no Distrito Juma, uma região ainda pouco conhecida do ponto vista geológico e metalogenético. A área de estudo localiza-se na porção centro-sul do Cráton Amazônico, adjacente as Províncias Minerais do Tapajós, a leste, e Alta Floresta, ao sul. A ocorrência de granitos com idade orosiriana na região indica que rochas com idades da Província Rondônia-Juruena ocorrem em contato com rochas da Província Tapajós-Parima. Este contexto geológico, similar ao do Domínio Peixoto de Azevedo, despertou o interesse prospectivo sobre a área de estudo e para a seleção inicial de guias exploratórios, que embasaram a construção de cenários prospectivos em 2D e 3D. O mapeamento em 2D foi efetuado a partir da integração de dados multifonte utilizando lógica *fuzzy*, uma técnica de modelagem espacial baseada no conhecimento (*knowledge-driven*). O primeiro cenário foi gerado na escala 1:250.000 e, posteriormente, na escala 1:100.000 em duas janelas denominadas de Alvos Juma e Guida. Os resultados mostram locais potenciais para hospedar mineralizações auríferas, validados por dados geológicos obtidos em campo, disponibilizados pela empresa BBX *Minerals* e pelo Serviço Geológico do Brasil. Após esta etapa, foi realizada uma inversão de dados magnéticos, utilizando a técnica de inversão do Vetor de Magnetização (MVI), com o intuito de mapear estruturas e corpos geológico em sub-superfície. O primeiro modelo 3D foi elaborado para auxiliar na visualização e compartimentação geológico regional, que somada ao modelo 2D, indica o *footprint* distal da mineralização. Efetuou-se ainda a inversão dos dados magnéticos para toda a área de estudo. Na região do Alvo Guida foi mapeado um corpo granítico com ocorrência de ouro em suas encaixantes (veios de quartzo, brechas e *stockworks*) validado com testemunhos de sondagem. O presente estudo sugere que o Distrito Juma seja compatível com um sistema de características similares a mineralizações do tipo pórfiro-epitermal, regionalmente correlacionáveis a depósitos de ouro já conhecidos.

Palavras-chave: Modelagem Prospectiva, Aerogeofísica, Inversão do Vetor de Magnetização (MVI), Cráton Amazônico.

ABSTRACT

This master thesis has as its central theme the study of the favorability for gold prospecting in the Juma District, a region still poorly known from the geological and metallogenetic point of view. It is located in the south-central portion of the Amazon Craton, adjacent to the Tapajós Mineral Provinces to the east and Alta Floresta to the south. The occurrence of Orosirian granites in the Juma District indicates that rocks from Rondônia-Juruena Province occur in contact with rocks from Tapajós-Parima Province. This geological context is similar to the Peixoto de Azevedo Domain, which aroused the interest in the study area and guided the initial selection of exploratory criteria that supported the construction of prospective 2D and 3D scenarios. 2D mapping was based on the integration of multi-source data using fuzzy logic, a knowledge-driven spatial modeling technique. The first scenario was generated on the 1: 250,000 scale and later on the 1: 100,000 scale, in two windows called Juma and Guida Targets. The results have shown potential locations for gold mineralization, validated by geological data obtained in the field, available from the Geological Survey of Brazil and BBX Minerals database. After this step, a magnetic data inversion was performed using the Magnetization Vector Inversion (MVI) technique, in order to map geological bodies and structures in subsurface. The first 3D model was carried out to assist the visualization and regional compartmentalization of Juma District. The integrated analysis with 2D model indicates the distal footprint of the mineralization. In the Guida Target region, a granitic body was mapped with gold occurrences hosted in quartz veinlets, breccias and stockworks, validated by boreholes. Imaging suggests, based on geological data, that it could be a porphyry-epithermal mineral system type.

Keywords: Prospectivity Mapping, Amazon Craton, Fuzzy Logic, Airborne Geophysics, Magnetization Vector Inversion

LISTA DE ABREVIações

AGHT – Amplitude do gradiente horizontal

ARIM SE-AM – Áreas de Relevante Interesse Mineral do Sudeste do Amazonas

GT – Gradiente Total

BGI – *Bureau Gravimétrique Internacional*

CMA – Campo magnético anômalo

CMT – Campo magnético total

CMY – *Cyano, Magenta, Yellow*

CPRM – Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais

DJ – Distrito Juma

Dx – Derivada horizontal em x

Dy – Derivada horizontal em y

Dz – Derivada vertical

eU – Equivalente urânio em ppm

eTh – Equivalente tório em ppm

IGRF – Campo Geomagnético Internacional de Referência

K (%) – Potássio em percentagem

LD – Limites de detecção

MDT – Modelo digital de terreno

MVI – *Magnetization Vector Inversion*

RGB – *Red, Green, Blue*

SI x 10⁻³ – Unidade de Susceptibilidade Magnética

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

PAF – Província Alta Floresta

PMT – Província Mineral do Tapajós

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Localização da área de estudo e dos principais municípios e acessos da região sudeste do estado do Amazonas (Modificado a partir de DNIT, 2015).....	15
Figura 1.2: Fotografias da amostragem realizada durante campanhas de campo do projeto Metalogenia do Sudeste do Amazonas, cujos resultados foram utilizados nesta análise: a) Coleta de material fino para sedimento de corrente; b) Cerca de 1 a 2 kg de material coletado para análise de sedimento de corrente; c) Área de cascalheira, onde foi coletada amostra de concentrado de bateia; d) Concentração de minerais pesados em bateia.	19
Figura 1.3: Fotografia da etapa de descrição de testemunhos de sondagem dos alvos Guida e Platô (<i>BBX Minerals</i>).....	20
Figura 1.4: Fluxograma simplificado ilustrando as etapas do processamento de dados aerogeofísicos e os principais produtos gerados. ...	22
Figura 1.5: Fluxograma representando as etapas do processo de análise da confiabilidade de lineamentos magnéticos para o Distrito Juma.	24
Figura 1.6: Mapa de susceptibilidade magnética com as dimensões do <i>mesh</i> em que foi feita a inversão do tipo MVI-Voxi regional.....	27
Figura 1.7: Mapa da plataforma sul-americana e com destaque para as áreas cratônicas e escudos (fonte CPRM, 2003).....	28
Figura 1.8: Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico segundo (a) Tassinari & Macambira (1999) e (b) Santos (2003), com a área de estudo em ambos modelos (modificado de Vasquez et al. 2008).....	31
Figura 1.9: Mapa da estimativa de espessura crustal para o Cráton Amazônico (modificado a partir de Albuquerque et al., 2017) com limites das províncias geocronológicas (Santos, 2003). Estão destacadas as Províncias Alta Floresta, Tapajós e o Distrito Juma na porção centro-sul do Cráton.....	32
Figure 2.1: Crustal thickness map of the Amazonian Craton (modified from Albuquerque et al., 2017) showing the Juma District and the limits of geochronological provinces (Santos, 2003). The Tapajós and Alta Floresta Mineral Provinces, known for hosting gold mineralizations in the south-central region of the craton, are highlighted.	39

Figure 2.2: Products derived from airborne magnetics and satellite gravimetry data (WGM2012) covering the southern central Amazon Craton while highlighting (a) major structural domains and provinces superimposed on the total gradient of the anomalous magnetic field and (b) geochronological data compiled from Scandola et al. (2017) and ARIM SE-AM Project (CPRM) superimposed on bouguer anomaly image. In both images, the black polygon defining the study area stands out..... 40

Figure 2.3: Geological map of Juma District showing the main gold occurrences and major regional structures (Meloni et al., 2018a). Based on the individual characteristics of the mineral occurrences and their spatial distributions, three sectors were defined: Ema, Acari, and Juma. The Arraia Granite, in the east, and Chuim Granite, cutting the volcanic rocks from the Jacareacanga Group in the north-central portion of the map are particularly noteworthy..... 43

Figure 2.6: Flowchart detailing the steps of the methodology, the fuzzy logic operators and pertinence functions for the Juma District prospectivity map. 50

Figure 2.7: Flowchart detailing the steps of the methodology, the fuzzy logic operators and pertinence functions for the Juma Target prospectivity map. 50

Figure 2.8: Flowchart detailing the steps of the methodology, the fuzzy logic operators and pertinence functions for the Guida Target prospectivity map. 51

Figure 2.9: Evidencial maps used for the Juma District prospectivity modeling, with the same color-scheme for all the maps. The high values are associated with a higher chance that the analyzed criteria favor the occurrence of gold occurrences. 56

Figure 2.10: Juma District prospectivity map containing three prospective classes for gold occurrences: low, medium and high. Five regions with the highest prospectivity for new targets are delimited in the map..... 57

Figure 2.11: Prospectivity map of the Juma Target in which three prospectivity classes are differentiated in low, medium and high favorability for gold occurrences. 60

Figure 2.12: Prospectivity map of the Guida Target in which three prospectivity classes are differentiated in low, medium and high favorability for gold occurrences.	63
Figure 2.13: Juma District prospectivity map validation showing the percentage of primary gold occurrences (blue line) in each of the prospective scores and the percentage of the area occupied by each class defined by the degree of prospectivity (red line).	64
Figure 2.14: Juma Target prospectivity map validation showing the percentage of primary gold occurrences (blue line) in each of the prospective scores and the percentage of the area occupied by each class defined by the degree of prospectivity (red line).	64
Figure 2.15: Guida Target prospectivity map validation showing the percentage of primary gold occurrences (blue line) in each of the prospective scores and the percentage of the area occupied by each class defined by the degree of prospectivity (red line).	65
Figure 2.16: Regional MVI model for an estimated depth of 20 km. The shallowest magnetic bodies, depth <1000 m, were highlighted within the perimeter of Juma District.....	66
Figure 2.17: A contribuição das componentes projetada e perpendicular à amplitude efetiva mostra uma forte influência da magnetização remanente, indicando também que uma inversão tradicional de susceptibilidade, que considera apenas a direção de magnetização na direção do campo induzido, não é a técnica mais adequada para este tipo de terreno.....	67
Figure 2.18: Regional MVI model and the interpretation of geological structures and bodies in depth.	68
Figure 2.19: MVI model generated for the Juma District region with the location of the Guida and Juma targets and main geophysical bodies at a depth of 20km.....	69
Figure 2.20: Integrated analysis of drill cores interpretation (JED04, JED05 and JED06) and the geophysical model of the body interpreted as Chuim granite, which is intruded into a volcano-sedimentary sequence. Photographs illustrate some of the most significant intervals.	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1: Lista de amostras de sedimento de corrente e concentrado de bateia e os respectivos projetos em que foram coletadas.....	18
Table 2.1: The main features of the granitic intrusions in Juma District compared to porphyry gold, Serrinha and Tocantinzinho deposits (Adapted from Moura 2006; Lopes & Moura, 2019).....	42
Table 2.2: Exploratory criteria and theoretical fundamentals used for generate the evidential maps of the Juma District.....	53
Table 2.3: Criteria used to elaborate evidential maps to model the Juma target.....	59
Table 2.4: Criteria used to elaborate evidential maps to the Guida target prospectivity map.....	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Apresentação	12
1.2	Objetivos	13
1.3	Localização e Vias de Acesso.....	14
1.4	Materiais e métodos	16
1.4.1	Materiais.....	16
1.4.2	Métodos de trabalho.....	20
1.5	Geologia regional	27
1.5.1	Compartimentação Geológica do Cráton Amazônico.....	27
1.5.2	Geologia da Província Tapajós-Parima.....	31
1.5.3	Geologia da Província Rondônia-Juruena.....	33
1.6	Estrutura da Dissertação	35
2	TARGETING NEW STRATEGIC AREAS FOR GOLD EXPLORATION IN SOUTHEAST AMAZON STATE: THE CASE HISTORY OF JUMA DISTRICT.....	36
2.1	Introduction.....	37
2.2	Geological Setting	38
2.2.1	Tectonic Framework and Regional geology	38
2.2.2	Juma District Geology	41
2.2.3	Mineralization	44
2.3	Data and processing.....	45
2.3.1	Datasets	46
2.3.2	Fuzzy logic methodology	48
2.3.3	3D Magnetic inversion	51
2.4	Data integration	52
2.4.1	Juma District.....	52
2.4.2	Juma Target	58

2.4.3	Guida Target	61
2.4.4	Validation.....	63
2.5	3D Magnetic inversion	65
2.5.1	Regional model	66
2.5.2	Juma District 3D model	67
2.5.3	Correlation of inversion result with known geology: Guida Target	69
2.6	Discussions and conclusions.....	72
2.7	Acknowledgements	72
2.8	References	72
3	CONCLUSÕES.....	81
4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O Cráton Amazônico é o seguimento tectônico com a maior exposição de rochas Paleoproterozoicas da Plataforma Sul-americana (Almeida *et al.*, 1981), sendo também reconhecido por abrigar diversos depósitos de ouro primários e secundários. A partir da década de 1970, após a abertura da BR-230 (ou rodovia Transamazônica), que liga o município de Apuí (AM) a Porto Velho (RO), a região sudeste do estado do Amazonas apresentou melhores condições de acesso e ocupação. Iniciou-se então uma pequena e constante atividade garimpeira, além de pesquisas geológicas, incluindo projetos da Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais (CPRM). Mais recentemente, a partir do ano de 2006, a prospecção aurífera na região se intensificou com a descoberta do garimpo Eldorado do Juma e posterior instalação de projetos exploratórios da empresa australiana *BBX Minerals*. Em 2015 a CPRM lançou o projeto ARIM-SE AM (*Áreas de Relevante Interesse Mineral do Sudeste do Amazonas*) abrangendo uma área localizada entre os municípios de Apuí (AM) e Aripuanã (MT). Esta região possui ocorrências de ouro conhecidas, como os garimpos do Eldorado do Juma e os prospectos Guida e Platô. Também apresenta maior facilidade para acesso terrestre quando comparada com o resto da área coberta pelo Projeto ARIM-SE AM, além englobar extensões territoriais em que não ocorrem impedimentos legais para a extração de bens minerais (reservas indígenas e/ou ecológicas). Por estes motivos, foi escolhida para um trabalho mais detalhado, com o intuito de criar novos vetores prospectivos através da análise de dados multifonte.

A prospecção aurífera no Cráton Amazônico esteve baseada, até pouco tempo atrás, em modelos exploratórios para ouro orogênico, apesar da ocorrência de distintos padrões de alteração hidrotermal e ausência de terrenos metamórficos em extensas áreas (Juliani *et al.*, 2018). Depósitos relacionados a sistemas pórfiro-epitermais com idades pré-Cambrianas não são tão representativos quanto os exemplos meso-Cenozoicos, e em alguns casos sua classificação ainda é controversa. Porém, tanto a Província Mineral do Tapajós (PMT) quanto a Província Alta Floresta (PAF), ambas adjacentes à área de estudo, já apresentam conhecidos depósitos auríferos baseados em modelos tipo pórfiro-epitermal. Neste contexto,

merecem destaque os trabalhos de Moura (1998), Aguja (2013), Juliani et al. (2014), Assis (2015), Bettencourt *et al.* (2015), Trevisan (2015), Lopes e Moura (2019). Estudos mais detalhados, em diversas escalas e níveis de pesquisa geológica, se fazem necessários para que novos critérios prospectivos sejam estimulados, especialmente em terrenos com extensas sequências plutono-vulcânicas, como nas Províncias Rio Negro Juruena e Tapajós-Parima.

A área de estudo do presente trabalho é interessante para o entendimento da evolução dos métodos prospectivos no sudoeste do Cráton Amazônico, motivado por seu potencial econômico para Cu e Au. Porém, apesar da alta potencialidade para exploração de ouro, bem como a significativa produção do garimpo Eldorado do Juma, as dificuldades de acesso terrestre prejudicam o avanço do conhecimento geológico da região. Soma-se a isso uma densa vegetação, perfis de solo espessos e modelos tectônicos ainda inconclusivos. Desta forma, o uso da aerogeofísica e métodos robustos para integração de dados tornam-se ferramentas estratégicas para o refinamento da cartografia geológica e uma melhor caracterização prospectiva em terrenos do tipo *greenfield*.

O presente trabalho apresenta mapas prospectivos em 2D para o Distrito Juma efetuados a partir de dados multifonte (aeromagnéticos, gamaespectrométricos, geoquímicos, mineralométricos e geológicos) utilizando a lógica *fuzzy*. A partir destes cenários na escala 1:250.000 foi possível a seleção de janelas com maior prospectividade, que foram modeladas na escala 1:100.000. Os resultados foram validados com dados de campo coletados durante o projeto ARIM. Para consolidar os resultados obtidos, efetuou-se inversões dos dados magnéticos em 3D com o intuito de visualizar regionalmente e localmente a expressão de estruturas e corpos potenciais em sub-superfície.

A principal meta desta dissertação de mestrado é apresentar cenários prospectivos que possam ajudar o mapeamento de corpos potenciais para hospedar mineralizações auríferas na região do Distrito Juma, sudeste do estado do Amazonas.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste projeto é a geração de modelos prospectivos que possam auxiliar na caracterização de áreas potenciais para prospecção de ouro no

Distrito Juma através da integração de dados multifonte. Adicionalmente, pretende-se mapear a expressão de estruturas e corpos chave através da inversão 3D de dados magnéticos aéreos.

Para atingir o objetivo central foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- a) Refinamento da cartografia geológica através da integração de produtos derivados de dados geofísicos e geológicos disponíveis na literatura;
- b) Processamento e geração de produtos derivados de dados magnéticos aéreos com o intuito de mapear estruturas e lineamentos magnéticos na área de estudo;
- c) Processamento de dados gamaespectrométricos para o mapeamento de corpos potenciais para hospedar as mineralizações auríferas através da variação dos radioelementos K, eTh e U;
- d) Análise estatística de dados geoquímicos de sedimento de corrente e mineralométricos (concentrado de bateia) para o mapeamento de associações de elementos possivelmente relacionados com mineralizações de ouro;
- e) Geração de mapas de favorabilidade mineral através da integração de dados multifonte para o mapeamento de regiões potenciais dentro do Distrito Juma;
- f) Inversão 3D de dados aeromagnéticos com o intuito de mapear a expressão de estruturas e corpos potenciais em sub-superfície.

1.3 Localização e Vias de Acesso

A área de estudo está localizada no sudeste do estado do Amazonas, abrangendo parte dos municípios de Apuí e Novo Aripuanã. A base logística e de trabalhos de campo é a sede do município de Apuí, localizado cerca de 500 km de Manaus, as margens da rodovia Transamazônica (BR-230). O deslocamento para a área de trabalho, partindo de Manaus, se dá por via aérea até o aeroporto de Apuí ou através de barco até o município de Humaitá, que tem ligação terrestre com a área de estudo. A figura 1.1 ilustra as principais rotas, terrestres e fluviais, da região sudeste do estado do Amazonas, com destaque para a área de estudo.

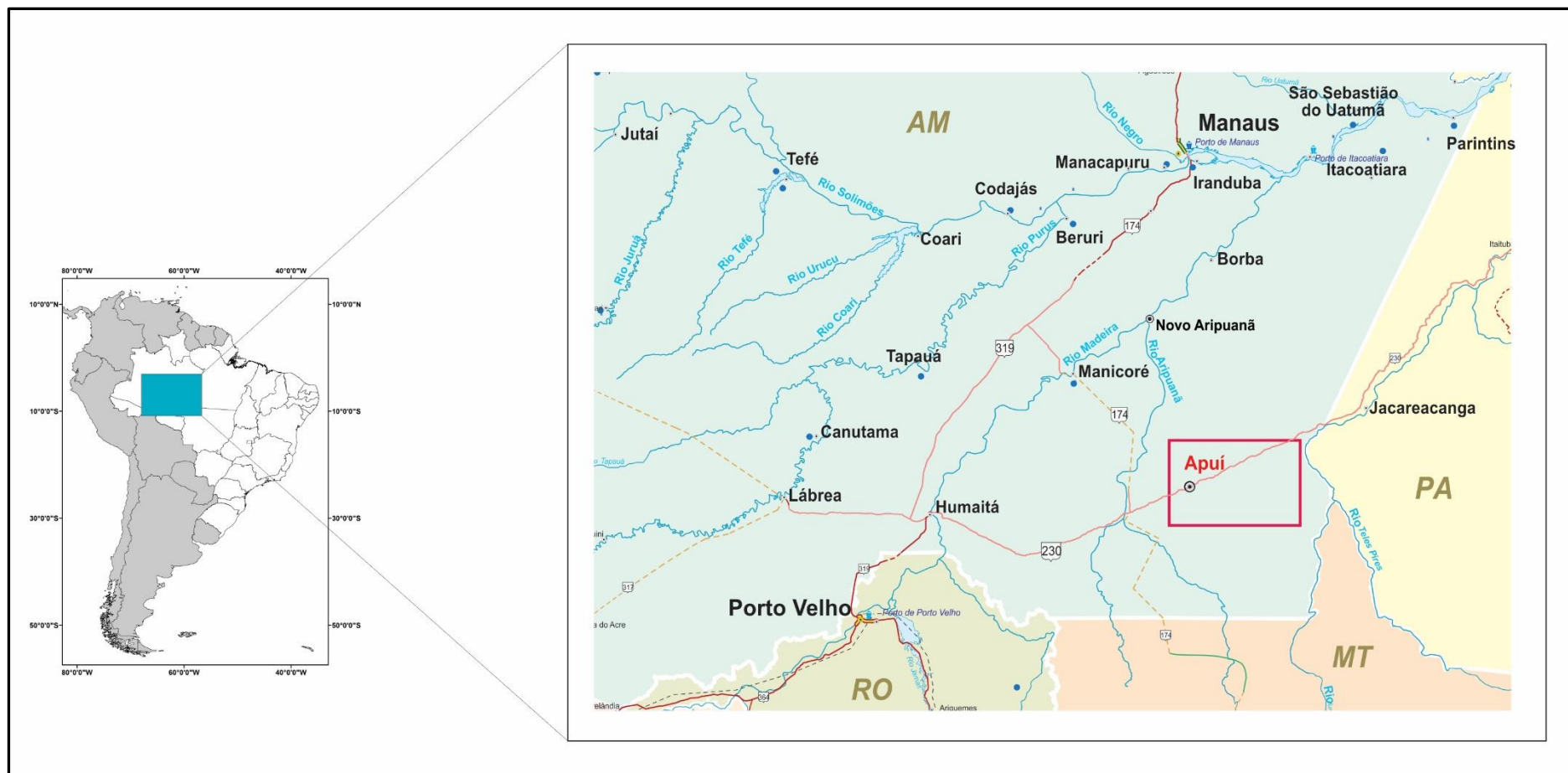


Figura 1.1: Localização da área de estudo e dos principais municípios e acessos da região sudeste do estado do Amazonas (Modificado a partir de DNIT, 2015).

1.4 Materiais e métodos

Para a elaboração deste trabalho utilizou-se dados de natureza diversa e métodos que possibilitaram análises prospectivas em 2D e 3D. Os materiais e métodos serão descritos a seguir.

1.4.1 Materiais

Os materiais utilizados nesta dissertação de mestrado incluem: dados cartográficos, aerogeofísicos, imagens de sensores remotos, geoquímica de sedimento de corrente e mineralometria de concentrados de bateia e testemunhos de sondagem com amostragem de susceptibilidade magnética.

1.4.1.1 Dados cartográficos

As bases cartográficas utilizadas foram as cartas geológicas do projeto ARIM-SE AM da CPRM, além dos mapas dos projetos Aripuanã-Sucunduri (Liberatore *et al*, 1972), Tapajós-Sucunduri (Bizinella *et al*, 1980), Folha Sumaúma (Costa *et al*, 2013) e Rio Roosevelt (Oliveira *et al*, 2014).

1.4.1.2 Dados geofísicos

Os dados aerogeofísicos magnéticos e gamaespectrométricos utilizados neste trabalho foram extraídos dos seguintes Projetos: Aripuanã (CPRM, 2008), Rio Machado (CPRM, 2008), Noroeste do Mato Grosso (CPRM, 2008), Itaituba (2008), Rondônia Central (CPRM, 2009), Sucunduri (CPRM, 2009), Província Aurífera do Tapajós – Fase 2 (CPRM, 2011), Japuíra (CPRM, 2012), Rio Juruena (CPRM, 2012), Serra dos Apiacás (CPRM, 2012), Serra dos Caiabis (CPRM, 2012), Norte do Mato Grosso (CPRM, 2012) e Branco Machadinho (CPRM, 2013). Todos os dados foram adquiridos pela empresa LASA Engenharia e Prospecções S.A., com linhas de controle na direção N-S e espaçamento de 500 metros, enquanto as linhas de produção foram adquiridas com espaçamento de 5000 m e orientação E-W, ambas com altura constante de voo de 100 m. Atualmente o Serviço Geológico tornou público o acesso a toda a sua base de dados aerogeofísicos e relatórios dos projetos, disponíveis em <http://geosgb.cprm.gov.br/>.

Os dados gamaespectrométricos foram adquiridos pelo gamaespectrômetro EXPLORANIUM, modelo GR-820, de 256 canais espectrais. As leituras dos gamaespectrômetros são realizadas a cada 1 segundo representando medições a intervalos de 78 metros no terreno, aproximadamente. Foram realizadas medidas dos radioelementos urânio, tório e potássio, além da contagem total ($\mu\text{R/h}$). Os mapas de eU e eTh foram expressos em valores equivalentes (ppm), por não serem medidas diretas do elemento radioativo pai, mas de elementos químicos pertencentes à sua série de decaimento, enquanto o K foi expresso em porcentagem.

Os dados magnéticos foram adquiridos utilizando o magnetômetro com sensor de vapor de césio tipo *stinger* acoplado à cauda da aeronave. Esse sensor é orientado conforme os parâmetros do campo magnético da Terra, incluindo a força do campo (campo total), inclinação e declinação. O campo total na área de estudo tem intensidade aproximada de 25000 nT, e inclinação e declinação magnéticas estimadas em $3,2^\circ$ e $-14,5^\circ$, respectivamente. As leituras do magnetômetro foram realizadas a cada 0.1 segundo o que equivale dizer que, para a velocidade média de 280 km/h da aeronave, houve uma leitura a cada 7.8 metros de terreno.

Também foram utilizados dados gravimétricos (anomalia Bouguer) do modelo gravimétrico digital *World Gravity Map* (WGM2012; Bonvalot *et al.*, 2012) calculado em escala global. Esse dado é fornecido pelo *Bureau Gravimétrique International* (BGI). Estas informações são derivadas do modelo Geopotential Model 2008 - EGM 2008, adquiridas pela *National Geospatial Intelligence Agency* - NGA. Os dados gravimétricos não foram utilizados nas modelagens prospectivas, porém serviram de base para interpretações regionais.

1.4.1.3 Dados geoquímicos e mineralométricos

Os dados geoquímicos de sedimento de corrente e de mineralometria por concentrado de bateia fazem parte dos Projetos Sumaúma-Mutum-Roosevelt (Folha Mutum), Metalogenia do SE do Amazonas e Fosfato do Brasil, todos da CPRM. Também foram utilizados dados de amostras coletadas pela Brasil Explore (analisados pela SGS-Geosol) pertencentes ao banco de dados da CPRM. Foram utilizadas 485 amostras de sedimento de corrente e 484 amostras de concentrado de bateia, distribuídas segundo a Tabela 1.1:

Tabela 1.1: Lista de amostras de sedimento de corrente e concentrado de bateia e os respectivos projetos em que foram coletadas.

	Sedimento de corrente	Concentrado de bateia
Metalogenia do sudeste do Amazonas	38 amostras	39 amostras
Sumaúma-Mutum-Roosevelt	38 amostras	39 amostras
Fosfato	4 amostras	5 amostras
Coletadas por terceirizada (Brasil Explore)	422 amostras	431 amostras

A distribuição das amostras (sedimento de corrente e concentrado de bateia) nas áreas mais adensadas corresponde a escala 1:100.000, com densidade mínima de uma amostra a cada 10 Km², sendo maior nas áreas de difícil acesso.

