

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Integração de dados aerogeofísicos e mapeamento litológico
preditivo com *Self-Organizing Maps* na Província Mineral do Tapajós,
Cráton Amazônico**

Gabriel Cellier

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Recursos Minerais e
Hidrogeologia do Instituto de Geociências da
Universidade de São Paulo

Área de concentração: Recursos Minerais e
Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Caetano Juliani

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)
via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:
Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Cellier, Gabriel

Integração de dados aerogeofísicos e mapeamento
litológico preditivo com Self-Organizing Maps na
Província Mineral do Tapajós, Cráton Amazônico /
Gabriel Cellier; orientador Caetano Juliani. -- São
Paulo, 2023.
101 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
em Recursos Minerais e Hidrogeologia) -- Instituto
de Geociências, Universidade de São Paulo, 2023.

1. Cráton Amazônico. 2. Província Mineral do
Tapajós. 3. Mapeamento geológico. 4. Aerogeofísica. 5.
Self-Organizing Maps. I. Juliani, Caetano, orient.
II. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Integração de dados aerogeofísicos e
mapeamento litológico preditivo com Self-
Organizing Maps na Província Mineral do
Tapajós, Cráton Amazônico**

GABRIEL CELLIER

Orientador: Prof. Dr. Caetano Juliani

Dissertação de Mestrado

Nº 916

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Caetano Juliani

Dra. Mariana Brando Soares

Dr. Cleyton de Carvalho Carneiro

SÃO PAULO
2023

“We are the dust on the stained glass windows

Trying to comprehend the cathedral”

Enter Shikari – Shinrin-Yoku

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, Guida, Renato, Lucas e Júlia pelo constante apoio, paciência e compreensão que tiveram comigo, não foi fácil, mas seria muito mais difícil sem o apoio de vocês.

Expresso meus agradecimentos ao meu orientador, professor Caetano Juliani. Infelizmente muito contratemplos que não permitiram a realização do projeto como planejado inicialmente, mas acredito que um bom trabalho foi feito, obrigado pelos esclarecimentos durante todo esse tempo. Estendo os agradecimentos a Prof. Lena Monteiro, que prontamente me ajudou quando preciso.

Devo meus agradecimentos ao companheiro de pós-graduação e amigo Luiz Dutra. Obrigado pela amizade e por toda vez que me ajudou durante esses anos, esse trabalho não aconteceria sem suas contribuições, tenho admiração por você. Eternamente grato.

Agradeço ao Rodrigo de Gouvêa e ao laboratório InTRA da Escola Politécnica da USP, por gentilmente cederem uso do seu algoritmo IntraSOM antes mesmo de sua publicação e de toda a ajuda durante o processo. Desejo sucesso a todos.

A Júlia Kastrup, muito obrigado por todo companheirismo durante essa fase e por acreditar em mim mesmo quando nem eu mais acreditava, sempre lembrarei da sua cumplicidade, das ajudas e de sua compreensão na reta final. Amo você.

A todos que de alguma forma, direta ou indireta, contribuíram com a produção deste trabalho, mesmo que com uma palavra amiga, meu muito obrigado.

RESUMO

A Província Mineral do Tapajós (PMT), localizada no centro-sul do Cráton Amazônico, destaca-se pela produção de ouro há mais de seis décadas e tem demonstrado grande potencial para ocorrência de depósitos magmático-hidrotermais polimetálicos, especialmente dos tipos epitermal e pórfiro. No entanto, mesmo com os esforços realizados nas últimas décadas, incluindo a recente publicação do mapa geológico da província, o conhecimento geológico é incompleto, realidade que desfavorece o desenvolvimento da exploração mineral na região. A situação é agravada pelas dificuldades naturais que a região impõe como a dificuldade de acesso, densa vegetação e espesso manto intempérico sobre o substrato rochoso.

O uso de técnicas indiretas de mapeamento em regiões com essas dificuldades tem se expandido nos últimos anos. Nesse contexto, o mapeamento preditivo por meio de técnicas de *Machine Learning*, realizado a partir de variadas bases de dados, tem se mostrado uma ferramenta útil para caracterização e delimitação de unidades geológicas, identificação de anomalias composicionais, identificação de estruturas e mais.

Neste trabalho, dados aerogeofísicos foram processados e interpretados a fim de investigar a geologia da porção leste da PMT, sempre à luz do atual mapa geológico da região. Dados obtidos nesta etapa foram utilizados posteriormente como parâmetros para nortear a produção de um mapa litológico preditivo a partir da técnica de *Self-Organizing Maps* (SOM), uma técnica não supervisionada de *Machine Learning*, ou seja, que realiza as análises e agrupamento de dados de forma independente, agrupando as amostras conforme relações de similaridade entre elas, definidas pelo próprio algoritmo. Os resultados obtidos evidenciam a forte influência de dados aerogeofísicos na produção do mapa geológico da região, com forte relação dos contatos geológicos entre os mapas, atestando um resultado satisfatório do uso da técnica SOM neste estudo. No entanto, em diversas regiões do mapa geológico, a identificação e delimitação de unidades geológicas e estruturas não são suportadas pelos dados obtidos neste estudo, em especial em regiões com poucos ou sem dados de afloramentos.

Os resultados obtidos pelo método SOM se mostraram eficientes na elaboração de mapas geológicos previsionais e aparentam maior eficiência que o simples uso de dados geofísicos para mapeamento de extensões de unidades geológicas identificadas em campo e inferência em regiões não estudadas. Mostra também potencial para inferência de regiões afetadas por alterações hidrotermais, o que pode ser útil para elaboração de modelos exploratórios e definição de áreas potenciais para exploração.

ABSTRACT

The Tapajós Mineral Province (TMP), located in the central-south region of Amazonian Craton, stands out for its gold production for over six decades and has demonstrated huge potential for occurrences of magmatic-hydrothermal polymetallic deposits, especially epithermal and porphyry types. However, even with all the efforts made in the last few decades, including the recent publication of the province geologic map, the geologic knowledge is uncomplete, a reality that disfavor the development of the mineral exploration in the region. This situation is aggravated by the natural difficulties that this region imposes, such as access difficulties, dense forest cover and thick weathering profile.

The use of indirect mapping techniques in regions with similar difficulties is expanding in the last few years. In this context, predictive mapping based on Machine Learning techniques, using different datasets, has proved to be a useful tool to characterize and delimitate geological units, recognize compositional anomalies, geological structures and more.

In this contribution, aerogeophysical data is processed and interpreted to investigate the geology of the eastern region of the TMP, in the light of the geologic map. The obtained data were utilized as parameters for the production of a predictive geologic map using Self-Organizing Maps (SOM), an unsupervised Machine Learning technique, which analyses and structure the data independently, clustering the samples according to their similarities, which is recognized by the algorithm itself.

The results evidence the strong contribution from the aerogeophysical data in the production of the geologic map, with strong correlation between the contacts of both maps, attesting a successful outcome from the use of SOM in this study. However, in many regions of the geologic map, defined geological units and structures are not supported by the data obtained in this study, especially in regions with few or no-data from previous field surveys.

The SOM technique was effective in the creation of a predictive geologic map and appears to be more efficient than the use of geophysical data alone to map previously described geological units and to infer units in not-studied regions. It also has potential to infer areas affected by hydrothermal activity, which can be useful in the elaboration of exploratory models and defining prospective areas for exploration.

Sumário

1. APRESENTAÇÃO	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Localização da Área	3
1.3 Justificativas e Motivações	3
1.4 Objetivos.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Contexto geológico regional.....	6
2.1.1 Cráton Amazônico.....	6
2.1.2 Província Mineral do Tapajós.....	10
2.2 Fundamentos dos dados aerogeofísicos.....	19
2.2.1 Análise dos dados gamaespectrométricos	20
2.2.2 Análise dos dados magnetométricos.....	23
2.3 Modelagem litológica preditiva por método <i>Self-Organizing Maps</i>	24
2.3.1 Fundamentos do <i>Self-Organizing Maps</i>	26
2.3.2 Produtos do <i>Self-Organizing Maps</i>	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 Revisão Bibliográfica	29
3.2 Aquisição de dados aerogeofísicos.....	29
3.2.1 Projeto Aerogeofísico Itaituba.....	29
3.2.2 Projeto Aerogeofísico Rio Curuá	30
3.2.3 Projeto Aerogeofísico Cachoeira Curuá.....	31
3.3 Processamento de dados aerogeofísicos	31
3.3.1 Técnicas utilizadas nos dados de gamaespectrometria.....	32
3.3.2 Técnicas utilizadas nos dados magnetométricos	35
3.4 Produção de mapas por método dirigidos pelos dados.....	38
3.4.1 Parâmetros do treinamento em ambiente SOM.....	38
3.5 Interpretação dos dados obtidos	39
4. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS	40
4.1 Mapas Gamaespectrométricos	40
4.1.1 Mapas de contagem de elementos (K, eU, eTh e CT).....	41
4.1.2 Mapa MDT (Modelo Digital de Terreno).....	42
4.1.3 Mapas de razões de elementos (K/eTh, eU/eTh, eU/K e FF).....	44
4.2 Mapas Magnetométricos.....	45
4.3 Unidades litogeofísicas a partir de domínios gamaespectrométricos	50
4.3.1 Domínio 1	51
4.3.2 Domínio 2.....	52

4.3.3 Domínio 3	53
4.3.4 Domínio 4	54
4.3.5 Domínio 5	54
4.3.6. Domínio 6	55
4.3.7. Domínio 7	56
4.3.8. Domínio 8	56
4.4 Discussão e Comentários	57
5. MODELAGEM LITOLÓGICA PREDITIVA POR MÉTODO SOM	62
5.1 Parâmetros estatísticos das variáveis de entrada	62
5.2 Resultados das análises SOM	64
5.3 Caracterização dos <i>clusters</i> do mapa litológico preditivo	67
5.4 Discussão e Comentários	72
6. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	76
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Cráton Amazônico e suas províncias geotectônicas segundo (A) Santos et al. (2000) e (B) Santos et al. (2006).7
- Figura 2** – (A) Mapa geológico e estrutural do leste da PMT por Vasquez et al. (2008, 2017) e (B) lineamentos delimitados por Dutra e Cellier (2020). Modificado de Dutra e Cellier (2020).9
- Figura 3** - Modelo de evolução tectônica na região por Fernandes et al. (2011) demonstrando a influência de uma possível *flat-subduction* da placa responsável pela geração dos arcos magmáticos e, posteriormente, do magmatismo alcalino ca. 1,88 Ga no sul do Cráton Amazônico.....10
- Figura 4** - Área de estudo no (A) mapa da América do sul com contornos de terrenos cratônicos; (B) Província Ventuari–Tapajós (Santos et al., 2000, 2006) e limites dos levantamentos aerogeofísicos da região e (C) recorte da área de estudo, a leste da PMT, no mapa geológico de Vasquez et al. (2020).11
- Figura 5** - Reconstrução paleogeográfica do vulcanismo e magmatismo fissural paleoproterozoico na parte sul do Cráton Amazônico (Roverato et al., 2019).16
- Figura 6** – Mapa da PMT por Vasquez et al. (2020) com marcações dos principais depósitos e ocorrências de ouro. Quadrados amarelos representam ocorrências de ouro, verdes ocorrências de cobre. Linha tracejada menor delimita limite da Província Ventuari-Tapajós (Santos et al., 2000) e linha tracejada maior limite da Província Tapajós-Parima (Tassinari e Macambira, 1999). Modificado de Juliani et al. (2021).17
- Figura 7** – Espectro típico dos raios gama, medido a 100 m de altitude, indicando as janelas de energia dos radioelementos potássio (K), urânio (eU), tório (eTh) e contagem total (CT) (Minty, 1997).....21
- Figura 8** - Variação dos teores médios de K (em %), U e Th (em ppm) nas rochas ígneas em função do teor de sílica em sua composição (Dickson e Scott, 1997).23
- Figura 9** - Síntese da vetorização de dados no espaço n-dimensional que ocorre no ambiente SOM. (A) Representação do espaço n-dimensional, (B) seed-vectors implantados de forma aleatória no espaço n-dimensional, (C) comparação de amostras iniciais com os *seed-vectors* de um raio da amostra, (D) um *seed-vector* é definido a partir de sua maior similaridade e (E) os outros *seed-vectors* no raio do primeiro selecionado se modificam de forma a se assemelhar a amostra inicial e se transformam nos *node-vectors*. Modificado de Carneiro (2010).27
- Figura 10** - Mapa gamaespectrométrico de contagem de elementos de (A) Potássio (K), (B) Urânio equivalente (eU), (C) Tório equivalente (eTh) e mapas de (D) Contagem total (CT)

e (D) Mapa de Modelo Digital de Terreno (MDT).	33
Figura 11 - Mapas de razão de elementos sendo (A) K/eTh, (B) eU/eTh, (C) eU/K e (D) Fator F (FF, Efimov, 1978; Gnojek e Prichystal, 1985).	34
Figura 12 - Mapa radiométricos ternário RGB de K, eU e eTh da região de estudo no leste da PMT. Obtido a partir da associação dos mapas de contagem de elementos (Fig. 9 (A-C)).	35
Figura 13 - Mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) da região de estudo.	36
Figura 14 - Mapa Tilt Angle no nível superficial da <i>região de estudo</i>	36
Figura 15 - (A) Recorte da área de estudo no mapa geológico (Vasquez et al., 2020) e os mapas <i>Tilt Angle</i> com aplicação do <i>UC</i> nos níveis de (B) 500 m, (C) 1000 m (D) e 2000 m de profundidade.	37
Figura 16 - Recorte da área de estudo no mapa geológico e de recursos minerais da Província Mineral do Tapajós, segundo Vasquez et al. (2020).	40
Figura 17 - Mapas radiométricos de contagem de elementos sobrepostos pelas unidades geológicas de Vasquez et al. (2020) e drenagens sendo (A) Potássio, (B) Urânio equivalente, (C) Tório equivalente e (D) Contagem total.	42
Figura 18 - Mapas MDT da região de estudo (A) sem sobreposição das unidades geológicas e drenagens e (B) com sobreposição de unidades geológicas e drenagens. Unidades geológicas segundo o mapa geológico de Vasquez et al. (2020).	43
Figura 19 - Mapas radiométricos de razão de elementos (A) K/eTh, (B) eU/eTh, (C) eU/K e (D) Fator F (Efimov, 1978; Gnojek e Prichystal, 1985). com limites das unidades geológicas propostas por Vasquez et al. (2020).	45
Figura 20 - Mapas de Amplitude de Sinal Analítico da região de estudo (A) Sem contatos do mapa geológico e (B) Com contatos do mapa geológico da PMT de Vasquez et al. (2020).	46
Figura 21 - Mapa ASA com interpretação de lineamentos geofísicos, sendo: Linhas pretas marcando falhamentos orientados preferencialmente E-W, linhas brancas tracejadas como diques tardios orientados NE-SW a1 NNE-SSW e círculos azuis como possíveis intrusões vulcânicas ou estruturas de caldeiras conforme descrito por Juliani et al. (2005).	47
Figura 22 - Recorte da região de estudo no mapa geológico da PMT com estruturas identificadas por (A) Vasquez et al. (2020) e (B) pelo autor, a partir de lineamentos observados no mapa <i>Tilt Angle</i> com aplicação do filtro <i>Upward Continuation</i> no nível de 500 metros de profundidade.	49
Figura 23 - (A) Mapa de composição ternária RGB de gamaespectrometria da região de estudo; (B) Unidades litogeofísicas interpretadas a partir do mapa de composição ternária com teores de potássio, urânio equivalente e tório equivalente interpretados visualmente.	50
Figura 24 – <i>Comparativo entre (A) mapa geológico da PMT e (B) unidades litogeofísicas</i>	

<i>interpretadas a partir do mapa ternário RGB.</i>	51
Figura 25 - Mapas aerogeofísicos de (A) K, (B) eU, (C) eTh, (D) Contagem Total, (E) Mapa ASA e (F) MDT sobrepostos por contatos da Suíte Maloquinha (cinza) e Suíte Creporizão (preto) definidos por Vasquez et al. (2020).....	60
Figura 26 – (A-F) Plotagens de parcelas componentes demonstrando visualmente as principais relações entre as variáveis utilizadas nas análises SOM: (A) K, (B) eU, (C) eTh, (D) Contagem Total, (E) ASA, (F) MDT, onde as cores quentes representam altos valores e contribuições para a análise e as cores frias baixos valores e contribuições; (G) Matriz-U, cores quentes representam alta dissimilaridade e cores frias altas similaridades.	65
Figura 27 - Modelo espacializado mostrando cada amostra codificada pela cor representativa de cada cluster a partir das análises SOM. Os valores de referência de variáveis para cada cluster estão representados nas Tabelas 6 e 7.	66
Figura 28 - Comparativo entre o (A) área de estudo segundo mapa geológico de Vasquez et al. (2020) e (B) modelo elaborado pelo algoritmo IntraSOM com contatos das unidades litológicas e drenagens do mapa (A) sobrepostos..	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do levantamento 1082 – Projeto Aerogeofísico Itaituba.	30
Tabela 2 – Características do levantamento 1130 – Projeto Aerogeofísico Rio Curuá.	30
Tabela 3 – Características do levantamento 1130 – Projeto Aerogeofísico Cachoeira Curuá.	31
Tabela 4 - Parâmetros utilizados na análise no IntraSOM.	39
Tabela 5 – Valores de referência para classificação das variáveis analisadas.	62
Tabela 6 – Influência das variáveis em cada cluster das análises SOM.	63
Tabela 7 – Classificação da influência das variáveis em cada cluster das análises SOM.	63

1. APRESENTAÇÃO

1.1 Introdução

Localizado na região norte do Brasil, o Cráton Amazônico é o mais extenso cráton da América do Sul e situa-se majoritariamente no território brasileiro. Atualmente esta região representa uma importante frente de exploração mineral no país e com crescente importância para o mercado mineral nacional. A nível global, o Cráton Amazônico representa uma das maiores fronteiras minerais em potencial e com possibilidades de novas descobertas, com vastas regiões consideradas de elevado potencial mineral para depósitos dos tipos epitermal, pórfiro e IOCG, especialmente considerando-se o restrito conhecimento geológico atual em diversas regiões do cráton.

Segundo Cordani (1979), Tassinari e Macambira (1999) e Santos et al. (2000), o Cráton Amazônico representaria um domínio tectônico predominantemente paleoproterozoico com núcleos arqueanos a leste e com terrenos progressivamente mais novos a sudoeste. A partir de estudos geocronológicos e isotópicos, inicialmente, foi considerado um produto de diversas subducções entre crostas oceânicas (arcos de ilha) e entre crosta continental-oceânica durante todo o Paleoproterozoico, especialmente durante o Riáciano e o Orosiriano (Tassinari e Macambira, 1999, 2004; Santos et al., 2000).

A área de estudo, a Província Mineral do Tapajós (PMT), está localizada na região centro-sul do Cráton Amazônico, e está inserida a sul da Província Ventuari–Tapajós (1,9–1,8 Ga), por Tassinari e Macambira (1999; 2004). Segundo Santos et al. (2000), a área estaria situada na Província Tapajós–Parima (2,03–1,86 Ga), localizada a oeste da Província Amazônia Central (1,90–1,86 Ga), mais especificamente no Domínio Tapajós.

A PMT tem idades majoritariamente Orosiriana (ca. 2,0 a 1,87 Ga) e é composta por múltiplas suítes ígneas que representam o magmatismo de arco e de regime colisional a pós-colisional. Cassini et al. (2022) propõe uma divisão do registro da província em duas sequências magmáticas, onde, a mais antiga (ca. 2,0–1,95 Ga), representa o magmatismo de arco, e a mais nova (ca. 1,89–1,87 Ga), representa a evolução do arco, com registro composto por rochas tardi- a pós-orogênicas e anorogênicas.

Estudos recentes sugerem extensão da crosta arqueana relacionada à Província Mineral Carajás sob as extensas coberturas vulcânicas e sedimentares da PMT (Carneiro et al., 2018; Dutra e Cellier, 2020; Juliani, 2019), uma vez que os dados aerogeofísicos

indicam continuidade das zonas de cisalhamento arqueanas E-W de Carajás até o rio Tapajós, em especial em profundidades superiores a 5 km. Esta estruturação sugere que rochas granito-gnáissicas arqueanas podem continuar sentido oeste sob a PMT. Idades U-Pb arqueanas obtidas em zircões detríticos de 2,85 a 2,48 Ga (Santos et al., 2004) e idades Sm/Nd T_{dm} ca. 2,5–2,9 Ga (Echeverri-Misas, 2015; Lamarão et al., 2005) corroboram a existência de crosta arqueana no embasamento das sequências vulcânicas da PMT.

A região se destaca pelo crescente número de trabalhos que descrevem mineralizações magmático-hidrotermais, especialmente nas últimas duas décadas. Neste período, estudos descreveram sistemas epitermais auríferos *low-*, *intermediate-* e *high-sulfidation* (e.g. Corrêa-Silva, 2002; Echeverri-Misas, 2015; Guimarães et al., 2021; Juliani et al., 2000, 2005, 2021; Tokashiki, 2015), sistemas hidrotermais do tipo pórfiro (e.g. Aguja-Bocanegra, 2013; Juliani et al., 2000, 2002, 2021; Usero et al., 2009), ocorrências com afinidade com depósitos do tipo *Intrusion-Related Gold System* (e.g. Borges et al., 2009; Santos et al., 2001). Esses estudos, juntamente de dezenas de outros efetuados na região, demonstram o alto potencial metalogenético da PMT para a existência de variados tipos de depósitos magmático-hidrotermais em rochas mais ou menos evoluídas petrogeneticamente (Echeverri-Misas, 2015).

No entanto, é notório que mesmo com os crescentes esforços realizados, especialmente nas últimas décadas, o conhecimento geológico atualmente disponível na região ainda é incompleto. Há fatores locais que contribuem massivamente para esse cenário, como a densa cobertura vegetal, espesso manto intempérico sobre o substrato rochoso, a dificuldade de acesso na região e o clima de alta pluviosidade. Esses motivos dificultam a logística envolvida na realização de levantamentos geológicos-estruturais e exploratórios na região.

Considerando os desafios impostos pela região, juntamente com a necessidade de aprimorar o conhecimento geológico, a fim de compreender a evolução tectônica e metalogenética, torna-se importante uma abordagem com uso de métodos indiretos de mapeamento, como a partir do processamento de dados aerogeofísicos. Os levantamentos aerogeofísicos fornecem dados e informações que podem orientar e otimizar as operações subsequentes ao levantamento de campo e coleta de amostras, ou ainda ser utilizado posteriormente para o refinamento de um mapeamento geológico, identificando feições que possam indicar mudanças litológicas ou estruturas previamente não detectadas durante os trabalhos de levantamento em campo.

1.2 Localização da Área

A área de estudo, localiza-se na porção leste da Província Mineral do Tapajós, inserido na região centro-sul do Cráton Amazônico, no sudoeste do estado do Pará. As cidades de Novo Progresso e Castelo dos Sonhos estão dentro da área da pesquisa, aproximadamente na região central da área de realização deste estudo. O acesso a região ocorre principalmente a por meio da BR-163, a partir do norte do estado do Mato Grosso ou pela BR-230, partindo de Belém, rumo a direção oeste onde ingressa na BR-163 em direção sul.

1.3 Justificativas e Motivações

Este estudo representa mais uma contribuição ao conjunto de trabalhos que vem sendo desenvolvidos no centro-sul do Cráton Amazônico há mais de duas décadas sob supervisão do Prof. Dr. Caetano Juliani e sua equipe. O objetivo primordial desta pesquisa consiste em contribuir para o melhor entendimento da geologia da região da PMT, a partir de análises de dados aerogeofísicos, abordando a caracterização e a relação espacial das unidades geológicas na região. Além disso, buscou-se identificar estruturas em subsuperfície e áreas com concentrações anômalas de elementos que possam ser relacionadas a alterações hidrotermais.

Adicionalmente, foi empregada a técnica de *Self-Organizing Maps* (SOM) como forma de mapeamento preditivo, com o objetivo de demonstrar a capacidade de criação de um mapa geológico da região por meio da integração de base de dados de diferentes parâmetros geofísicos. Buscou-se assim obter um mapa que, em certo grau, represente a configuração geológica da região, se tornando uma ferramenta útil para estudos preliminares, de planejamento de atividades de campo a caracterização preliminar de unidades geológicas a partir de características geofísicas ou de atividades posteriores, de forma a refinar um mapeamento já existente, checando variações e características que ajudem na delimitação de contatos entre as unidades. O uso de diferentes técnicas aplicadas aos dados aerogeofísicos, é justificado, especialmente levando-se em consideração as diversas dificuldades que regiões como a PMT impõem para a realização de levantamentos de campo e a escassez de dados para aplicação de outras técnicas, como por exemplo, dados geoquímicos.

A região tem destaque na produção de ouro no Brasil há décadas, com estimativas superiores a 900 toneladas de produção desde o final dos anos 1950 (Juliani et al., 2021). Grande parte desta produção tem sido feita em garimpos, que exploraram ouro a partir de

pequenas cavas em depósitos coluviais, placers e paleoplacers.

A difícil e controversa compreensão da sua evolução tectônica, a falta de modelos metalogenéticos e a carência de estudos de detalhe em diversas aplicações das geociências contribuem para um menor desenvolvimento da indústria mineral na região. Esse cenário abre espaços para a atividade garimpeira, que além dos conhecidos danos ambientais e sociais, são efetuados majoritariamente sem estudos e não contribuem para o avanço do conhecimento geológico na região.

A aplicação de métodos de estudo indiretos, incluindo o sensoriamento remoto e a aerogeofísica, permitem o reconhecimento de estruturas geológicas e feições relacionadas a unidades litológicas, servindo como ferramenta para otimização e planejamento de levantamentos geológicos-estruturais, ou mesmo como principal metodologia em estudos de caráter regional ou de maior detalhamento, como neste estudo. O uso em conjunto de diferentes técnicas serve a embasar as interpretações, que podem servir de forma a destacar pontos de interesse, apontar semelhanças e diferenças entre as unidades em relação aos seus contatos ou mesmo possibilitar a correlação entre elas em diferentes regiões de um mapeamento.

Nesse contexto, o Serviço Geológico do Brasil (SBG/CPRM), tem efetuado levantamentos aerogeofísicos no Cráton Amazônico nas últimas décadas, muitas em áreas de conhecimento geológico restrito e com potencial mineral, como a PMT. Esses dados, de grande amostragem, permitem a realização de estudos a partir da aplicação de diferentes técnicas de processamento e análise de dados, se mostrando uma importante ferramenta no avanço de estudos geológicos, estruturais e metalogenéticos na região.

Desta forma, utilizando diferentes técnicas no processamento e interpretação dos dados aerogeofísicos, em conjunto com a técnica de *Self-Organizing Maps*, foi investigada a porção leste da PMT, de forma a contribuir com a caracterização geológica da região e as discussões acerca do seu potencial mineral e de sua evolução tectônica.

1.4 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi investigar a geologia da porção leste da PMT a partir da geração de mapas confeccionados por modelagem espacial de dados aerogeofísicos. Visou-se (i) caracterização de unidades geológicas bem como suas extensões e contatos, (ii) mapear estruturas geológicas em subsuperfície e em maiores profundidades e (iii) identificação de regiões com maiores indícios de terem sido afetadas por atividades hidrotermais.

Para alcançar esses objetivos, o estudo contou com o processamento e interpretação de mapas produzidos a partir de levantamentos gamaespectrométricos e magnetométricos, além da elaboração de um mapa com uso da técnica de *Machine Learning* de *Self-Organizing Maps* (SOM), ou mapas auto-organizáveis (Kohonen, 1982, 2001, 2013). Foram utilizados dados gamaespectrométricos e magnetométricos obtidos a partir dos levantamentos aerogeofísicos como variáveis para nortear a produção do mapa SOM.

Os mapas produzidos neste trabalho foram analisados e interpretados à luz do atual mapa geológico da PMT, na escala de 1:500.000, elaborado por Vasquez et al. (2020), que representa o fruto de trabalhos desenvolvidos nas últimas décadas pelo Serviço Geológico do Brasil (SBG/CPRM). O objetivo foi comparar os resultados e perceber semelhanças e diferenças, utilizando os resultados de forma a refinar o atual mapa geológico, auxiliando na caracterização de áreas discutíveis e fomentando a discussão e elaboração de modelos que representem com maior fidelidade a geologia e evolução tectônica da região.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo conta com a caracterização da geologia da região sul do Cráton Amazônico, região onde se insere a área de estudo, a Província Mineral do Tapajós. Ademais, o capítulo conta com revisão dos fundamentos dos métodos utilizados neste estudo, nomeadamente dados aerogeofísicos de gamaespectrometria e magnetometria e a técnica de *Self-Organizing Maps*, um método de *Machine Learning* não supervisionado.

2.1 Contexto geológico regional

2.1.1 Cráton Amazônico

O Cráton Amazônico conta com área superior a $4,6 \times 10^6$ km² e representa uma das maiores áreas cratônicas do mundo (Almeida et al., 1981, 2000). Estável a mais de 1 Ga, o Cráton Amazônico constitui uma região de grande importância do ponto de vista metalogenético, contando com diversas províncias minerais tais como a do Tapajós, Carajás, Xingu, Pitinga, Alta Floresta e outras, com maior destaque para Carajás, onde são descritos diversos depósitos de classe mundial.

O cráton, delimitado pelas faixas móveis neoproterozoicas Tucavaca e Paraguai–Araguaia, conta com espessa cobertura sedimentar fanerozoica representada pelas bacias do Maranhão a nordeste, Parecis a sudoeste, Xingu e Alto Tapajós a sul, Solimões a oeste, Tacutu a norte e Amazonas na região central. O Cráton Amazônico pode ser dividido em dois escudos, separados pela Bacia do Amazonas, os escudos Brasil Central (ou Guaporé) a sul e o Escudo das Guianas a norte.

A partir da década de 70 iniciaram-se os estudos e proposições de compartimentação e evolução do cráton, primeiramente com Amaral (1974), que o dividiu, baseado em datações K-Ar e Rb-Sr e correlações tectono-estratigráficas, em três blocos: Oriental, Central e Ocidental. Cordani et al. (1979) propuseram uma evolução a partir de um núcleo arqueano, a Província Amazônia Central, e evolução por sucessivos episódios de acreção crustal do final do Arqueano até o Mesoproterozoico, dividindo o em quatro províncias: Amazônia Central (> 2,1 Ga), Maroni–Itacaiúnas (ca. 2,1–1,8 Ga), Rio Negro–Juruena (ca. 1,7–1,45 Ga) e Rondoniana (ca. 1,4–1,15 Ga).

Com o progressivo aumento dos dados geológicos e geocronológicos este modelo foi gradativamente atualizado, mas ainda contando com influência da estruturação proposta por Cordani et al. (1979). Estudos posteriores adicionaram províncias e atualizaram definições das províncias já propostas (*e.g.* Cordani e Brito Neves, 1982;

Tassinari, 1996; Teixeira et al., 1989). Tassinari e Macambira (1999) propuseram a individualização da Província Ventuari–Tapajós (ca. 1,95–1,80 Ga), dividindo assim o Cráton Amazônico nas seguintes províncias: Amazônia Central (> 2,3 Ga), Maroni–Itacaiúnas (2,2–1,95 Ga), Ventuari–Tapajós (1,95–1,80 Ga), Rio Negro–Juruena (1,88–1,55 Ga), Rondoniana–San Ignácio (1,55–1,3 Ga) e Sunsás (1,3–1,0 Ga).

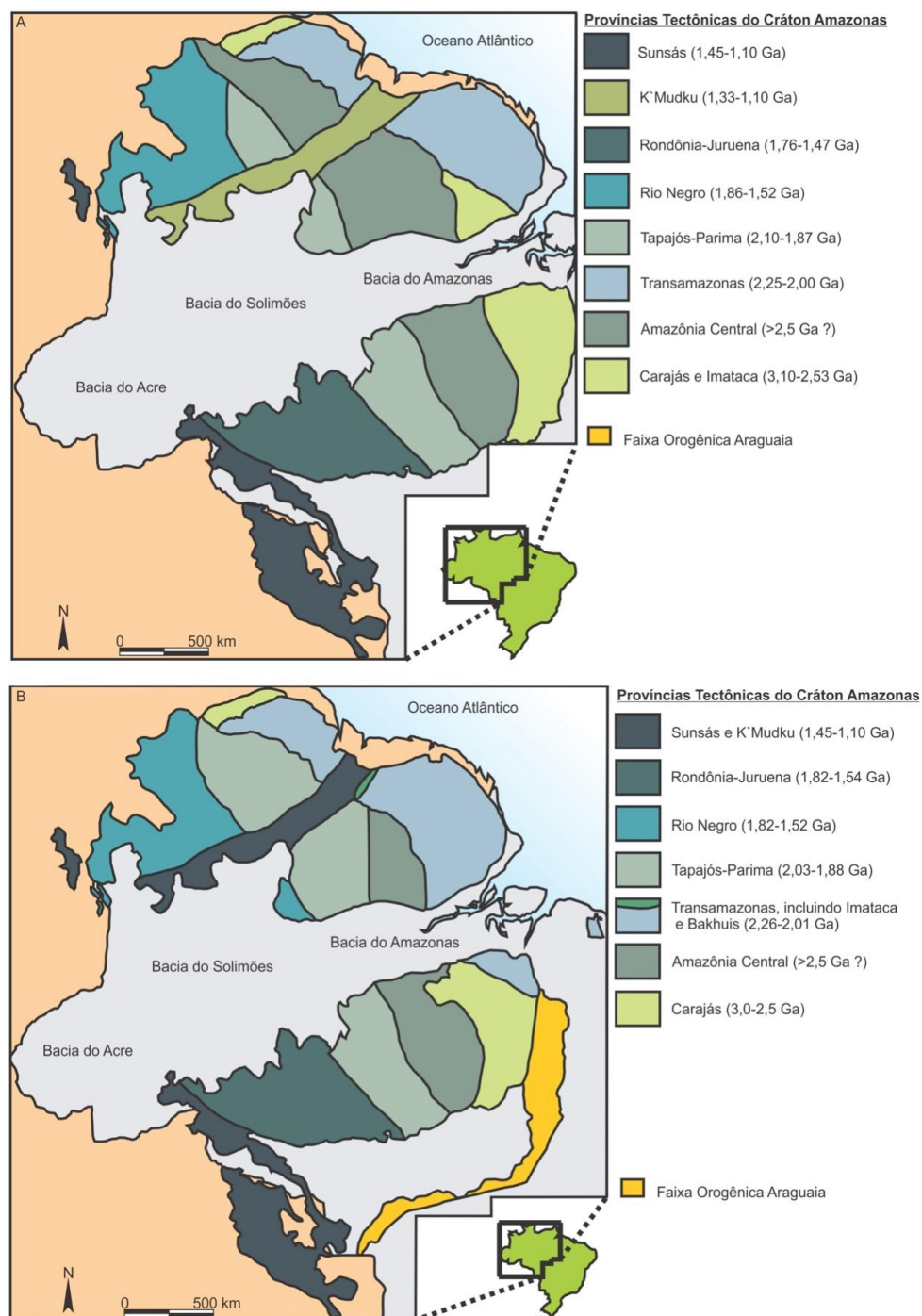


Figura 1 – Cráton Amazônico e suas províncias geotectônicas segundo (A) Santos et al. (2000) e (B) Santos et al. (2006).

Pouco tempo depois, Santos et al. (2000) apresentaram uma revisão que propôs uma nova divisão do Cráton Amazônico (Fig. 1(A)), com base em datações U-Pb e Sm-Nd. Essa nova abordagem dividiu o cráton em sete províncias geocronológicas, indicando eventos acrescionários sucessivos e o desenvolvimento de arcos magmáticos. Foram propostos a separação da região de Carajás da Província Amazônia Central, mudança de Maroni–Itacaiúnas para Transamazônica, a denominação de Ventuari–Tapajós como Tapajós–Parima, divisão da Província Rio Negro–Juruena em Rio Negro e Rondônia–Juruena e ampliação da faixa Sunsás.

Posteriormente, novos dados foram adquiridos (*e.g.* Santos et al., 2002, 2004), levando Santos et al. (2006) a propor uma nova subdivisão das províncias geotectônicas do Cráton Amazônico, com mudanças sutis em relação a proposta anterior (Fig. 1(B)). Entre as principais alterações destacam-se a incorporação da Faixa Imataca à Província Transamazonas e da Faixa K'Mudku ao Orógeno Sunsás.

Um modelo alternativo para a evolução tectônica do sul do Cráton Amazônico propõe que sob as rochas intrusivas e vulcânicas da PMT se estende um embasamento arqueano da Província Carajás (Carneiro et al., 2018; Dutra e Cellier, 2020; Juliani, 2019; Juliani et al., 2009, 2013). A partir de estudos geofísicos, foram identificados na PMT lineamentos E-W em diferentes níveis crustais (Fig. 2) em continuidade a leste com zonas de cisalhamento arqueanas da região da Província Carajás. Essas estruturas crustais profundas foram interpretadas como controladoras das intrusões dos magmas orogênicos cálcio-alcálico na região, além da geração de caldeiras vulcânicas. Em níveis crustais mais rasos, foram identificadas estruturas NW-SE e NE-SW (Fig. 2) que são considerados falhamentos que estariam associadas ao magmatismo pós-colisional do tipo A da Suíte Maloquinha (Carneiro et al., 2018; Dutra e Cellier, 2020).