Os sedimentos de corrente foram coletados de forma composta na porção ativa e retilínea dos canais, em uma área de cerca de 50 metros. Aproximadamente 1 kg da fração fina foi coletada após peneiramento no local, com material plástico para evitar contaminação (Figura 1.2a e b). A cada 10 amostras, foi feita uma duplicata de campo. Posteriormente, as amostras foram enviadas de forma integral para serem preparadas e analisadas nos laboratórios da SGS Geosol. A preparação consistiu de secagem em estufas a 60°C, quarteamento, peneiramento em malha <80#, pulverização e digestão parcial com água régia. A análise foi realizada em equipamentos ICP-OES (emissão ótica com plasma indutivamente acoplado) e ICP-MS (espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado).

As amostras de concentrado de bateia foram coletadas em concentradores naturais de minerais pesados como em curvas de rio, atrás de obstáculos e cascalheiras (Figura 1.2c e d). As amostras de concentrado de bateia também foram enviadas para o laboratório SGS-Geosol, onde foram peneiradas, quarteadas, separadas por densidade (líquidos densos) e magnetismo, e analisadas semi-quantitativamente para mineralometria com lupa binocular e microscópio ótico. Os resultados foram dados em termos de porcentagem do mineral no concentrado, nas seguintes faixas: <1%, 1-5%, 5-25%, 25-50%, 50-75%, 75-100%. O ouro foi analisado de forma quantitativa após quarteamento, através da contagem de pintas.



Figura 1.2: Fotografias da amostragem realizada durante campanhas de campo do projeto Metalogenia do Sudeste do Amazonas, cujos resultados foram utilizados nesta análise: a) Coleta de material fino para sedimento de corrente; b) Cerca de 1 a 2 kg de material coletado para análise de sedimento de corrente; c) Área de cascalheira, onde foi coletada amostra de concentrado de bateia; d) Concentração de minerais pesados em bateia.

1.4.1.4 Testemunhos de sondagem

Foram disponibilizados pela empresa *BBX Minerals*, para descrição geológica, 6 testemunhos de sondagem dos alvos Platô e Guida (**Figura 1.3**). Estes alvos estão localizados no distrito Juma, porção leste, nas proximidades do Rio Acari, sudeste do Amazonas e os furos variam entre 180 a 300 metros de profundidade.

Foi realizada a descrição faciológica das rochas e a aferição da susceptibilidade magnética, com auxílio de susceptímetro portátil. Foi utilizado o susceptímetro portátil modelo KT 10, com resolução de 1×10^{-6} SI (min: 0.001×10^{-3} ; max: 1999.99×10^{-3} SI) e frequência de operação de 10 kHz.



Figura 1.3: Fotografia da etapa de descrição de testemunhos de sondagem dos alvos Guida e Platô (BBX Minerals).

1.4.1.5 Dados do sensor SRTM

Para elaboração de modelo digital de terreno e uso integrado com imagens geofísicas foram utilizados dados de satélite da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com projeção geográfica datum WGS84, datum vertical EGM96 e resolução espacial de 1 arc-segundo para cobertura global (~ 30 metros).

1.4.2 Métodos de trabalho

Os métodos utilizados nesta dissertação de mestrado incluem pesquisa bibliográfica, descrição geológica de testemunhos de sondagem e medidas das

propriedades físicas das rochas, além de processamento e interpretação de dados aerogeofísicos, geológicos e geoquímicos.

1.4.2.1 Pesquisa Bibliográfica

Inicialmente, foi feito o levantamento bibliográfico das principais pesquisas realizadas na região sudeste do CA e das mineralizações auríferas, tanto da região de estudo quanto de províncias minerais adjacentes. Os dados levantados foram artigos científicos, dissertações, relatórios internos da CPRM e mapas, que abordam a geologia e geotectônica no intuito de se estabelecer uma melhor contextualização da área e auxiliar na interpretação dos dados aerogeofísicos.

1.4.2.2 Processamento e interpretação dos dados aerogeofísicos

O processamento dos dados aerogeofísicos iniciou-se com algumas etapas preparatórias, incluindo a geração de bancos de dados (magnetométrico e gamaespectrométrico). O arquivo original, formato *.XYZ*, foi importado para o *software OASIS MONTAJ 9.4* (GEOSOFT TM, 2017), em formato *.gdb*, criando um novo *database*, a partir do qual foram plotadas as linhas de voo do aerolevante e perfis de algumas das linhas para análises de possíveis valores anômalos, que possam atrapalhar as futuras interpretações. A aplicação de testes aos dados magnetométricos não mostrou a existência de ruídos, em padrões e quantidade, que eventualmente possam comprometer os resultados pretendidos nas etapas futuras de processamento e interpretação dos dados.

Neste trabalho foram utilizados os dados do campo magnético anômalo (CMA), e seus produtos derivados, que refletem a variação da susceptibilidade magnética das rochas da região. Para obter o CMA foram retirados os valores de Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF). Com a subtração do IGRF, o campo resultante representa as anomalias magnéticas situadas na crosta acima da superfície Curie, ou CMA. O método bidirecional foi o escolhido para a interpolação dos dados de magnetometria, pois resultou no maior detalhamento das anomalias magnéticas, em contraste com um baixo nível de ruídos, uma vez que assume que há uma maior densidade de pontos amostrados nas linhas de voo do que nas linhas de controle. Todas as interpolações foram feitas com uma malha regular de 125m, equivalente a $\frac{1}{4}$ do espaçamento das linhas de voo. Os principais

produtos derivados do CMA utilizados neste trabalho consistem em: Gradiente Total (GT), derivada horizontal em x (Dx), derivada horizontal em y (Dy), derivada vertical (Dz), amplitude do gradiente horizontal total (AGHT), calculado a partir de Dx e Dy e inclinação do gradiente total (IGT).

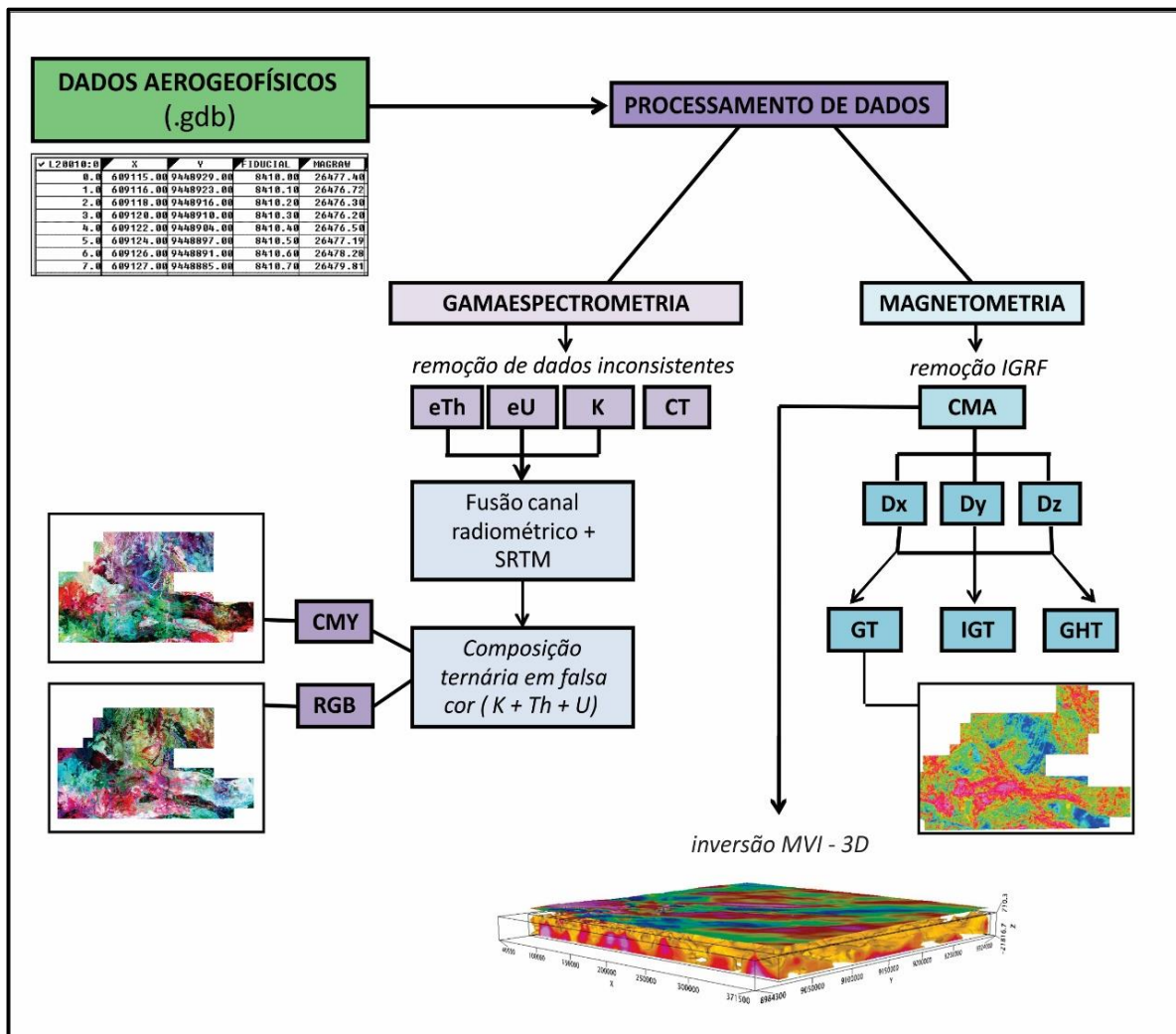


Figura 1.4: Fluxograma simplificado ilustrando as etapas do processamento de dados aerogeofísicos e os principais produtos gerados.

Para o processamento dos dados gamaespectrométricos foram analisados previamente cada um dos canais (K%, eTh, eU) e para retirada dos valores negativos, que posteriormente foram interpolados através do método de mínima curvatura. A interpolação também foi em malha regular de 125 m, que gerou os grids individuais para cada um dos radioelementos, razões principais entre os canais (eTh/K%; eU/K%). Os principais produtos derivados dos dados gamaespectrométricos utilizados neste trabalho foram: Composição ternária em falsa cor (RGB), com o K% no canal vermelho, eTh no canal verde e eU no canal

azul; Razões entre os canais do Th e K ($eTh/K\%$) e U e Th (eU/eTh); Mapa do fator F ($F = K \times (eU/eTh)$) (Efimov, 1978) e K anômalo (Pires, 1995).

O fluxograma apresentado na figura 1.4 sintetiza o processamento e os principais produtos aerogeofísicos gerados para este trabalho.

1.4.2.3 Tratamento de dados geoquímicos e mineralométricos

A caracterização geoquímica para sedimentos de corrente foi feita através da estatística univariada, a partir do tratamento estatístico de 485 amostras de sedimento de corrente. Foram analisados 47 elementos e 12 apresentaram menos de 50% de valores válidos (Ag, As, Be, In, Li, Na, S, Sc, Ta, Te, Tl e W). O teste Shapiro-Wilk mostra que nenhum dos elementos apresenta distribuição normal nos dados brutos. Somente Al e Fe puderam ser normalizados através da log-transformação. A partir da classificação do *box plot* foram confeccionados mapas de sedimento de corrente para os elementos.

Para dados mineralométricos de concentrado de bateia, o banco de dados foi composto por 859 amostras coletadas. A análise contém de 50 a 82 minerais verificados e são, com exceção do ouro (contagem de pintas), semi-quantitativas (descritas em intervalos de porcentagem).

1.4.2.4 Análise estrutural de dados geológicos e geofísicos

Para identificar prováveis estruturas controladoras das ocorrências de ouro no Distrito Aurífero Juma foi aplicada a metodologia similar a utilizada por Sánchez (2014). O método consiste em um procedimento de comparação binária entre os lineamentos magnéticos e as demais variáveis disponíveis, classificando os lineamentos segundo critérios de confiabilidade, determinado pelo somatório dos valores obtidos em cada uma das comparações. Para o Distrito Juma os dados utilizados para a classificação foram Gradiente total (GT) + Inclinação do Gradiente Total (IGT) + Gradiente Horizontal Total (GHT) + Residuais do Campo Magnético Anômalo (CMA –profundidades: > 12 km, 12 – 2 km, 2 – 0,357 km, 0,357 – 0 km) + SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) + mapas geológicos disponíveis no banco de dados do Projeto ARIM-SE AM. Após uma etapa inicial em que 848 lineamentos magnéticos foram traçados, na escala 1:100.000, cada um deles foi comparado com os demais dados geoespaciais, recebendo o valor de 0 (zero),

quando não há correlação entre o lineamento e a imagem analisada ou 1 (um) quando há correlação. Esta análise booleana permitiu um somatório máximo de variáveis é igual a 9 (nove), ou seja, o valor de maior confiabilidade será 9 e o de menor será 1. O fluxograma da figura 1.5 exemplifica como foi desenvolvida esta metodologia.

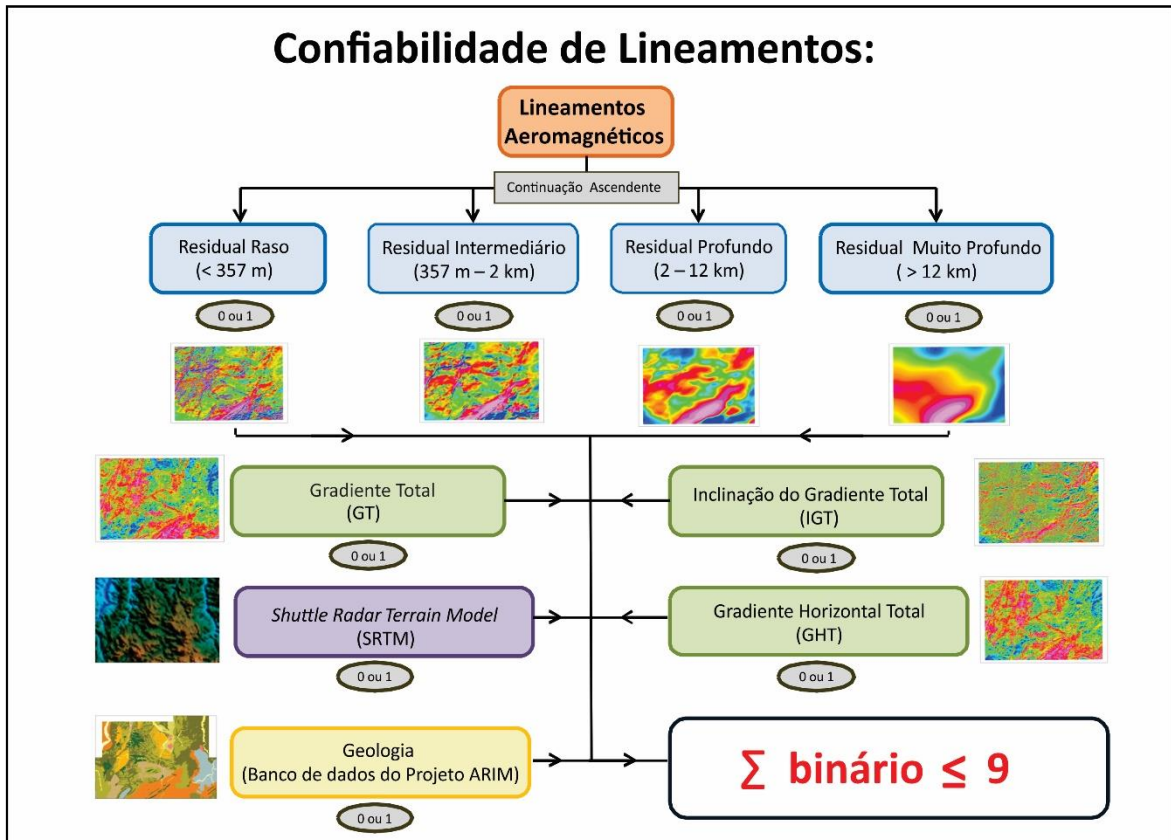


Figura 1.5: Fluxograma representando as etapas do processo de análise da confiabilidade de lineamentos magnéticos para o Distrito Juma.

1.4.2.5 Integração de dados

A metodologia utilizada para a elaboração dos mapas de prospectividade da região do Distrito Juma foi baseada nas propostas de Pan & Harris (2000) e Harris & Sanborn-Barrie (2006), posteriormente modificada por Nykänen (2008). A integração de dados em mapas de prospectividade foi feita em plataforma GIS através de uma modelagem do tipo *knowledge driven* (Bonham-Carter, 1994), em que o conhecimento do *expert* é transferido através de uma análise espacial quantitativa. Desta forma, um conhecimento prévio relativo ao modelo exploratório adotado é fundamental para que a escolha dos dados de entrada e as etapas posteriores da modelagem sejam bem-sucedidas.

Neste trabalho, a técnica escolhida para aplicação da modelagem prospectiva foi a lógica *fuzzy*. Foram gerados 3 mapas de prospectividade para a região do distrito Juma: (1) Mapa de prospectividade do *Distrito Juma* na escala 1:250.000; (2) Mapa de prospectividade do *Alvo Juma*, na escala 1:100.000 e (3) Mapa de prospectividade do *Alvo Guida*, na escala de 1:100.000. O processamento dos dados de entrada foi feito no *software* ArcGIS versão 10.2 e para a integração fuzzy utilizou-se a extensão SDM (*Spacial Data Modeller*).

O primeiro passo para a geração dos mapas de prospectividade foi a escolha do modelo exploratório adotado, guia para a seleção dos dados de entrada e etapas posteriores. Em seguida foi feito o pré-processamento dos dados, que envolveu diversas técnicas de geoprocessamento incluindo: interpolação, cálculos de raster, processamento de imagens, classificação e mudanças de escala (*rescaling*). Após a preparação dos dados iniciou-se a etapa de fuzzificação, em que foram escolhidas as funções de pertinência (*fuzzy memberships*) mais adequadas para cada um dos dados de entrada devidamente preparados. Este processo consistiu em uma simplificação padronizada de dados com naturezas distintas para que pudessem ser utilizados conjuntamente. As funções de pertinência utilizadas foram: *fuzzy categorical* (em que o expert define quais valores devem ser ressaltados), *fuzzy small* (que resalta os menores valores) e *fuzzy large* (ressaltando os maiores valores).

Em seguida os parâmetros críticos para a mineralização foram transformados em mapas evidenciais, através dos operadores *fuzzy* mais adequados, resultando em valores no *range* de 0 a 1 (Nykänen, 2008; Raines *et al.*, 2010), em que 0 significa uma evidencia fortemente negativa e 1 evidencia fortemente positiva. Os operadores fuzzy utilizados nesta etapa foram: *fuzzy AND*, *fuzzy OR* e *fuzzy Gamma*. O operador *fuzzy AND* é uma função de interseção em que os resultados tendem a ser valores conservativos, enquanto o fuzzy OR é um operador máximo que tende a gerar valores maiores. O operador *fuzzy Gamma*, consiste em uma combinação de *fuzzy sum* e *fuzzy product* (soma algébrica e produto algébrico respectivamente), no qual para $\gamma = 1$ a combinação será igual ao *fuzzy sum*, enquanto para $\gamma = 0$, a combinação será igual a *fuzzy product* (Nykänen, 2008). O operador *Fuzzy Gamma em $\gamma = 0.8$* foi utilizado para integrar o conjunto de dados no Distrito Juma e no Alvo Juma, enquanto o operador *Fuzzy Gamma em $\gamma = 0.7$* foi utilizado para o Alvo Guida.

1.4.2.6 Inversão de dados aeromagnéticos

A inversão 3D de dados magnéticos tipo Voxi-MVI (Ellis et al., 2012) foi empregada a partir dos grids do CMA, onde foi possível ilustrar a geometria das anomalias magnéticas em profundidade. Os dados do CMA são sensíveis a propriedade de magnetização das rochas e ao contraste de susceptibilidade de rochas distintas e podem ser modelados em 3D por meio da inversão do vetor de magnetização. Na presença do campo magnético, os domínios magnéticos tendem a se orientar de acordo com número de interações de efeitos magnético como por exemplo indução, remanência, anisotropia e desmagnetização. A inversão pelo vetor de magnetização MVI possibilita a inversão dos dados do campo magnético, recuperando a direção de magnetização e amplitude para cada domínio magnético existente na área do levantamento (Ellis et al., 2012). A técnica MVI foi aplicada usando VOXI *Earth Modeling* da Geosoft. A medida de cada célula do *mesh* para o modelo regional foi de 1350 x 1350 x 700 m e para o Distrito Juma de 750x 750x 350 m, os dados foram invertidos sujeitos a um erro relativo de 2,171 nT (5% of the data range).

O vetor de magnetização está relacionado a susceptibilidade magnética, que mensura a capacidade de um material em magnetizar-se sob a ação de um campo magnético ao qual este é submetido. A susceptibilidade magnética, representada pelo símbolo χ , se relaciona com a magnetização (**M**) e o campo magnético (**H**) conforme equação (1):

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \quad (1)$$

Na presença do campo magnético, os domínios magnéticos tendem a se orientar de acordo com número de interações de efeitos magnético como por exemplo indução, remanência, anisotropia e desmagnetização. A inversão 3D de dados magnéticos, visando recuperar a susceptibilidade magnética, ter sido amplamente utilizada na última década por geocientistas. Porém, a incerteza na direção de magnetização tem limitado o uso dessa técnica quando há presença de significativa remanência na área de estudo (Li et al., 2010).

Após esta etapa foram plotados os furos de sondagem dos alvos Platô e Guida, com suas interpretações geológicas e dados de susceptibilidade, medidos em campo. Também foram integrados aos modelos gerados pela inversão os dados

gamaespectrométricos, em composição ternária falsa cor RGB e CMY, o mapa geológico do Distrito Juma e mapas estruturais. Esta etapa foi importante para a interpretação em sub-superfície das mineralizações e anomalias, compondo o mapeamento geológico-geofísico em 3D.

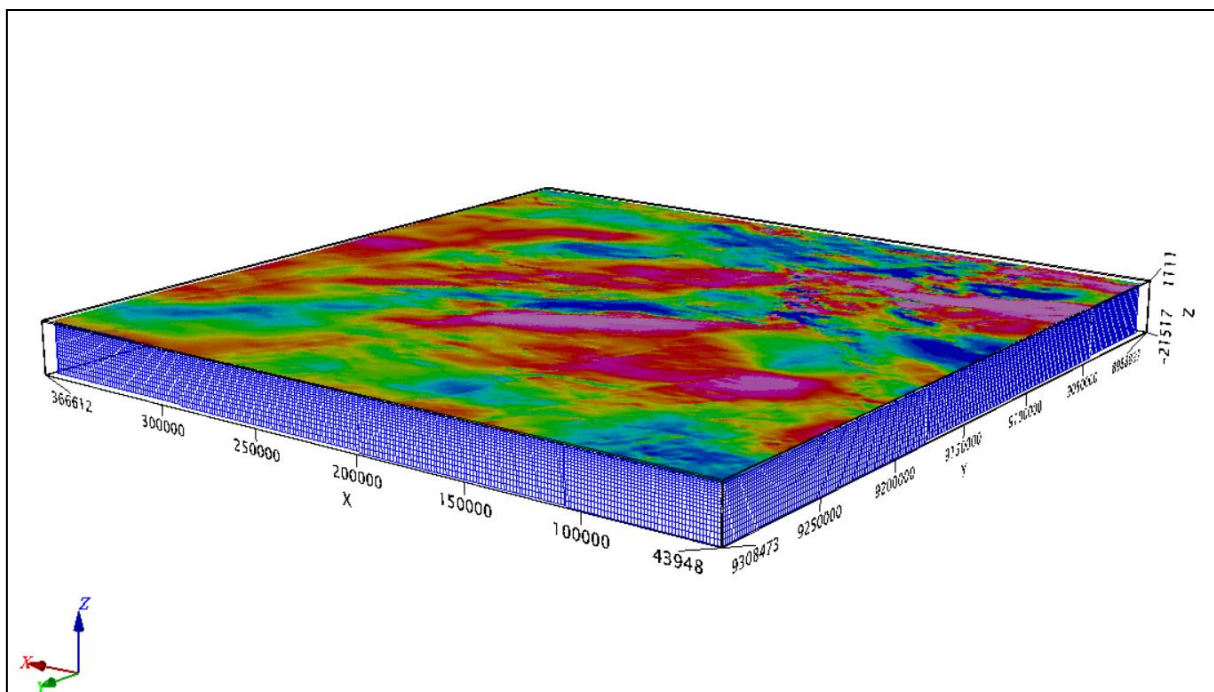


Figura 1.6: Mapa de susceptibilidade magnética com as dimensões do *mesh* em que foi feita a inversão do tipo MVI-Voxi regional.

1.5 Geologia regional

1.5.1 Compartimentação Geológica do Cráton Amazônico

O Distrito Juma (DJ) está localizado na porção centro-sul do Cráton Amazonas (CA). Crátons são unidades diferenciadas da litosfera continental, caracterizados por possuírem espessas e antigas raízes mantélicas. Desta forma, apresentam alta resistência mecânica e comportamento tectônico marcado por longa estabilidade (Alkmim, 2004). O Cráton Amazonas é uma das unidades tectônicas mais importantes da América do Sul, sendo uma das maiores, e menos conhecidas, exposições de rochas pré-cambrianas do planeta. Localizado ao norte da Plataforma Sul-Americana (Almeida & Hasui, 1984), é definido como a porção da crosta continental que permaneceu estável durante a orogênese Brasileira (Almeida, 1978; Almeida et al., 2000). Contido predominantemente em território nacional, o Cráton Amazonas estende-se ao norte para os países vizinhos (Venezuela, Guiana, Suriname e Guiana Francesa), onde os limites estão encobertos por sedimentos

fanerozoicos. No Brasil ocupa uma área de aproximadamente 4,3 milhões de km², sendo limitado a leste pela Faixa Araguaia e a sul e sudeste pela Faixa Paraguai, ambas geradas durante o Ciclo Orogênico Brasileiro (930–540 Ma; Pimentel e Fuck, 1992). O cráton é coberto por diversas bacias fanerozoicas, a nordeste (Maranhão), sul (Xingu e Alto Tapajós), sudoeste (Parecis), oeste (Solimões), norte (Tacutu) e centro (Amazonas).



Figura 1.7: Mapa da plataforma sul-americana e com destaque para as áreas cratônicas e escudos (fonte CPRM, 2003).

Em sua configuração geográfica o Cráton Amazônico é dividido em dois blocos, ou escudos, separados por um contato E-W coincidente com o eixo da Bacia Fanerozoica do Amazonas. A porção norte é definida como escudo das Guianas e a sul escudo Brasil Central (ou Guaporé), representados na figura 1.7.

A evolução geológica e a compartimentação tectônica do Cráton Amazônico têm sido objeto de estudo de vários autores desde meados do século passado. Amaral (1974) sugeriu a divisão de três grandes entidades geocronológicas: Amazônia Oriental, Amazônia Central e Amazônia Ocidental, com base em datações geocronológicas, majoritariamente pelo método K-Ar e secundariamente Rb-Sr. Este trabalho foi modificado e aperfeiçoado ao longo do tempo servindo como base para diversos modelos que o sucederam, tanto geocronológicos quanto geofísico-estruturais. Neste contexto merecem destaque os trabalhos de: Almeida (1978), Almeida et al. (1981) Cordani *et al*, (1979), Hasui *et al*, (1984), Teixeira et al. (1989) Costa & Hasui (1997), Tassinari & Macambira (1999) e Santos et al. (2000; 2003).

De acordo com sínteses mais recentes, a evolução do cráton é marcada por sucessivos eventos acrescionários, com maior ou menor envolvimento de crosta juvenil, ocorridos do Paleoproterozoico ao Neoproterozoico (Tassinari *et al*, 2000; Cordani & Teixeira, 2007 e Scandolara *et al*, 2017). Dados paleomagnéticos do Paleo-Mesoproterozoico favoreceram a inserção do Cráton Amazônico no supercontinente Columbia há 1780 Ma, em um cenário que se assemelhava à configuração “South AMerica and BAItica” (SAMBA; D’Agrella-Filho et al., 2016).