O magmatismo cálcio-alcálico que durou entre ca. 2,10–1,87 Ga na PMT, seria relacionado a uma longa orogenia oceano-contidente de direção E-W, com subducção de sul para norte. Juliani et al. (2013) sugeriram que ao menos dois arcos magmáticos continentais teriam se formado neste período, nomeados Arcos Tapajônicos (Juliani et al., 2013, Juliani, 2019). As idades U-Pb de ca. 2,48–2,85 Ga e Sm-Nd T_{dm} ca. 2,5–2,9 Ga (Santos et al., 2004) em zircões herdados nos granitos da região e valores negativos ϵ_{Nd} (Echeverri-Misas, 2015; Lamarão et al., 2005; Tokashiki, 2015) reforçam a contribuição crustal arqueana na formação de um arco magmático associado a subducção oceano-contidente.

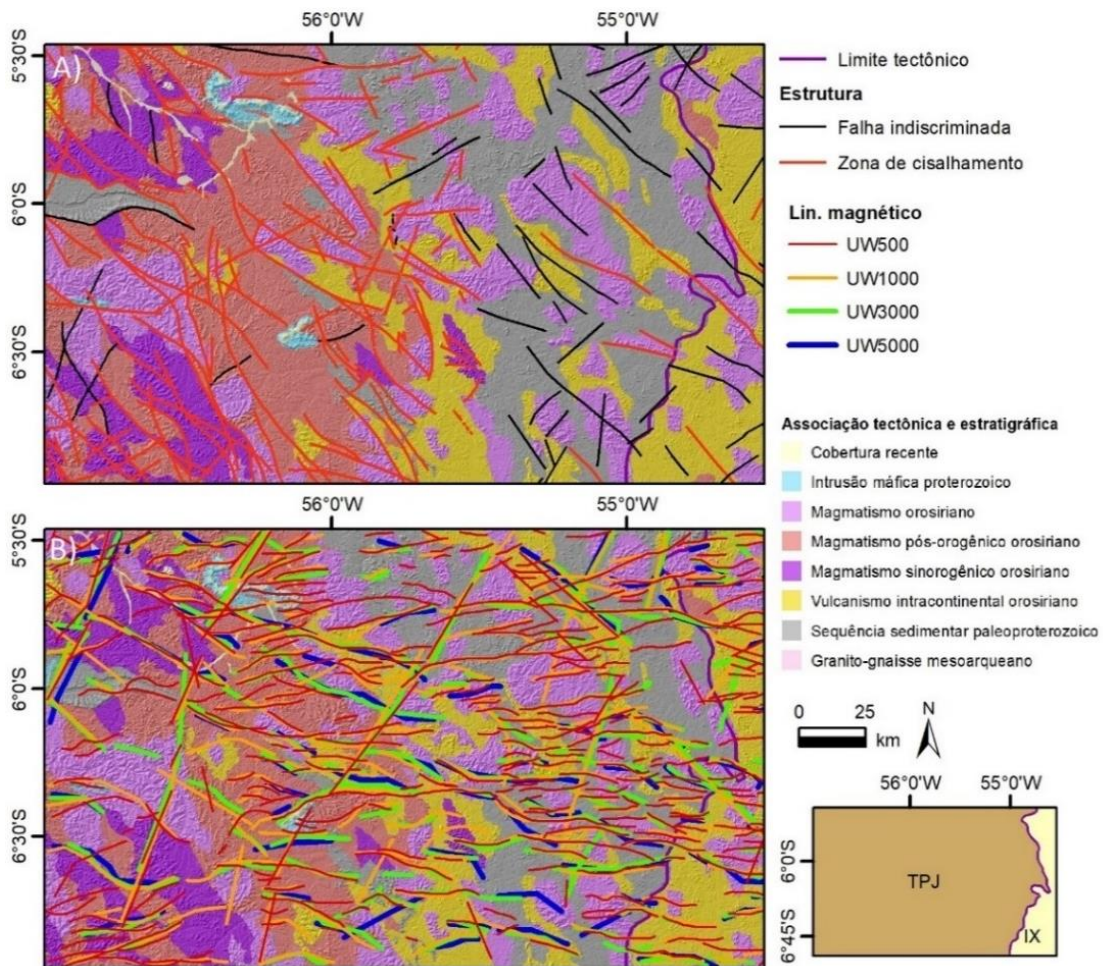


Figura 2 – (A) Mapa geológico e estrutural do leste da PMT por Vasquez et al. (2008, 2017) e (B) lineamentos delimitados por Dutra e Cellier (2020). Modificado de Dutra e Cellier (2020).

As suítes de rochas interpretadas como arcos magmáticos apresentam menores idades conforme avanço de SW em direção a NE, o que levou a sugestão de Juliani et al. (2009) de uma zona de subducção na Serra do Cachimbo. Segundo Fernandes et al. (2011, 2019), a presença de unidades cálcio-alcálicas de alto potássio mais jovens (Formação Sobreiro, ca. 1,88 Ga) em São Felix do Xingu seria relacionado a ocorrência um estágio de *flat-subduction* (Fig. 3).

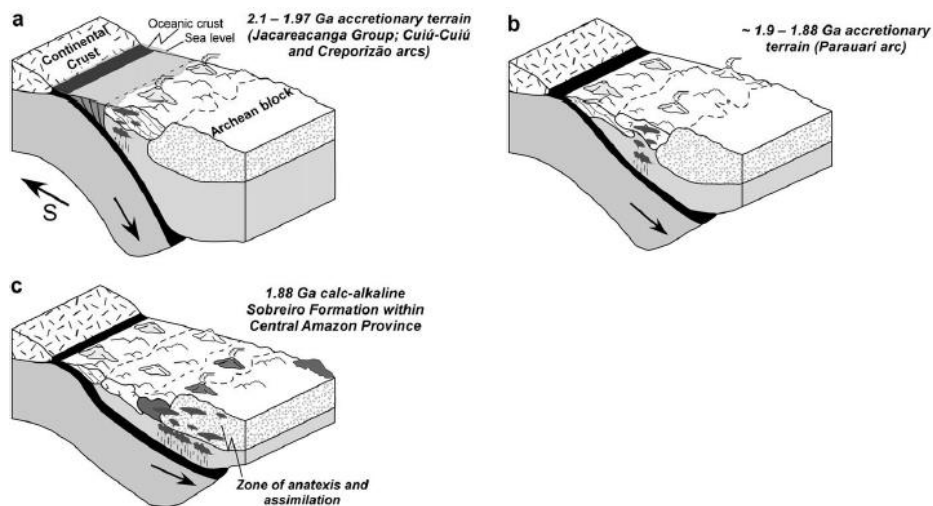


Figura 3 - Modelo de evolução tectônica na região por Fernandes et al. (2011) demonstrando a influência de uma possível *flat-subduction* da placa responsável pela geração dos arcos magmáticos e, posteriormente, do magmatismo alcalino ca. 1,88 Ga no sul do Cráton Amazônico.

2.1.2 Província Mineral do Tapajós

Tectonicamente, a PMT se localiza na Província Ventuari–Tapajós, adentrando parcialmente na Província Amazônia Central a oeste, segundo Tassinari e Macambira (1999). Segundo Santos et al. (2000, 2006) a PMT insere-se na Província Tapajós–Parima, no Domínio Tapajós. Em ambos os modelos a Província Tapajós–Parima (ou Ventuari–Tapajós) constitui faixa orogênicas de arcos insulares acrescida ao núcleo cratônico da Província Amazônia Central durante o Paleoproterozoico.

Estudos geocronológicos mais recentes permitem a divisão do registro geológico na região da PMT em dois grupos, ambos com sequências intrusivas e extrusivas. Cassini et al. (2022) propuseram a divisão entre uma sequência magmática antiga, de ca. 2,0–1,95 Ga e uma sequência magmática nova, de rochas entre 1,89 a 1,86 Ga. A província apresenta composição predominantemente granítica, característica observada também na PMT e na área de estudo, na porção leste da província (Fig. 4).

2.1.2.1 Litoestratigrafia da Província Mineral do Tapajós

As principais unidades litoestratigráficas presentes na PMT se formaram e evoluíram principalmente no Paleoproterozoico, mas também são identificadas na região formações mais jovens fanerozoicas, de modo geral associadas a depósitos sedimentares.

A unidades mais antiga é a sequência vulcanossedimentar de baixo grau metamórfico do **Grupo Jacareacanga** (ca. 2,1 Ga, Santos et al., 1997, 2000) que ocorre

em uma faixa NNW a noroeste na PMT, fora da área delimitada para este estudo. Litologicamente, é representada por xistos variados com presenças variáveis de feldspato, micas e quartzo, além de quartzitos, *metacherts*, metaturbiditos, metabasaltos.

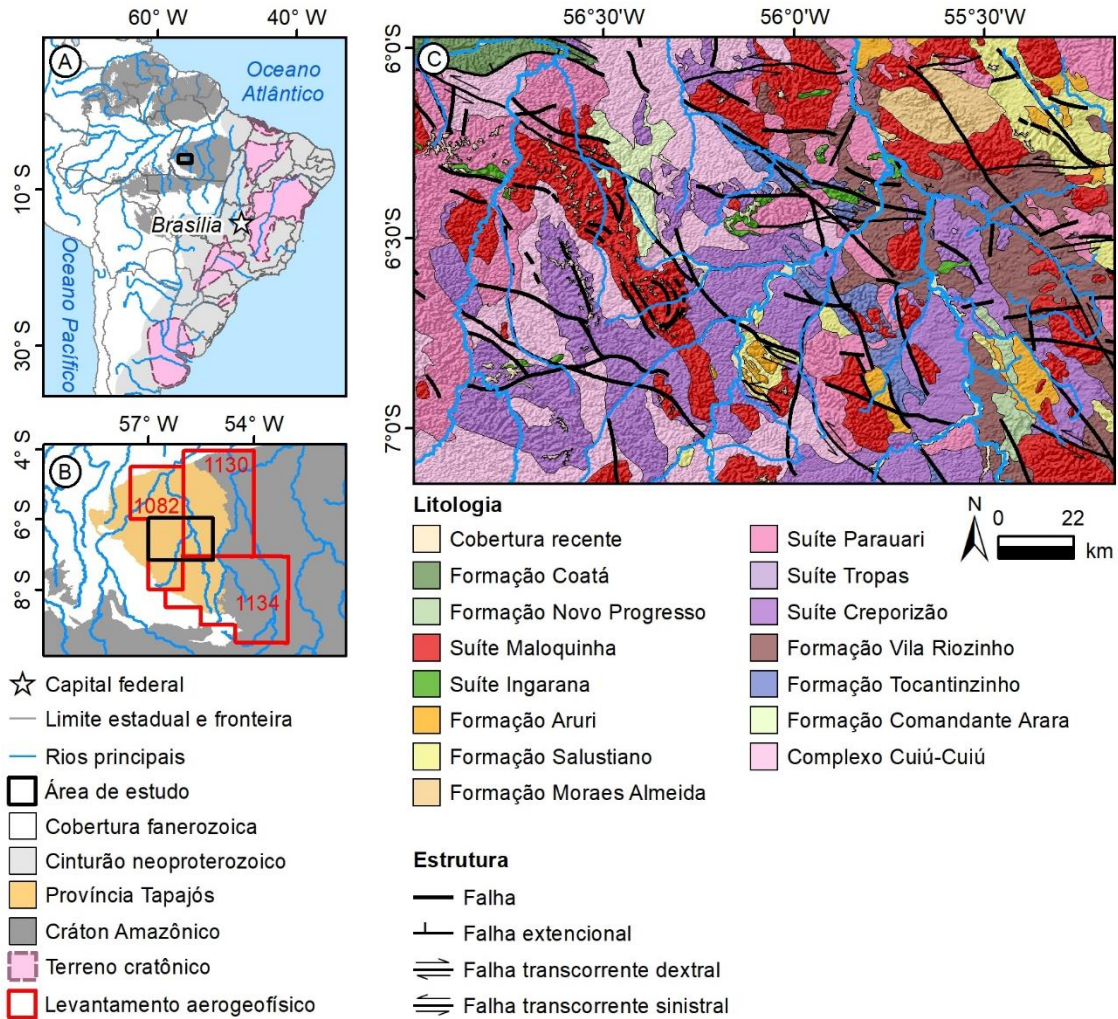


Figura 4 - Área de estudo no (A) mapa da América do sul com contornos de terrenos cratônicos, (B) Província Ventuari–Tapajós (Santos et al., 2000, 2006) e limites dos levantamentos aerogeofísicos da região e (C) recorte da área de estudo, a leste da PMT, no mapa geológico de Vasquez et al. (2020).

A seguir, o primeiro dos arcos magmáticos formados a partir dos eventos orogênicos paleoproterozoicos na região, seria o **Complexo Cuiú-Cuiú** (Almeida et al., 1998) de idades ca. 2,04 Ga (Santos et al., 1997, 2000). Esta unidade, que comporia o embasamento das sequências vulcânicas, aflora predominantemente na porção central e sudoeste da PMT, segundo Vasquez et al. (2020), e estão presentes na região de estudo, principalmente porções cartografadas na região central da PMT.

O Complexo Cuiú-Cuiú é constituído predominantemente por granodioritos,

tonalitos, quartzo–dioritos e monzodioritos com migmatitos subordinados. São granitoides cálcio-alcálicos a cálcio-alcálicos de alto potássio interpretados como formados em um arco magmático primitivo. Há uma ocorrência de conjunto de rochas vulcânicas ácidas a intermediárias com rochas piroclásticas, vulcanoclásticas e sedimentares vulcanogênicas ca. 2,0 Ga da denominada **Formação Comandante Arara**, interpretada como correspondentes extrusivos dos magmas associados ao Complexo Cuiú-Cuiú (Vasquez et al., 2017).

Compondo uma relativa faixa de orientação NW na porção centro-leste da PMT, ocorre a **Formação Vila Riozinho**, que compõe uma sequência vulcânica cálcio-alcálica de alto potássio a shoshoníticas, a qual representaria um evento vulcânico mais antigo que o do Grupo Iriri (Lamarão et al., 1999, 2002). Esta unidade reúne rochas traquíticas, andesitos e riolitos associados com idades ca. 2,00 a 1,99 Ga.

Seguindo a cronoestratigrafia, a seguir e a **Suíte Intrusiva Creporizão**, proposta por Ricci et al. (1999). Esta reúne granitoides cálcio-alcálicos, predominando sieno- e monzogranitos, com granodioritos, tonalitos e monzodioritos subordinados, interpretados como rochas sin- a tardi-orogênicas (Klein e Vasquez, 2000; Ricci et al., 1999). Estes granitoides ocorrem na região central da PMT, e estão extensivamente presentes na área do estudo. As rochas apresentam idades de ca. 1,98 a 1,96 Ga (Klein e Vasquez, 2000; Santos, 1999, Vasquez e Klein, 2000).

No oeste da PMT ocorrem granitoides cálcio-alcálicos, predominantemente tonalitos com granodioritos e monzogranitos subordinados da **Suíte Intrusiva Tropas**, considerada um dos arcos magmáticos formados nas orogenias da região (Santos et al., 2001, 2004). Estas rochas indicam um evento magmático anterior com idades ca. 1.90 a 1.89 Ga (Santos et al., 2004).

A **Suíte Intrusiva Parauari** representa um expressivo plutonismo na região, com rochas graníticas cálcio-alcálicas de alto potássio, especialmente monzo- e sienogranitos com quartzo monzonitos, tonalitos e monzodioritos subordinados. Sua ocorrência é ampla em toda a PMT, aflorando como corpos alongados com diferentes extensões (Fig. 4(C)).

Esta unidade compõe vários corpos graníticos, *e.g.* Granito Batalha (Juliani et al., 2002), Granito Palito (Echeverri-Misas, 2010), Granito Jardim do Ouro (Lamarão, 2001; Lamarão et al, 2002) dentre outros. Dada a grande variação composicional, os trabalhos do PROMIN-Tapajós (*e.g.* Almeida et al., 2000; Ferreira et al., 2000; Klein e Vasquez, 2000) distinguem corpos da unidade em três “fácies”, termo substituído para “unidades” devido desacordo hierárquico do termo conforme Petri et al. (1986).

Assim, dividem a Suíte Intrusiva Parauari na: (i) Unidade Granodiorítica, de predominância granodiorítica, mas com tonalitos, monzo- e sienogranitos subordinados. Um corpo representativo desta unidade é o Granodiorito Fofquinha; (ii) Unidade Granítica, que ocorre em forma de batólitos de monzo- e sienogranitos, como os granitos Batalha, Palito, Jardim do Ouro, dentre outros, e; (iii) Unidade Granítica com Titanita, que é nomeada como Granito Mangabal (Pessoa et al., 1977), composta por monzogranito com sienogranito e granodiorito subordinados. As idades obtidas para as rochas desta suíte variam de modo geral entre ca. 1,88 a 1,87 Ga (*e.g.* Lamarão et al., 2002; Santos et al., 2000, Vasquez et al., 2000).

A **Suíte Intrusiva Ingarana** (Bahia e Quadros, 2000) representa vários corpos de rochas gabróicas presentes na PMT, geralmente constituindo corpos pequenos dispersos predominantemente na região leste da província, onde concentram-se os estudos deste trabalho. Representam as principais rochas máficas na região, que apresentam idades ca. 1,87 Ga (Santos et al., 2004, 2013; Vasquez et al., 2000).

O maior registro de rochas vulcânicas na PMT é representado pelo **Grupo Iriri**, que compõe o magmatismo Uatumã, comumente considerado como sendo o evento tardi-a pós-orogênico na região. O grupo foi primeiramente descrito por Forman et al. (1972) como formação, e elevado a grupo por Pessoa et al. (1977), ao associar as rochas efusivas e piroclásticas ácidas com as rochas vulcanoclásticas e rochas de composição intermediária em diversas regiões da Amazônia (*e.g.* Bahia e Quadros, 2000; Klein e Vasquez, 2000). Dado o agrupamento de rochas de filiação cálcio-alcálica e alcálica em uma mesma formação, Lamarão et al. (2002) individualizou as rochas efusivas e ignimbríticas de afinidade alcálica na Formação Moraes Almeida.

Com diferentes estudos do vulcanismo Iriri, incongruências na unidade vêm sendo observadas. Foram evidenciados mais de um evento vulcânico associado à unidade (Juliani et al., 2015; Lamarão et al., 1999), inclusive com a identificação de rochas mais antigas associadas erroneamente ao grupo (Semblano et al., 2016; Tokashiki et al., 2014).

Segundo Juliiani et al. (2005) o vulcanismo Iriri pode ter sido iniciado com a **Formação Bom Jardim**, composta por andesitos, latitos e quartzo traquitos com fluxos riolíticos e basálticos e rochas vulcanoclásticas subordinadas (Almeida et al., 2000, Bahia e Quadros, 2000). Estas rochas apresentam natureza cálcio-alcálica de alto potássio. Na sequência de formação das caldeiras vulcânicas na PMT, Juliiani et al. (2005) consideraram essa unidade como representante do vulcanismo pré-caldeira, basal do Grupo Iriri, com idades de ca. 1.899 Ga.