Quanto à evolução geocronológica, o Cráton Amazônico tem sido dividido em províncias orientadas preferencialmente na direção NW-SE que se tornam mais jovens de oeste para leste. Dois modelos geocronológicos são atualmente aceitos: Tassinari & Macambira (1999) e Santos *et al*, (2000, 2006), ambos representados pela figura 1.8. Os primeiros autores, baseados em datações de Rb-Sr e dados geofísicos, dividiram o Cráton Amazônico em seis províncias geocronológicas: Amazônia Central – PAC (> 2,3 Ga); Maroni-Itacaiúnas – PMI (2,2–1,95 Ga); Ventuari-Tapajós - PVT (1,95–1,80Ga); Rio Negro-Juruena - PRNJ (1,8–1,55 Ga); Rondoniana-San Ignácio - PRSI (1,55–1,3 Ga), e Sunsás – PS (1,3–1,0 Ga). Os padrões geocronológicos encontrados indicaram que um proto-cráton arqueano (que corresponderia a PAC) foi formado a partir de microcontinentes independentes que foram amalgamados por cinturões orogênicos paleoproterozoicos entre 2,2 – 1,95 Ga. Desta forma, as PVT e PRNJ teriam sido acrescidas às PAC e PMI por meio de sucessivos arcos magmáticos, enquanto as províncias PRSI e PS seriam resultado de dois eventos orogênicos de natureza ensialica (Rondoniano-San Ignácio e Sunsás).

Santos et al. (2000; 2003) propõe, baseado em dados isotópicos de Sm-N e datações geocronológicas U-Pb em zircões, alterações ao modelo proposto por Tassinari & Macambira (1999). Segundo os autores, o método Rb-Sr possui certa limitação quando aplicado em áreas de alto grau metamórfico, polideformadas ou polimetamorfizadas. Desta forma, foram propostas oito províncias geológicas: Carajás e Imataca – PCI (3.10-2.53 Ga), Transamazonica (Guianas) – PT (2.25-2.00 Ga), Tapajós-Parima – PTP (2.10-1.87 Ga), Amazônia Central - PAC (1.88-1.70 Ga), Rio Negro – PRN (1.86-1.52 Ga), Rondônia-Juruena – PRJ (1.76-1.47 Ga) e Sunsás – PS (1.33-0.99 Ga) (incluindo o K'Mudku Shear Belt - 1.10-1.33 Ga). Estas novas idades são de 100 a 400 Ma anos mais velhas que as obtidas pelo método Rb-Sr. As rochas mais jovens conhecidas no cráton (basaltos e granitos pós-Sunsás) têm idades entre 980–950 Ma, havendo um longo hiato (500–450 m.a.) desde o princípio do Neoproterozóico (Toniano) até o magmatismo máfico cambriano Piranhas (507 Ma; Santos 2003).

As províncias geocronológicas são interpretadas como produtos de sucessivas orogenias do tipo oceano-oceano, independentemente do modelo adotado. Estes processos envolveram subduções de baixos ângulos de mergulho, com vergência de sudeste para nordeste, e acreção de crosta juvenil evoluída através de processos de diferenciação magmática, com presença de magmatismo granítico e retrabalhamento crustal.

Com relação à espessura crustal, estudos sismológicos e gravimétricos recentes (Lloyd *et al.* 2010; Chulick *et al.* 2013; Corrêa Costa *et al.* 2016; Albuquerque *et al.*, 2017) sugerem que o Cráton Amazônico é composto por duas regiões com crosta mais espessa (> 50 km). Estas regiões corresponderiam a: (1) Porção central do Escudo das Guianas, ou a porção norte da Província Tapajós-Parima e; (2) Porção sul do Escudo Brasil Central, ao norte da Bacia dos Parecis pertencente à Província Geocronológica Rondônia-Juruena. Não é possível estabelecer uma correlação entre a geocronologia das províncias e a espessura crustal. Há regiões com crosta mais espessa em províncias mais jovens, como por exemplo na Província Rondônia-Juruena, enquanto há porções de crosta mais fina em regiões bastante antigas como ao norte da Província Transamazônica. De maneira geral, pode-se assumir que as bacias sedimentares estão localizadas em regiões de crosta mais fina, como por exemplo as bacias do Acre e Solimões,

indicando que processos extensionais podem estar relacionados com sua origem ou evolução.

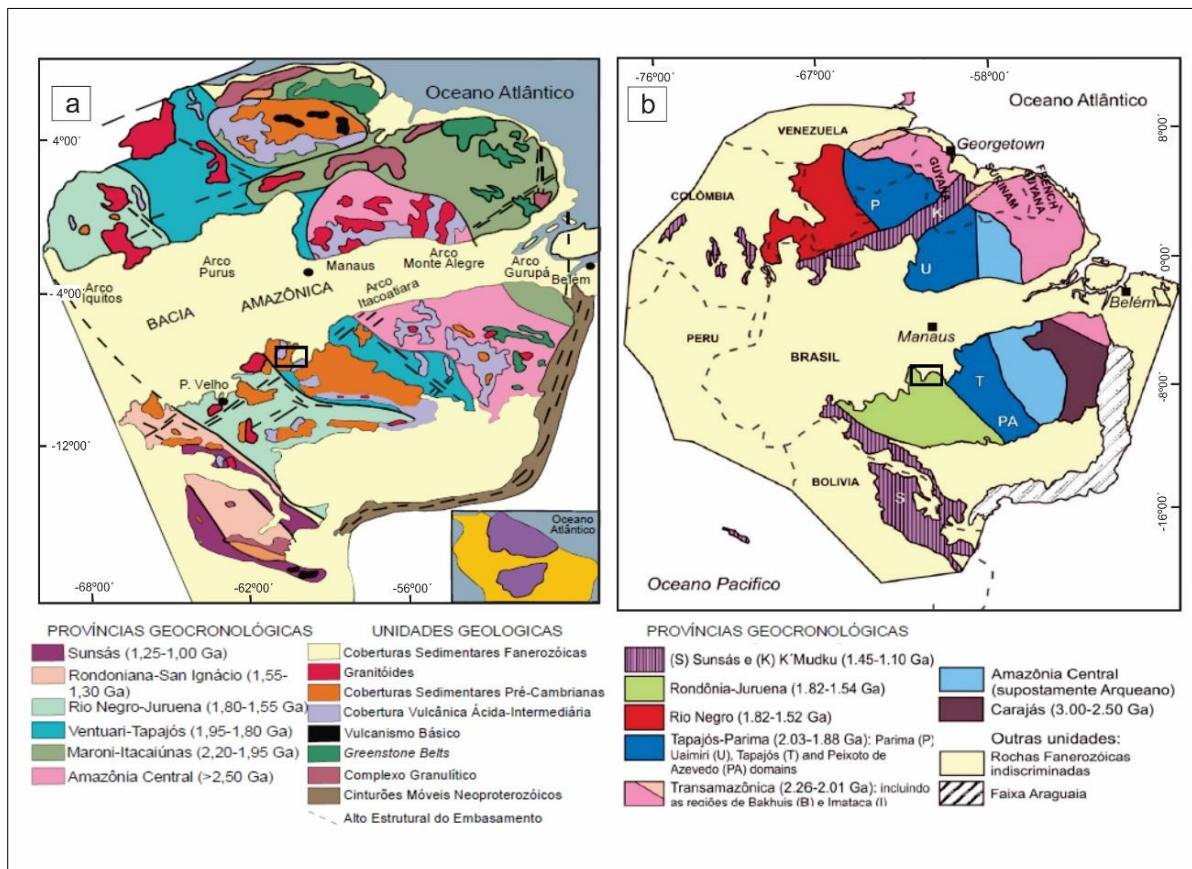


Figura 1.8: Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico segundo (a) Tassinari & Macambira (1999) e (b) Santos (2003), com a área de estudo em ambos modelos (modificado de Vasquez et al. 2008).

A figura 1.9 ilustra a estimativa para espessura crustal de todo o Cráton Amazonas (Albuquerque et al., 2017), com destaque para a área de estudo (Distrito Juma) e principais regiões detentoras de mineralizações de ouro da porção centro-sul do Cráton Amazônico (Província Mineral do Tapajós e Província Alta Floresta).

1.5.2 Geologia da Província Tapajós-Parima

A província Tapajós – Parima (2,1-1,87 Ga) apresenta uma evolução tectono-geológica de idade orosiriana, compreendendo quatro eventos plutonovulcânicos desenvolvidos durante um espaço de tempo de, aproximadamente, 140 Ma (Coutinho et al., 2000). O embasamento da província, metamorfozido em fácies xisto-verde a anfibolito superior, consiste em metassedimentos do Grupo Jacareacanga, gnaisses do Complexo Cuiú-Cuiú e granitoides da Suíte Intrusiva Creporizão.

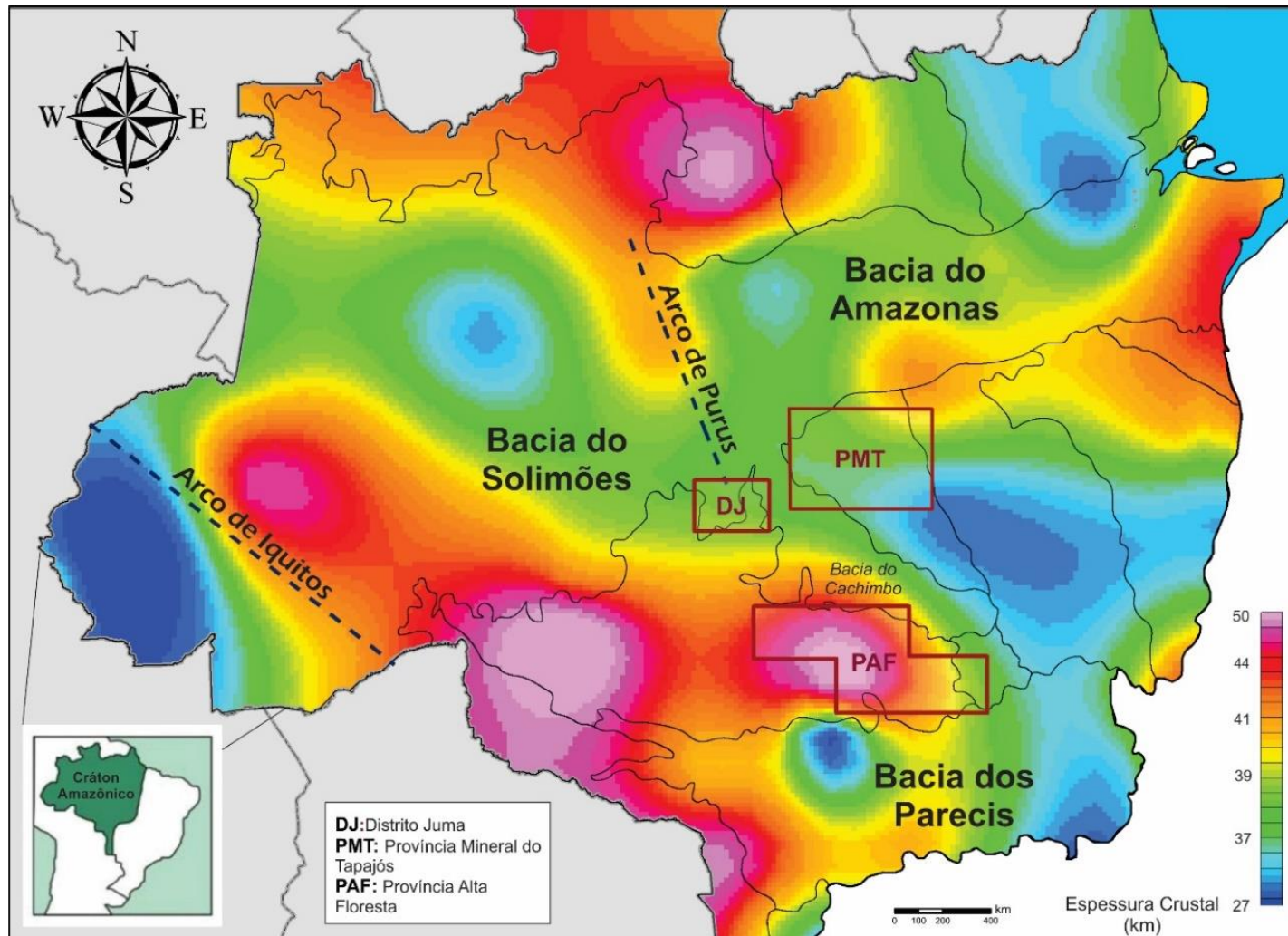


Figura 1.9: Mapa da estimativa de espessura crustal para o Cráton Amazônico (modificado a partir de Albuquerque et al., 2017) com limites das províncias geocronológicas (Santos, 2003). Estão destacadas as Províncias Alta Floresta, Tapajós e o Distrito Juma na porção centro-sul do Cráton.

O Grupo Jacareacanga é composto por unidades supracrustais, basaltos magnesianos relacionados a um magmatismo oceânico, com posterior sedimentação em retroarco e fossa oceânica que geraram turbiditos, cherts e formações ferríferas bandadas (Santos et al., 2000; 2003). Essa unidade é truncada por gnaisses de composição granodiorítica a tonalítica, oriundos de um arco magmático insular cálcio-alcálico primitivo do Complexo Cuiú-Cuiú (Pessoa et al., 1977; Santos et al., 2000), que correspondem aos mais antigos granitoides da província. Um segundo arco magmático, denominado Creporizão, tem composição cálcio-alcálica sendo composto por rochas graníticas mais evoluídas, como monzogranitos e andesitos, que apresentam incorporação de crosta continental. Esses dois primeiros arcos constituem a Orogênese Mundurucus segundo Santos (2003). Ainda de acordo com o autor, seguiu-se um hiato tectônico de 40 a 50 Ma, antes do desenvolvimento de um terceiro arco insular primitivo (Arco Tropas), acrescido ao continente entre 1,9 e 1,89 Ga, predominantemente constituído por tonalitos, andesitos e basaltos. Um novo arco continental primitivo (Arco Parauari) se desenvolveu entre 1.879-1.883 Ma truncando todas as unidades supracitadas, sendo composto por monzogranitos e vulcânicas félsicas, com sienogranitos a tonalitos subordinados.

A Suíte Maloquinha (1,88-1,86 Ga) e o Grupo Iriri (~1,88-1,87 Ga) truncam todas as unidades anteriores e constituem assembleias plutono-vulcânicas cálcio-alcálicas a alcálicas, peralíticas a metaluminosas e pós-colisionais a intra-placa (Santos, 2003). Sedimentos fluviais do Grupo Buiçu e sills e diques máficos da Suíte Crepori truncam todas as sequências de arcos descritas acima.

Os dados litoestratigráficos-litoestruturais da Província Mineral do Tapajós evidenciam que os terrenos são caracterizados por uma evolução crustal que reúne diversos protólitos, com diferentes idades e fases deformacionais, associados a regimes distintos de esforços, ora distensivos ora compressivos, que atuaram durante sua história evolutiva (Coutinho et al., 2008).

1.5.3 Geologia da Província Rondônia-Juruena

A província Rondônia – Juruena (1,82-1,54 Ga) registra eventos geológicos paleo a mesoproterozoicos que afetaram a região sudoeste do Cráton Amazonas. Seu limite com a província Tapajós - Parima se dá a oeste com o Domínio Peixoto

de Azevedo e a norte encontra-se encoberto pela bacia Alto Tapajós. A sudoeste separa-se da Província Sunsás pela zona de sutura Guaporé, front de empurrão do cinturão Nova Brasilândia de idade Esteniana (Rizzotto & Hartmann, 2012). A noroeste e a sul é recoberta pelas bacias fanerozoicas do Amazonas e dos Parecis. Santos (2000) a subdividiu em dois domínios principais: Roosevelt – Juruena (1,84-1,79 Ga) e Jamari (1,76-1,65 Ga).

O Domínio Roosevelt – Juruena, no qual estão inseridas a maior parte das unidades da área de estudo, é composto por quatro associações geológicas distintas: embasamento, granitoides cálcio-alcálicos, sequências vulcânicas e vulcano-sedimentares e assembleias pós-orogênicas com granitos anorogênicos e rochas sedimentares clásticas. No conjunto, esses domínios evoluíram a partir de sucessivos arcos magmáticos desenvolvidos através da subducção de crosta oceânica sob a crosta Tapajós – Parima (Santos et al., 2000; Pinho et al., 2001; Santos, 2003). O embasamento (~2,2 – 1,8 Ga) é constituído por dois segmentos principais: os complexos Monte Verde e Bacaeri – Mogno, a norte e mais antigo, composto por tonalitos, dioritos, basaltos e paragnaisses, e o Grupo Jauru, mais jovem e situado ao sul da província, constituído por charnokitos ígneos pós-colisionais (1.775 ±10 Ma). Ambos foram submetidos a condições de metamorfismo em fácies anfibólito, no intervalo de 1,76 a 1,62 Ga, possivelmente decorrente de uma fase orogênica colisional (Santos, 2003). Esse embasamento é intrudido por diversas suítes graníticas orogênicas e cálcio-alcálicas de idade 1,84 a 1,77 Ga, produtos de um arco magmático com participação de crosta continental, posterior à formação do arco Bacaeri, juvenil e mais antigo (JICA/MMAJ, 2000; Santos, 2003).

O Domínio Jamari, por sua vez, é constituído por ortognaisses cálcio-alcálicos de baixo K (associação quartzo-diorito, tonalito, metabasalto, meta-andesito) e paragnaisses, designados de Complexo Jamari (Isotta et al., 1978), originados em fase de arco magmático juvenil tipo Andino entre 1,67 e 1,63 Ga, com significativa contribuição crustal, possivelmente da orogênese Tapajós – Parima. As unidades paraderivadas possivelmente refletem sequências imaturas depositadas em bacias intermontanas sobre o arco magmático pré-construído (Santos, 2003).

Todas as unidades anteriormente descritas são cobertas por rochas vulcânicas da Suíte Colíder (1,82 – 1,76 Ga; Brito et al., 2010; Almeida & Costa 2014), vulcano-sedimentares do Grupo Roosevelt (1.740 ±8 Ma) e sequências

epiclásticas e vulcanoclásticas marinho-deltaicas do Grupo Beneficente (Almeida & Nogueira Filho, 1959). A relação do vulcanismo do Grupo Colíder com a sedimentação do Grupo Beneficente é marcada por erosão de feno-latitos e evolução para um ambiente deltaico-costeiro. Tufos intercalados com a sequência sedimentar mostram que um vulcanismo atuou concomitante à sedimentação Beneficente (Simões et al., 2017).

Recentemente, em divisão de caráter geotectônico, Scandola et al. (2017) propôs que no sudoeste do Cráton Amazônico se desenvolveu o Orógeno Acrescionário Juruena (1,81 – 1,51 Ga). Uma margem acrescionária teria evoluído entre 1,81 – 1.74 Ga formada em ambiente relacionado a subducção que precedeu em cerca de 30 a 50 Ma a colocação dos granitos pós-colisionais, tipo A, da Suíte Intrusiva Serra da Providência. Os autores também propuseram uma divisão tectono-estratigráfica para região, na qual os limites de terrenos e domínios incorporaram macroestruturas geradas em três eventos orogênicos distintos. Desta forma, o Orógeno Acrescionário Juruena é composto pelos Terrenos Jamari e Juruena e pelos Domínios Roosevelt, Aripuanã e Alta Floresta.

1.6 Estrutura da Dissertação

Este projeto de pesquisa foi desenvolvido na Universidade de Brasília sob a orientação da Professora Dra. Adalene Moreira Silva em cooperação com a CPRM. A dissertação de mestrado está estruturada em três partes: **(I)** a primeira, em que é apresentado problema estudado, os objetivos, os materiais e métodos utilizados e o contexto geológico regional; **(II)** a segunda, organizada em formato de artigo, em língua inglesa, a ser submetido à *Minerals*, e intitulado “**TARGETING NEW STRATEGIC AREAS FOR GOLD EXPLORATION IN SOUTHEAST AMAZON STATE: THE CASE HISTORY OF JUMA DISTRICT**” e **(III)** a terceira em que encontram-se as discussões e considerações finais, objetivando sumarizar os resultados obtidos, bem como, a aplicação em outras regiões do Cráton Amazônico.

2 TARGETING NEW STRATEGIC AREAS FOR GOLD EXPLORATION IN SOUTHEAST AMAZON STATE: THE CASE HISTORY OF JUMA DISTRICT

Lila Costa Queiroz ^{a,b}, Adalene Moreira Silva^a, Frederico Ricardo Ferreira Rodrigues de Oliveira e Sousa ^c Michele Zorzetti Pitarello ^d

^a Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 70910-900, Brazil;

^b CPRM – Serviço Geológico do Brasil – Belo Horizonte - MG, 30140-002, Brazil;

^c CPRM – Serviço Geológico do Brasil – Fortaleza - CE, 60115-080, Brazil;

^d CPRM – Serviço Geológico do Brasil – Manaus - AM, 69067-375.

ABSTRACT

The occurrence of gold in the Juma District, a region still poorly known from the geological and metallogenetic viewpoint, has led to a rising prospective interest in the southern central Amazon Craton. For this study, prospective 2D and 3D models were elaborated aiming to simulate possible scenarios for gold occurrences in the Juma District. The 2D prospectivity maps integrated multi-source data using fuzzy logic, a knowledge-driven spatial modeling technique. The 1:250,000 scale was defined for the entire district and the 1:100,000 scale for two windows (Juma and Guida Targets). The results indicate new targets with the potential for host gold, validated by the geological data available from the Geological Survey of Brazil (CPRM) and BBX Minerals. Subsequently, a magnetic data inversion was performed using the Magnetization Vector Inversion (MVI) technique to map the geological subsurface bodies and structures. The first 3D model allowed visualizing and performing the regional compartmentalization of the Juma District. In the Guida Target region, a granitic body was mapped with gold occurrences hosted in quartz veinlets, breccias and stockworks, which was validated by the drill cores results. The present study suggests that the Juma District mineralization is compatible with porphyry-epithermal systems, regionally correlated to known gold deposits.

Keywords: Prospectivity Mapping, Amazonian Craton, Fuzzy Logic, Airborne Geophysics, Magnetization Vector Inversion

2.1 Introduction

Over the last years, the expanding coverage of geophysical data allowed better imaging of the regional structural framework of the Amazon Craton and led to a rising interest in mapping the upper-crust geometries (Figure 2.1). Although studies on the lithosphere are incipient, crust mapping provides valuable information on geodynamics and parameters for identifying areas favorable to the discovery of new mineral deposits.

This study uses the fuzzy logic technique to integrate multi-source data in a single prospectivity map followed by a 3D magnetic data inversion. The study area is in the Northern region of Brazil, adjacent to the Tapajós Mineral Provinces to the east and Alta Floresta to the south, both separated by the Alto Tapajós Basin (Figures 2.1 and 2.2).

The Juma District has records of gold mining (known as “*garimpos*”) activities since the 1970s, which increased the interest in the geological research of the area by public and private companies, especially the Geological Survey of Brazil (CPRM). In 2006, the discovery of the *Garimpo Eldorado do Juma* intensified the gold exploration in the region with subsequent exploratory projects conducted by private companies such as Australian BBX Minerals.

Recently, the mapping of Orosirian granites in the study area indicates a geological context similar to the Peixoto de Azevedo Domain, where rocks from Rondônia-Juruena Province occur in contact with those from the Tapajós Domain (Meloni et al., 2018a). Therefore, arguably the two provinces have a similar geological context, which increased the interest in the potential of the Juma District. The total gradient of the anomalous magnetic field illustrates the regional structural framework and its different provinces (Figure 2.2).

Airborne geophysics products were used to generate the prospective scenarios, strategic for mapping the mineral potential of this inhospitable region and defining the exploratory pipeline. From the 2D spatial modeling products, key areas were selected for detailing regions that may potentially host gold mineralizations (Silva 1999, Hronsky, 2004; Hronsky & Groves, 2008; Silva et al, 2012; Uchôa, 2017). This effort is performed on different scales to generate the parameters that also help to understand the mineral system. If possible, 3D inversion should be included as an attempt to map the most distal footprint.

This work aims to present a prospective study for gold mineralizations in the Juma District from 2D and 3D modeling at different scales. Detailing of mineralized subsurface bodies was used to validate the prospective targets. The results contribute to the evolution of geological and prospective knowledge in the area, bringing new insights to the mineral exploration activity in the south-central region of the Amazonian Craton.

2.2 Geological Setting

2.2.1 Tectonic Framework and Regional geology

The Amazon Craton is one of the most important tectonic units in Brazil, and one of the largest and least studied pre-Cambrian region on the planet. It is located in the northern South American Platform (Almeida & Hasui, 1984) and defined as the portion of the continental crust that remained stable during the Brasiliano orogenesis (Almeida, 1978; Almeida et al., 2000). The craton evolution is marked by successive accretionary events, from Paleoproterozoic to Neoproterozoic, with greater or lesser involvement of the juvenile crust (Tassinari et al., 2000; Cordani & Teixeira, 2007; Scandolara et al., 2017).

Seismological and gravimetric studies (Lloyd et al. 2010; Chulick et al. 2013; Corrêa Rosa et al. 2016; Albuquerque *et al.*, 2017) suggest that the Amazonian Craton consists of two regions with thicker crust (~50 km), the northern portions of the Tapajós-Parima Province and Parecis Basin, both belonging to the Rondônia-Juruena Geochronological Province. No correlation has been established between provincial geochronology and crustal thickness (Figure 2.1).

According to Santos et al. (2000), the southern central portion of the Amazon Craton comprises the Rondônia-Juruena (1.80 - 1.50 Ga) and Tapajós-Parima (2.03 - 1.88 Ga) geochronological provinces, being partially covered by the rocks of the Alto Tapajós Basin (Figure 2.2). The Rondônia-Juruena Province, where most of the study area units are located, records Paleo to Mesoproterozoic geological events that affected the southwest region of the Amazon Craton.

Scandolara *et al.* (2017) based on geological, geophysical and geochronological data, propose the characterization of the Juruena Accretionary Orogen (1.81 - 1.51 Ga) in the southwest of the Amazon Craton. The accretionary margin would precede by 30 to 50 Ma the placement of post-collisional granites of the Serra da Providência Suite (Santos *et al.*, 2000, 2008; Payolla *et al.*, 2002; Scandolara, 2006; Ribeiro and Duarte, 2011; Duarte *et al.*, 2012; Scandolara *et al.*, 2013 a,b; 2014; Duarte, 2015; Scandolara *et al.*, 2017).

To improve visualization, the main geological domains described above are superimposed on the total gradient of anomalous magnetic field, illustrating the different patterns by varying the magnetic gradient in the structural provinces and the location of the study area. Geochronological data were also compiled from Scandolara *et al.* (2017) and ARIM SE-AM Project (CPRM), and superimposed on the Bouguer satellite anomaly image (WGM2012) showing the relationships between age and crustal density (Figure 2.2).