A seguir, sobreposto a Formação Bom Jardim, ocorre a **Formação Salustiano**, definida por rochas vulcânicas e piroclásticas ácidas cálcio-alcálicas de alto potássio representadas por ignimbritos riolíticos e dacíticos e derrames de riolitos e dacitos (Pessoa et al., 1977), que foram associadas a vulcanismo de caldeira (Juliani et al., 2005) com idades U-Pb de ca. 1,87 Ga (Almeida et al., 2000; Bahia e Quadros, 2000; Dall’Agnol et al., 1999; Ferreira et al., 2000). Alterações hidrotermais foram descritas em rochas desta unidade, com diferentes tipos e intensidades (Corrêa-Silva et al., 2002; Juliani et al., 2000, 2005; Nunes, 2001).

A **Formação Aruri** representa o topo do vulcanismo Iriri, sendo composta por depósitos piroclásticos com predomínio de ignimbritos, tufos intercalados com brechas piroclásticas, conglomerados e arenitos vulcanogênicos (Almeida et al., 2000; Bahia e Quadros, 2000; Ferreira et al., 2000; Klein e Vasquez, 2000). São depósitos piroclásticos de fluxo de massa, tração e queda associados a depósitos vulcanoclásticos sin-eruptivos e vulcanogênicos em ambientes fluviais e lacustres nos centros vulcânicos. Um exemplo da constituição desse ambiente vulcanossedimentar é representado na Figura 5 de Roverato et al. (2019), onde pode-se observar as relações dos eventos vulcânicos geneticamente vinculados com a evolução de caldeiras vulcânicas, como a definida por Juliani et al. (2005). Lamarão et al. (1999) obteve idades Pb-Pb de ca. 1,87 Ga para algumas rochas deste evento.

A última suíte intrusiva paleoproterozoica na região da PMT é a **Suíte Intrusiva Maloquinha**, com corpos geralmente arredondados, mas por vezes alongados na direção NW-SE no mapa geológico e comumente intrusivos em rochas da Suíte Parauari. Afloramentos desta unidade são comuns na PMT, mas concentram-se sobretudo na região central e leste da área estudada, em corpos relativamente arredondados ou elípticos e fortemente associados a altos topográficos.

Essa suíte foi primeiramente definida por Santos et al. (1975) como Granito Maloquinha. Pouco depois, Almeida et al. (1977) a definiram como suíte devido à ocorrência de diversos corpos graníticos, os quais foram associados ao magmatismo Uatumã e geneticamente vinculados com as rochas do Grupo Iriri. No entanto, Juliani et al. (2005) argumentaram que essa correlação se mostra petrologicamente imprópria, pois o mesmo magma não poderia gerar os granitos alcalinos desta suíte e as rochas cálcio-alcálicas relacionadas ao Grupo Iriri. Os autores consideraram que o Grupo Iriri é parte do conjunto tardi- a pós-colisional do evento magmático cálcio-alcálico relacionado a Suíte Intrusiva Parauari, relacionado a diferentes estágios da construção dos Arcos

Tapajônicos (Juliani et al., 2013). Correlações possíveis destas rochas alcalinas podem ser com as vulcânicas alcalinas da Formação Moraes de Almeida (Lamarão et al., 2002) e Formação Santa Rosa (Juliani e Fernandes, 2010).

A **Suíte Intrusiva Maloquinha** é composta por diversas rochas graníticas alcalinas como monzogranitos, sienogranitos e quartzo sienitos associados com idades ca. 1,88 Ga (Lamarão et al., 2002, 2008; Vasquez et al., 1999) e 1,87 Ga (Lamarão et al., 2005, Santos et al., 2001). Entretanto, observa-se que rochas cálcio-alcalinas menos diferenciadas petrologicamente, quando afetadas por intensa alteração potássica em sistemas do tipo pórfiro, adquirem cores e características petrográficas semelhantes às dos granitos alcalinos do tipo A e, muitas vezes, estas rochas são cartografadas equivocadamente como parte da Suíte Maloquinha.

Há ainda ocorrências de alguns granitos subalcalinos a alcalinos posteriores ao magmatismo alcalino orosiriano da Suíte Intrusiva Maloquinha, individualizados por Klein e Vasquez (2000). Fazem parte dessas rochas o Granito Porquinho (Bahia et al., 1998), um corpo elíptico na região nordeste da PMT, composta por sienogranitos e monzogranitos que apresentam riebeckita e hastingsita, de idade de ca. 1,78 Ga (Santos et al., 2004). Outro corpo é o Granito Caroçal, originalmente considerado como parte da Suíte Maloquinha por Santos et al. (1975), mas redefinido por Almeida et al. (2000) devido seu caráter cálcio-alcalino de alto potássio. Este corpo granítico é formado por sienogranitos e monzogranitos com idades de ca. 1,87 Ga e 2,68 Ga no núcleo de zircão herdadas de um protólito arqueano com 2,68 Ga.

Roverato et al. (2019) propuseram uma reconstrução paleogeográfica representando o extenso vulcanismo fissural e relacionado a caldeiras que caracteriza o Paleoproterozoico na região sul do Cráton Amazônico (Fig. 5), contexto em que se insere a PMT. Na representação, elevações relacionadas a ignimbritos poderiam facilitar a formação de sedimentos para retrabalhamento, que podem se acumular em depressões tectônicas-vulcânicas, essas mesmas áreas que podem formar lagos intracaldeiras. Magmas ascendentes poderiam formar domos intracaldeiras e centros vulcânicos e vulcanismo fissural seria responsável por derrames e ignimbritos.

Coberturas sedimentares relacionadas a diferentes eventos são observadas na região. Unidades paleoproterozoicas são representadas principalmente pelas formações **Castelo dos Sonhos** e **Novo Progresso**. A primeira representa quartzo-arenitos e conglomerados de milonitização incipiente e metamorfismo de baixo grau, de idade de deposição entre 2,05–2,01 (Klein et al., 2016). A Formação Novo Progresso ocorre na

área de estudo em pequenos corpos a sudeste, composta por arenitos diversos com intercalações de rochas de granulações mais fina. É considerado uma sequência epiclástica com fonte detrítica relacionada ao vulcanismo na PMT e de ambiente deposicional fluvial e lacustre. Apresenta idade máxima de sedimentação de ca. 1,84 Ga (Vasquez et al., 2020).

Coberturas fanerozoicas ocorrem por toda extensão da PMT, especialmente associadas a drenagens em depósitos aluvionares modernos e em paleoterraços e paleocanais. Essas coberturas representam importantes depósitos de ouro, sendo responsáveis por grande parte da produção de ouro de garimpos na região. No mapa geológico da PMT de Vasquez et al. (2020), ocorre a unidade “Cobertura Lateríticas Imaturas”, com ocorrências esparsas na área de estudo, associadas espacialmente às rochas gabróicas da Suíte Ingarana e em meio aos blocos da Suíte Maloquinha, relacionadas a altas topografias.

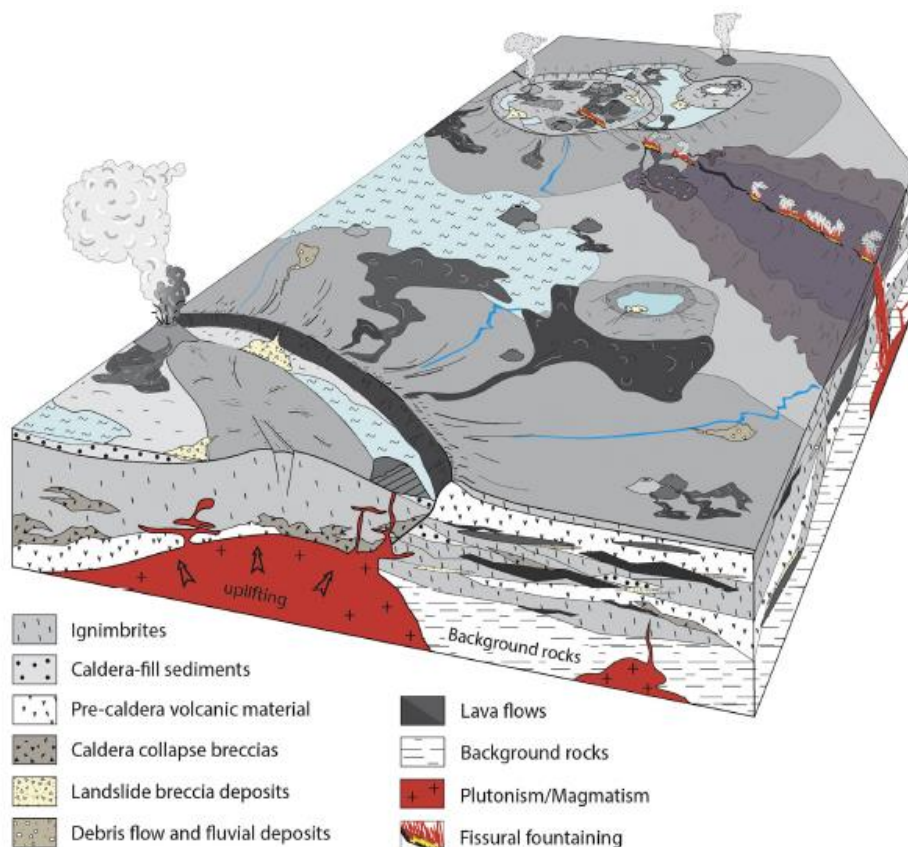


Figura 5 - Reconstrução paleogeográfica do vulcanismo e magmatismo fissural paleoproterozoico na parte sul do Cráton Amazônico (Roverato et al., 2019).

2.1.2.2 Recursos Minerais na Província Mineral do Tapajós

O conhecimento geológico ainda insuficiente, especialmente em estudos de detalhe, aliado a indefinição em relação a evolução tectônica e petrogenética do sul do Cráton Amazônico, dificulta a elaboração de um modelo metalogenético apropriado para as mineralizações da PMT. Entretanto, estudos realizados nas últimas décadas reforçaram o grande potencial da região para depósitos magmáticos-hidrotermais dos tipos epitermal e pórfiro, incluindo polimetálicos. Trabalhos pioneiros definiram mineralizações epitermais *high-sulfidation* em rochas vulcânicas cálcio-alcálinas de ca. 1,88 Ga (Jacobi, 1999; Juliani et al., 2000, 2005; Nunes et al., 2000) e tipo pórfiro (Botelho e Moura, 1998; Juliani et al., 2002, 2005; Moura et al., 2002, 2006). Desde então, variados trabalhos vêm descrevendo mineralizações magmático-hidrotermais na região. Algumas mineralizações serão descritas a seguir, com suas localizações apresentadas na Figura 6.

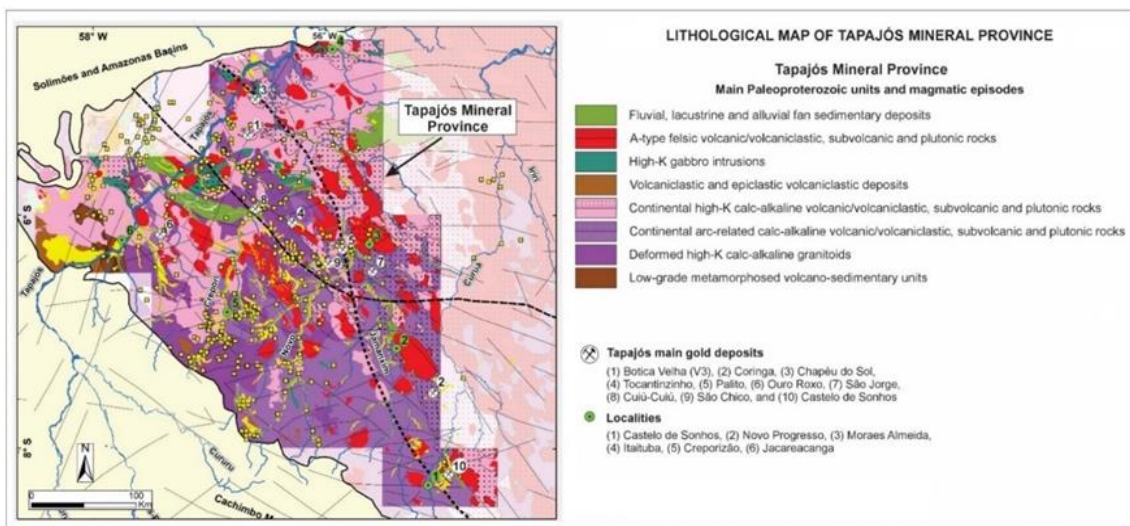


Figura 6 – Mapa da PMT por Vasquez et al. (2020) com marcações dos principais depósitos e ocorrências de ouro. Quadrados amarelos representam ocorrências de ouro, verdes ocorrências de cobre. Linha tracejada menor delimita limite da Província Ventuari-Tapajós (Santos et al., 2000) e linha tracejada maior limite da Província Tapajós-Parima (Tassinari e Macambira, 1999). Modificado de Juliani et al. (2021).

Há diversas descrições de mineralizações epitermais na PMT, incluindo entre elas o depósito Botica Velha (V3), na região norte da PMT, associada a brechas hidrotermais desenvolvidas em sequências vulcânicas e vulcanoclásticas do Grupo Iriri, geneticamente vinculadas com a evolução de caldeiras vulcânicas. É considerado um depósito epitermal *high-sulfidation* típico (Echeverri-Misas, 2015; Jacobi, 1999; Juliani et al., 2005). Idades Ar-Ar resultaram em idade de mineralização em ca. 1,86 Ga (Juliani et al., 2005).

A sul da PMT ocorre o depósito Coringa (Guimarães et al., 2021; Tokashiki, 2015), com diversos veios e *stockworks* mineralizados hospedados em rochas vulcânicas e vulcanoclásticas de ca. 1,97 Ga associadas a domos de riolito. Nos veios ocorrem calcopirita, bornita, esfalerita, galena, pirita e carbonatos, além de adularia, razão pela qual os autores interpretam esse depósito como epitermal *intermediate-sulfidation*, com gradações para *low-sulfidation*.

O depósito Chapéu do Sol, localizado no norte da PMT, é hospedado em rochas vulcânicas e vulcanoclásticas relacionadas a dois intervalos diferentes de formação, com vulcânicas riolíticas e dacíticas de 1,99–1,97 Ga sob ignimbritos, tufos e brechas vulcânicas de ca. 1,88–1,87 Ga (Aguja-Bocanegra, 2013). As mineralizações ocorrem na forma de sulfetos disseminados (pirita, calcopirita, molibdenita e esfalerita) e em *stockworks*, veios e vênulas. A autora associou o depósito polimetálico a um epitermal *low-sulfidation*.

Diversas mineralizações consideradas do tipo pórfiro foram caracterizadas na PMT, incluindo o depósito Tocantzinho, um dos mais estudados da PMT, considerado o maior depósito de ouro da província com reservas indicadas de 49 Mt @ 1,35g/t de ouro em média (Sutherland et al., 2019).

O depósito Tocantzinho é hospedado em sieno- e monzogranitos de idade ca. 1,98 Ga (Borgo et al., 2017) alterados por metassomatismo potássico, seguido de silicificação, cloritização, sericitização e alteração carbonática (Lopes e Moura, 2019; Santiago et al., 2013). A mineralização se associa a zonas de alteração sericítica e ocorre de forma disseminada e em *stockworks*. A idade de mineralização é de 1,86–1,85 Ga (Biondi et al., 2018). Características similares às encontradas em depósitos pórfiros levaram a caracterização deste depósito como de “estilo pórfiro” (Biondi et al., 2018; Lopes e Moura, 2019).

Na porção central da PMT e inserido na área de estudo, ocorre o depósito aurífero do Palito, hospedado em granitos porfiríticos de ca. 1,88 Ga associado a um estágio pós-colisional da Suíte Parauari (Echeverri-Misas, 2010, 2015). As mineralizações associam-se principalmente a veios e *stockworks* mas também ocorrem em sulfetos disseminados em zonas de alteração sericítica. A idade da mineralização pelo método Pb-Pb é de ca. 1,79 (Santos et al., 2013).

Também na região central, ocorre o depósito de São Jorge, hospedado em um granito homônimo que foi dividido por Lamarão et al. (2002) em São Jorge Antigo (ca. 1,98 Ga) e São Jorge Jovem (ca. 1,89 Ga). A mineralização se vincula com o segundo,

sob a forma de veios e vênulas e ocorrem majoritariamente associadas às alterações propilítica e sericítica. Associados ao ouro ocorrem calcopirita, esfalerita, galena e molibdenita (Borges et al., 2009, Lamarão et al., 2002). Borges et al. (2009) consideram que o depósito apresenta atributos relacionáveis a sistemas pórfiro e a *Intrusion Related Gold-System*.

Diversas outras mineralizações foram descritas na PMT, incluem entre elas o Granito Batalha (Juliani et al., 2002), São Chico (Tunningley e Ackroyd, 2012), garimpos do Joel e Davi (Dreher et al., 1998; Gómez-Gutierrez, 2018), Pista e Fofão (Corrêa-Lima e Klein, 2020), Mato Velho (Tokashiki et al., 2015). Bettencourt et al. (2016) e Juliani et al. (2014, 2021) resumem várias das ocorrências e depósitos estudados ao longo das últimas décadas na PMT.

2.2 Fundamentos dos dados aerogeofísicos

Com o objetivo de aprimorar a elaboração de modelos geológicos mais representativos da realidade, os métodos geofísicos podem ser empregados em diversos estudos no campo das geociências, incluindo o mapeamento geológico e estudos estruturais. Nesse contexto, a utilização de dados aerogeofísicos, representam uma valiosa ferramenta que ajudam a superar desafios encontrados em trabalhos de campo em regiões geologicamente complexas e/ou com difícil acesso, como o Cráton Amazônico.

A caracterização e o entendimento da geologia do Cráton Amazônico ainda apresentam lacunas significativas, em grande parte devido desafios encontrados para realização de atividades de campo na região. A densa cobertura vegetal e o clima com fortes chuvas dificultam o acesso a região, além de resultarem em um espesso manto intempérico sobre o substrato geológico, limitando a exposição de afloramentos.

Assim, métodos aerogeofísicos representam um método eficiente para mapeamento, proporcionando dados espaciais contínuos que podem ser estudados em diversas perspectivas e metodologias, com objetivo de caracterizar o ambiente, a geologia, hidrogeologia e potencial mineral de uma região.

Neste trabalho foram utilizados dados de levantamentos aerogeofísicos de gamaespectrometria e magnetometria pertencentes a levantamentos que abrangem áreas superiores a 50.000 km². A abordagem regional foi adotada devido o foco do estudo em extensa área a leste da PMT. Os tópicos a seguir apresentam uma síntese conceitual da metodologia utilizada.

2.2.1 Análise dos dados gamaespectrométricos

Os dados gamaespectrométricos são baseados na monitoração da abundância de radiação de raios gama emitido pelo registro geológico. Essa radiação é gerada pelo contínuo processo de decaimento radioativo que ocorre nas rochas. Os raios gama se originam pela irradiação de energia gerada durante a emissão de partículas alfa ou beta a partir de um núcleo instável em estado excitado.

No processo de decaimento radioativo, ocorrem três principais tipos de radiação: alfa e beta, que são emitidas na forma de partículas, e gama, que é emitida na forma de onda eletromagnética. As ondas gama compreendem um comprimento de onda aproximado de 3×10^{-12} e 3×10^{19} Hz e uma energia entre 0,2 e 3 MeV (Minty, 1997).

A radiação gama é capaz de atravessar cerca de 30 a 45 centímetros na crosta terrestre, porém, pode se propagar por centenas de metros na atmosfera, o que permite sua medição por meio de levantamentos aéreos. Medições gamaespectrométricas também podem ocorrer por meio terrestre e em perfurações na crosta.

Na natureza existem dezenas de isótopos radioativos, no entanto a maioria é de ocorrência rara ou com energia radioativa insuficiente para ser medida. Por isso, convencionou-se o uso de radiação gama emitidos pelo potássio (^{40}K), pelos elementos da série do urânio (^{238}U) e do tório (^{232}Th), que viabilizam os levantamentos por suas concentrações mais elevadas na crosta superior (Telford et al., 1990).

Os espectrômetros modernos são configurados para operar com uma faixa de energia entre 0 e 3 MeV (IAEA, 2003). Essa faixa engloba as quatro principais janelas de energia convencionalmente utilizadas em levantamentos gamaespectrométricos. Essas janelas, que são relativamente amplas, incluem a janela de energia do potássio (K) em torno de 1,46 MeV, a janela de energia dos produtos da série de decaimento radioativo do urânio (eU), aproximadamente 1,7 MeV, e a janela de energia da série do tório (eTh), com valores em média de 2,5 MeV. Além disso, há a janela de contagem total (CT), que fornece uma medida relativa da radioatividade total (Fig. 7) (IAEA, 2003).

As concentrações de urânio e tório são determinadas por meio de suas séries de decaimento, devido ao fato que seus isótopos, ^{238}U e ^{232}Th , não emitirem radiação gama. Assim, a radiação gama é medida a partir dos isótopos filhos da sua série de decaimento, o ^{214}Bi e ^{208}Tl , respectivamente. Por essa razão, as concentrações desses elementos são referenciadas como urânio equivalente (eU) e tório equivalente (eTh). As concentrações desses dois elementos são expressas por parte por milhão (ppm) enquanto o potássio é expresso em porcentagem.

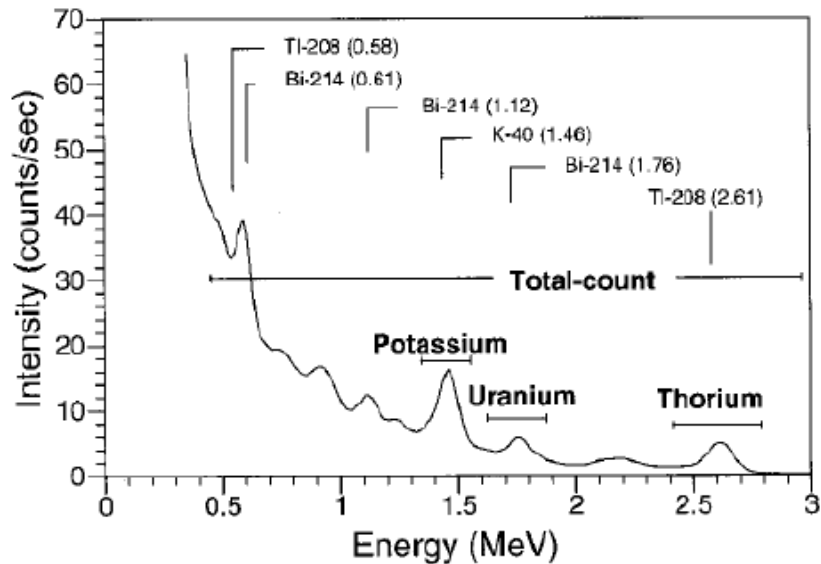


Figura 7 – Espectro típico dos raios gama, medido a 100 m de altitude, indicando as janelas de energia dos radioelementos potássio (K), urânio (eU), tório (eTh) e contagem total (CT) (Minty, 1997).

A distribuição das concentrações de potássio, urânio e tório desempenham papel crucial nos estudos com levantamentos gamaespectrométricos. O conhecimento de seus comportamentos geoquímicos é fundamental para uma interpretação mais precisa dos dados. O uso dos mapas pode contribuir na delimitação de áreas de interesse para a exploração mineral, identificação de anomalias composicionais, caracterização de unidades e fácies litológicas e determinação de contatos de unidades litológicas.

O potássio apresenta somente um isótopo radioativo, o ^{40}K , que é responsável por cerca 98% da emissão de radiação gama de isótopos primários da crosta terrestre (Adams e Gasparini, 1970). Esse elemento químico possui uma abundância média de aproximadamente 2,32% na crosta terrestre (IAEA, 2003) e é encontrado principalmente como feldspatos alcalinos e micas (e.g. muscovita, biotita e flogopita). Esses minerais são comuns em rochas félsicas, especialmente em granitoides, e ocorrem em associação com argilominerais intempéricos, diagenéticos e como produtos de alteração hidrotermal. Essa característica é atribuída à alta mobilidade do potássio, que é facilmente lixiviado e posteriormente adsorvido por argilominerais.

Os minerais de potássio são suscetíveis ao intemperismo, e o potássio liberado pode ser incorporado em outros materiais (Ramos et al., 2010). Altos teores de potássio são comumente observados em áreas com alteração hidrotermal ou com regime pluviométrico elevado, como em climas tropicais. O relevo da região de estudo, incluindo áreas com altimetrias mais elevadas e áreas com cursos de drenagens, também

desempenham um papel relevante na distribuição do potássio. Os produtos gerados pelo intemperismo podem conter maiores teores de potássio, além de, eventualmente, urânio. Esses elementos químicos podem se acumular em solos residuais e depósitos secundários em áreas de topografias mais baixas e em áreas mais próximas às drenagens (Wilford et al., 1997).

O urânio é um metal reativo que ocorre com abundância média na crosta de 2,7 ppm (IAEA, 2003). Os radioisótopos de ocorrência natural são o ^{238}U e ^{235}U sendo o primeiro o mais medido nos levantamentos gamaespectrométricos devido à alta energia e intensidade dos raios gama emitidos pelo seu isótopo sucessor, o ^{214}Bi .

O urânio ocorre nas rochas na forma de óxidos e silicatos em rochas ígneas e metamórficas na forma de minerais acessórios, notadamente zircão, monazita, xenotima, allanita, apatita e titanita (IAEA, 2003). O elemento ganha mobilidade em condições supergênicas, se oxidando para U^{6+} , podendo formar uma grande variedade de minerais com este isótopo em sua composição (Bea, 1999).

O tório representa o elemento menos móvel dos três utilizados nos estudos gamaespectrométricos, mas torna-se mais móvel e sujeito a lixiviação em ambientes com maiores pH. Sua ocorrência natural é na forma do radioisótopo ^{232}Th e seus sucessores ao decair são o ^{208}Pb e ^{208}Tl . O elemento apresenta abundância média na crosta de aproximadamente 10,5 ppm (IAEA, 2003). O tório ocorre de forma livre em óxidos hidróxidos de Fe e Ti e comumente está presente em minerais acessórios, destacando-se principalmente na allanita, monazita e zircão. O tório e o urânio se comportam de forma semelhante devido aos seus raios iônicos próximos, respectivamente de 0,98 Å e 0,95 Å.

O urânio e o tório podem ocorrer na forma de elementos traços em alguns minerais formadores de rocha como feldspatos e piroxênios, representando alguns ppm em sua composição. A substituição pode ocorrer em cátions de tamanho e carga semelhantes, como tório, zircônio, titânio e cálcio (Dentith e Mudge, 2014)

Devido a menor mobilidade do elemento químico, comumente seus minerais são mais estáveis, o que faz com que o elemento se acumule em depósitos secundários de minerais pesados.

De um modo geral quanto maior os teores de sílica na composição de uma rocha ígnea, maiores serão seus teores de potássio, urânio e tório, exceto pelos pegmatitos (Fig. 8, Dickson e Scott, 1997). Sendo assim, espera-se que rochas máficas e ultramáficas apresentem menores concentrações destes elementos se comparado a granitoides e vulcânicas félsicas.

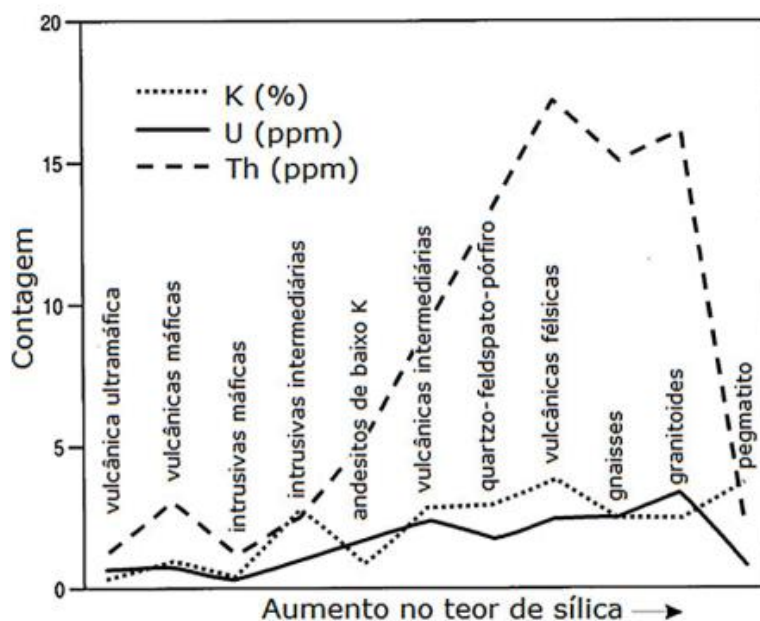


Figura 8 - Variação dos teores médios de K (em %), U e Th (em ppm) nas rochas ígneas em função do teor de sílica em sua composição (Dickson e Scott, 1997).

2.2.2 Análise dos dados magnetométricos

Os levantamentos magnetométricos representam um método efetivo de mapeamento da intensidade do campo magnético terrestre. O magnetismo gerado pelas rochas provoca anomalias no campo magnético terrestre e sua intensidade varia conforme a composição mineral da rocha, sua intensidade é diretamente relacionada a quantidade de minerais magnéticos. Adicionalmente, os minerais magnéticos, podem ser primários ou secundários, o que permite a identificação de alguns processos geológicos posteriores à formação, como as alterações hidrotermais que comumente se associam a depósitos minerais.

Os materiais que podem sofrer magnetização são classificados em três grupos conforme suas propriedades de susceptibilidade magnética, podem ser diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.

Os materiais diamagnéticos têm sua magnetização desenvolvida em sentido contrário ao campo magnético e possuem susceptibilidades baixas a negativas. Minerais como quartzo, calcita e grafita fazem parte desse grupo. Minerais paramagnéticos tem sua magnetização na mesma direção do campo magnético e contam com susceptibilidade magnética baixa, mas positiva. Dentre minerais que compõe o grupo se encontram minerais máficos como olivina, piroxênio, anfibólio e biotita. Por fim, minerais ferromagnéticos são os que contam com alta susceptibilidade magnética, relacionada a

metais como o ferro, níquel e cobalto. Minerais desse grupo são os que apresentam maior magnetismo e são grandes responsáveis pela magnetização das rochas. Dentre estes estão magnetita, hematita e ilmenita.

Os materiais ferromagnéticos mantêm o momento magnético cessada a influência do campo magnético externo, o que se define como magnetização remanente, característica não observada nos outros dois grupos. Essa magnetização está relacionada à formação do material e pode ser desenvolvida por processos geológicos que afetam as rochas e sua direção está relacionada à do campo magnético terrestre no momento de sua formação.

Os dados magnéticos adquiridos nos levantamentos aerogeofísicos são uma função da magnetização induzida, relacionada a magnetização produzida pela ação do campo magnético terrestre com a magnetização remanente que permanece no material após a retirada do campo magnético. Essa soma vetorial representa a magnetização total (Equação 1)

$$\vec{M}_t = \vec{M}_i + \vec{M}_r \quad (\text{Equação 1})$$

Diversos parâmetros influenciam a forma e a magnitude das anomalias magnéticas resultantes do campo magnético anômalo. Esses parâmetros incluem a orientação, a forma e a atitude dos corpos de rochas hospedeiras dos minerais magnéticos, bem como a inclinação magnética da região. No processamento dos dados magnetométricos, a aplicação de diversos processos de correção de erros e filtragens podem acentuar ou suavizar determinadas anomalias magnéticas.

2.3 Modelagem litológica preditiva por método *Self-Organizing Maps*

Os processos geológicos constituem um sistema complexo com interações espaciais que variam da escala da composição isotópica de minerais até escala planetária. Estes processos têm, muito comumente, duração de centenas de milhares a milhões de anos, ou seja, se relacionam com a evolução da Terra e até mesmo do sistema solar.

O estudo desses sistemas geológicos tem gerado volume de dados físicos, químicos e geológicos variados cada vez maior, que trazem à luz um crescente desafio para a análise integrada e identificação de variáveis e conexões menos evidentes.

Nesse sentido, as técnicas de Inteligência Artificial, como o *Machine Learning*, ou Aprendizado de Máquina, tem se mostrado muito eficientes em estudos de geociências que integram dados diversos, tais como dados geofísicos, de sensoriamentos remotos, litológicos, litoquímicos, mineralógicos, estruturais etc., resultando em interpretações muitas vezes inovadoras ou de valia no aprimoramento de modelos já estabelecidos. Muito embora o uso de algoritmos em pesquisas geocientíficas exista há décadas (*e.g.* Dai e MacBeth, 1995; Dowla et al., 1990), sua utilização tem se expandido nos últimos anos, devido aos custos mais acessíveis de equipamentos e ao intenso desenvolvimento de métodos e algoritmos.

Os algoritmos de *Machine Learning* desempenham um papel fundamental na otimização do reconhecimento e classificação de características de dados geológicos, em especial quando há disponibilidade de bancos de dados robustos e complexos. Para realizar essa tarefa, os algoritmos podem ser divididos essencialmente em dois grupos: supervisionados e não supervisionados. Os algoritmos supervisionados requerem treinamento com exemplos conhecidos e previamente classificados, a fim de reconhecer características previamente indicadas ao lidar com os dados. Por outro lado, os métodos não supervisionados identificam tendências e estruturas com base nos parâmetros e características dos dados presentes no banco de dados. O uso de métodos não supervisionados é especialmente oportuno quando há pouca ou nenhuma “rotulação” disponível no conjunto de dados e se deseja gerar uma visualização ou agrupamento deles.

São várias as áreas e aplicações em que o *Machine Learning* é utilizado nas geociências. Essas aplicações incluem o mapeamento geológico, tanto por métodos supervisionados (*e.g.* Cracknell et al., 2014; Dunham et al., 2023; Kuhn et al., 2018, 2019), quanto métodos não supervisionados (*e.g.* Carneiro et al., 2012; Carter-McAuslan e Farquharson, 2021, Wu et al., 2021). Outros exemplos são a detecção e alerta de terremotos (*e.g.* Kong et al., 2016; Reddy e Nair, 2013), classificação de sismos (*e.g.* Köhler et al., 2010; Sick et al., 2015; Titos et al., 2018), classificação de cinzas vulcânicas (Shoji et al., 2018), dentre outros.

Neste estudo, optou-se por utilizar o método de *Self-Organizing Maps*, ou Mapas Auto-organizáveis (Kohonen, 1982, 2001, 2013), que representa um método não supervisionado amplamente utilizado em várias áreas para classificação, agrupamento ou clusterização de dados. Embora não numerosos, há diferentes exemplos de trabalhos que utilizaram a técnica de SOM para a criação de mapas geológicos preditivos como

Carneiro et al. (2012), Cracknell e Reading (2014) e Carter-McAuslan e Farquharson (2021).

A escolha desse método para desenvolvimento do estudo teve como objetivo a classificação dos dados aerogeofísicos de forma autônoma, evitando vieses por parte do autor e utilizando parâmetros relevantes para avaliação de semelhanças e diferenças entre as unidades através de seus agrupamentos. A utilização de um método não supervisionado é justificada pelo reconhecimento de que tanto o mapa geológico de Vasquez et al. (2020), quanto os mapas elaborados neste estudo podem apresentar vieses ou influências por parte de seus respectivos autores, tanto na elaboração quanto na interpretação. Essa característica fica evidente, por exemplo, em área do mapa geológico onde são delimitadas unidades geológicas em áreas sem levantamento de campo que não são justificáveis nos diversos mapas geofísicos interpretados neste trabalho, ou nas unidades litogeofísicas delimitadas com base em interpretação visual pelo autor deste estudo.

2.3.1 Fundamentos do *Self-Organizing Maps*

O *Self-Organizing Maps* (SOM), constitui uma técnica de análise multivariada capaz de analisar, visualizar e interpretar dados espaciais em redes neurais artificiais de forma não supervisionada (Kohonen, 1982, 2001, 2013). A análise SOM reduz a dimensionalidade dos dados, sendo capaz de converter bancos de dados robustos, complexos e não-lineares em uma visualização em duas dimensões a partir de um conjunto de n dimensões, além de promover o agrupamento dos dados com excelente visualização das relações entre as variáveis empregadas na análise (Agarwal e Skupin, 2008). O emprego desse método visar diferentes objetivos, incluindo como método preditivo, de estimação, de clusterização e classificação, como ferramenta para redução de ruídos e reconhecimento de padrões no banco de dados (Fraser e Dickson, 2007).

O SOM é uma técnica baseada na quantificação vetorial e medidas do vetor similaridade (Fig. 25), convertendo relações estatísticas não-lineares em um algoritmo de fácil compreensão a partir de um aprendizado competitivo, ou seja, onde os dados competem entre si por meio de interações laterais múltiplas, gerando agrupamentos chamados de *clusters*. O método também proporciona uma visualização das relações entre os dados, ainda que sutis, de forma uni- ou bidimensional (Kohonen, 1982, 2001, 2013).

Com esta técnica, cada amostra é considerada um vetor n -dimensional em um espaço amostral definido pelas variáveis da amostra. Neste espaço n -dimensional (Fig. 9(A)), os dados definidos pelas amostras iniciais são lançados aleatoriamente a partir de

um número definido de *seed-vectors* (Fig. 9(B)) que serão treinados para representar a estrutura e os padrões das amostras iniciais utilizadas na análise.