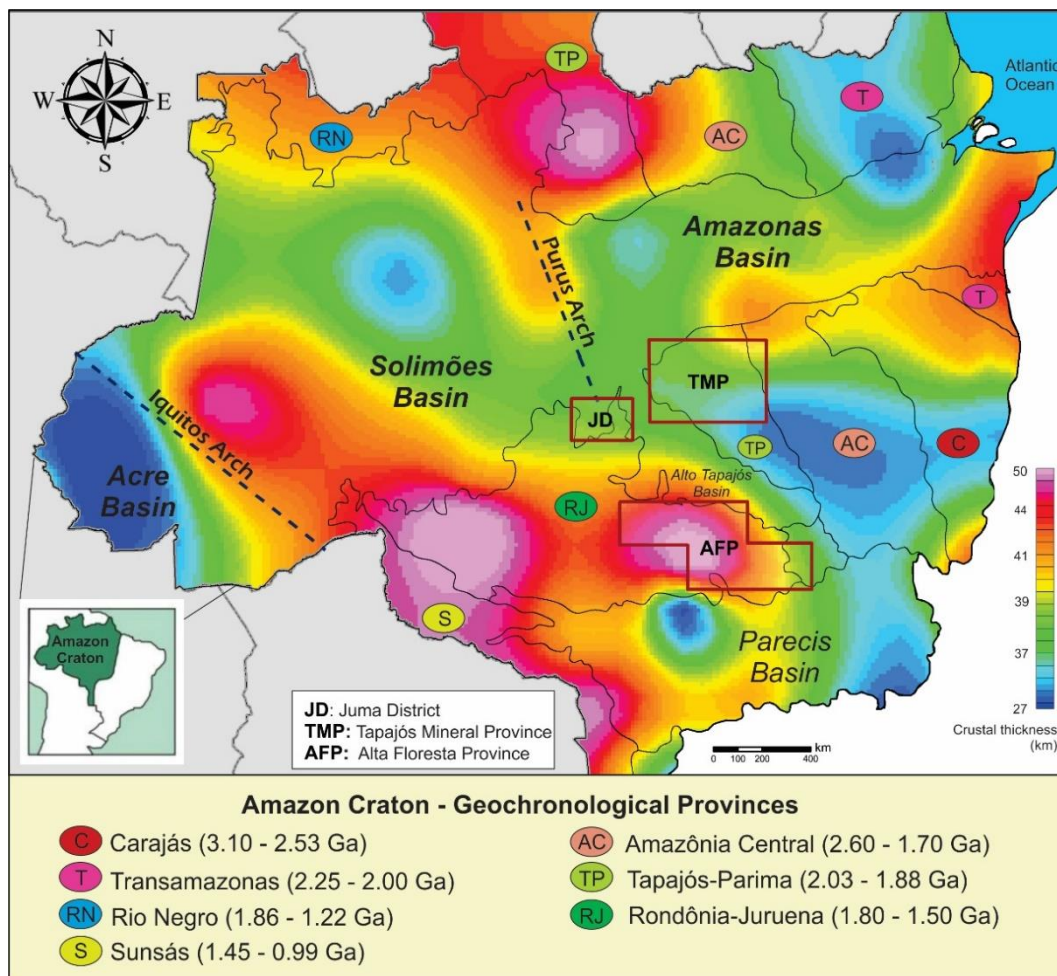


Figure 2.1: Crustal thickness map of the Amazonian Craton (modified from Albuquerque *et al.*, 2017) showing the Juma District and the limits of geochronological provinces (Santos, 2003).

The Tapajós and Alta Floresta Mineral Provinces, known for hosting gold mineralizations in the south-central region of the craton, are highlighted.

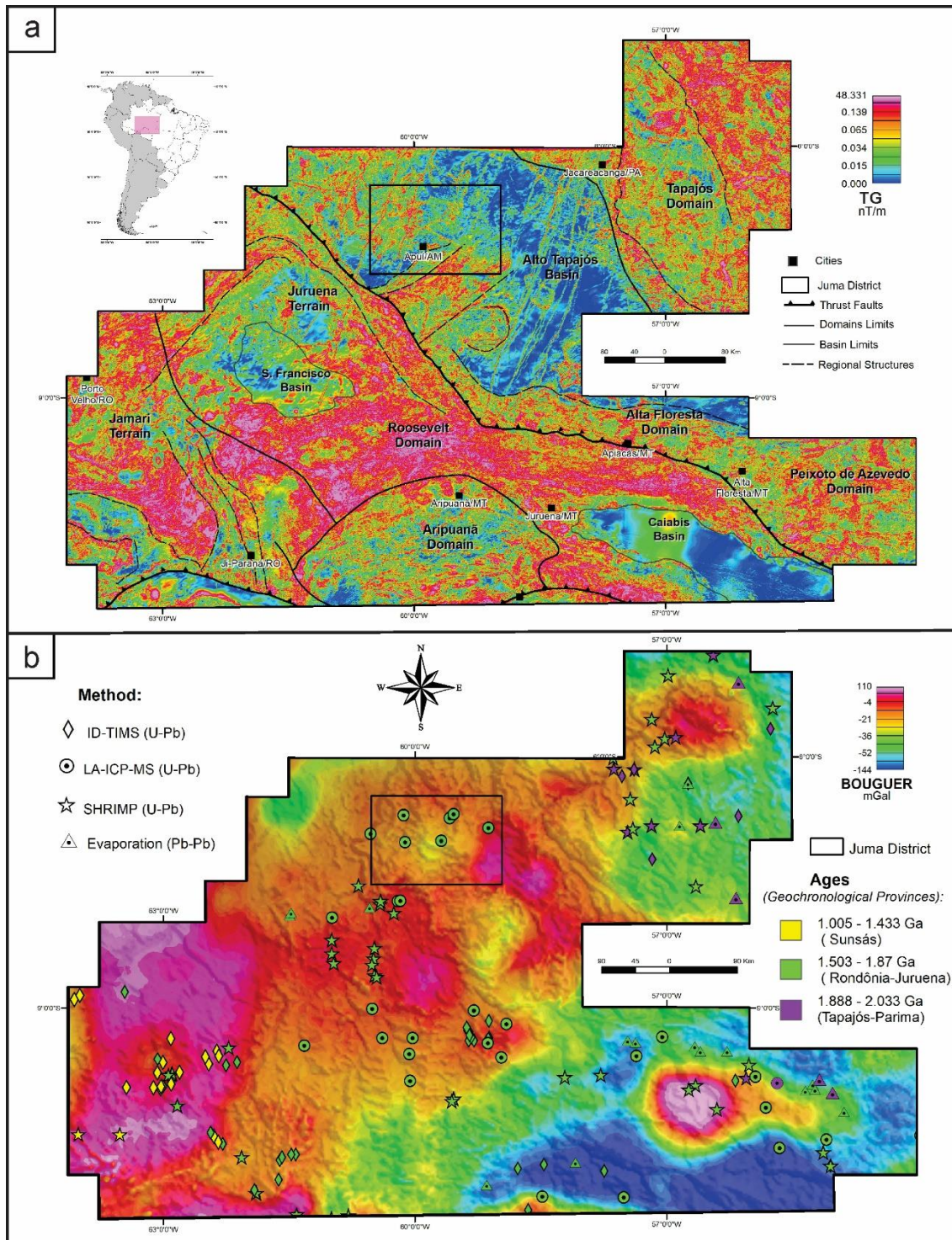


Figure 2.2: Products derived from airborne magnetics and satellite gravimetry data (WGM2012) covering the southern central Amazon Craton while highlighting (a) major structural domains and provinces superimposed on the total gradient of the anomalous magnetic field and (b) geochronological data compiled from Scandolaro et al. (2017) and ARIM SE-AM Project (CPRM) superimposed on bouguer anomaly image. In both images, the black polygon defining the study area stands out.

2.2.2 Juma District Geology

The Juma District records geological events from the Paleoproterozoic to Paleozoic and, despite its potential to host gold mineralizations, the regional geology is still poorly known. The area is mainly covered by non-metamorphic or greenschist facies volcano-sedimentary sequences. The pre-Juruena basement consists of Orosirian metavolcanic-sedimentary rocks from the Jacareacanga Group (Tapajós Domain) cut by the Paleoproterozoic Chuim and Arraia granites (~1855.1 Ga.;~1837 Ga.; CPRM, 2019). The monzogranites are magnesian, calc-alkaline to alkali-calcic, peraluminous rocks, such as I-type granite (Meloni et al., 2018b). Field data show distal and proximal hydrothermal zones, characterized by alteration halos, associated with chloritization, epidotization, carbonation, and oxidation processes, occasionally containing gold. This composition and age are compatible with the I-type granites of Matupá Intrusive Suite and correlated with the rocks of the Serrinha gold deposit in the Juruena-Teles Pires Province (Moura, 1998; Moura & Botelho, 2002; Moura et al., 2006). Table 2.1 compares the main characteristics of Au-porphphyry-type deposits of the Juma District with two regionally associated deposits: Serrinha (Alta Floresta Domain) and Tocantinzinho (Tapajós Domain).

The lithological units related to the Juruena Orogen are characterized by high-K calc-alkaline magmatic rocks of the Igarapé das Lontras Suite, acidic to intermediate volcanic rocks from the Colíder Group and marine-deltaic metasedimentary rocks from the Beneficente Group (Almeida & Nogueira Filho 1959; Liberatore et al., 1972; Reis et al., 2009, 2013; Simões et al., 2017). The Colíder and Beneficente Groups are related to rift-type basins environment with volcanism, both containing gold. Gabbros and diabases of the Mesoproterozoic Matá-Matá Suite (Betiollo et al., 2009) are also associated with gold mineralization.

Table 2.1: The main features of the granitic intrusions in Juma District compared to porphyry gold, Serrinha and Tocantinzinho deposits (Adapted from Moura 2006; Lopes & Moura, 2019).

	Juma District	Serrinha Deposit	Tocantinzinho Deposit	Porphyry Gold Deposits
Tectonic Environment	Volcano-plutonic arc	Volcano-plutonic arc	Magmatic arc	Volcano-plutonic arc
Intrusion Age	1855.1 ± 6.4 Ma (Chuim Granite); 1837.8 ± 9.6 Ma (Arraia Granite)	1900 Ma	1982 ± 8 Ma	Variable, predominantly cenozoic and mesozoic
Host rock composition	I-type, peraluminous and magnesian calc-alkaline to alkali-calcic, monzogranite	I-type, magnetite-series, equigranular to porphyritic monzogranite cut by cogenetic rhyolitic dikes	I-type, calc-alkaline, magnetite-series, oxidized, monzogranite	I-type, magnetite-series porphyry; coeval volcanic rocks are common
Mineralization type	Quartz veinlets, breccias and stockworks	Disseminated	Disseminated; in veinlets and fractures (stockwork)	Disseminated; stockwork; fractures controlled
Main metals	Au	Au	Au	Au-(Cu)
Key sulfides associated	± Pyrite	Pyrite	Pyrite	Pyrite- (chalcopyrite; bornite)
Association of hydrothermal alteration	Epidote, actinolite, chlorite, calcite, magnetite, adularia	K-feldspar, albite, chlorite, sericite, pyrite, magnetite	Phyllic alteration, K-feldspar alteration (microclinization)	Biotite, K-feldspar, magnetite, sericite, anhydrite, albite, pyrite, chlorite, clay
References	Brito, 2010; Meloni et al., 2018a,b; This study	Moura (1998); Moura & Botelho (2002); Moura et al. (2006)	Castro 2015; Lopes & Moura, 2019	Sillitoe (1991, 1993, 2000, 2010); Hedenquist and Lowenstern (1994)

The topographically lower regions expose the Paleozoic fluvial sandstones of the Sucunduri Group (Liberatore et al., 1972) and the siltstones and sandstones of Jatuarana Group in the Alto Tapajós Basin (Bizinella et al. 1980). These rocks represent the youngest lithotypes in the study area.

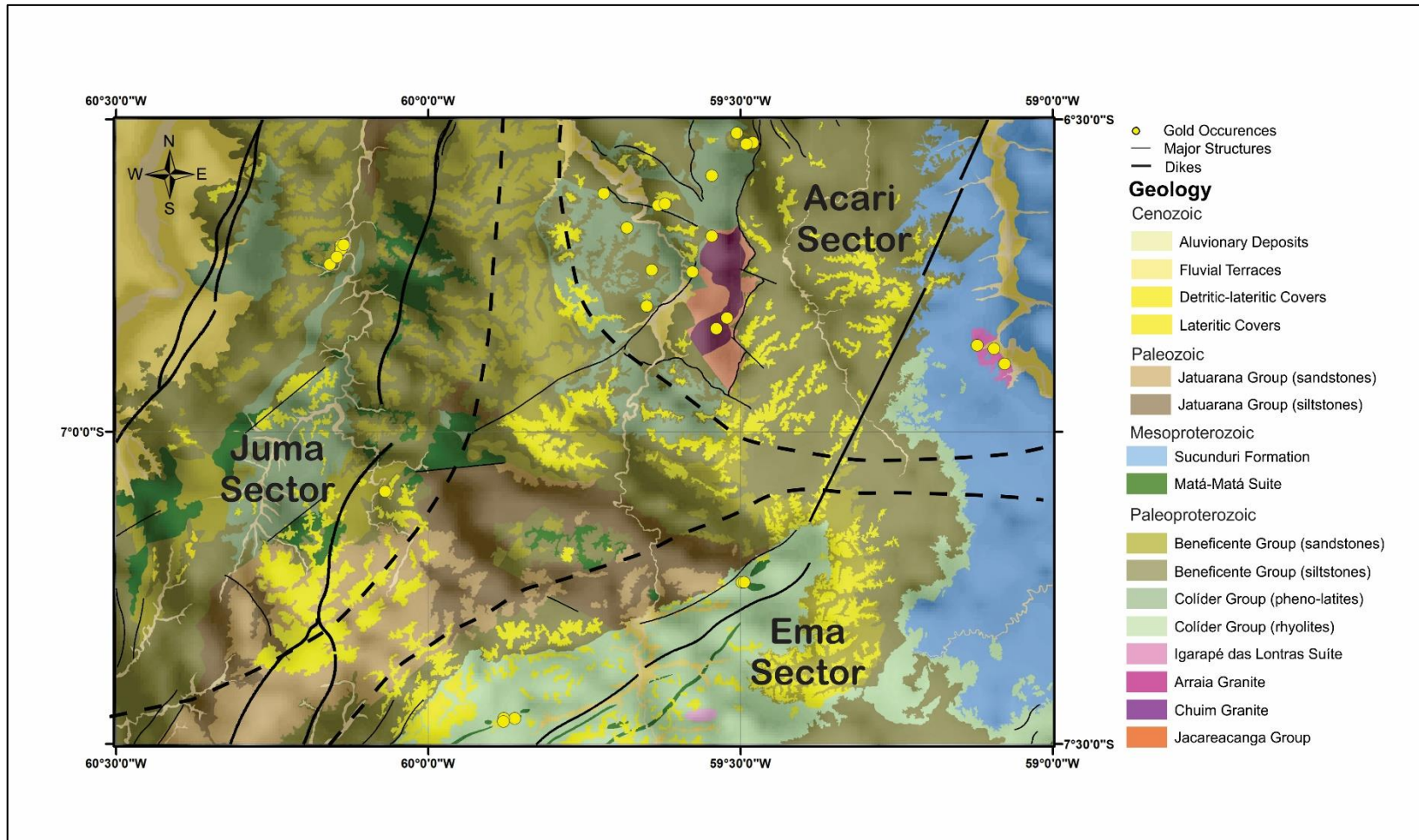


Figure 2.3: Geological map of Juma District showing the main gold occurrences and major regional structures (Meloni et al., 2018a). Based on the individual characteristics of the mineral occurrences and their spatial distributions, three sectors were defined: Ema, Acari, and Juma. The Arraia Granite, in the east, and Chuim Granite, cutting the volcanic rocks from the Jacareacanga Group in the north-central portion of the map are particularly noteworthy.

2.2.3 Mineralization

The Juma District has 28 known gold occurrences, most of them corresponding to ancient prospects or artisanal mining (“garimpos”), mainly hosted by volcanic rocks without metamorphism from Paleoproterozoic sequences of the Colíder (~1.78 - 1.73 Ga) and Beneficente (~1.75 Ga) Groups (Simões et al., 2017; Meloni et al., 2018a, b). Some of the mineralizations are associated with mafic intrusions from Matá-Matá Suite (Betiollo et al., 2009) while others, with monzogranitic intrusions in volcano-sedimentary sequences from the basement. Based on the individual characteristics and spatial distribution of occurrences, the Juma District was divided into three sectors: Acari, to the north and northeast; Emma, to the south and southeast, and Juma, to the northwest (Figure 2.3).

The Acari sector is characterized by mineralizations associated with the Orosirian Chuim and Arraia Granites, which are intruded into volcano-sedimentary sequences. Most of the gold occurrences are hosted in quartz veins or silicious matrix from hydrothermal breccias, occasionally drusiform, with microcrystalline and lattice bladed textures. Sulfide occurrences are uncommon but can be locally associated with gold. Hydrothermal alteration halos are evidenced by chloritization, carbonation, sericitization, quartz-adularia veins and formation of clay minerals. The geochemical and compositional affinity of the granites are similar to the Matupá Suite hydrothermal rocks, in the Serrinha gold deposit (Table 2.1; Moura, 1998; Moura & Botelho 2002; Moura et al., 2006).

In the Ema sector, gold occurrences are structurally controlled by the Buiuçu shear zone, which traverses the southeastern portion of the studied area in the NE-SW direction. Gold is hosted in lapilli-tuffs and diabases associated with quartz veins, whose width ranges from a few centimeters to as much as one meter.

In the Juma sector, the mineralization is widespread in networks and stockworks of millimeter-to-centimeter-thick kaolinized veins that cut the volcano-sedimentary strata. In this sector, silicification is subordinate and quartz veinlets are uncommon.

The gold occurrences in the Ema and Acari sectors are spatially associated with fault corridors and shear zones, locally hosted in NE-SW and NW-SE regional ductile faults of unknown ages. The strong structural control supports an epigenetic origin for the mineralizations, many having features that indicate an epizonal depth of formation (Meloni et al., 2018). Sulfide is only found in the Acari sector, evidenced by the limonitic masses and boxwork textures in quartz veins. Fluid migration from deep crustal zones is responsible for some of the gold occurrences. The apparent absence of regional metamorphism in the host rocks and similar models described in the literature suggest a magmatic-hydrothermal origin for the gold mineralization in the Juma District. For this work, an exploration model related to porphyry-epithermal systems was adopted.

2.3 Data and processing

The research methodology consists of four steps: (1) Input data selection; (2) Data processing; (3) prospective 2D modeling of gold mineralization; and (4) 3D magnetic data inversion integrated with drill core results. These steps were defined from the exploration model adopted for the Juma District, considering its different sectors, using the methodology proposed by Pan & Harris (2000), Harris & Sanborn-Barrie (2006) Silva et al. (2012) and Uchôa (2018). **Figure 2.5** shows the flowchart with the main steps and data obtained in this work.

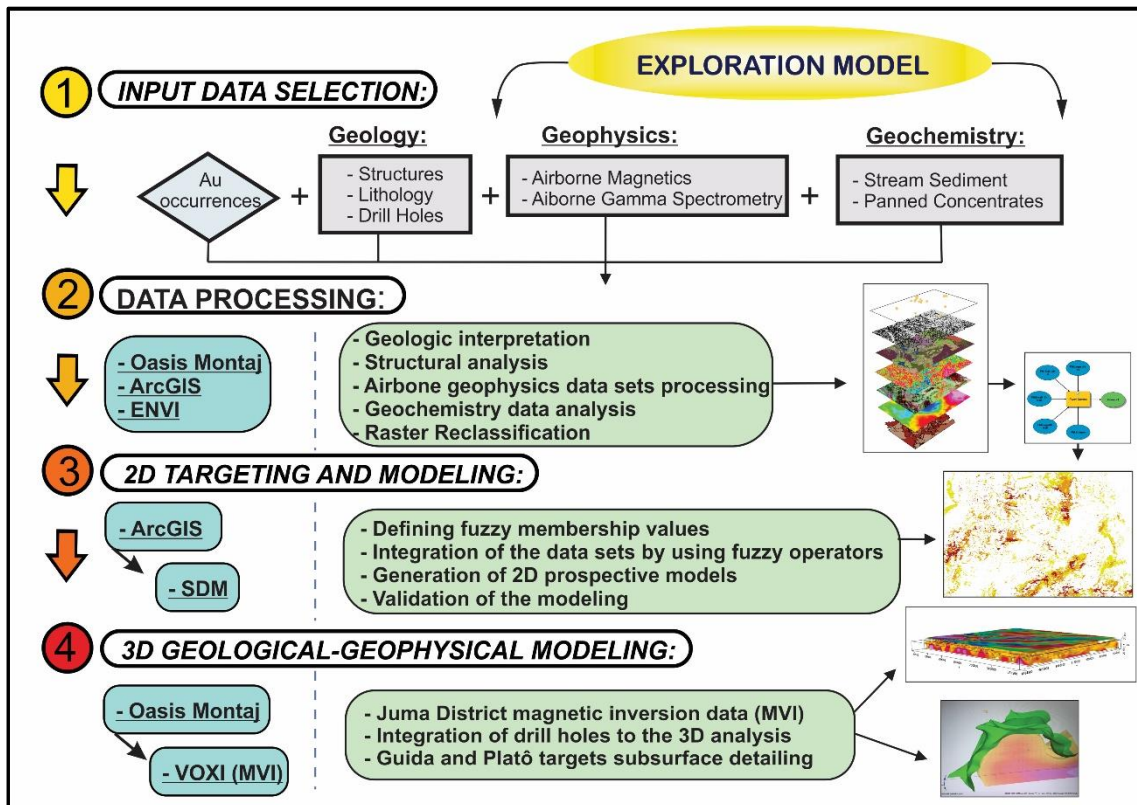


Figure 2.4: Flowchart showing the main steps and products generated for this work, based on the methodology proposed by Pan & Harris (2001) and Harris & Sanborn-Barrie (2006).

2.3.1 Datasets

The dataset used in this work consists of multi-source layers including the Juma district geological map, gold occurrences, airborne magnetic and gamma-ray spectrometry data, stream sediment survey, mineralogy of panned concentrates and magnetic susceptibility of drill core samples.

Initially, a 1:250,000 scale was adopted to prepare the Juma District prospectivity map. After generating the first model, the scale of the dataset was adjusted to the 1:100,000 to create the prospectivity maps of the Juma and Guida target windows. The geographic coordinate system was the SIRGAS 2000 datum.

2.3.1.1 Geology and structural data

The geological and structural data, including the spatial location of gold occurrences, were obtained from the Geological Survey of Brazil (CPRM). The most up-to-date geological map available for the region is from the ARIM Project (CPRM, 2019) in 1: 100,000 scale.

BBX Minerals provided six drill cores for the geological description and magnetic susceptibility measurement. The drill holes, with depths varying from 180 to 300 m, were drilled in the eastern portion of the Juma District, near the Acari River.

2.3.1.2 Airborne geophysics

The airborne magnetic and gamma-ray spectrometry data were acquired by LASA between 2008 and 2013 provided by the CPRM. The traverse lines were flown at 500 m spacing with control lines separated by 5000 m. The flight directions were N-S and E-W, respectively, with a constant 100 m flight height.

2.3.1.3 Airborne magnetics

Magnetic data were acquired using a Cesium vapor magnetometer sensor coupled to the aircraft tail. The total field had an approximate intensity of 25577 nT, and an estimated magnetic inclination and declination of 3.2° and -14.5°, respectively. The magnetometer readings were taken at 0.1-s intervals, so one measure was taken every 7.8 meters for 280 km/h average speed.

The original magnetic data were corrected by removing the International Geomagnetic Reference Field (IGRF) to separate deep magnetic sources, which are not of interest to mineral exploration analysis. Subsequently, the data were interpolated by the bi-directional method to a grid with 125 x 125 m cells using the OASIS Montaj software, resulting in the Anomalous Magnetic Field (AMF). The main products derived from the AMF are as follows, Dz (Vertical Derivative in Z), Dx (Horizontal Derivative in X), Dy (Horizontal Derivative in Y), ATHG (Amplitude of Total Horizontal Gradient) and TG (Total Gradient; Nabighian, 1972; Roest et al., 1992; Dentith & Mudge, 2014).

2.3.1.4 Airborne gamma ray spectrometry

Gamma-ray spectrometry data were acquired by the Exploranium GR-820 Airborne Spectrometer with 256 spectral channels. Ground readings were taken every 1-s at approximately 78-m intervals. Data were pre-processed to eliminate inconsistent and negative values for potassium (K%), thorium (eTh) and uranium (eU) channels since these corresponded to less than 3% of the total area covered

by the data. The K, eTh, and eU channels were interpolated by the minimum curvature method using 125 x 125 m cells (Akima, 1970; Smith and Wessel, 1990). The eU and eTh maps were expressed as equivalent values (ppm) and K, as a percentage. The main products used are the ternary false-color RGB composition (with K% in the red channel, eTh in the green channel, and eU in the blue channel); Th and K ratio (eTh/K%); U and Th ratio (eU/eTh); F factor ($F = K \times (eU/eTh)$; Efimov, 1978) and anomalous K (Pires, 1995).

2.3.1.5 Stream sediment and panned concentrate

The stream sediment and panned concentrate surveys are available on the CPRM database (<http://geosgb.cprm.gov.br/>), whose results are based on the analysis of 485 stream sediments and 484 heavy mineral panned concentrates. The distribution of samples in the Juma District region corresponds to a 1:100,000 scale, with a minimum density of one sample every 10 km².

Stream sediment analyses were performed on ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission) and ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry). Results of panned concentrates are expressed as a mineral percentage in the following ranges <1%, 1-5%, 5-25%, 25-50%, 50-75%, and 75-100%. Gold was quantitatively analyzed after quartering.

2.3.2 Fuzzy logic methodology

The integration methodology used in this study was based on the proposals of Pan & Harris (2000) and Harris & Sanborn-Barrie (2006), later modified by Nykänen (2008), Silva et al. (2012) and Uchôa (2018). A knowledge-driven method was applied to generate scenarios favorable to gold occurrences in the GIS environment (Bonham-Carter, 1994). In this case, the expert knowledge and the adopted exploration model are essential for successfully choosing the input data and subsequent modeling stages.

Fuzzy logic was the technique chosen for applying prospectivity modeling. Three maps were generated for the Juma District region as follows (1) Juma District prospectivity map, 1:250,000 scale; (2) Juma Target prospectivity map, 1:100,000 scale; and (3) Guida Target prospectivity map, 1:100,000 scale. Input

data processing used the ArcGIS software and the fuzzy modeling was performed in the SDM (Spatial Data Modeler) extension.

The first step for generating the prospectivity maps was choosing the exploration model to guide the input data selection and subsequent steps. The data was then processed using various geoprocessing techniques including interpolation, raster calculations, image processing and classification. After preparing the data, the fuzzification stage consisted of choosing the most appropriate fuzzy memberships for each properly prepared input data, i.e., a standardized simplification of different data to allow using them together. The pertinence functions used were fuzzy categorical (the expert defines the values to be highlighted), fuzzy small (highlights the smallest values) and fuzzy large (highlights the largest values).

Subsequently, the critical mineralization parameters were transformed into evidential maps using the most appropriate fuzzy operators, the resulting values range from 0 (strongly negative evidence) to 1 (strongly positive evidence) (Nykänen, 2008; Raines et al., 2010). The fuzzy operators used in this step were fuzzy AND, fuzzy OR and fuzzy Gamma. The fuzzy AND operator is an intersection function whose results tend toward conservative values while fuzzy OR is a maximum operator that tends toward larger values. The fuzzy operator Gamma combines the fuzzy sum and fuzzy product so that combination equals either fuzzy sum for $\gamma = 1$ or fuzzy product for $\gamma = 0$ (Nykänen, 2008). The Fuzzy Gamma operator was set at $\gamma = 0.8$ to integrate the dataset in Juma District and Juma Target, while $\gamma = 0.7$ was chosen for the Guida Target.

The flowcharts of Figures 2.5, 2.7 and 2.8 detail the steps of the described methodology, with the fuzzy logic operators and pertinence functions for each of the generated prospectivity maps.