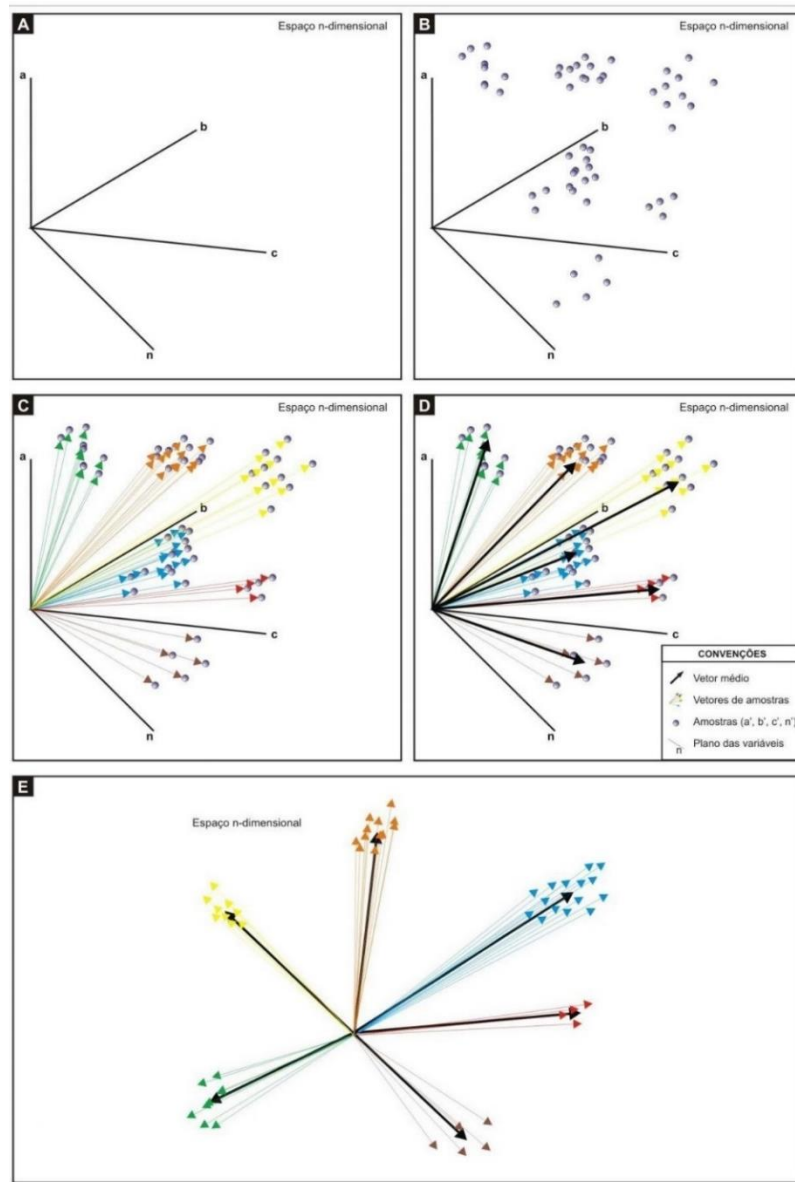


Figura 9 - Síntese da vetorização de dados no espaço n-dimensional que ocorre no ambiente SOM. (A) Representação do espaço n-dimensional, (B) *seed-vectors* implantados de forma aleatória no espaço n-dimensional, (C) comparação de amostras iniciais com os *seed-vectors* de um raio da amostra, (D) um *seed-vector* é definido a partir de sua maior similaridade e (E) os outros *seed-vectors* no raio do primeiro selecionado se modificam de forma a se assemelhar a amostra inicial e se transformam nos *node-vectors*. Modificado de Carneiro (2010).

Inicialmente, há um processo interativo entre os dados, chamado de etapa competitiva, onde cada amostra original é comparada com todos os *seed-vectors* presentes dentro de um dado raio de distância (Fig. 9(C)). Um *seed-vector* deste raio será

determinado como vencedor pela sua maior semelhança com a amostra inicial. A etapa seguinte, chamada de etapa cooperativa, os *seed-vectors* vencedores são modificados para que suas propriedades se assemelhem às propriedades dos dados de entrada mais próximos (Fig. 9(D)). Além disso, os *seed-vectors* inseridos no raio do vencedor também são modificados de forma que suas propriedades se assemelhem às dos dados de entrada (Fig. 9(E)). Esses dois passos poderão ser repetidos centenas a milhares de vezes para cada unidade amostral (Fraser e Dickson, 2007).

Os vetores resultantes dessas duas etapas, treinados para representar de forma mais semelhante possível as amostras iniciais, são denominados vetores-neurônios ou *node-vectors*, ou ainda, *Best Matching Unit* (BMU).

2.3.2 Produtos do *Self-Organizing Maps*

Após o treino dos *seed-vectors* e a implementação dos *node-vectors*, todas as amostras são representadas em um mapa 2D, gerado a partir de uma regressão para transformação do espaço n -dimensional em um espaço bidimensional, mantendo suas relações topológicas, ou seja, mantendo as relações de proximidade entre *node-vectors* mesmo no espaço 2D.

Nos mapas auto-organizáveis, as amostras são representadas por neurônios que podem ser agrupados, formando os *clusters*. Há diferentes representações possíveis dos mapas auto-organizáveis, incluindo a matriz de distância unificada, ou Matriz-U (*U-Matrix*, Ultsch e Vetter, 1994) e os mapas de parcelas componentes, ou *Component Plots*.

O mapa Matriz-U é elaborado a partir da distância euclidiana no espaço vetorial entre os *node-vectors* adjacentes e tem como objetivo a visualização das relações topológicas entre os neurônios. As representações Matriz-U costumam usar uma escala de cor-temperatura, com cores frias (azuis) representando neurônios adjacentes com maior similaridade e cores quentes (vermelhas) representando as maiores distâncias euclidianas entre os neurônios, ou seja, neurônios com maior dissimilaridade.

Os mapas *Component Plots*, ou Parcelas Componentes, representam um outro modo de visualização dos neurônios resultantes do processamento por meio da técnica SOM. Essa representação visa mostrar a contribuição de cada variável para cada neurônio, isso se torna possível pois cada neurônio é um vetor individual no espaço amostral que foi definido pelas variáveis iniciais. Esses mapas também utilizam da escala de cor-temperatura, onde tons frios (azuis) representam baixos valores e tons quentes (vermelhos) representam altos valores.

3. MATÉRIAS E MÉTODOS

3.1 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica foi efetuada por meio da compilação de artigos e teses com uso do acervo da biblioteca do IGC-USP e dos sistemas de busca de dados fornecidos pelo Sistema Integrado de Bibliotecas da USP (SIBi/USP) com base de dados SciELO, *Web of Science*, Portal CAPES e outros.

Os artigos, teses e outras publicações de caráter científico abordam temas relacionados a: (i) geologia regional e local, com enfoque no Cráton Amazônico e Província Mineral do Tapajós, (ii) estudos baseados em métodos indiretos de mapeamento e sensoriamento remoto, estudos como esses são limitados na região então a compilação abrangeu estudos de metodologia semelhante aplicados a outras regiões, (iii) publicações sobre *Machine Learning*, especialmente focados na técnica de *Self-Organizing Maps* e, (iv) estudos focados no uso de *Self-Organizing Maps* como método de mapeamento preditivo litológico, especialmente a partir de dados geofísicos.

3.2 Aquisição de dados aerogeofísicos

O estudo foi realizado a partir do processamento e interpretação de dados aerogeofísicos disponibilizados gratuitamente na plataforma GEOSBG do Serviço Geológico do Brasil (SBG/CPRM). Os projetos que integram os dados utilizados neste estudo são descritos nos itens a seguir.

3.2.1 Projeto Aerogeofísico Itaituba

O levantamento aerogeofísico 1082 – *Projeto Aerogeofísico Itaituba*, foi realizado como parte do projeto “Cartografia da Amazônia” vinculado com o programa “Geologia do Brasil” desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil (SBG/CPRM). A aquisição dos dados foi feita de 16/07/2008 a 14/09/2009 pela empresa LASA Engenharia e Prospecções S/A. O desenvolvimento deste levantamento abrangeu área total de 51.967 km² no estado do Pará e do Amazonas, com levantamento de 111.891 km de perfis com os métodos magnetométricos e gamaespectrométricos.

Para efetuar a cobertura da região foram feitas 561 linhas de voo de direção N-S e com espaçamento de 500 metros e 26 linhas de controle, de direção E-W, com espaçamento de 10 km. A Tabela 1 apresenta os parâmetros que norteiam o levantamento.

Tabela 1 – Características do levantamento 1082 – Projeto Aerogeofísico Itaituba.

Direção das linhas de produção	N-S
Espaçamento entre as linhas de produção	500 m
Direção das linhas de controle	E-W
Espaçamento entre as linhas de controle	10 km
Intervalo entre medições geofísicas consecutivas	0,1 s (magnetômetro) e 1,0 s (espectrômetro)
Altura média do voo	100 m
Velocidade aproximada do voo	276 km/h

3.2.2 Projeto Aerogeofísico Rio Curuá

O levantamento aerogeofísico 1130 – *Projeto Aerogeofísico Rio Curuá*, também parte do projeto “Cartografia da Amazônia”.

A aquisição dos dados ocorreu de 17/01/2014 a 01/08/2015 pela empresa Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda. O levantamento abrangeu área aproximada de 80.050 km², recoberta por 168.171 km de perfis pelos métodos magnetométricos e gamaespectrométricos.

Foram levantadas 561 linhas de voo de direção N-S com espaçamento de 500 metros e 43 linhas de controle de direção E-W com espaçamento de 10 km. Vale observar que dentro deste levantamento existe uma área chamada de “Área *Infill*” com 5.096 km² na qual foram intercaladas linhas de espaçamento de 250 metros para linhas de voo e espaçamento de 5 km para linhas de controle.

Os parâmetros que norteiam o levantamento são descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Características do levantamento 1130 – Projeto Aerogeofísico Rio Curuá.

Direção das linhas de produção	N-S
Espaçamento entre as linhas de produção	250 e 500 m
Direção das linhas de controle	E-W
Espaçamento entre as linhas de controle	5 e 10 km
Intervalo entre medições geofísicas consecutivas	0,1s (magnetômetro) e 1,0s (espectrômetro)
Altura média do voo	100 m
Velocidade aproximada do voo	270 km/h

3.2.3 Projeto Aerogeofísico Cachoeira Curuá

O levantamento aerogeofísico 1134 – *Projeto Aerogeofísico Cachoeira Curuá*, de modo análogo aos anteriores, foi realizado como parte do projeto “Cartografia da Amazônia”. A aquisição dos dados foi feita no período de 18/07/2015 a 04/08/2016 pela empresa LASA Prospecções S/A. Originalmente o projeto pretendia abranger uma área de 88.788 km², cobrindo um total de 186.474 km de perfis no estado do Pará. Por motivos de conflitos em áreas indígenas, apenas cerca de 34,5% do projeto foi concluído, totalizando cerca de 64.282 km de perfis por métodos magnetométricos e gamaespectrométricos.

Para efetuar a cobertura da região foram feitas 380 linhas de voo de direção N-S e espaçamento de 500 metros e 22 linhas de controle de direção E-W e espaçamento de 10 km. Os parâmetros que norteiam o levantamento são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Características do levantamento 1130 – Projeto Aerogeofísico Cachoeira Curuá.

Direção das linhas de produção	N-S
Espaçamento entre as linhas de produção	500 m
Direção das linhas de controle	E-W
Espaçamento entre as linhas de controle	10 km
Intervalo entre medições geofísicas consecutivas	0,1 s (magnetômetro) e 1,0 s (espectrômetro)
Altura média do voo	100 m
Velocidade aproximada do voo	270 km/h

3.3 Processamento de dados aerogeofísicos

O processamento dos dados aerogeofísicos ocorreu em duas fases. A primeira foi a conversão dos arquivos em formato XYZ dos levantamentos aerogeofísicos para o formato de banco de dados Geosoft (GDB), com uso do *software* Geosoft Oasis Montaj. Esses dados foram interpolados para geração de malhas regulares em células de 100 metros, por meio do método de Interpolação de Curvatura Mínima (Briggs, 1974), o equivalente a um quinto do espaçamento entre as linhas de voo.

As malhas geradas passaram pela aplicação de diferentes filtragens e, por fim, foram exportadas para o ArcMap, onde foram transformados em mapas e edições finais ocorreram a fim de adicionar elementos de identificação como legendas e escalas.

3.3.1 Técnicas utilizadas nos dados de gamaespectrometria

O processamento das malhas regulares dos dados de gamaespectrometria geraram ao todo dez mapas. Três mapas de contagem de elementos foram elaborados (Fig. 10(A-C)), sendo eles: (A) concentração de potássio (K), expresso em %; (B) concentração de urânio equivalente (eU), expresso em ppm; (C) concentração de tório equivalente (eTh), expresso em ppm. A Figura 10 ainda conta com a taxa de exposição do canal de Contagem Total (CT) (Fig. 10(D)), que é a medida de toda a radiação gama dentro da janela energética estimada de 0,41 a 2,81 MeV e com o Modelo Digital de Terreno (MDT) (Fig. 10(E)), expresso em metros, que representa a altimetria do solo, desconsiderando outros elementos acima do relevo como as árvores ou construções, por exemplo.

A partir dos mapas de contagem de elementos tornou-se possível a produção de mapas de razões de elementos (Fig. 11). Esses mapas são úteis para visualização da diferença entre as concentrações de elementos na região de estudo, acentuando o enriquecimento e o empobrecimento entre os elementos. A visualização de corpos com concentrações distintas de radioelementos podem apontar influência de diferentes processos como diferenciação magmática, anomalias composicionais geradas por meio de processos hidrotermais ou lixiviação de elementos causado por intemperismo.

Devido à baixa mobilidade geoquímica do tório, suas razões se mostram úteis para distinção de áreas com concentrações anômalas de potássio e urânio em uma unidade geológica (Ribeiro et al., 2014). Desta forma, os mapas K/eTh são úteis para identificar anomalias relacionadas a intemperismo, diagênese e zonas de alteração hidrotermal, devido à alta mobilidade do potássio.

Altas concentrações de potássio podem indicar intrusões geoquimicamente diferenciadas ou metassomatismo potássico associado a diversos sistemas minerais. Por outro lado, sua depleção pode indicar presença de rochas mais primitivas ou zonas de alteração hidrotermal sódico-cálcica, albitização, cloritização, pirofilitização ou caolinitização, por exemplo.

Concentrações anômalas no mapa eU/eTh são comumente consideradas como resultado de metamorfismo de contato e diferenciação de suítes graníticas. Por fim, o mapa eU/K relaciona-se a processos intempéricos e diagenéticos.

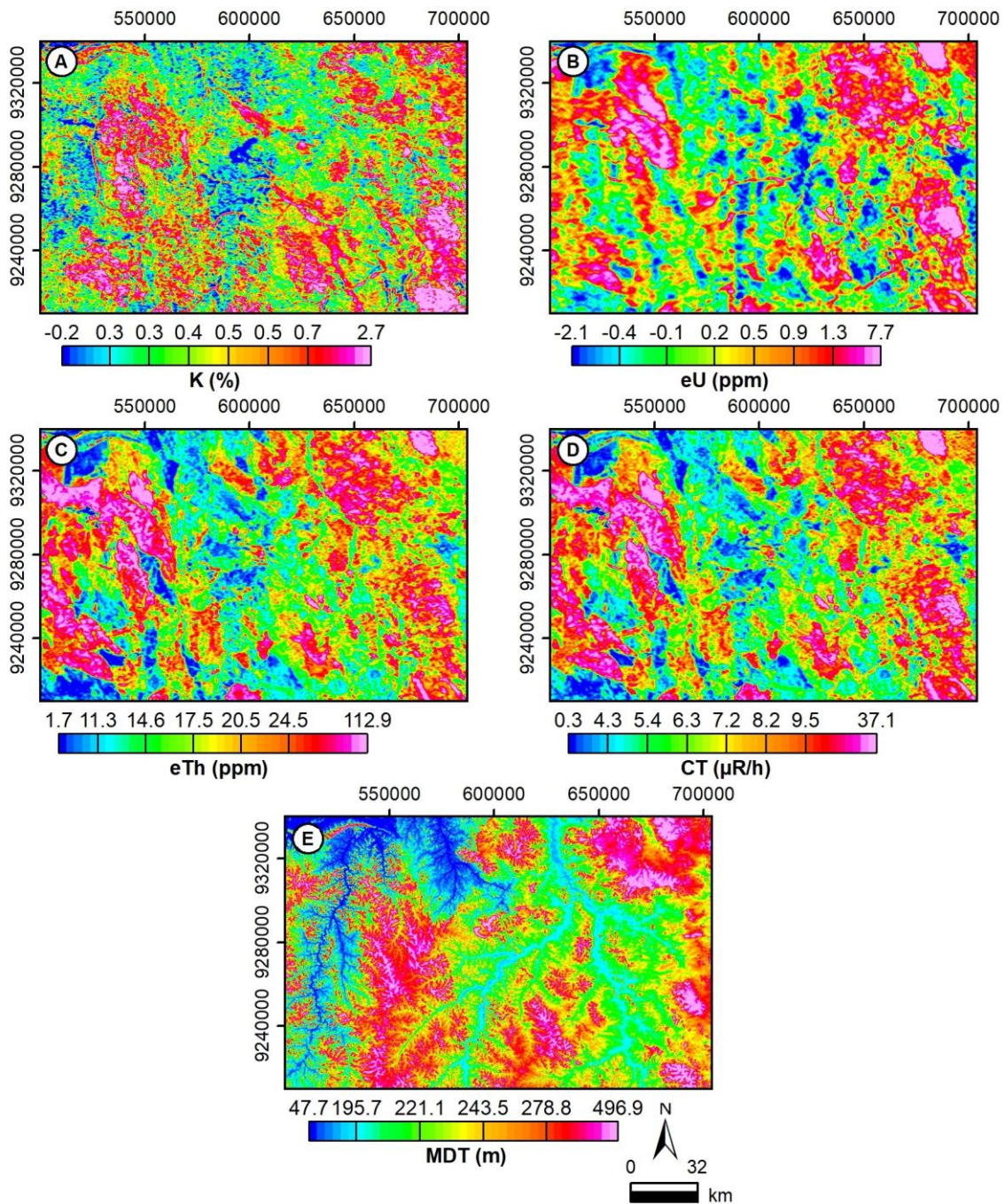


Figura 10 - Mapa gamaespectrométrico de contagem de elementos de (A) Potássio (K), (B) Urânio equivalente (eU), (C) Tório equivalente (eTh) e mapas de (D) Contagem total (CT) e (D) Mapa de Modelo Digital de Terreno (MDT).