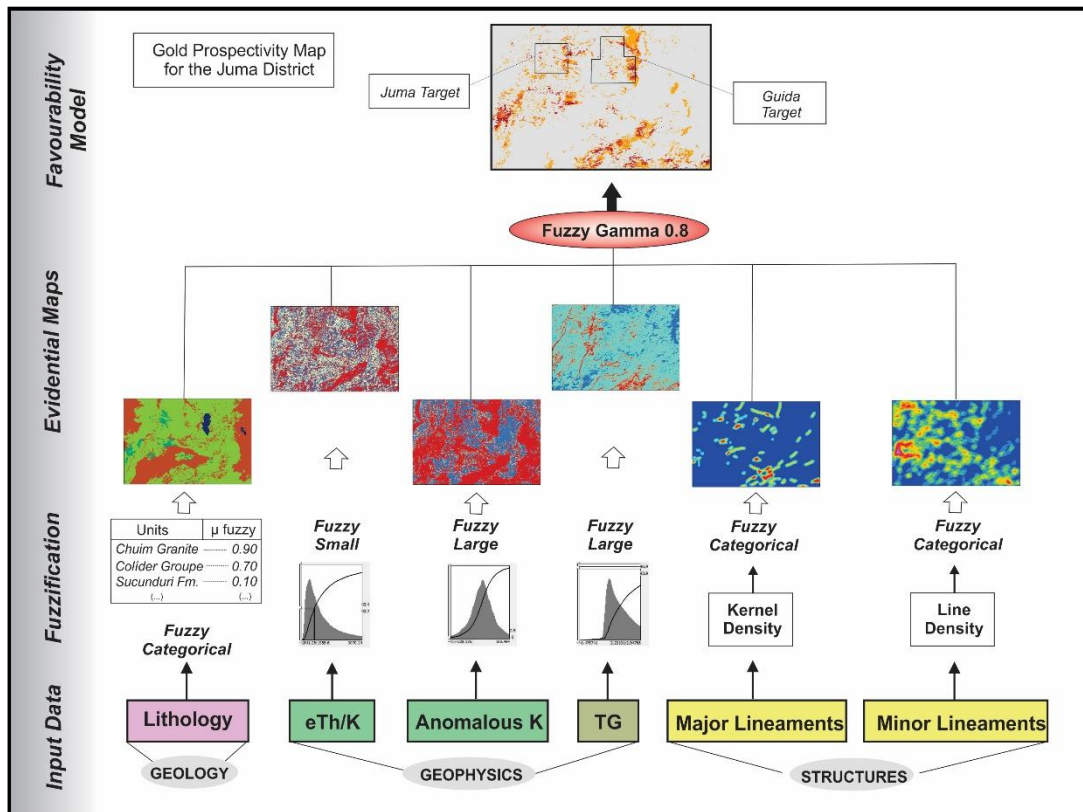


Figure 2.4: Flowchart detailing the steps of the methodology, the fuzzy logic operators and pertinence functions for the Juma District prospectivity map.

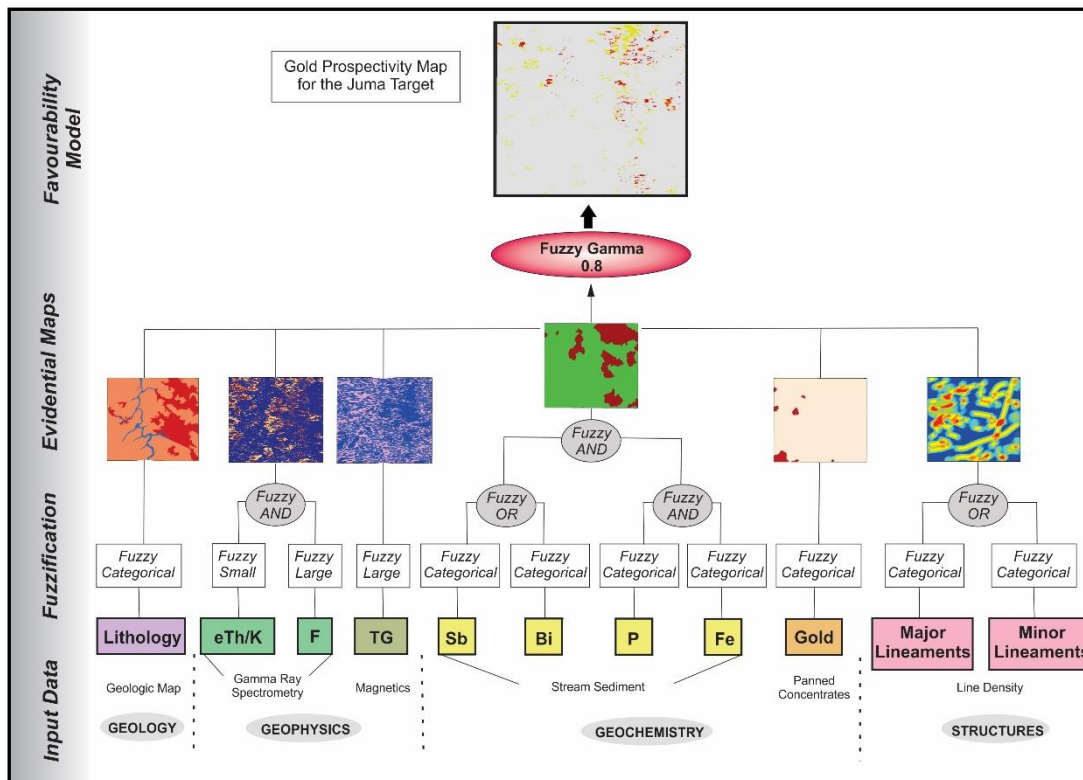


Figure 2.5: Flowchart detailing the steps of the methodology, the fuzzy logic operators and pertinence functions for the Juma Target prospectivity map.

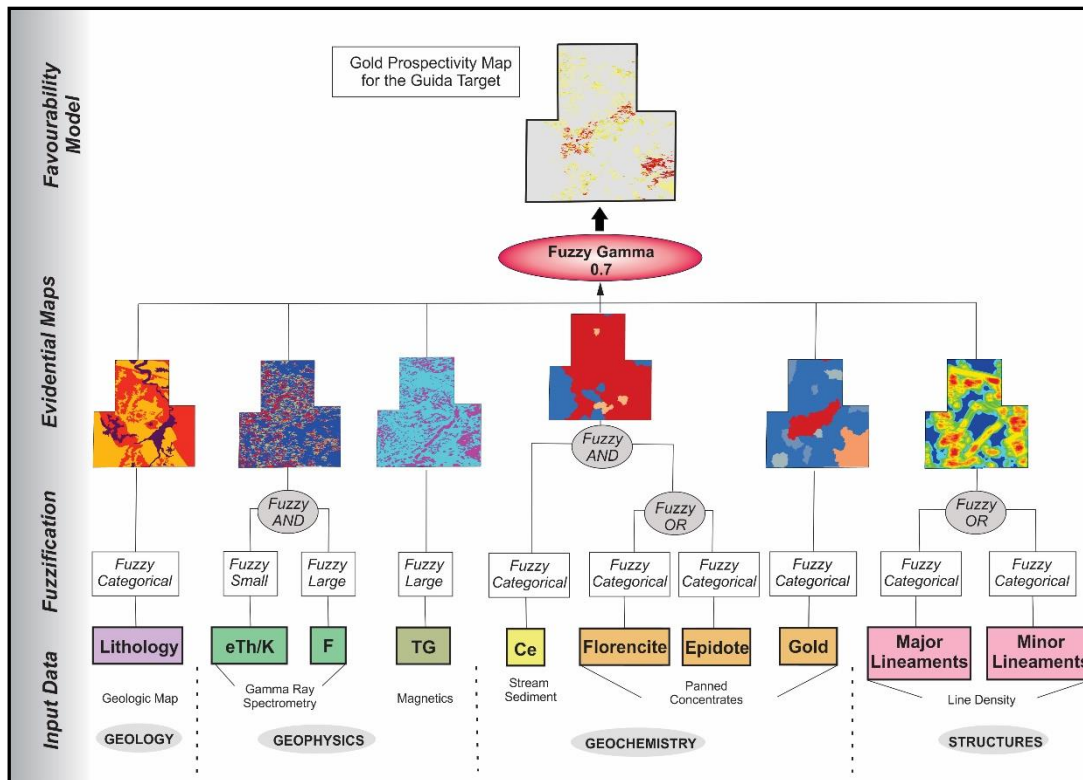


Figure 2.6: Flowchart detailing the steps of the methodology, the fuzzy logic operators and pertinence functions for the Guida Target prospectivity map.

2.3.3 3D Magnetic inversion

The 3D inversion of the magnetic data for the Juma District was carried out using grids of the anomalous magnetic field (AMF), to illustrate in-depth the geometry of the magnetic anomalies. In the presence of the magnetic field, the magnetic domains tend to orient themselves according to the number of interactions of magnetic effects such as induction, remanent magnetization, anisotropy and demagnetization (Emerson et al., 1985). Therefore, these factors must be taken into consideration before choosing the best method for 3D inversion of magnetic data.

The anomalous magnetic field data are sensitive to both magnetization and susceptibility contrast of different rocks. The Magnetic Vector Inversion (MVI) enables recovering the magnetization direction and amplitude for each magnetic domain existing in the survey area (Ellis et al., 2012). The magnetization vector is related to magnetic susceptibility, which indicates the degree of magnetization of a material in response to an applied magnetic field. The dataset has been inverted to produce 3D susceptibility models using the Geosoft VOXI Earth Modelling system. The Juma District model used a 750 × 750 × 350 m mesh cell,

and the data were inverted subject to a relative error of 2.171 nT (5% of data range).

After this stage, the drill cores of Guida Target, geological interpretations and field-measured susceptibility were plotted together. The Juma District geological and structural maps were integrated into the models generated by the inversion with the gamma-ray spectrometry data, based on the ternary false-color images. This step was important for interpreting the subsurface mineralization and anomalies, as well as composing a geological-geophysical analysis in 3D.

2.4 Data integration

A probabilistic approach for classifying prospective targets is based on refining the exploration model into proxy parameters for the critical processes that generate the deposit-type sought (Hronsky & Groves, 2008). This section describes the district-scale integration and extraction of proxies from mappable criteria for gold deposition in the three prospectivity maps. Ideally, the evidential maps represent the source, migration and depositional processes of the mineral system to be modeled (Nykänen, 2008). In this work, the three elements characterizing the type of sought mineralizations were identified as source, pathway and traps.

The Juma District geological, airborne geophysical and structural data were used to choose the criteria that define the critical processes for gold mineralization. After this initial prospective modeling, two windows were defined, considered strategic for the occurrence of new mineralizations, to be detailed: Juma and Guida Targets. These targets used the regional model dataset, as well as geochemical data for prospective modeling. The following topics describe the exploratory criteria and spatial proxies used in the final prospectivity maps.

2.4.1 Juma District

The first prospective model for the entire Juma District region was developed based on exploratory criteria related to porphyry-epithermal systems. Precambrian porphyry-epithermal deposits are not as representative as the Meso-Cenozoic examples and, in some cases, their classification is still controversial. However, the Alta Floresta and Tapajós Mineral Provinces, both

adjacent to the study area, are known to host gold deposits in similar geological settings. In this context, the works of Moura (1998), Moura et al., 2006, Aguja Bocanegra (2013), Juliani et al. (2014), Assisi (2015), Bettencourt et al. (2015), Trevisan (2015) and Lopes & Moura (2019) are highlighted.

The key criteria (based on geological, structural, airborne magnetic and gamma-ray spectrometric data) used in evidencial maps are summarized in Table 2.2.

Table 2.2: Exploratory criteria and theoretical fundamentals used for generate the evidencial maps of the Juma District.

<i>Exploratory criteria</i>	<i>Fundamentals</i>	<i>Spatial Proxy</i>	<i>Primary data</i>	<i>Evidencial maps</i>
Geology	Gold is mainly hosted on non-metamorphic volcanic felsic rocks from Paleo-Mesoproterozoic volcano-sedimentary sequences or associated with Orosirian granites. Usually containing hydrothermal alteration.	1) Paleo-Mesoproterozoic igneous and volcano-sedimentary rocks; 2) Alteration zones	Juma District geological map (CPRM); Geochronological data (CPRM)	Lithological units weighted by prospective potential
Structural	Lineaments and faults acted as structural controls to direct fluid flow and to deposit gold.	Proximity to faults and lineaments	Airborne magnetic data; Juma District geological map (CPRM)	1) Distance of major and minor lineaments; 2) Structure density estimation
Airborne magnetics survey	Gold host units and structural faults that control mineralization usually have magnetic signatures	Magnetic signatures	Airborne magnetic data	Total gradient of magnetic data
Airborne gamma-ray spectrometry survey	Potassium mobility may be an indicator of fluid remobilization and ore deposition	K-rich units	Airborne gamma-ray spectrometry data	1) eTh/K map; 2) Anomalous potassium map

Although known gold occurrences are good indicators of regions favorable to new occurrences, they also risk guiding prospective exploration to known areas while hindering investigations in areas without previous discoveries. Therefore, they were used only for the map validation process and characterization of the targets to be detailed in the current model. Since the Juma District has at least

three distinct known mineralized sectors, this stage of the work sought to identify the criteria related to all occurrences, for example, the apparent absence of regional metamorphism and features indicative of epizonal depth.

The mappable criteria for the source of gold are the lithological units, weighted according to the potential to transport gold from deeper zones to the subsurface. The units with the highest weights in the lithological map were the Paleo-Mesoproterozoic, especially of magmatic or volcanic origin, such as the Arraia and Chuim Granites. These units were more favorable to the occurrence of new mineralizations due to the tectonic events that evolved into their genesis. For the Matá-Matá Suite, the geochemical affinity of mafic volcanic rocks with gold allowed assigning higher weights to this unit. The volcano-sedimentary Colíder and Beneficente Groups were relevant in the model especially at intersections with high structure density sites.

The focused fluid pathways are necessary to characterize the migration process, becoming important to define structural weakness areas. The criterion used was the interpretations obtained from the minor and major magnetic lineaments related to the regional tectonic structures that favor the migration of fluids. The NE and NW directions tend to have greater relevance in the fluid transport process. The Buiuçu fault system is an example of regional structure that concentrates gold deposits in the Ema Sector, crossing the entire southeastern portion of the study area in the NE-SW direction. In this context, the total gradient of the anomalous magnetic field was useful since the lineaments and main features, that may conduct the gold, tend to have magnetic responses. Thus, on a regional basis, this criterion may help to delimit the extension of hydrothermal alterations zones, favorable areas for the occurrence of gold deposits.

The criteria defined for ore deposition are associated with intersecting brittle structures, which tend to concentrate and precipitate fluids, forming traps often with occurrences of quartz veins and breccias. These regions are possibly related to hydrothermal features, with associated chloritization, carbonation and epidotization. In this context, the spatial proxy is defined by gamma-spectrometric anomalies. K-enriched areas, obtained through the anomalous Th/K and K ratios, were interpreted as having the greatest potential for fluid remobilization. Six

evidential maps were produced to create the final prospectivity map. In these maps, the high values are associated with a higher chance that the analyzed criteria favor the occurrence of gold mineralizations (Figure 2.9).

The Juma District prospectivity map (Figure 2.10) generated five regions with the highest prospectivity for new targets: (1) North-central map, where known gold occurrences are associated with the Chuim Granite intrusion, that cut across volcano-sedimentary rocks from Jacareacanga Group; (2) South-southeast area, where mineralizations are hosted in quartz veins and volcanic rocks, this region is structurally controlled by the Buiuçu fault zone; (3) Western region, with no known records of mineralizations yet. Mafic rocks from the Matá-Matá Suite are mapped in contact with volcano-sedimentary rocks of the Beneficente Group, geological context similar to that of Juma target; (4) Central portion with a known occurrence, *Garimpo Rio das Pombas*. Mineralization is hosted in kaolinitic venules on volcano-sedimentary rocks of the Beneficente Group, context similar to the *Garimpo Eldorado do Juma*; (5) Northwestern region, where the mineralizations tend to occur preferentially in networks and stockworks of kaolinitic venules locally associated with intrusive mafic rocks. This region was detailed as Juma Target in this work.

The following sections introduce the specific characteristics of the Juma and Guida Target mineralizations, in Juma and Acari sectors, respectively, to allow elaborating more detailed scale prospectivity maps.

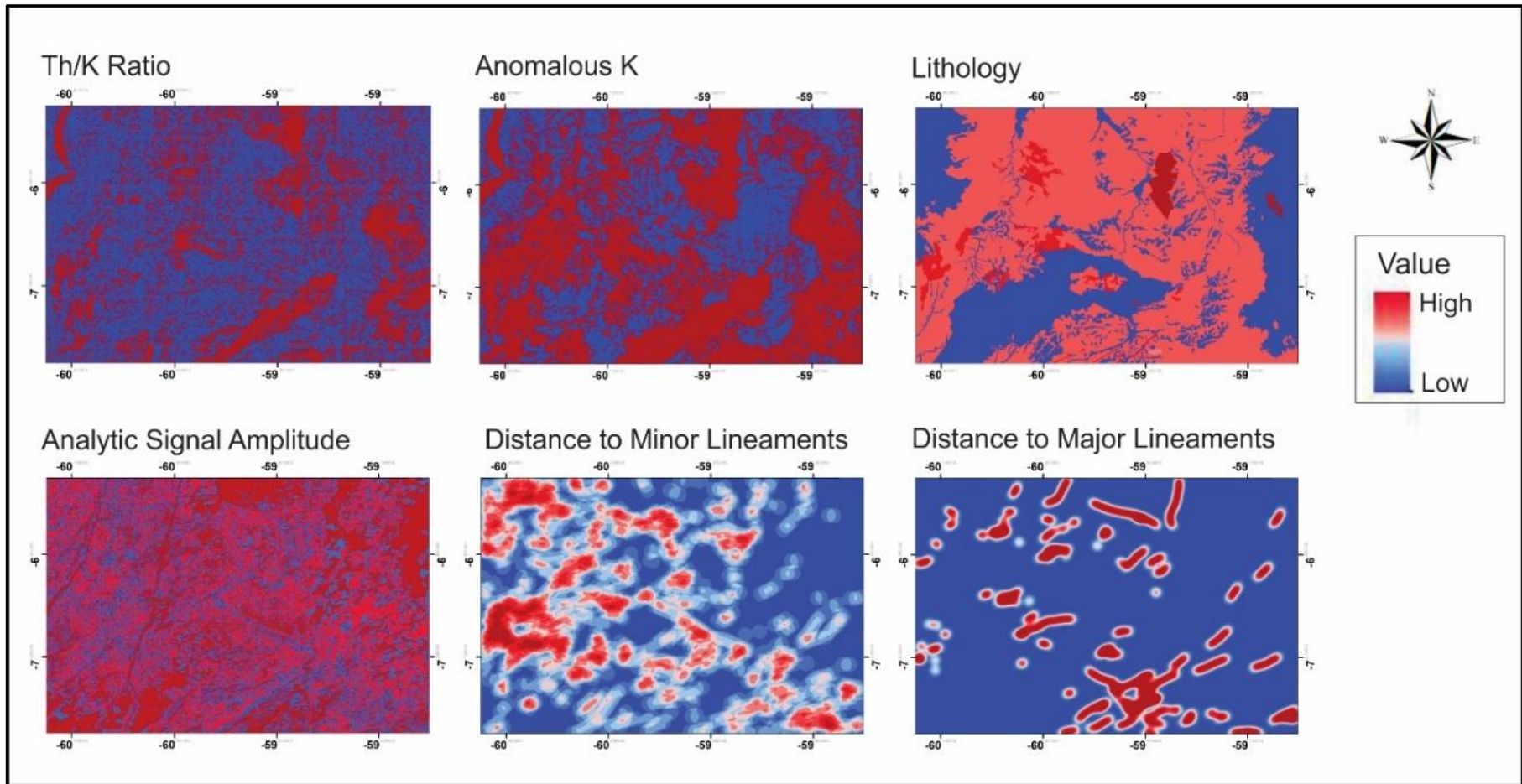


Figure 2.7: Evidential maps used for the Juma District prospectivity modeling, with the same color-scheme for all the maps. The high values are associated with a higher chance that the analyzed criteria favor the occurrence of gold occurrences.

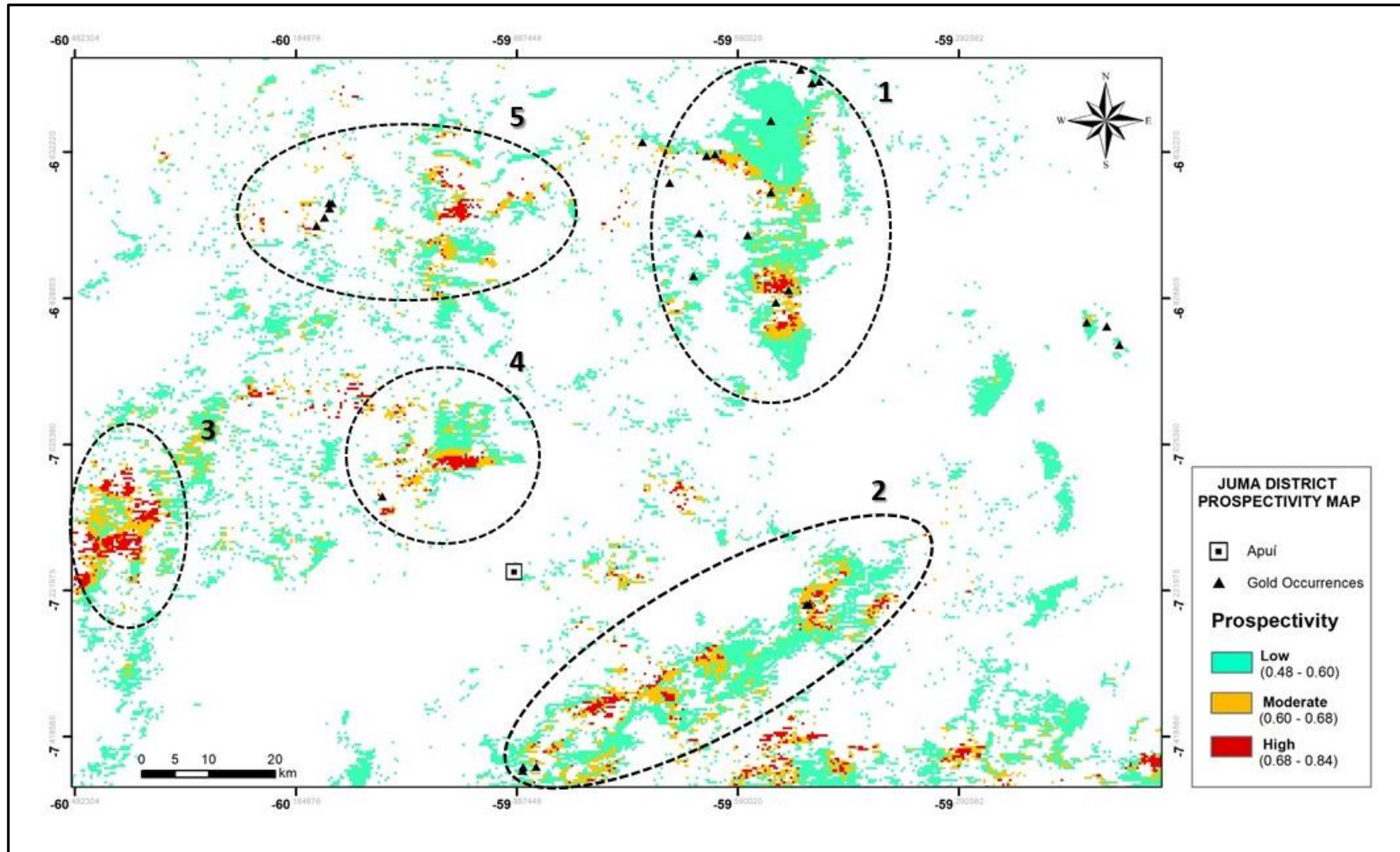


Figure 2.8: Juma District prospectivity map containing three prospective classes for gold occurrences: low, medium and high. Five regions with the highest prospectivity for new targets are delimited in the map.

2.4.2 Juma Target

The Juma target is characterized by mineralizations associated with kaolinite veins and stockwork features hosted in the gabbros and gabbronorites from Matá-Matá Suite. The Eldorado do Juma prospect, located in this target, gives the name to the district. Considering the geological characteristics and the work scale, lithology is the main indicator of the critical process of a gold source. Thus, the mafic lithologies were assigned higher weights in the geology evidential map compared to the others. The P anomalies in stream sediment were also used to define favorable regions (anomalous basins) for the occurrence of geological units that host mineralization. P is an abundant element in acidic volcanic rocks (Porder et al., 2012) that tend to be associated with gold occurrence in this geological context. In addition to the lithological and geochemical criteria, magnetic signatures obtained from the total gradient map were also useful, since both mafic units, faults and other structures that can concentrate gold tend to have magnetic responses.

To map fluid migration and depositional processes, products derived from gamma-spectrometric data were applied to delimit regions with possible hydrothermal remobilization through anomalous potassium concentration. The Th/K and F factor maps, emphasizing lower and higher values, respectively, were particularly important. The magnetic lineaments were transformed into the evidential map of lineament density and served as a proxy for the fluid migration process. Structural control for this type of mineralization should be scale-dependent, so prospective scale lineaments were defined for targets plotted on a 1:100,000 scale. Regional fractures and fault zones have been used to map larger structures that can provide pathways for hydrothermal fluids. In addition to these proxies, the anomalous Sb and Bi concentrations, known as pathfinder elements for gold, were adopted in this model. **Table 2.3** summarizes the main exploratory criteria used to prepare the Juma Target prospectivity map.

Table 2.3: Criteria used to elaborate evidential maps to model the Juma target.

<i>Exploratory criteria</i>	<i>Fundamentals</i>	<i>Spatial proxy</i>	<i>Primary data</i>	<i>Evidential maps</i>
Geology	Mineralization is related to the mafic dikes of the Matá-Matá Suite. Presence of networks and stockworks of kaolinitic veinlets	1) Mafic dikes; 2) Alteration zones; 3) Known gold occurrences	Juma District geological map (CPRM); Geochronological data; Known gold occurrences	Lithological units weighted by prospectivity potential
Structural	Mineralization is related to structures (fractures and faults) and their intersections	Proximity to faults and lineaments	Airborne magnetic data survey; Juma District geological map (CPRM)	1) Distance of major and minor lineaments; 2) Structure density estimates
Airborne magnetics	The volcanic units and faults that control mineralization often have magnetic signatures	Magnetic signatures	Airborne magnetic data survey	Total gradient of magnetic data
Airborne gamma-ray spectrometry	Potassium mobility may be an indicator of fluid remobilization and ore deposition	K-rich units	Airborne gamma-ray spectrometry data survey	1) F factor map; 2) eTh/K map
Geochemistry	Gold host units are usually enriched with elements related to mafic rocks and hydrothermal fluids	1) Proximity to anomalous gold basins 2) Sb, Bi and P anomalies	Panned concentrate and stream sediment surveys	1) Anomalous gold basins; 2) Sb, Bi and P anomalies of stream sediment analysis

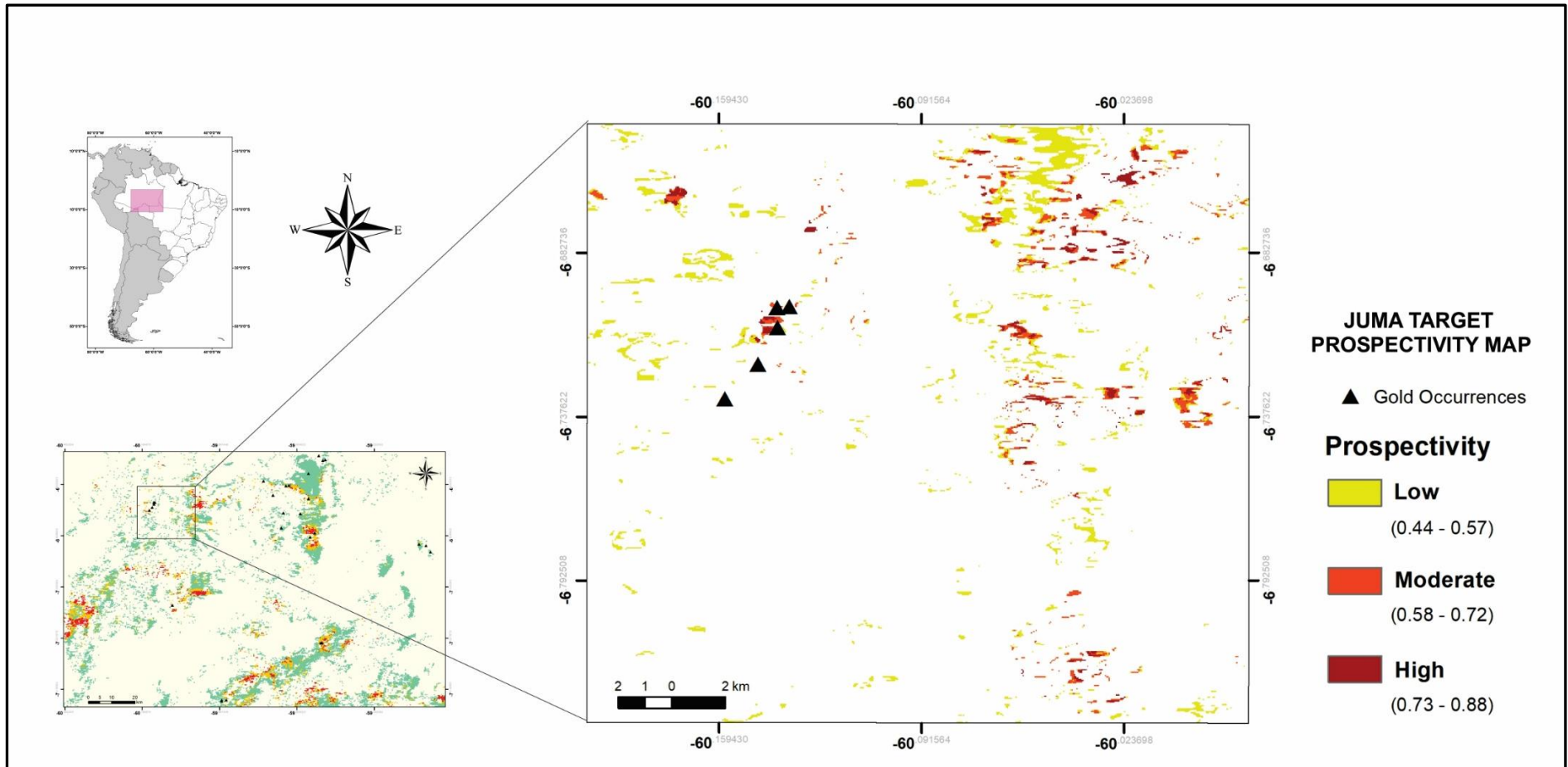


Figure 2.9: Prospectivity map of the Juma Target in which three prospectivity classes are differentiated in low, medium and high favorability for gold occurrences.