Neste estudo foram elaborados os mapas de razão K/eTh , eU/eTh , eU/K e o mapa de Fator F (Fig. 11(A-D)) (FF, Efimov, 1978; Gnojek e Prichystal, 1985). O último representa uma técnica baseada em uma equação (Equação 2) que realça os maiores valores de potássio e urânio em relação ao tório, com objetivo de apontar possível lixiviação de radioelementos em zonas afetadas por alteração hidrotermal ou intemperismo.

$$F = \frac{K}{eTh/eU} = \frac{K \cdot eU}{eTh} \quad (\text{Equação 2})$$

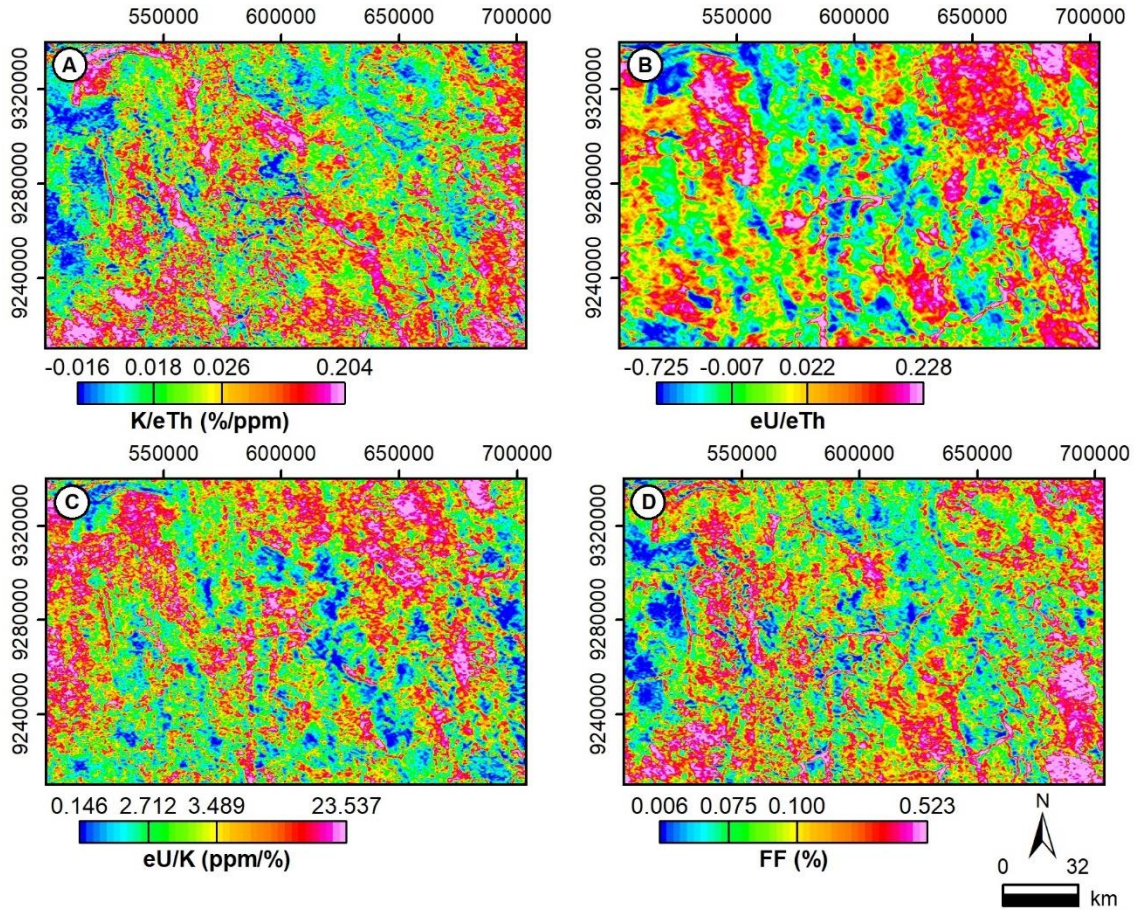


Figura 11 - Mapas de razão de elementos sendo (A) K/eTh, (B) eU/eTh, (C) eU/K e (D) Fator F (FF, Efimov, 1978; Gnojek e Prichystal, 1985).

Por fim, foi gerado o mapa ternário (Fig. 12), que representa a concentração relativa de K, eU e eTh, associando uma cor da escala RGB a cada elemento. O vermelho representa o K, o verde a concentração de eTh e o azul a concentração de eU. A gradação de determinada cor equivale a maiores teores do elemento que ela representa em detrimento dos outros dois elementos no espaço onde ela se encontra. Coloração branca representa altos valores proporcionais dos três elementos enquanto a cor preta se relaciona a baixos teores dos três elementos.

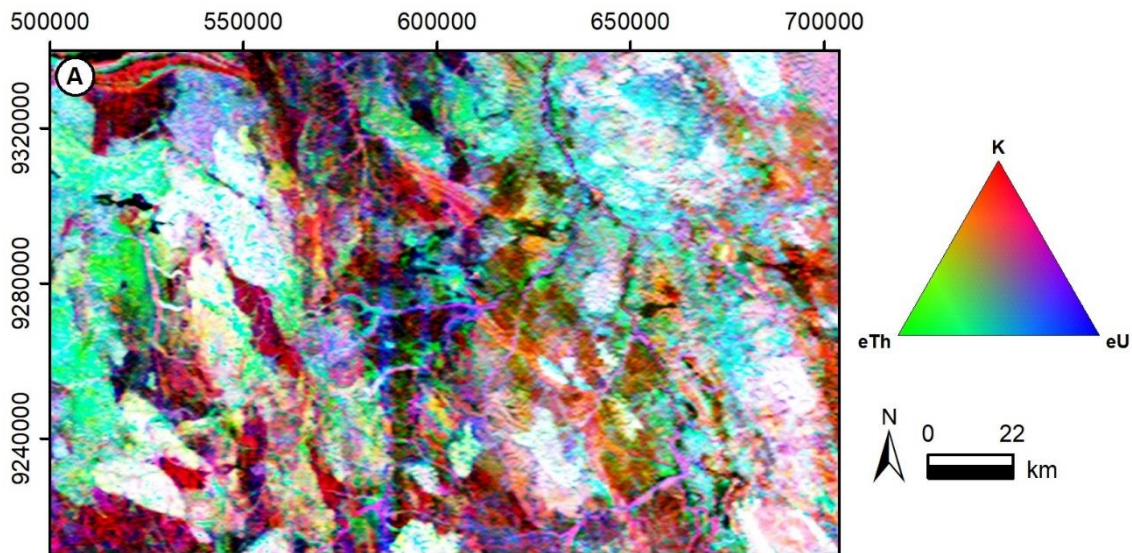


Figura 12 - Mapa radiométricos ternário RGB de K, eU e eTh da região de estudo no leste da PMT. Obtido a partir da associação dos mapas de contagem de elementos (Fig. 10 (A-C)).

3.3.2 Técnicas utilizadas nos dados magnetométricos

A partir dos levantamentos magnetométricos, primeiramente, gerou-se um mapa de Campo Magnético Anômalo (CMA), a partir da correção de erros e da remoção do IGRF, que visa destacar a heterogeneidade magnética da região de pesquisa.

A aplicação de filtros nas malhas de levantamentos magnetométricos fez-se necessária a fim de destacar as anomalias magnéticas. Inicialmente, visa separar a influência de fontes profundas, aprimorando a visualização de anomalias superficiais. Para isso, foram utilizados os filtros *Butterworth* e *Directional Cossine*, realizando a separação regional-residual.

O primeiro mapa elaborado foi o de Amplitude do Sinal Analítico (ASA, Fig. 13). O filtro, proposto por Nabighian (1972), é calculado a partir de uma expressão baseada nas derivadas horizontais e na derivada vertical do campo potencial (Equação 3), resultando em um realce na assinatura magnética dos corpos, independentemente do campo magnético da Terra ou das direções magnéticas da fonte (Blum, 1999), permitindo uma interpretação com maior detalhe da geometria das anomalias magnéticas.

$$ASA = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} \quad (\text{Equação 3})$$

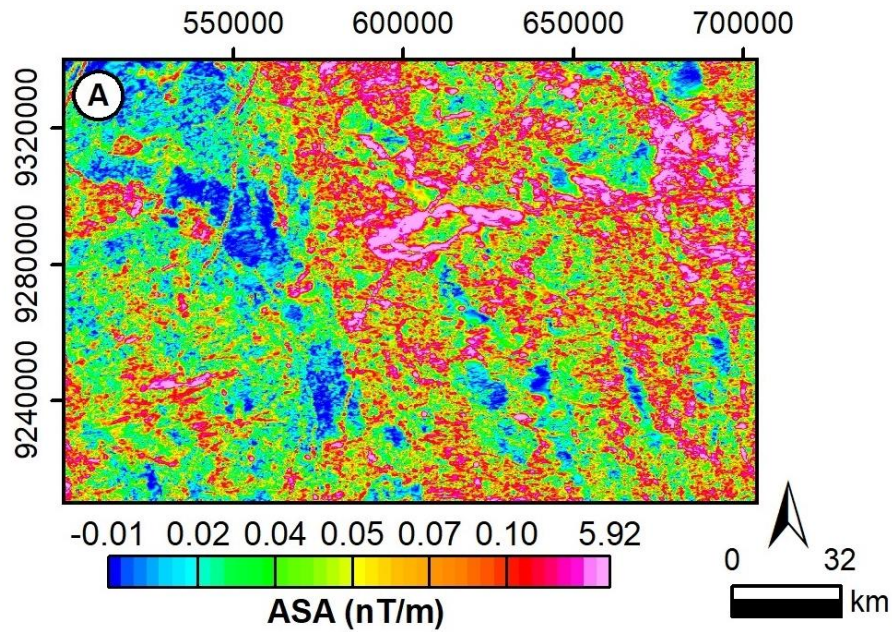


Figura 13 - Mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) da região de estudo.

Outra técnica empregada no estudo foi o *Tilt Angle*, ou Inclinação do Sinal Analítico (Fig. 14, Miller e Singh, 1994). Essa filtragem visa uma maior distinção dos lineamentos magnéticos a partir do contraste local de magnetização. O *Tilt Angle* é calculado segundo a Equação 4 que estima o mergulho da fonte geradora da anomalia magnética, obtendo assim o contraste local de susceptibilidade magnética.

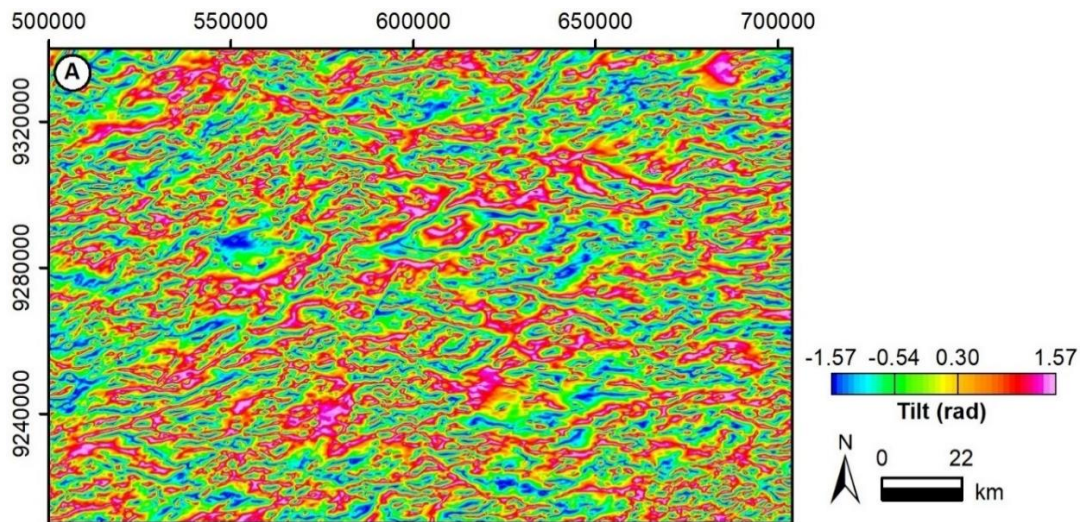


Figura 14 - Mapa *Tilt Angle* no nível superficial da região de estudo.

$$Tilt = \arctan \left(\frac{dz^2}{\sqrt{dx^2 + dy^2}} \right) \quad (\text{Equação 4})$$

Após a separação regional-residual e a utilização dos filtros de ASA e *Tilt Angle*, foi aplicado o filtro *Upward Continuation* (UC). Este filtro visa manter as anomalias de comprimento de onda longos, comumente associados a estruturas profundas, enquanto atenua as anomalias de menores comprimentos de onda, relacionadas às estruturas mais superficiais (Gabtni e Jollouli, 2017). Essa técnica permite o ajuste do nível de profundidade, possibilitando o estudo de estruturas em diferentes níveis crustais e interpretações das relações de estruturas em diferentes profundidades de uma região.

Foi dada preferência à utilização da técnica de *Upward Continuation* no mapa de *Tilt Angle* (Fig. 15(B-D)) para avaliação de estruturas nos níveis a 500, 1000 e 2000 metros de profundidade, atenuando assim anomalias mais superficiais e ressaltando as mais profundas.

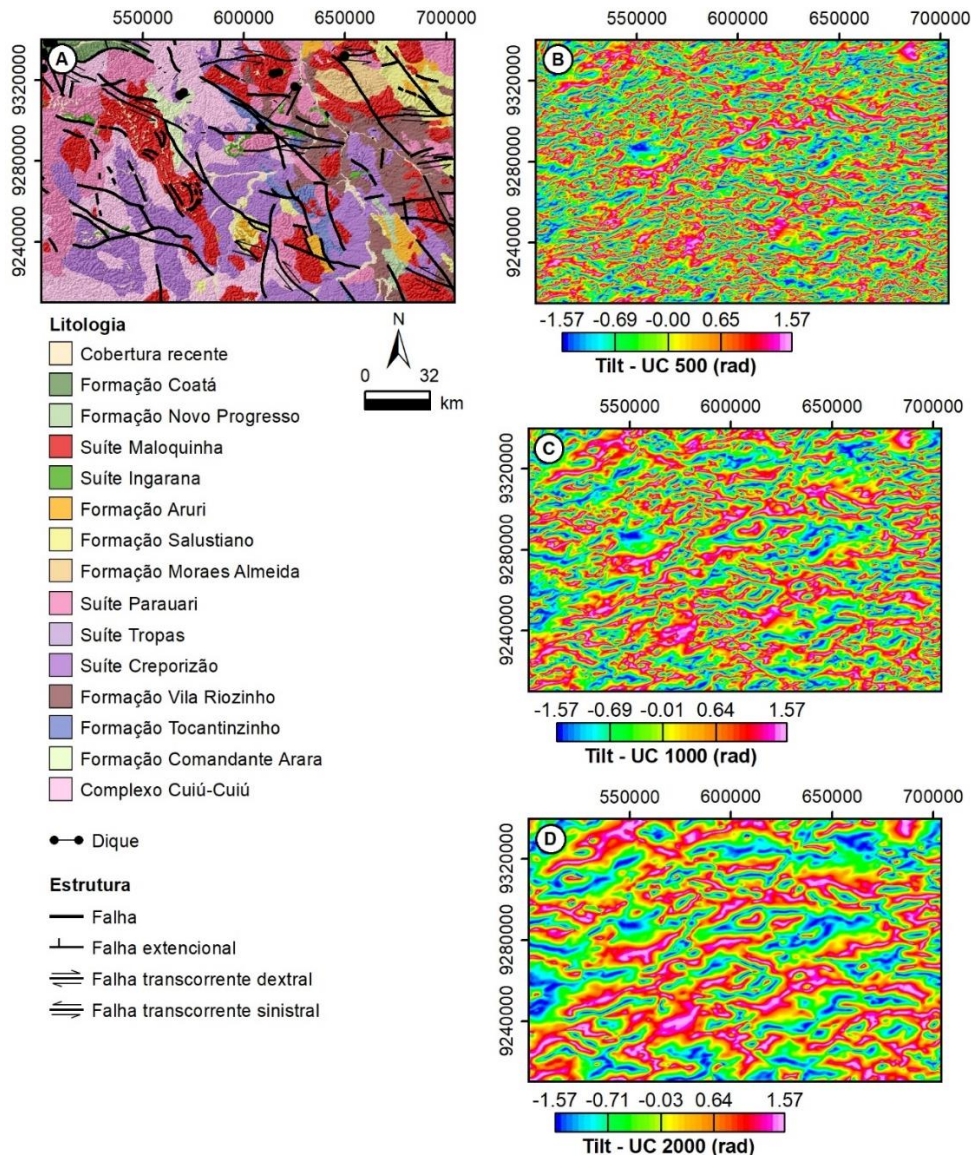


Figura 15 - (A) Recorte da área de estudo no mapa geológico (Vasquez et al., 2020) e os mapas *Tilt Angle* com aplicação do UC nos níveis de 500 metros (B), 1000 metros (C) e 2000 metros (D) de profundidade.

3.4 Produção de mapas por método dirigidos pelos dados

Visando a geração de um modelo geológico a partir do banco de dados obtido na etapa anterior, optou-se pela geração de um mapa litológico preditivo por meio do uso de *Machine Learning* com a técnica não supervisionada *Self-Organizing Maps* (Kohonen, 1982, 2001, 2013). O uso de técnicas de aprendizado de máquina não supervisionado permite a análise de uma grande quantidade de dados não uniformes de forma rápida e a possibilidade do realce de nuances e feições sutis que poderiam passar despercebidas em um processamento manual dos dados. A ausência de vieses na parametrização dos dados é outra característica importante, já que os dados são agrupados a partir de semelhanças e diferenças percebidas pelo próprio algoritmo no ambiente SOM.

A análise em ambiente SOM se deu em colaboração com o laboratório InTRA (*Integrated Technology for Rock and Fluid Analysis*) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Campus Baixada Santista, a partir do algoritmo IntraSOM (de Gouvêa et al., 2023), baseado na técnica de *Self-Organizing Maps* (Kohonen, 1982, 2001, 2013). Os parâmetros utilizados para o treinamento no ambiente SOM e elaboração do mapa litológico preditivo são descritos no próximo item.

3.4.1 Parâmetros do treinamento em ambiente SOM

Para a realização do processamento foram escolhidas seis variáveis obtidas a partir do processamento dos levantamentos aerogeofísicos que são considerados relevantes para a identificação e correlação das unidades geológicas na área de estudo. São elas, respectivamente: (a) abundância de potássio (K), em porcentagem; (b) de urânio equivalente (eU), em ppm; (c) de tório equivalente (eTh), em ppm; (d) da contagem total (CT); (e) do gradiente magnetométrico realçado pela Amplitude do Sinal Analítico (ASA) do campo magnético anômalo (nT/m) e; (f) do modelo digital de terreno (MDT), com altitude em metros.

Para obtenção das variáveis, as imagens foram transformadas em formato vetorial, onde os *pixels* são substituídos por pontos, mantendo suas coordenadas espaciais. Cada ponto, que representa um *pixel*, tem associado um valor referente a cada variável, considerado o atributo a ser analisado no ambiente SOM. A base de dados deste estudo contou com 2.658.783 amostras.

Os parâmetros de configuração do SOM utilizados no estudo foram os seguintes: (i) espaço de dados com inicialização randômica; (ii) formato de visualização em grade hexagonal, onde homogeneização é melhor devido ter mais vizinhos que a grade

retangular; (iii) polígono de treinamento para a projeção dos neurônios foi uma superfície de hipervolume toroidal e (iv) tamanho do mapa de 90 colunas x 90 linhas.

Os parâmetros que nortearam a análise no ambiente SOM seguem na Tabela 4:

Tabela 4 - Parâmetros utilizados na análise no IntraSOM.

Inicialização	Randômica
Grade de visualização	Hexagonal
Polígono de treinamento	Toróide
Tamanho do mapa	90 colunas x 90 linhas
Normalização	Variância
Função de vizinhança	Gaussiana
Variáveis utilizadas	K, eU, eTh, CT, ASA e MDT

3.5 Interpretação dos dados obtidos

A interpretação dos produtos originados nas etapas anteriores se deu de forma individual e comparativa, sempre à luz do atual mapa geológico da PMT de Vasquez et al. (2020).