2.4.3 Guida Target

The Guida target covers the Guida and Platô prospects operated by BBX Minerals. In this work, the mineralizations were interpreted as related to a possible Paleoproterozoic porphyry-epithermal system. The gold occurrences in this context are hosted in volcanic and volcano-sedimentary rocks intruded by the Chuim Granite, associated with breccias and hydrothermalism.

To define the gold source process, heavier weights were assigned to the Paleoproterozoic igneous and volcano-sedimentary units, which are known to host gold mineralizations, such as the Beneficente Group and Arraia Granite. Considering fluid remobilization as a crucial factor for gold deposition, mineralometric data obtained from panned concentrates were incorporated to the model to identify possible concentrations of minerals with hydrothermal origin. Epidote and florencite were highly correlated with gold occurrences in the region. Thus, basins with anomalous concentrations of these minerals are considered spatial proxies in the Guida Target modeling.

Highly permeable sites were defined to map fluid migration and depositional processes. In epithermal systems, areas with structural weakness may act as pathways for hydrothermal fluids. Thus, the most relevant lineaments were plotted in the scale that best suits the target (1:50,000) serving as the structural criterion to locate favorable areas for new mineralizations. Local controls, such as minor faults and fractures, should be considered for modifying the permeability of the ore host rocks. The F factor and Th/K maps delimited regions with possible hydrothermal remobilization through potassium concentration. Magnetic units, obtained from the total gradient map, were also considered proxies, since both faults and igneous units tend to have magnetic responses.

Table 2.4: Criteria used to elaborate evidential maps to the Guida target prospectivity map.

<i>Exploratory criteria</i>	<i>Fundamentals</i>	<i>Spatial Proxy</i>	<i>Primary data</i>	<i>Evidential maps</i>
Geology	Gold is hosted in rocks related to Paleoproterozoic porphyry-epithermal systems. Usually with associated hydrothermal alteration	1) Host rocks; 2) Alteration zones; 3) Known gold occurrences	Juma District geological map (CPRM); Geochronologic data; Known gold occurrences	Lithological units weighted by prospective potential
Structural	Mineralization is related to lineaments, faults and fractures and their intersections	Proximity to faults and lineaments	Airborne magnetic data survey; Juma District geological map (CPRM)	1) Distance of major and minor lineaments; 2) Structure density estimates
Airborne magnetics	Volcanic units and structures, that control mineralization, usually have magnetic signatures	Magnetic signatures	Airborne magnetic data survey	Total gradient of magnetic data
Airborne gamma-ray spectrometry	Potassium mobility may be an indicator of fluid remobilization and ore deposition	K-rich units	Airborne gamma-ray spectrometry data survey	1) F Factor Map; 2) eTh/K map
Geochemistry	Gold host units are usually enriched with hydrothermal alteration minerals such as epidote and florencite	1) Proximity to anomalous gold, florencite and epidote basins; 2) Ce anomalies	Panned concentrate and stream sediment surveys	1) Anomalous florencite, epidote and gold panned concentrate basins; 2) Ce anomalies – stream sediments survey

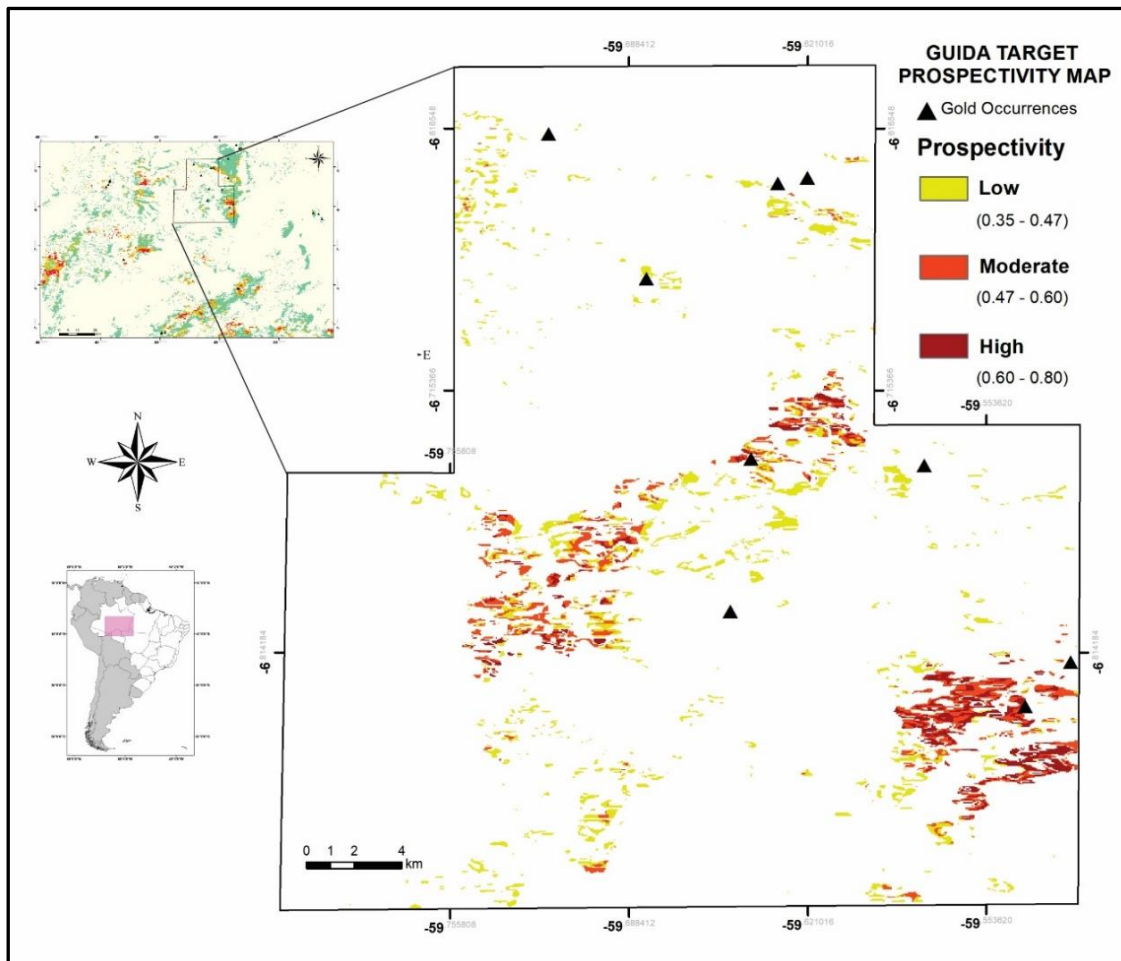


Figure 2.10: Prospectivity map of the Guida Target in which three prospectivity classes are differentiated in low, medium and high favorability for gold occurrences.

2.4.4 Validation

The efficiency of knowledge-driven prospective modeling can be measured by comparing the number of gold occurrences within each polygon, classified according to the prospectivity degree, compared to the total area. The prospectivity scores ranged from 0 to 3, where 0 was assigned to low prospectivity areas and 3 to high prospectivity areas. Reducing the search area is a key criterion for decreasing the costs and risks in mineral exploration. Therefore, the graphs contrasting the percentage of the mapped area by the percentage of gold occurrences allowed to validate the prospectivity models. Only the primary gold occurrences were considered, whereas detrital gold data were discarded. Three graphs were generated for the prospectivity models of Juma District, Juma Target and Guida Target (Figure 2.13, Figure 2.14, Figure 2.15) showing that as the prospectivity scores increased, the research area decreased considerably.

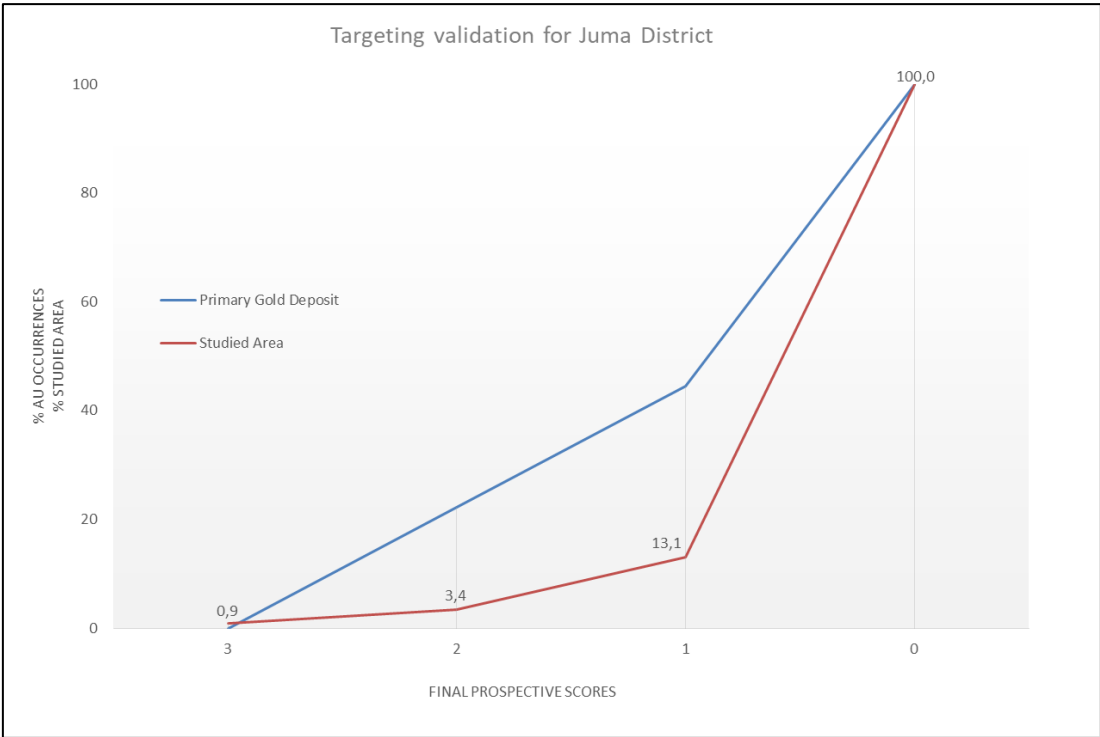


Figure 2.11: Juma District prospectivity map validation showing the percentage of primary gold occurrences (blue line) in each of the prospective scores and the percentage of the area occupied by each class defined by the degree of prospectivity (red line).

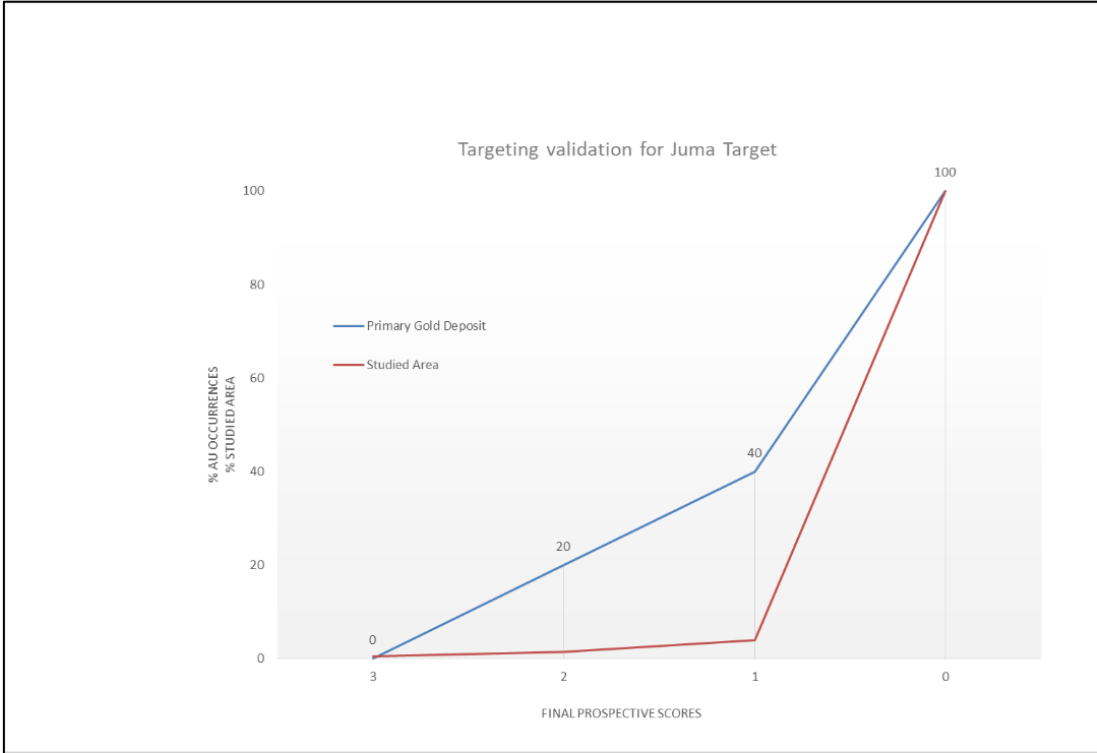


Figure 2.12: Juma Target prospectivity map validation showing the percentage of primary gold occurrences (blue line) in each of the prospective scores and the percentage of the area occupied by each class defined by the degree of prospectivity (red line).

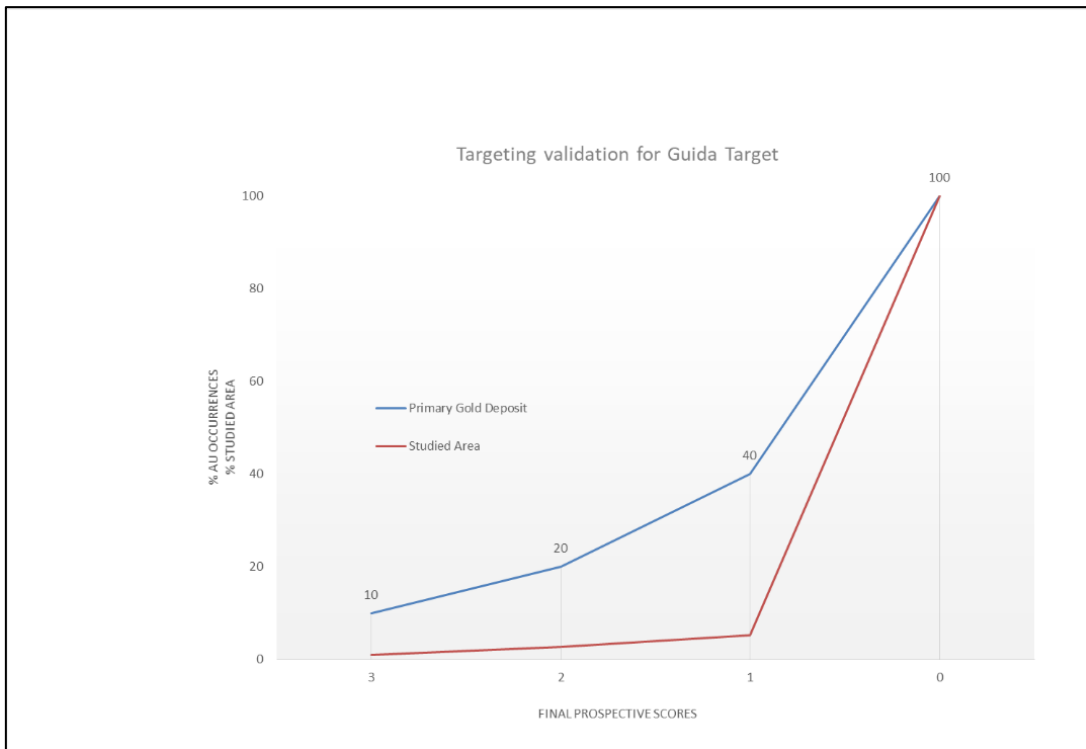


Figure 2.13: Guida Target prospectivity map validation showing the percentage of primary gold occurrences (blue line) in each of the prospective scores and the percentage of the area occupied by each class defined by the degree of prospectivity (red line).

2.5 3D Magnetic inversion

The 3D geological-geophysical models can be generated from the comparison between physical properties of the rock, as magnetism, to surface and depth geological data (drill holes). The 3D inversions of magnetic data seeking to recover the distribution of magnetic susceptibility have been widely used in mineral exploration during the last decade. However, when significant remanence is present in the study area, uncertainty about the magnetization direction limits the use of this technique (Li et al., 2010). Thus, it must be considered that a magnetic body has two magnetization sources, M_i (induced) and M_r (remnant), according to equation (2):

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_i + \mathbf{M}_r \quad (2)$$

Most available algorithms require knowledge of the magnetization direction, which is fundamental for developing the inversion models (Li & Oldenburg, 1996; Pilkington, 1997). The 3D magnetization vector inversion (MVI) is an algorithm that generates susceptibility models and the subsurface

magnetization vector, considering the effects of induced and remnant magnetization without prior knowledge of the remanent magnetization direction or intensity (Ellis et al., 2012; MacLeod and Ellis, 2013; Johnson and Aisengart, 2014). The following topics explain the use of this technique in two MVI inversions: Regional and Juma District models.

2.5.1 Regional model

The regional magnetization vector inversion model covered approximately 97,600 km² area, extending beyond the Juma District limits, to facilitate visualizing the continuity of the structures and anomalies. The 1350 x 1350 x 700 m sized cells account for a total of 860,608 cells that allowed identifying the magnetic sources of the main features and regional geological structures for a 20 km estimated depth (Figure 2.16).

Models of the perpendicular to the field and projected in the direction of the induction field components compared with the susceptibility inversion model allows to assume that the remanent component plays an important role in the total magnetization of the region (Figure 2.17). The use of MVI has been accepted as a more suitable tool for 3D modeling of Juma District.

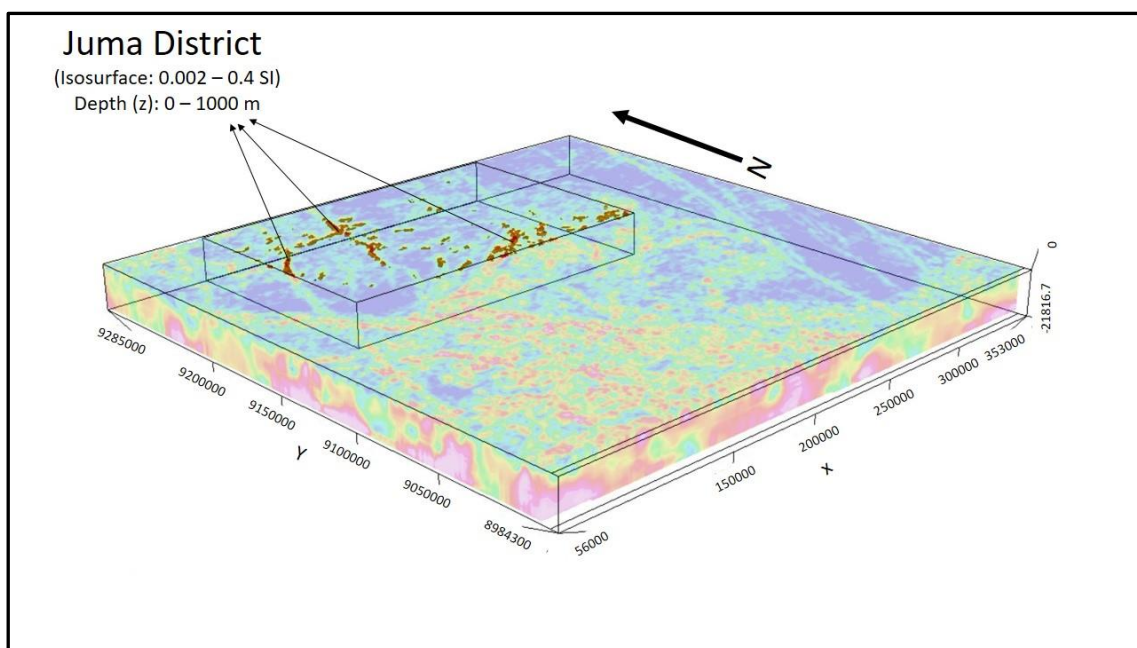


Figure 2.14: Regional MVI model for an estimated depth of 20 km. The shallowest magnetic bodies, depth <1000 m, were highlighted within the perimeter of Juma District.

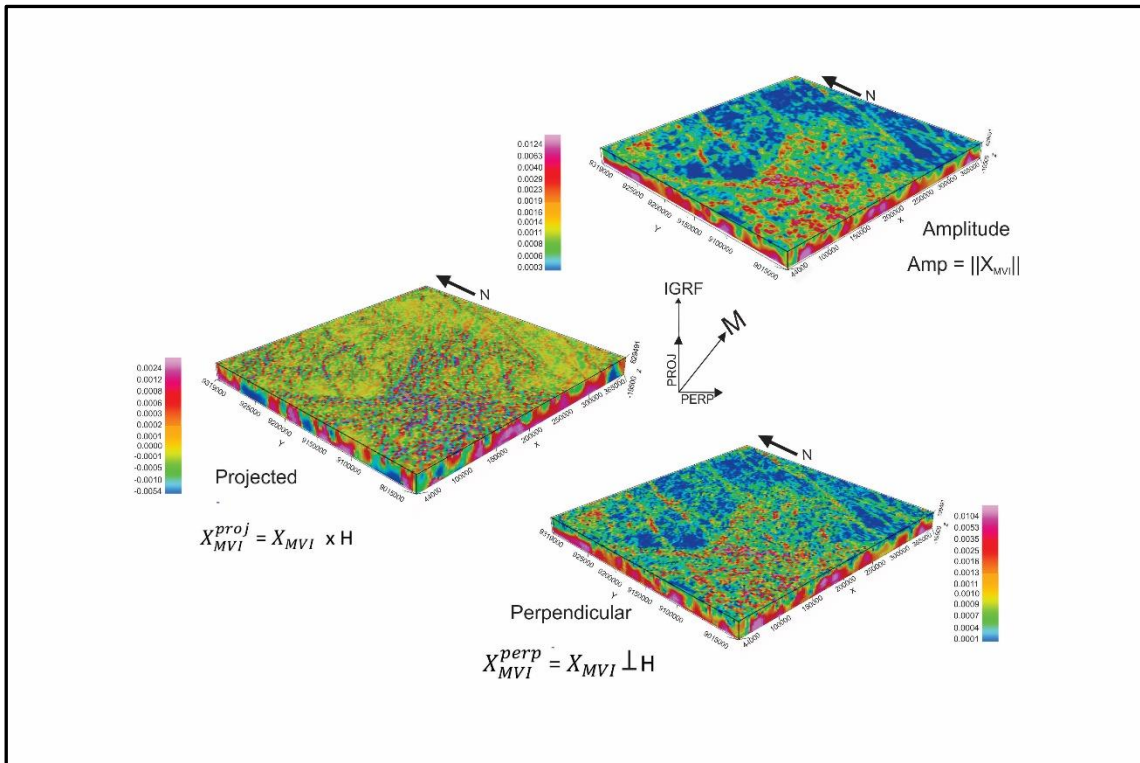


Figure 2.15: A contribuição das componentes projetada e perpendicular à amplitude efetiva mostra uma forte influência da magnetização remanente, indicando também que uma inversão tradicional de susceptibilidade, que considera apenas a direção de magnetização na direção do campo induzido, não é a técnica mais adequada para este tipo de terreno.

Geologically, the regional model highlighted important structures and bodies related to the mineralizing systems of Juma District. The results showed that the Buiçu fault system extends beyond the boundaries of the study area in the NE-SW direction characterized by high magnetic amplitudes and deep source of magnetic anomaly. This fault system traverses southeastern Juma District, Ema Sector, and is an important structure for host gold occurrences. It is also possible to observe the most magnetic bodies at shallow depths (<1000 m), including dikes and mafic rocks (Figure 2.16).

2.5.2 Juma District 3D model

The Juma District model covered a 20,706 km² area divided into single cells totaling 238 x 226 x 16 cells. This model highlighted the Buiçu fault system and the main regions with gold occurrences in the district (Figures 2.18 and 2.19). From this model, integrated analyses using the geological field data, drill core and magnetic susceptibility measurements were performed.

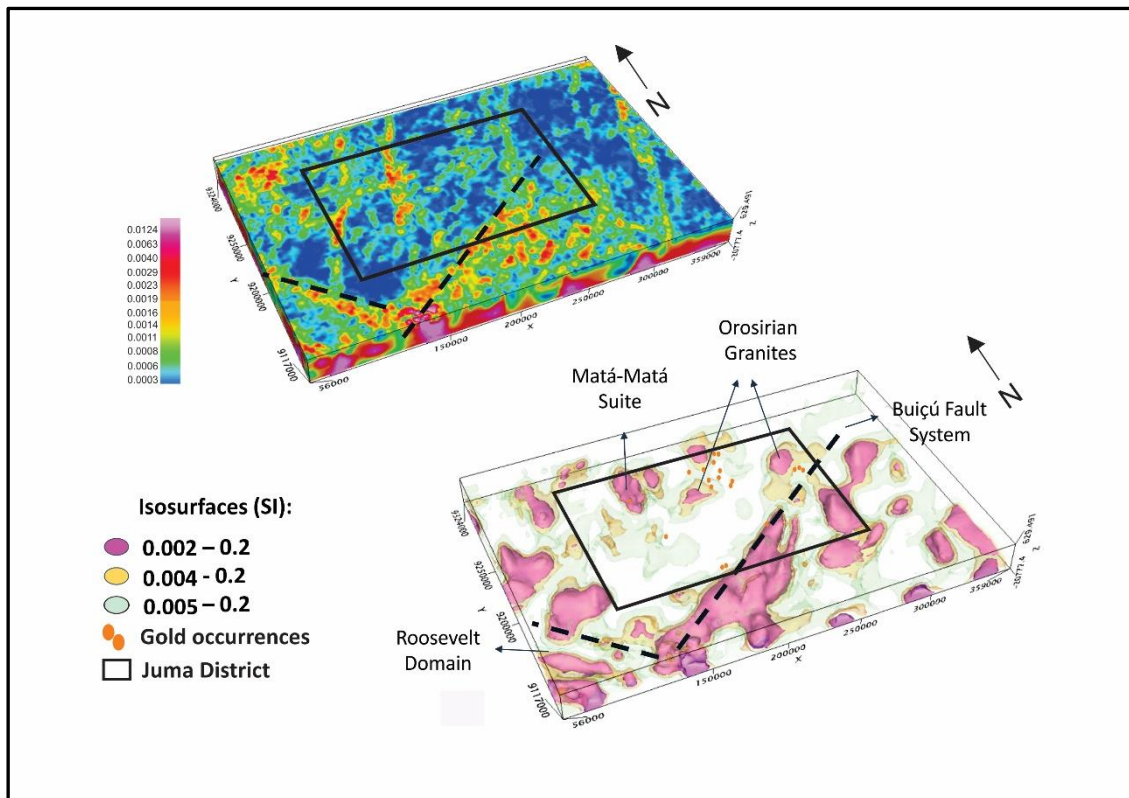


Figure 2.16: Regional MVI model and the interpretation of geological structures and bodies in depth.

The Buiçu fault system is characterized by a high magnetic susceptibility domain, with SW-NE spatial continuity, dipping to NW. The magnetization sources reach the depth limit established for inversion (20km). Geologically, the region is highly deformed, constituting a several kilometer long shear zone, composed of lithologies including volcanic rocks from the Colíder Group, volcano-sedimentary from the Beneficente Group and mafic rocks from the Matá-Matá Suite. According to the proposed geophysical model, the highest magnetic susceptibility values range from 0.02 to 0.025 SI for 1000 m maximum depth, corresponding to I-type granites, felsic volcanics, andesites, basalts, amphibolites and metasedimentary rocks (Telford et al., 1990).

In the Juma Target region, SW-NE mafic dikes were observed as well as a large magnetic domain intercepting the surface, where the mineralization of the Eldorado do Juma gold mining occurs. In this domain, the magnetic susceptibility values between 0.02 to 0.221 SI are compatible with gabbros and diabases of the Matá-Matá Suite. However, due to the irregular geometry of these anomalies,

the interpretation without in-depth geological data is limited and often qualitative (Telford et al., 1990).

For the Guida Target, the interpretation was supported by drill cores, making possible the characterization of the granitic body, related to gold mineralization in-depth.

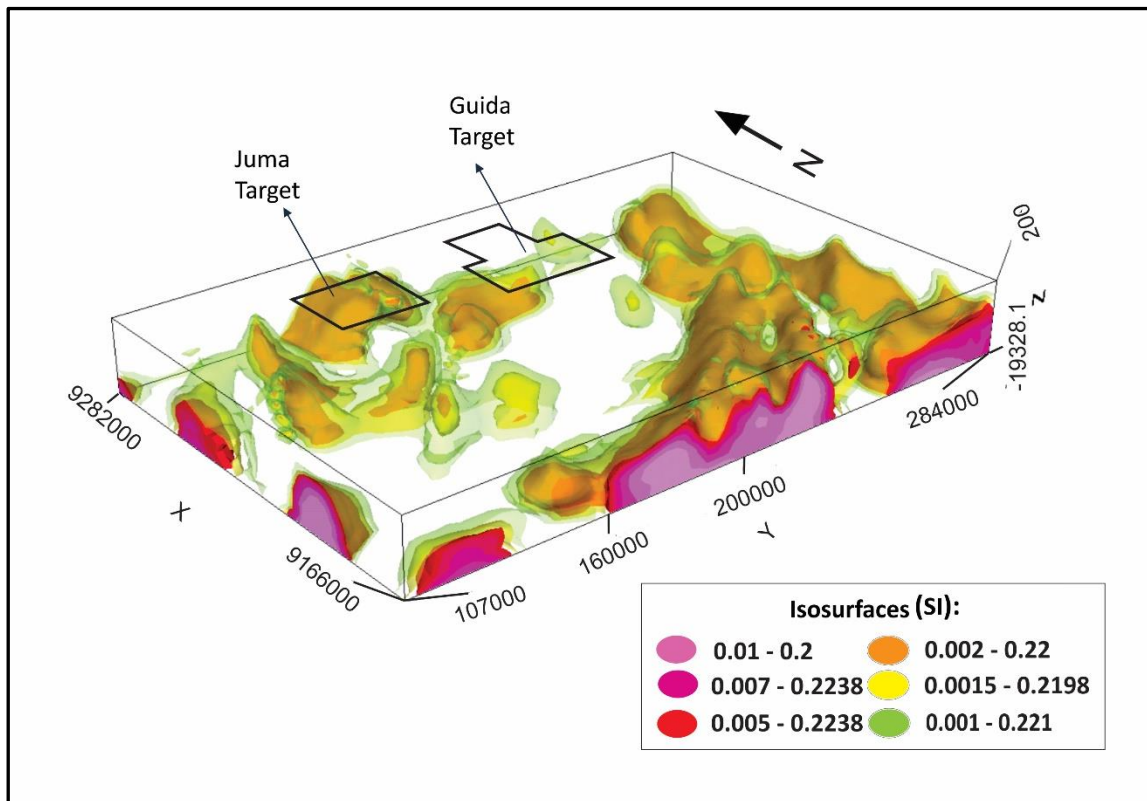


Figure 2.17: MVI model generated for the Juma District region with the location of the Guida and Juma targets and main geophysical bodies at a depth of 20km.

2.5.3 Correlation of inversion result with known geology: Guida Target

This topic presents the interpreted geophysical model for the mineralized portion of the Guida target (Figure 2.20). This model derives from the joint analysis of six drill cores with MVI data inversion. The cores have 300 m maximum depth were studied for rock lithological description and magnetic susceptibility measurement.

Locally, hydrothermal volcanic and volcanoclastic rocks predominate in the JED01, JED02 and JED03 drill cores. In the JED02 and JED03 a quartz-sandstone cover followed by volcanoclastic rocks interspersed with volcanic rocks were described. Although gold mineralization was visible in the 66.45 to

121.70 m range of JED01, subsequent fire assay analysis indicated extremely low values (BBX Minerals, 2015).

The JED04, JED05, and JED06 drillholes predominantly consist of thin volcano-sedimentary rocks intensely deformed cut by a monzogranitic body and hydrothermal breccias, filled with quartz veins. All drill cores have hydrothermal alteration features, mainly chloritization, epidotization and carbonation. The JED04 and JED06 had significant gold contents, 4.58 and 51.59 g/t, respectively (BBX Minerals, 2015). All gold intervals had features indicative of low-sulfidation mineralization such as breccias and quartz veins with possible microcrystalline, drusiform and lattice-bladed textures. These structures are possibly related to the placement of the Chuim granite, which is considered in this work as part of a Paleoproterozoic porphyry-epithermal system. Geophysically, a magnetic body with a susceptibility ≥ 0.002 SI that correlates spatially with the granite was delimited. The integrated analyses of several MVI slices and the drill cores geologic interpretation generated a surface defined as the *contact zone* between the granite and the basement rocks. The boundary between the magnetic body and the host rocks is considered favorable to the occurrence of new mineralizations, being represented by the green surface in Figure 2.20.

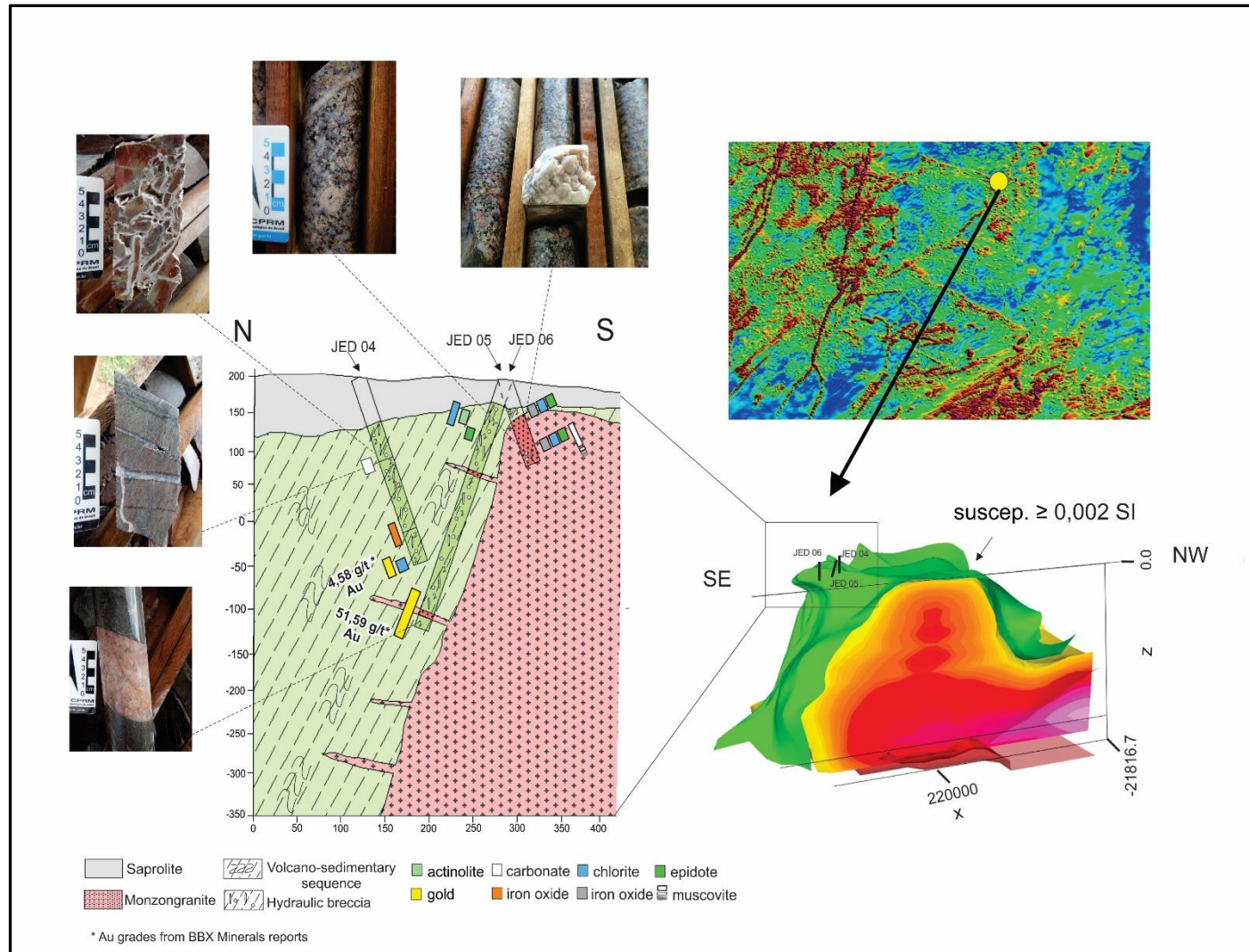


Figure 2.18: Integrated analysis of drill cores interpretation (JED04, JED05 and JED06) and the geophysical model of the body interpreted as Chum granite, which is intruded into a volcano-sedimentary sequence. Photographs illustrate some of the most significant intervals.

2.6 Discussions and conclusions

In this work, 2D and 3D prospectivity techniques were applied to define the favorable scenarios for gold occurrences in the Juma District. The work was divided into two main steps: (1) Generation of the prospectivity maps for the entire district (1:250,000 scale) and for two strategic targets (1:100,000 scale), using the fuzzy logic technique; (2) Airborne magnetic data inversion using a MVI technique to characterise bodies and structures related to subsurface mineralizations.

The prospectivity maps present exploratory concepts that helped define areas of interest and new prospective criteria for the Juruena Orogen region. The spatial proxies were defined from geological, structural, airborne geophysical and geochemical data. The present study suggests that the Juma District mineralization is possibly compatible with porphyry-epithermal systems, regionally correlated to known gold deposits. This methodology helps to reduce costs for district-scale mineral research since it focuses on locations probabilistically more favorable to new gold occurrences.

2.7 Acknowledgements

The authors would like to thank the Geological Survey of Brazil (CPRM) for their support to this work, including the study time-off granted to researcher Lila Queiroz, and the staff for technical discussions and contributions. We also express our thanks to the BBX Minerals for providing the drill cores for analysis and CAPES for the *Portal de Periódicos*. Adalene M. Silva thanks CNPq for the research productivity grant (Process 311565/2018-2).

2.8 References

Aguja Bocanegra, 2013. Mineralizações Epitermal Low-Sulfidations e do tipo Pórfiro Superpostas associadas os Magmatismo Félsico de 1,88 GA na Parte Norte da Província Mineral do Tapajós (PA). Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 235 p.

Akima, H., 1970: A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *Journal of Association for Computing Machinery* 17, 589-602.

Albuquerque, D. F., Sand, G., Paes, L., Bianchi, M., Vieira, L., Assumpção, M., Condori, C., Estrela, M., 2017. Crustal structure of the Amazonian Craton and adjacent provinces in Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 79: 431-442.

Almeida F.F.M., Brito Neves B.B., Carneiro C.D.R., 2000. The origin and evolution of the South American Platform. *Earth Science Reviews*, 50: 77-111.

Almeida, F.F.M & Hasui, Y. 1984. *O Pré-cambriano do Brasil*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 378 p.

Almeida, F.F.M., 1978. Tectonic Map of South America, 1:5.000.000. Explanatory Note. DNPM/CGMW/UNESCO, Brasília, 23 pp.

Almeida, F.F.M., Nogueira Filho, J.V. 1959. Reconhecimento geológico do rio Aripuanã. DNPM, Rio de Janeiro, Boletim da Divisão de Geologia e Mineração, 199, p. 43.

Assis, R.R., 2015. Depósitos auríferos associados ao magmatismo félsico da Província de Alta Floresta (MT), Cráton Amazônico: litogeoquímica, idade das mineralizações e fonte dos fluidos (Doctorate thesis). Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 363 p.

BBX Minerals. Acesso em 20/03/2019: <https://www.asx.com.au/asxpdf/20151223/pdf/4340qzbctwjhwv.pdf>.

Betiollo, L.M., Reis, N.J., Almeida, M.E., Bahia, R.C., Splendor, F., Costa, U.P., Luzardo, R. 2009. Magmatismo Máfico Calimiano (Sill Mata-Matá), rio Aripuanã, Amazonas – Implicações Geológicas. In: SBG, Núcleo Norte, Simpósio de Geologia da Amazônia, XI, Resumos Expandidos.

Bettencourt, J.S., Juliani, C., Xavier, R.P., Monteiro, L.V.S., Bastos Neto, A.C., Klein, E.L., Assis, R.R., Leite, W.B., Moreto, C.P.N., Fernandes, C.M.D., Pereira, V.P., 2015. Metallogenic 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*, Volume 68.

Bizinella, G.A., Santiago, A.F., Melo, A.F.F., Santos, A., Borges, F.R., Godoy, H.K., Yamaguti, H.S., Oliveira, J.R., Carmona, J.R.M., D'Antona, R.G., Oliveira, R.L. 1980. Projeto Tapajós-Sucunduri, convênio DNPM/CPRM, 8v.

Bonham-Carter, G.F., 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Elsevier, Amsterdam 398 pp.

Brito, R. S. C. de; Silveira, F. V., Reis, N. J., D'Antona, R. J. G., Pinheiro, S. S., 2010. Metalogenia do Distrito Aurífero do Rio Juma-Nova Aripuanã-AM. 1. ed. Brasília: CPRM. v. 1000. 43 p.

Castro, A. A. (2015). Gênese do depósito de ouro Tocantinzinho, província aurífera Tapajós (PA): evidências a partir de dados de geologia, petrologia e inclusões fluidas.

Chulick, G.S., Detweiler, S., Mooney, W.D., 2013. Seismic structure of the crust and uppermost mantle of South America and surrounding oceanic basins. *J. S. Am. Earth Sci.* 42, 260 e 276.

Cordani U.G. & Teixeira W., 2007. Proterozoic accretionary belt in the Amazonian Craton. *Geological Society, America Memoir*, 200: 297-320.

Corrêa Costa, J.W., Corrêa Costa, J.W., Fuck, R.A. 2016. The structure of the Amazonian craton: Available geophysical evidence. *Journal of South American Earth Sciences*, 70:162-173.

Costa e Silva, E., Silva, A. M., Bemfica Toledo, C. L., Mol, A. G., Otterman, D. W., & de Souza, S. R. C. (2012). Mineral potential mapping for orogenic gold deposits in the Rio Maria granite greenstone terrane, Southeastern Pará State, Brazil. *Economic Geology*, 107(7), 1387-1402.

Dentith, M. and Mudge, S. T, 2014. *Geophysics for the mineral exploration geologist*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Duarte, T.B., 2015. Geologia, geoquímica e geocronologia do domínio vulcânico do arco magmático Juruena, SW do cráton amazônico: implicações geotectônicas. MSc Dissertation. Instituto de Geociências Unicamp-Campinas, Brazil (in portuguese).

Duarte, T.B., Rodrigues, J.B., Ribeiro, P.S.E., Scandolara, J.E., 2012. Tectonic evolution of the Juruena magmatic arc between the Aripuanã and Juruena rivers: northwest Mato Grosso state. Brazil. *Rev. Bras. Geociências* 42, 824 e 840.

Efimov A.V. 1978. Multiplikativnyj pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud po aerogamma-spektrometricheskim dannym. In: *Metody rudnoj geofiziki*. Leningrad, Naucno-proizvodstvennoje objedinenie geofizika.

Ellis, R.G., WET, B., Macleod, I.N., 2012. Inversion of Magnetic Data from Remanent and Induced Sources, 22nd International Geophysical Conference and Exhibition, Australia.

Emerson, D. W., Clark, D., and Saul, S., 1985. Magnetic exploration models incorporating remanence, demagnetization and anisotropy: Hp 41c handheld computer algorithms. *Exploration Geophysics*, 16(1): 1– 122.

GEOSOFT, 2017. OASIS Montaj 9.4. GEOSOFT Inc., Toronto.

Harris, J.R., Sanborn-Barrie, M., 2006. Mineral potential mapping: examples from the Red Lake Greenstone Belt, Northwest Ontario. In: Harris, J.R. (ed.) *GIS for the Earth Sciences*. Geological Association of Canada. Special Publication, 44, 1–21.

Hronsky J. M. A. 2004. The science of exploration targeting. In: Muhling J. ed. *SEG 2004. Predictive Mineral Discovery Under Cover*, pp. 129 – 133. University of Western Australia, Centre for Global Metallogeny, Publication 33.

Hronsky, J.M.A., Groves, D.I., 2008. Science of targeting: Definition, strategies, targeting and performance measurement. *Aust. J. Earth Sci.* 55, 3–12. <https://doi.org/10.1080/08120090701581356>.

Johnson, A., Alsengart, T., 2014. Interpretation of magnetic data at low magnetic latitudes using Magnetization Vector Inversion. *Journal of Geophysics*, v. 35 (3), p.91-96.

Juliani, C., Vasquez, M.L., Klein, E.L., Villas, R.N.N., Echeverri-Misas, C.M., Santiago, E.S.B., Monteiro, L.V.S., Carneiro, C. de C., Fernandes, C.M.D., User, G., 2014. Metalogênese da Província Tapajós. In: Silva, M.G., Rocha Neto, M.B., Jost, H., Kuyumjian, R.M. (Eds.), *Metalogênese das Províncias Tectônicas*

Brasileiras, Programa Geologia do Brasil, Recursos Minerais, Serviço Geológico do Brasil, CPRM, pp. 229 e 263.

Li, Y., Shearer, S.E., Haney, M.M., Dannemiller, N., 2010. Comprehensive approaches to 3D inversion of magnetic data affected by remanent magnetization. *Geophysics*, v. 75(1), p. L1-L11. (<https://doi.org/10.1190/1.3294766>).

Li, Y., and D. W. Oldenburg, 1996. 3-D inversion of magnetic data: *Geophysics*, 61, 394–408, doi: 10.1190/1.1443968.

Liberatore, G., Alecrim, J.D., Medeiros, J.B., Malouf, R.F., Pinheiro, S.S., Achão, S.M., Santos, J.O.S. 1972. Projeto Aripuanã – Sucunduri. In: BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Convênio DNPM/CPRM, Relatório, 8v.

Lloyd, S., van der Lee, S., França, G.S., Assumpção, M., Feng, M., 2010. Moho map of South America from receiver functions and surface waves. *J. Geophys. Res.* 115, B11315. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB006829>.

Lopes, A. A. C., & Moura, M. A. (2019). The Tocantinzinho Paleoproterozoic Porphyry-Style Gold Deposit, Tapajós Mineral Province (Brazil): Geology, Petrology and Fluid Inclusion Evidence for Ore-Forming Processes. *Minerals*, 9(1), 29.

Lopes, A.A.C. & Moura, M.A., **2019**. The Tocantinzinho Paleoproterozoic Porphyry-Style Gold Deposit, Tapajós Mineral Province (Brazil): Geology, Petrology and Fluid Inclusion Evidence for Ore-Forming Processes. *Minerals*, 9, 29.

Macleod, I.N., Ellis, R.G., 2013. Magnetization Vector Inversion, a simple approach to the challenge of varying direction of rock magnetization. Australian Society of Exploration Geophysicists Extended Abstracts 2013, p. 1-4, Melbourne.

Meloni, R.E., Simões M. S., Ramos, M., Benevides, P. R. R., Queiroz L. C., Silva A. R. da C., 2018a. Regional reconnaissance of primary gold occurrences at Juma Gold District, SE of Amazonas State, southern Amazonian craton, Brazil. In: VIII Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral.

Meloni, R.E., Simões M. S., Benevides, P. R. R., 2018b. Granitos de idade orosiriana no limite entre as províncias Tapajós-Parima e Rondônia-Juruena, região de Apuí-AM. In: 49º Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro-RJ.

Moura M. A., Botelho N. F., 2002. Petrologia do magmatismo associado à mineralização do tipo ouro pórfiro da Província Aurífera Juruena-Teles Pires (Mt). *Revista Brasileira de Geociências* 32 (3), 377-386.

Moura M. A., Botelho N. F., Olivo G. R., Kyser T. K., 2006. Granite-related Paleoproterozoic, Serrinha gold deposit, Southern Amazonia, Brazil: hydrothermal alteration, fluid inclusion and stable isotope constraints on genesis and evolution. *Economic Geology* 101 (3), 585-605.

Moura, M. A., 1998. O maciço granítico Matupá no depósito de ouro serrinha (MT): petrologia, alteração hidrotermal e metalogenia. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 238 p.

Nabighian, M.N., 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, v. 37, p. 507-517.

Nykänen, V., 2008. Spatial data analysis as a tool for mineral prospectivity mapping: Espoo, Geological Survey of Finland, 27p.

Pan, G. & Harris, D.P., 2000. *Information Synthesis for Mineral Exploration*. Oxford University Press, New York, 461p.

Payolla, B.L., Bettencourt, J.S., Kozuch, M., Leite Jr., W.B., Fetter, A.H., Van Schmus, W.R., 2002. Geological evolution of the basement rocks in the eastcentral part of the Rondonia tin province, SW Amazonian craton, Brazil: UePb and Sm-Nd isotopic constraints. *Precambrian Res.* 119, 141e169.

Pilkington, M., 1997. 3-D magnetic imaging using conjugate gradients: *Geophysics*, 62, 1132–1142.

Pires A.C.B. 1985. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 25:61-68.

Porder, S., & Ramachandran, S. (2012). The phosphorus concentration of common rocks—a potential driver of ecosystem P status. *Plant and soil*, 367(1-2), 41-55.

Raines, G.L, Sawatzky, D.L., Bonham-Carter, G.F., 2010. New fuzzy logic tools in ArcGis 10: ArcUser, ESRI, 13 p.

Reis, N.J., Bahia, R.B.C., Almeida, M.E., Costa, U.A.P., Betiollo, L.B., Oliveira, A.C., Oliveira, A.A., Splendor, F. 2013. O Supergrupo Sumaúma no context geológico da Folha SB.20-Z-D (Sumaúma), sudeste do Amazonas: modo de ocorrência, discussão de idades em zircões detríticos e correlações no SW do Cráton Amazonas. *Contribuições à Geologia da Amazônia*, 8:197-220.

Reis, N.J., D'Antona, R.J.G., Camargo, M.A. 2009. Uma sucessão vulcanossedimentar como registro do embasamento da bacia paleozoica do Grupo Alto Tapajós na região dos rios Aripuanã, Juma, Camaiu, Brando e Sucunduri, porção sudeste do Amazonas. *Contribuições à Geologia da Amazônia*, 6.

Ribeiro, P.S.E., Duarte, T.B., 2011. Projeto Noroeste - Nordeste de Mato Grosso. Texto explicativo das Folhas Rio Guariba e Rio Aripuanã, escala 1:250.000. CPRM, Goiânia (in portuguese).

Roest, W.R., Verhoef J & Pilkington M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, v. 57, p. 116-125.

Santos J.O.S., Hartmann L.A., Gaudette H.E., Groves D.I., McNaughton N.J., Fletcher I.R., 2000. A new understanding of the Provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping an U-Pb and Sm- Nd geochronology. *Gondwana Research*, 3(4): 453-488.

Santos, J.O.S., 2003. Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central. In: Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H. (Eds.), *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. CPRM, Brasília, pp. 169e226

Santos, J.O.S., Rizzotto, G.J., Potter, P., McNaughton, N.J., Matos, R., Hartmann, L.A., Chemale Jr., F., Potter, P.E., Quadros, M.L.E.S., 2008. The age and autochthonous evolution of the Sunsas Orogen in West Amazon Craton, based on mapping and UePb geochronology. *Precambrian Res.* 165, 120 e 152.

Scandolara, J.E., 2006. Geologia e Evolução do terreno Jamari, embasamento da faixa Suns_as/Aguapeí, centro-leste de Rondônia, sudoeste do Cráton Amazônico. Unpublished PhD. Thesis. Universidade de Brasília, 462 pp. (in portuguese).

Scandolara, J.E., Fuck, R.A., Dall'Agnol, R., Dantas, E.L., 2013a. Geochemistry and origin of the early Mesoproterozoic mangerite-charnockite-rapakivi granite association of the Serra da Providência suite and associated gabbros, centraleastern Rondônia, SW Amazonian Craton, Brazil. *J. S. Am. Earth Sci.* 45, 166 e 193.

Scandolara, J.E., Fuck, R.A., Dantas, E.L., Souza, V.S., 2013b. Geochemistry of Jamari complex, central-eastern Rondônia: Andean type magmatic arc and Paleoproterozoic crustal growth of the southwestern Amazonian Craton. *Braz. J. S. Am. Earth Sci.* 46, 1e28.

Scandolara, J.E., Ribeiro, P.S.E., Frasca, A.A.S., Fuck, R.A., Rodrigues, J.B., 2014. Geochemistry and geochronology of mafic rocks from the Vesporsuite in the Juruena arc, Roosevelt-Juruena terrane, Brazil: implications for Proterozoic crustal growth and geodynamic setting of the SW Amazonian craton. *J. S. Am. Earth Sci.* 53, 20 e 49.

Scandolara J.E., Correa R.T., Fuck R.A., Souza V.S., Rodrigues J.B., Ribeiro P.S.E., Frasca A.A.S., Saboia A.M., Lacerda Filho J.V., 2017. Paleoproterozoic arc-accretion along the southwestern margin of the Amazonian craton: The Juruena accretionary orogen and possible implications for Columbia supercontinent. *Journ. of South Amer. Earth Sciences* 73 (2017) 223e247.

Sillitoe, R.H., 1991, Intrusion-related gold deposits, in Foster, R.P., ed., *Metallogeny and exploration of gold*: London, Blackie, p. 164–209.

Sillitoe, R.H., 1993, Gold-rich porphyry copper deposits: Geological model and exploration implications: Geological Association of Canada Special Paper 40, p. 465–478.

Sillitoe, R.H., 2000, Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery: *Reviews in Economic Geology*, v.3, p. 315–345.

Silva AM. 1999. Geophysical and Geological Data Integration Using a New Statistical Approach for Mineral Target Selection Applied to the Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero. Inst. de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado.

Silva, E. C., Silva, A. M., Toledo C. L. B., Mol A. G., Otterman D. W., de Souza S. R. C., 2012. Mineral Potential Mapping for Orogenic Gold Deposits in the Rio Maria Granite Greenstone Terrane, Southeastern Pará State, Brazil. Society of Economic Geologists, Inc. *Economic Geology*, v. 107, pp. 1387–1402.

Simões M. S., Meloni R.E., Benevides Filho P.R.R., Lisboa T. M., Silva A.R.C., 2017. A sucessão vulcanossedimentar dos grupos Colíder e Beneficente no sudeste do Amazonas: estilos eruptivos, tipos composicionais e ambientes de sedimentação. *Contribuições à Geologia da Amazônia - Volume 10*, pp. 263e272.

Smith, W.H.F., Wessel, P., 1990. Gridding with continuous curvature splines in Tension, *Geophysics* 55, 293- 305.

Tassinari C.C.G., Bettencourt J.S., Geraldés M.C., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 2000. The Amazonian Craton. In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz-Filho A., Campos D.A. (eds.) *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, 31st International Geological Congress, p. 41-95.

Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990. *Applied geophysics*, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, 792p.

Trevisan, V.G., 2015. Estudo comparativo entre mineralizações filonares de Au ± Cu e Au + metais de base do setor leste da Província de Alta Floresta (MT), Cráton Amazônico (Master thesis). Universidade Estadual de Campinas, 129 p.

Uchôa, J. C. F. (2018). A decisão econômica na exploração mineral: uma abordagem de sistemas minerais e sua aplicação aos depósitos auríferos do greenstone belt Rio Das Velhas. Inst. de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 195 p.

3 CONCLUSÕES

Neste estudo de caso foram apresentados possíveis cenários prospectivos para auxiliar o mapeamento de mineralizações de ouro no Distrito Juma. O trabalho foi dividido em 2 etapas: (1) a primeira que gerou mapas de prospectividade utilizando a técnica da lógica fuzzy para todo o distrito (escala de 1:250.000) e para dois alvos estratégicos (escala 1:100.000); (2) a segunda em que foi executada uma inversão de dados aeromagnéticos, do tipo MVI-VOXI, visando o melhor entendimento em sub-superfície de corpos e estruturas relacionados a mineralizações.

Os possíveis cenários prospectivos apresentados foram obtidos a partir do uso do banco de dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), que compreende dados geológicos, estruturais, aerogeofísicos, geoquímicos e mineralométricos. A dissertação de mestrado atingiu os objetivos propostos por meio da aplicação de técnicas de integração de dados tipo knowledge-driven que definiu áreas favoráveis à ocorrência de novas mineralizações. A inversão de dados aeromagnéticos foi utilizada como auxílio para a interpretação de alguns dos alvos gerados em sub-superfície. Desta forma, podemos apontar as seguintes conclusões:

Sobre a exploração aurífera em escala regional

A porção sudeste do estado do Amazonas está parcialmente recoberta pelas rochas da Bacia Alto Tapajós, no limiar entre as Províncias geocronológicas Rondônia-Juruena (1.80 - 1.50 Ga) e Tapajós-Parima (2.03 - 1.88 Ga). Esta região apresenta conhecidos depósitos auríferos e potencial prospectivo para mineralizações epitermais ou tipo pórfiro-epitermais, geneticamente relacionadas a granitos tipo I gerados a partir do desenvolvimento de sucessivos arcos magmáticos através da subducção de crosta oceânica sob a crosta Tapajós – Parima.

Algumas mineralizações auríferas primárias do Distrito Juma podem ser associadas ao contexto geológico do Domínio Peixoto de Azevedo, em que rochas com idades Rondônia-Juruena (a exemplo do Grupo Colíder) estão em contato com rochas de idade Tapajós (Suíte Matupá). Grandes estruturas geológicas, preferencialmente nas direções NE-SW e NW-SE, têm sido

importantes condutores de fluidos e merecem destaque em programas de exploração regional, principalmente quando associadas a análises geoquímicas e gamaespectrométricas que possam indicar remobilização hidrotermal. Recentemente, a descoberta de ocorrências auríferas relacionadas a granitos de idades orosirianas, mapeados pelo Projeto ARIM-SE AM (CPRM), possibilitou que novas perspectivas prospectivas fossem adotadas em caráter regional. Estes granitos, denominados Chuim (~1,85 Ga) e Arraia (1,84 Ga), possivelmente fazem parte de uma mesma suíte magmática devido as semelhanças de idade e geoquímica. Dentre as unidades graníticas espacialmente relacionadas a estes granitos, as rochas estudadas apresentam padrão geoquímico e geocronológico mais parecido ao granito Matupá do que outras unidades regionalmente correlacionáveis.

Sobre os critérios prospectivos para o Distrito Juma

O Distrito Juma é dividido em 3 setores definidos a partir de características similares em suas mineralizações, denominados Juma, Acari e Ema. Todas as mineralizações estudadas possuem evidências de serem epigenéticas, sendo majoritariamente encaixadas em rochas vulcânicas não metamorfizadas de idades paleoproterozoicas. O setor Ema hospeda mineralizações em veios de quartzo, com espessura centimétrica a métrica, preferencialmente encaixados em rochas vulcânicas ácidas ou diabásios. Este setor é estruturalmente marcado pela zona de falhas do Buiuçu, de direção NE-SW, que direcionou os condutos que transportam os fluidos mineralizados. O setor Juma tem um estilo de mineralização disseminada em networks e stockworks de vênulas caoliníticas que cortam sequências vulcanossedimentares do Grupo Beneficente. O setor Acari possui mineralizações de origem magmática-hidrotermal, associadas a brechas e veios de quartzo, possivelmente relacionadas à colocação de corpos monzograníticos.

Como critério prospectivo geológico, o ouro está hospedado principalmente em rochas vulcânicas félsicas a intermediárias, não-metamórficas (menoritariamente máficas), de sequências vulcano-sedimentares com idade paleo-mesoproterozóica. O hidrotermalismo desempenha um papel importante para formação de mineralizações e pode ser mapeado através da

mobilidade do potássio, que pode ser um indicador da remobilização de fluidos e deposição de minério. A arquitetura favorável da litosfera pode ser mapeada pelos lineamentos de 1ª ordem, representadas por grandes falhas e zonas de cisalhamento. A zona de cisalhamento do Buiuçu é um exemplo de domínio estrutural com centenas de quilômetros de extensão, que ultrapassa os limites da área de estudo, e hospeda mineralizações auríferas que acompanham seu trend. Essas estruturas são interessantes do ponto de vista prospectivo pois permitem a circulação de fluidos mineralizantes. Estruturas de segunda ordem também são importantes e podem representar trapas físicas como fraturas, falhas e veios concordantes ou discordantes à foliação regional.

Sobre as modelagens fuzzy

As modelagens foram realizadas a partir do entendimento de três elementos que caracterizam o estilo das mineralizações procuradas. De acordo com (Nykänen, 2008) são eles: a fonte, migração e os processos deposicionais para o sistema mineral a ser modelado. Para a fonte do ouro os critérios mapeáveis foram as unidades litológicas, com pesos dados em função do potencial para transportar ouro de zonas mais profundas para a subsuperfície. Para localizar os condutos dos fluidos mineralizados (pathways) foram definidas possíveis áreas com fraqueza estrutural, que geralmente estão relacionadas a este processo. O principal critério utilizado foram os lineamentos magnéticos, maiores e menores, relacionados às estruturas tectônicas regionais que favorecem à migração de fluidos. Para a deposição do minério, os critérios definidos estão associados à intersecção de estruturas rúpteis, que tendem a concentrar fluidos e precipitá-los através da formação de zonas favoráveis à deposição. Nesse contexto, o critério mapeável está relacionado às anomalias obtidas através de dados gamaespectrométricos. As áreas enriquecidas em K, obtidas através das razões Th/K e K anômalo, foram interpretadas como tendo maior potencial para remobilizações de fluidos. Para os alvos Juma e Guida também foram adicionados dados de geoquímica de sedimento de corrente e mineralometria de concentrado de bateia nas modelagens.

Sobre os mapas de prospectividade:

Este estudo de caso demonstrou que o uso da lógica fuzzy foi útil para o mapeamento de possíveis ocorrências auríferas e na geração de alvos prospectivos em escala de distrito. Com base na aplicação do método proposto foram elaborados três modelos prospectivos em diferentes escalas: para todo o Distrito Juma e para duas janelas denominadas alvos Juma e Guida. Em cada um deles foi possível especializar porções de primeira, segunda e terceira ordem de favorabilidade.

- Mapa de prospectividade do Distrito Juma

O mapa de prospectividade do Distrito Juma gerou 5 regiões com potencial para hospedar possíveis mineralizações auríferas:

(1) Região centro-norte do mapa, em que as mineralizações estão associadas a intrusão de um corpo granítico (Granito Chuim) em rochas vulcanossedimentares paleoproterozoicas. Uma faixa estruturada na direção norte-sul destacou-se como mais favorável a existência de novas ocorrências minerais;

(2) Região sul-sudeste do mapa, em que as mineralizações estão hospedadas em veios de quartzo encaixados em rochas vulcânicas ácidas e diabásios, esta região é estruturalmente controlada pela zona de falhas do Buiuçu, com direção NE-SW;

(3) Região oeste do mapa, em que ainda não há registros conhecidos de mineralizações, mas, são mapeadas rochas máficas da Suíte Matá-Matá em contato com rochas vulcanossedimentares do Grupo Beneficente, contexto geológico similar ao do alvo Juma;

(4) Região central do mapa em que há uma única ocorrência conhecida, garimpo Rio das Pombas, em que a mineralização está hospedada em vênulas caoliníticas hospedadas em rochas vulcanossedimentares do Grupo Beneficente;

(5) Região noroeste do mapa, em que ocorrem mineralizações conhecidas, incluindo o garimpo Eldorado do Juma, preferencialmente em *stockworks* de vênulas caoliníticas localmente associadas a rochas máficas intrusivas mesoproterozoicas. Esta região foi detalhada neste trabalho como Alvo Juma.

Alguns dos depósitos de ouro conhecidos, incluindo o garimpo Eldorado do Juma, estão localizados em áreas definidas como de alta ou média favorabilidade. Novos locais, ainda sem ocorrências conhecidas, também foram identificados nas porções sul e oeste da área estudada.

- Mapa de prospectividade do Alvo Juma

Os resultados obtidos para o Alvo Juma ressaltaram áreas com alta favorabilidade para novas mineralizações auríferas na porção nordeste do mapa (regiões com ocorrências de rochas máficas) e também nas adjacências do garimpo Eldorado do Juma. Estruturalmente faixas na direção NE-SW se destacaram como mais favoráveis a alojar novas ocorrências.

- Mapa de prospectividade do Alvo Guida

O mapa de prospectividade do Alvo Guida gerou duas áreas com maior favorabilidade à ocorrência de ouro: (1) uma faixa com direção NE-SW localizada na porção central do alvo e (2) região sudeste do Alvo, em que aflora o Granito Chuim encaixado em rochas vulcanossedimentares e estão localizados os furos de sondagem analisados neste trabalho.

Sobre a inversão do vetor de magnetização – MVI

Os resultados da inversão tipo MVI para dados magnéticos aéreos deu suporte à interpretação obtida através nos mapas de prospectividade, sendo também uma importante ferramenta para a identificação de locais para futuras investigações com sondagem. A partir da integração do modelo 3D como a descrição dos testemunhos foi possível estimar as dimensões do corpo granítico associado às mineralizações auríferas no alvo Guida. O topo da anomalia magnética é condizente com dados geológicos e os resultados obtidos levaram a definição espacial do contato entre o granito Chuim e as encaixantes vulcanossedimentares.

Considerações Finais

Neste trabalho foram utilizadas técnicas de prospecção mineral em 2D e 3D para definição de cenários favoráveis à ocorrência de ouro no Distrito Juma. Pode-se sugerir que o modelo exploratório proposto seja aplicável a novas pesquisas de prospecção mineral no Orógeno Juruena. Sugere-se a aquisição

de dados magnéticos, gradiométricos e gamaespectrométricos de alta resolução (espaçamento de 125m) nas janelas indicadas como potenciais para o avanço do programa exploratório. Este trabalho também pode auxiliar na redução da área de busca para descobertas de novos depósitos e na elaboração de propostas para futuros programas de sondagem.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguja Bocanegra (master) 2013 Mineralizações Epitermal Low-Sulfidations e do tipo Pórfiro Superpostas associadas os Magmatismo Félsico de 1,88 GA na Parte Norte da Província Mineral do Tapajós (PA)

Albuquerque, D. F., Sand, G., Paes, L., Bianchi, M., Vieira, L., Assumpção, M., Condori, C., Estrela, M., 2017. *Crustal structure of the Amazonian Craton and adjacent provinces in Brazil*. Journal of South American Earth Sciences, 79:431–442. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.08.019>

Alkimim F. F. 2004. *A evolução tectônica do Cráton Amazônico*. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. p. 471- 485.

Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. *Brazilian structural provinces: an introduction*. Earth Sci. Rev. 17, 1-29.

Almeida F.F.M., Brito Neves B.B., Carneiro C.D.R., 2000. *The origin and evolution of the South American Platform*. Earth Science Reviews, 50: 77-111.

Almeida, F.F.M & Hasui, Y. 1984. *O Pré-cambriano do Brasil*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 378 p.

Almeida, F.F.M., 1978. *Tectonic Map of South America, 1:5.000.000*. Explanatory Note. DNPM/CGMW/UNESCO, Brasília, 23 pp.

Almeida, F.F.M., Nogueira Filho, J.V. 1959. *Reconhecimento geológico do rio Aripuanã*. DNPM, Rio de Janeiro, Boletim da Divisão de Geologia e Mineração, 199, p. 43.

Almeida, M.E., Costa, U.A.P. 2014. *Geologia e recursos minerais da Folha Sumaúma – SB.20-Z-D*, Estado do Amazonas, escala 1:250.000 – Manaus: CPRM.

Amaral G., 1974. *Geologia Pré-Cambriana da região amazônica*. Tese de Livre Docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 212p.

Assis, R.R., 2015. *Depósitos auríferos associados ao magmatismo félsico da Província de Alta Floresta (MT), Cráton Amazônico: litogeoquímica, idade das mineralizações e fonte dos fluidos* (Doctorate thesis). Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 363 p.

Bettencourt, J.S., Juliani, C., Xavier, R.P., Monteiro, L.V.S., Bastos Neto, A.C., Klein, E.L., Assis, R.R., Leite, W.B., Moreto, C.P.N., Fernandes, C.M.D., Pereira, V.P., 2015. *Metallogenic 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, Volume 68.

Bizinella, G.A., Santiago, A.F., Melo, A.F.F., Santos, A., Borges, F.R., Godoy, H.K., Yamaguti, H.S., Oliveira, J.R., Carmona, J.R.M., D'Antona, R.G., Oliveira, R.L. 1980. Projeto Tapajós-Sucunduri, convênio DNPM/CPRM, 8v.

Bonham-Carter, G.F., 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Elsevier, Amsterdam (398 pp.).

Bonvalot, S., Balmino, G., Briaies, A., Huhn, M., Peyrefitte, A., Vales, N., Biancale, R., Gabalda, G., Moreaux, G., Reinquin, F., Sarrailh, M., 2012. *World Gravity Map Scale 1:50.000.000 – First edition*. Co-edited by CGMW – (Commission for the Geological Map of the World), BGI, CNES, IRD, France. Explanatory Note. 8.

Brito, R.S., Silveira, F.V., Larizzati, J.H. 2010. *Metalogenia do Distrito Aurífero do rio Juma – Nova Aripuanã – AM*. Informe de Recursos Minerais. Série Ouro, 17, CPRM-Brasília, p. 35

Chulick, G.S., Detweiler, S., Mooney, W.D., 2013. Seismic structure of the crust and uppermost mantle of South America and surrounding oceanic basins. *J. S. Am. Earth Sci.* 42, 260e276. <http://dx.doi.org/10.1061/j.jsames.2012.06.002>

Cordani U.G. & Teixeira W., 2007. *Proterozoic accretionary belt in the Amazonian Craton*. Geological Society, America Memoir, 200:297-320.

Cordani U.G., Tassinari C.C.G., Teixeira W., Basei M.A.S., Kawashita K., 1979. *Evolução Tectônica da Amazônia com base nos dados geocronológicos*. II Congresso Geológico Chileno. Arica. Chile, Actas, pp. 137-48.

Corrêa Costa, J.W., Corrêa Costa, J.W., Fuck, R.A. 2016. *The structure of the Amazonian craton: Available geophysical evidence*. *Journal of South American Earth Sciences*, 70:162-173.

Costa, J.B.S.; Hasui Y., 1997. *Evolução geológica da Amazônia*. In: COSTA, M. L. da; ANGÉLICA, R. S. *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém: SBG-NO, p.15-90.

Costa, U.A.P., Oliveira, A.C.S., 2013. *Geologia e recursos Minerais da Folha Sumaúma, SB.20-Z-D, Estado do Amazonas, escala 1:250.000*. CPRM, Manaus, 166 pp. (in portuguese).

Coutinho, M.G. da N., Santos, O.J.S., Fallic, A.E. & Lafon, J.M. 2000. *Orogenic gold deposits in Tapajós Mineral Province, Amazon, Brazil*. In: *International Geological Congress, 31st, (on CD-ROM)*, Rio de Janeiro.

Coutinho, M.G.N., 2008. *Província Mineral do Tapajós: Geologia, Metalogenia e Mapa Previsional para Ouro em SIG*. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, 420p.

CPRM, 2008. *Projeto Aerogeofísico Aripuanã*. Programa Geologia do Brasil (PGB), vol. I. Ministério de Minas e Energia, Brasília.

CPRM, 2008. *Projeto Aerogeofísico Itaituba*. Programa Geologia do Brasil (PGB), vol I. Ministério de Minas e Energia, Brasília.

CPRM, 2008. *Projeto Aerogeofísico Noroeste do Mato Grosso*. Programa Geologia do Brasil (PGB), vol. I. Ministério de Minas e Energia, Brasília.

CPRM, 2008. *Projeto Aerogeofísico Rio Machado*. Programa Geologia do Brasil (PGB), vol. I. Ministério de Minas e Energia, Brasília.

CPRM, 2009. *Projeto Aerogeofísico Rondônia Central*. Programa Geologia do Brasil (PGB), vol. I. Ministério de Minas e Energia, Brasília.

CPRM, 2009. *Projeto Aerogeofísico Sucunduri*. Programa Geologia do Brasil (PGB), vol. I. Ministério de Minas e Energia, Brasília.

CPRM, 2011. *Projeto Aerogeofísico Província Aurífera do Tapajós*. Programa Geologia do Brasil (PGB), vol. I. Ministério de Minas e Energia, Brasília.

CPRM, 2012. *Projeto Aerogeofísico Japuíra*. Programa Geologia do Brasil (PGB), vol. I. Ministério de Minas e Energia, Brasília.

CPRM, 2012. *Projeto Aerogeofísico Norte do Mato Grosso*. Programa Geologia do Brasil (PGB), vol. I. Ministério de Minas e Energia, Brasília.

CPRM, 2012. *Projeto Aerogeofísico Rio Juruena*. Programa Geologia do Brasil (PGB), vol. I. Ministério de Minas e Energia, Brasília.

CPRM, 2012. *Projeto Aerogeofísico Serra dos Apiacás*. Programa Geologia do Brasil (PGB), vol. I. Ministério de Minas e Energia, Brasília.

CPRM, 2012. *Projeto Aerogeofísico Serra dos Caiabis*. Programa Geologia do Brasil (PGB), vol. I. Ministério de Minas e Energia, Brasília.

CPRM, 2013. *Projeto Aerogeofísico Branco Machadinho*. Programa Geologia do Brasil (PGB), vol. I. Ministério de Minas e Energia, Brasília.

D'Agrella Filho M.S., Bispo-Santos F., Trindade R.I.F., Antonio, P.Y.J., 2016. *Paleomagnetism of the Amazonian Craton and its role in paleocontinents*. Brazilian Journal of Geology, 46(2), 275-299.

DEINT-Departamento de Informações em Transportes, 2015. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/images/bit/pdf/mapas/am.pdf> > Acesso em: 20 de outubro de 2018.

Dentith, M. and Mudge, S. T, 2014. *Geophysics for the mineral exploration geologist*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Efimov A.V. 1978. Multiplikativnyj pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud po aerogamma-spektrometricheskim dannym. *In: Metody rudnoj geofiziki*. Leningrad, Naucno-proizvodstvennoje objedinenie geofizika.

Ellis, R. G., de Wet, B., & Macleod, I. N., 2012. *Inversion of magnetic data for remanent and induced sources*. In *ASEG Extended Abstracts 2012* (pp. 1-4). Australian Society of Exploration Geophysicists (ASEG).

GEOSOFT, 2017. *OASIS* Montaj 9.4. GEOSOFT Inc., Toronto.

Harris, J.R., Sanborn-Barrie, M., 2006. Mineral potential mapping: examples from the Red Lake Greenstone Belt, Northwest Ontario. In: Harris, J.R. (ed.) *GIS for the Earth Sciences*. Geological Association of Canada. Special Publication, 44, 1–21.

Hasui Y., Haralyi N.L., Schobbenhaus C. 1984. *Elementos geofísicos e geológicos da região Amazônica: subsídios para o modelo geotectônico*. In: *Simpósio de Geologia da Amazonia*, Manaus, SBG, p. 129-147.

Isotta C.A.L., Carneiro J.M., Kato H.T., Barros R.J.L. 1978. Projeto Província Estanífera de Rondônia. Relatório Final, Porto Velho. Convênio CPRM/DNPM, 12 v.

JICA/MMAJ. 2000. Metal Mining Agency of Japan / Japan International Cooperation Agency. Report on the Mineral Exploration in the Alta Floresta Area, Brazil, Final Report, Projeto Alta Floresta - MT, Japan, March, 137p.

Juliani, C., Monteiro, L.V.S., Fernandes, C.M.D, 2018. *Potential for porphyry Cu-Mo and Cu-Au and epithermal Au in Paleoproterozoic (2.0 to 1.87 Ga) magmatic arcs in the Amazonian craton, Brazil: A new frontier of opportunities in mineral exploration*. Sessão Oral apresentada no: VIII Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral (Simexmin), 20 a 23 de maio de 2018, Ouro Preto – MG.

Juliani, C., Vasquez, M.L., Klein, E.L., Villas, R.N.N., Echeverri-Misas, C.M., Santiago, E.S.B., Monteiro, L.V.S., Carneiro, C. de C., Fernandes, C.M.D., User, G., 2014. *Metalogênese da Província Tapajós*. In: Silva, M.G., Rocha Neto, M.B., Jost, H., Kuyumjian, R.M. (Eds.), *Metalogênese das Províncias Tectônicas*

Brasileiras, Programa Geologia do Brasil, Recursos Minerais, Serviço Geológico do Brasil, CPRM, pp. 229 e 263.

Li, Y., SHEARER, S.E., HANEY, M.M., DANNEMILLER, N., 2010. Comprehensive approaches to 3D inversion of magnetic data affected by remanent magnetization. *Geophysics*, v. 75(1), p. L1-L11. (<https://doi.org/10.1190/1.3294766>)

Liberatore, G., Alecrim, J.D., Medeiros, J.B., Malouf, R.F., Pinheiro, S.S., Achão, S.M., Santos, J.O.S. 1972. Projeto Aripuanã – Sucunduri. In: BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Convênio DNPM/CPRM, Relatório, 8v.

Lloyd, S., van der Lee, S., França, G.S., Assumpção, M., Feng, M., 2010. Moho map of South America from receiver functions and surface waves. *J. Geophys. Res.* 115, B11315. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB006829>.

Lopes, A. A. C.; Moura, M. A. The Tocantinzinho Paleoproterozoic Porphyry-Style Gold Deposit, Tapajos Mineral Province (Brazil): Geology, Petrology and Fluid Inclusion Evidence for Ore-Forming Processes. *MINERALS*, v. 9, n. 1, 2019.

Moura, M.A., 1998. O Maciço Granítico Matup_a e o Dep_osito de Ouro Serrinha (MT): Petrologia, Alteração Hidrotermal e Metalogenia. Unpublished PhD. Thesis. Universidade de Brasília, 238 pp. (in portuguese).

Nykänen, V., 2008. Spatial data analysis as a tool for mineral prospectivity mapping: Espoo, Geological Survey of Finland, 27p.

Pan, G. & Harris, D.P., 2000. Information Synthesis for Mineral Exploration. Oxford University Press, New York, 461p.

Pessoa M.R., Andrade A.F., Nascimento J.D., Santos J.O.S., Oliveira J.R., Lopes R.C., Prazeres W.V. 1977. *Projeto Jamanxim*. Relatório Final. Manaus: DNPM/CPRM, 8v.

Pimentel, M.M., Fuck, R.A., 1992. Neoproterozoic crustal accretion in Central Brazil. *Geology* 20, 375e379.

Pinho M.A.S.B., Lima E.F., Fetter A., Van Schmus W.R., Chemele-Fr F. 2001. Caracterização petrográfica e dados geocronológicos preliminares das rochas vulcânicas da Formação Iriri – porção Centro-Sul do Cráton Amazônico, Arupuanã, Mato Grosso. *Revista Brasileira de Geociências*, 31:1-5.

Raines, G.L, Sawatzky, D.L., Bonham-Carter, G.F., 2010. New fuzzy logic tools in ArcGis 10: ArcUser, ESRI, 13 p.

Rizzotto G. J. & Hartmann L. A., 2012. Geological and geochemical evolution of the Trincadeira Complex, a Mesoproterozoic ophiolite in the southwestern Amazon craton, Brazil. *Lithos* 148: 277-295.

Sánchez, M. G., Allan, M. M., Hart C. J. R., Mortensen J. K. 2014. Extracting ore-deposit-controlling structures from aeromagnetic, gravimetric, topographic, and regional geologic data in western Yukon and eastern Alaska. *Interpretation*, 2(4), SJ75-SJ102.

Santos J.O.S., Hartmann L. A., Faria M. S. G., Riker S.R.L., Souza M.M., Almeida M.E., McNaughton N.J., 2006. *A compartimentação do Cráton Amazonas em Províncias: Avanços ocorridos no período 2000-2006*. In: SBG-Núcleo Norte, Simpósio de Geologia da Amazônia, 9p. Belém, CD-ROM.

Santos J.O.S., Hartmann L.A., Gaudette H.E., Groves D.I., McNaughton N.J., Fletcher I.R., 2000. *A new understanding of the Provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm- Nd geochronology*. *Gondwana Research*, 3(4): 453-488.

Santos, J.O.S., 2003. *Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central*. In: Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H. (Eds.), *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. CPRM, Brasília, pp. 169e226

Scandolara J.E., Correa R.T., Fuck R.A., Souza V.S., Rodrigues J.B., Ribeiro P.S.E., Frasca A.A.S., Saboia A.M., Lacerda Filho J.V., 2017. *Paleo-Mesoproterozoic arc-accretion along the southwestern margin of the Amazonian craton: The Juruena accretionary orogen and possible implications for Columbia supercontinent*. *Journ. of South Amer. Earth Sciences* 73 (2017) 223 e 247.

Simões M. S., Meloni R.E., Benevides Filho P.R.R., Lisboa T. M., Silva A.R.C., 2017. *A sucessão vulcanossedimentar dos grupos Colíder e Beneficente no sudeste do Amazonas: estilos eruptivos, tipos composicionais e ambientes de sedimentação*. *Contribuições à Geologia da Amazônia - Volume 10*, pp. 263e272.

Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 1999. *Geochronological Provinces of the Amazonian Craton*. Episodes, 22(3):174-182.

Tassinari C.C.G., Bettencourt J.S., Geraldés M.C., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 2000. *The Amazonian Craton*. In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz-Filho A., Campos D.A. (eds.) *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, 31st International Geological Congress, p. 41-95.

Teixeira, W., Tassinari, C.C.G., Cordani, U.G., Kawashita, K., 1989. *A review of the geochronology of the Amazonian Craton: Tectonic Implications*. Precambrian Research, v.42, pp. 213-27.

Trevisan, V.G., 2015. *Estudo comparativo entre mineralizações filonares de Au ± Cu e Au + metais de base do setor leste da Província de Alta Floresta (MT), Cráton Amazônico* (Master thesis). Universidade Estadual de Campinas, 129 p.

Vasquez M.L., Rosa Costa L.T., Silva, C.M.G., Klein E.L. 2008. *Compartimentação Tectônica*. In: M.L. Vasquez & L.T.E. Rosa-Costa (Orgs.) *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: Texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000*. Belém: CPRM. p. 39-112.