Visou-se a correlação espacial das unidades definidas no mapa geológico da PMT com teores de concentração de elementos; topografia da região; concentrações anômalas de elementos, potencialmente associadas a atividade hidrotermal; gradiente magnético, caracterizando as propriedades magnéticas de diferentes rochas e identificando estruturas e quando pertinente, associando-as a unidades presente na região. A interpretação do modelo dirigido pelos dados ocorreu em duas fases: (i) análise estatística do banco de dados de cada variável onde foram definidos valores de referência, que permitiram a classificação de contribuição de cada variável em cada *cluster*, (ii) análise das plotagens Matriz-U e Parcelas componentes a fim de identificar a contribuição de cada variável na formação dos *clusters* e possíveis correlações entre elas e (iii) análise do modelo especializado, que gerou o mapa litológico preditivo.

No último, semelhanças e diferenças espaciais e nos parâmetros associados a cada *cluster* foram analisados e interpretados de forma comparativa com o mapa geológico da região de Vasquez et al. (2020) e com os mapas geofísicos obtidos neste estudo.

4. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS

A partir da utilização de diferentes técnicas de processamento dos dados aerogeofísicos foi possível a interpretação dos mapas produzidos e a correlação deles com o mapa geológico e de recursos minerais da PMT elaborado por Vasquez et al. (2020) (Fig. 16). Objetivou-se a caracterização e mapeamento de unidades geológicas, a investigação de semelhanças e diferenças composicionais entre elas, a caracterização de áreas com indícios de alteração hidrotermal e mapeamento de estruturas tectônicas e lineamentos magnéticos.

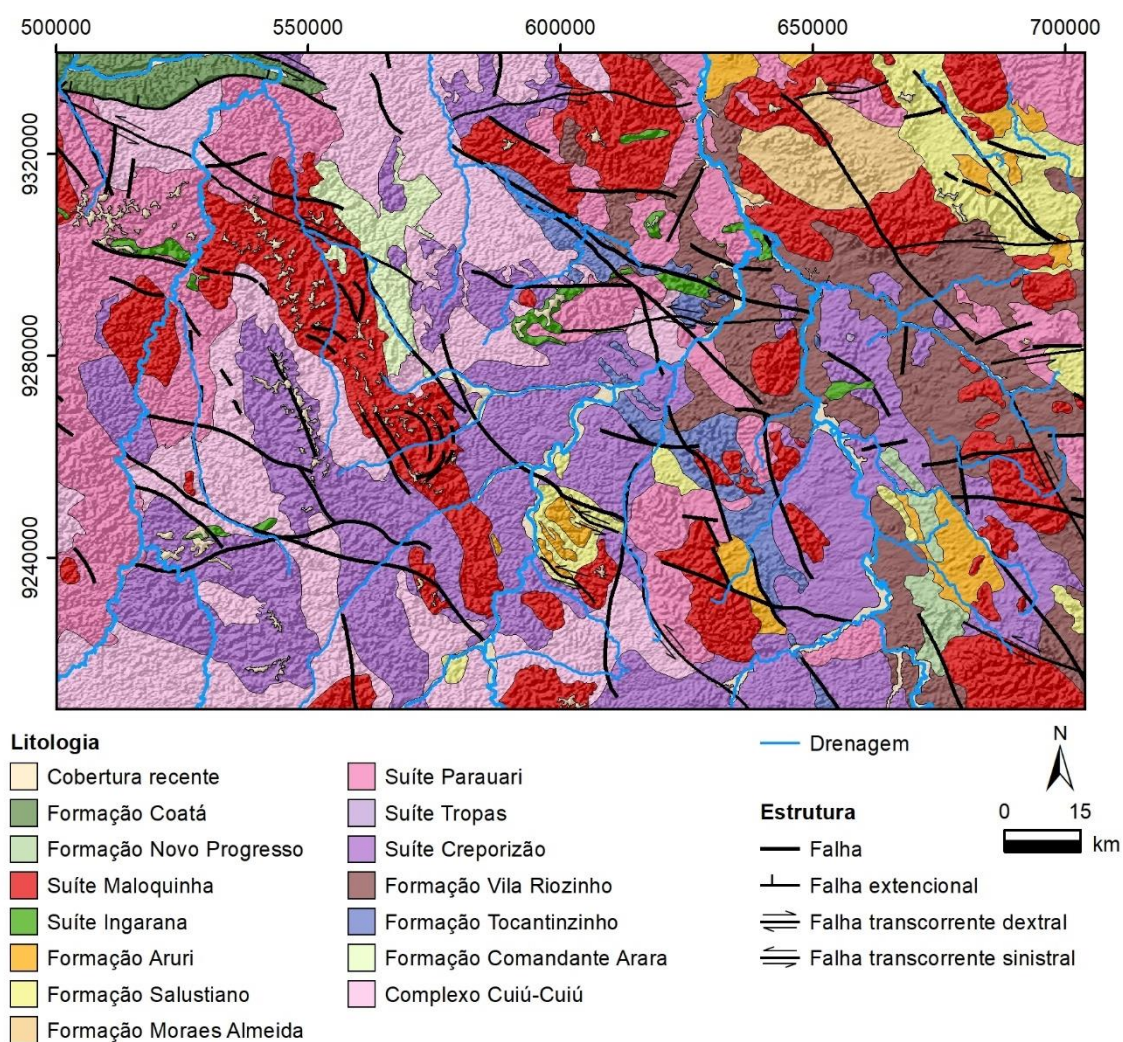


Figura 16 - Recorte da área de estudo a leste da PMT no mapa geológico de Vasquez et al. (2020).

4.1 Mapas Gamaespectrométricos

A seguir são apresentadas as interpretações fundamentadas nos mapas gamaespectrométricos elaborados.

4.1.1 Mapas de contagem de elementos (K, eU, eTh e CT)

Nos mapas de contagem de elementos (Fig. 10) percebe-se superposições frequentes de áreas que apresentam feições de altas concentrações de potássio, urânio e tório, também destacadas no mapa de contagem total (Fig. 10(D)).

Essa associação de altos valores dos elementos está significativamente associado com os granitos tipo A da Suíte Maloquinha, bem como com a Formação Moraes de Almeida, composta por vulcânicas ácidas do tipo A. Essa correlação das unidades é esperada devido à natureza alcalina das rochas. No entanto, é notável na Suíte Maloquinha, dois blocos no centro-norte e um a oeste não exibem essa característica, apresentando teores menores de K e eU e altos valores de eTh. Essas correlações entre as feições e as unidades ficam perceptíveis quando colocados os limites das unidades do mapa geológico nos mapas de contagem de elementos na Figura 17.

Dois feições distintas da Suíte Creporizão, a sudoeste, apresentam altos valores nos três elementos, contrastando com o restante da suíte, que exibe valores baixos a médios na contagem dos elementos. Percebe-se que essas feições de altos teores ocorrem apenas parcialmente dentro dos blocos relacionadas a suíte no mapa geológico. Essa discrepância é evidente em vários mapas gamaespectrométricos deste estudo.

O maior bloco da Suíte Maloquinha, localizado a centro-oeste do mapa, apresenta altos teores — típicos dos seus granitos tipo A — apenas na sua porção norte. Em todos os mapas gamaespectrométricos é observado a sul uma variação considerável nos teores radiométricos.

De forma geral, a região central do mapa exibe feições predominantemente associadas a baixos e médios teores de elementos, especialmente relacionados a Suíte Creporizão. Importante observar que essa região é caracterizada por forte confluência de drenagens, o que aumenta o potencial de lixiviação dos radioelementos. No entanto, outras regiões com drenagens apresentam comportamentos distintos, especialmente nas drenagens localizadas a oeste. Interessante destacar que o mapa eU tem associação mais evidente entre a presença de drenagens e baixos teores radiométricos, comportamento que, em um primeiro momento, seria esperado no mapa de potássio.

O Complexo Cuiú-Cuiú, devido às suas características geoquímicas menos evoluídas, tipicamente apresenta valores baixos a médios de K, eU e eTh, associando-se a tons azuis. Essa relação é particularmente evidente no mapa de tório, no qual a unidade é em sua maior parte representada como feições com cores azuladas. A Figura 17 correlaciona fortemente os contatos da unidade as zonas azuladas associadas a mesma.

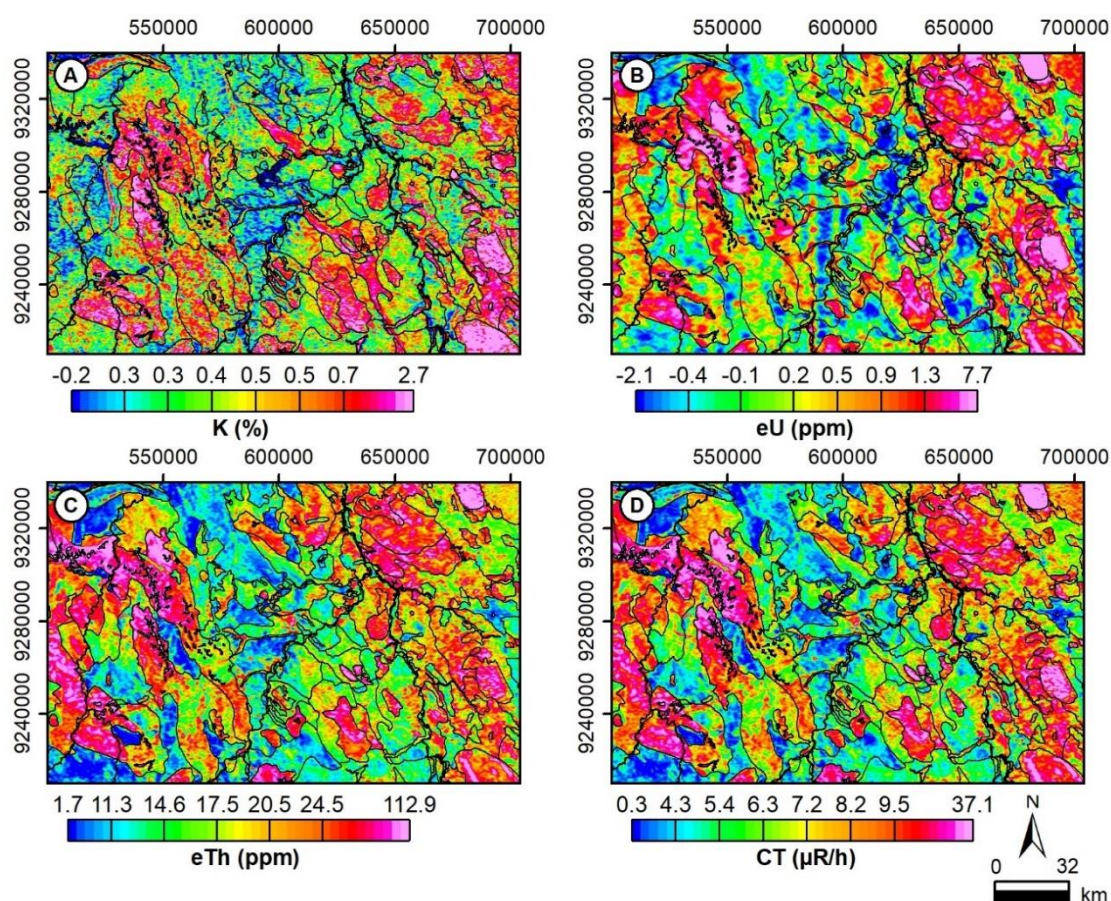


Figura 17 - Mapas radiométricos de contagem de elementos de (A) potássio, (B) urânio equivalente, (C) tório equivalente e (D) contagem total sobrepostos pelos contatos litológicos e drenagens de Vasquez et al. (2020).

Os pequenos e esparsos corpos de rochas gabróicas da Suíte Ingarana, únicas representantes máficas na região de estudo, apresentam radiometrias baixas a médias, especialmente de potássio, como esperado de rochas máficas.

No mapa CT (Fig. 10(D) e 17(D)) percebe-se a forte influência do tório nos resultados, com o mapa apresentando grande semelhança ao mapa de contagem de tório, tanto nos teores como nas formas das feições radiométricas.

4.1.2 Mapa MDT (Modelo Digital de Terreno)

No mapa MDT (Fig. 10(E) e 18), verifica-se forte correlação entre maiores altimetrias e maiores radiometrias nos mapas de contagem de elementos. Essas regiões parecem estar majoritariamente associadas aos granitos tipo A da Suíte Maloquinha, evidenciado na Figura 18(B). No entanto, não se observa essa correlação em um bloco na borda oeste e em dois no centro-norte, que contam com baixos teores de potássio e urânio,

porém associados a maiores altimetrias, característica aparentemente típica da unidade, o que sugere que o corpo mapeado deve estar incluindo duas unidades magmáticas distintas.

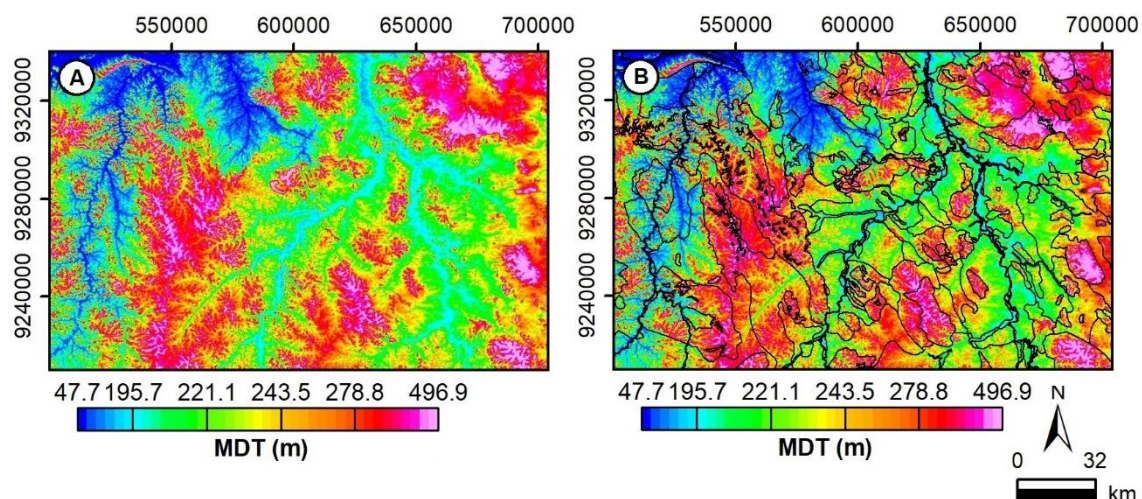


Figura 18 – (A) Mapa MDT da região de estudo e (B) mapa MDT com sobreposição de contatos litológicos e drenagens por Vasquez et al. (2020).

É notável uma variação altimétrica significativa ao longo do maior bloco associado a Suíte Maloquinha na região centro-oeste do mapa. Essa discrepância em relação ao restante dos registros associados a unidade levanta questões sobre sua caracterização e extensão do bloco a sul no mapa geológico da PMT.

A região central do mapa MDT apresenta baixa altimetria e uma maior densidade de drenagens dendríticas e baixas contagens radiométricas, aproximadamente coincidente com corpos delimitados por Vasquez et al. (2020) como sendo da Suíte Creporizão. Mais a norte desta área, outra feição de baixa radiometria, sobretudo nas suas bordas, é encontrada em altimetrias elevadas. Essas feições, características de rochas máficas, estão associadas aos gabros da Suíte Ingarana.

Há uma correlação entre baixas concentrações radiométricas e zonas com drenagens maiores e mais densas, indicando provável lixiviação causada pelo intemperismo. No entanto, essa relação é menos evidente nas drenagens a oeste, principalmente nos mapas de urânio e tório, elementos menos móveis em comparação ao potássio, nos quais essa relação é mais pronunciada.

4.1.3 Mapas de razões de elementos (K/eTh, eU/eTh, eU/K e FF)

Os mapas de razões de elementos (Fig. 11), derivados dos mapas de contagem de elementos, maximizam contrastes radiométricos e variações composicionais, evidenciando assinaturas radiométricas sutis e atenuando eventuais anomalias relacionadas a vegetação ou umidade do solo (Wilford et al., 2014). As interpretações desses mapas foram complementadas pelo mapa de Fator F (Fig. 11(D); Efimov, 1978; Gnojek e Prichystal, 1985). Os mapas resultantes foram sobrepostos pelos contatos das unidades geológicas presentes no mapa geológico da PMT de Vasquez et al. (2020) (Fig. 19).

No mapa K/eTh (Fig. 11(A) e 19(A)), altas razões geralmente estão relacionadas a baixas contagens de tório, não necessariamente a altas concentrações de potássio. Essas relações são observadas no Complexo Cuiú-Cuiú e na região central do mapa. Contudo, são também descritas feições de alta razão associados a altos valores elevados de potássio e tório, especialmente na Formação Tocantizinho, feições da Suíte Maloquinha ao leste e parte do bloco a noroeste do Granito Patrocínio, da Suíte Creporizão.

O mapa de eU/eTh (Fig. 11 (B) e 19(B)) exhibe feições de altas razões que se correlacionam com unidades do mapa geológico. Destacam-se os valores elevados atribuídos à Suíte Maloquinha, e a uma grande feição a nordeste, composta por granitos da suíte e pela Formação Moraes de Almeida, composta por rochas vulcânicas do tipo A. Os corpos com menores valores são mais difíceis de serem relacionados a unidades, uma vez que estão dispersos com menor ordenamento pelo mapa. Todavia, é possível observar uma correlação entre zonas de baixas razões e o Complexo Cuiú-Cuiú e a Suíte Creporizão. A Suíte Parauari apresenta as maiores variações, correlacionando-se com algumas das feições de maiores valores, mas também comumente exibindo colorações esverdeadas, associadas a valores médios a baixos.

O mapa eU/K (Fig. 11(C) e 19(C)) assemelha-se muito ao mapa de eU (Fig. 10(B) e 17(B)), evidenciando o protagonismo do urânio na razão. De modo geral, os maiores valores estão relacionados a Suíte Parauari, principalmente a leste, a Suíte Maloquinha, embora nesta unidade a correlação não ocorra sempre, e a Formação Moraes de Almeida. As rochas destas unidades são ricas em potássio, assim como as das formações Tocantizinho, formada predominantemente por ignimbritos e riolitos, e a Coatá, que corresponde a um dos registros sedimentares na região. Todas essas unidades apresentam-se com cores azuis no mapa.

No mapa FF (Fig. 11(D) e 19(D)), observa-se uma dispersão de altos valores correlacionados com as maiores altimetrias no mapa MDT (Fig. 10(E) e 18). Esses valores associam-se aos granitos da Suíte Maloquinha, a corpos da Suíte Creporizão no sudoeste do mapa e da Formação Tocantizinho e Formação Coatá. Os menores valores concentraram-se no oeste, ligados a Suíte Parauari e à Suíte Maloquinha. A última, contando com uma grande no centro-oeste e os dois no centro-norte que apresentam comportamentos radiométricos distintos dos demais registros associados a unidade.

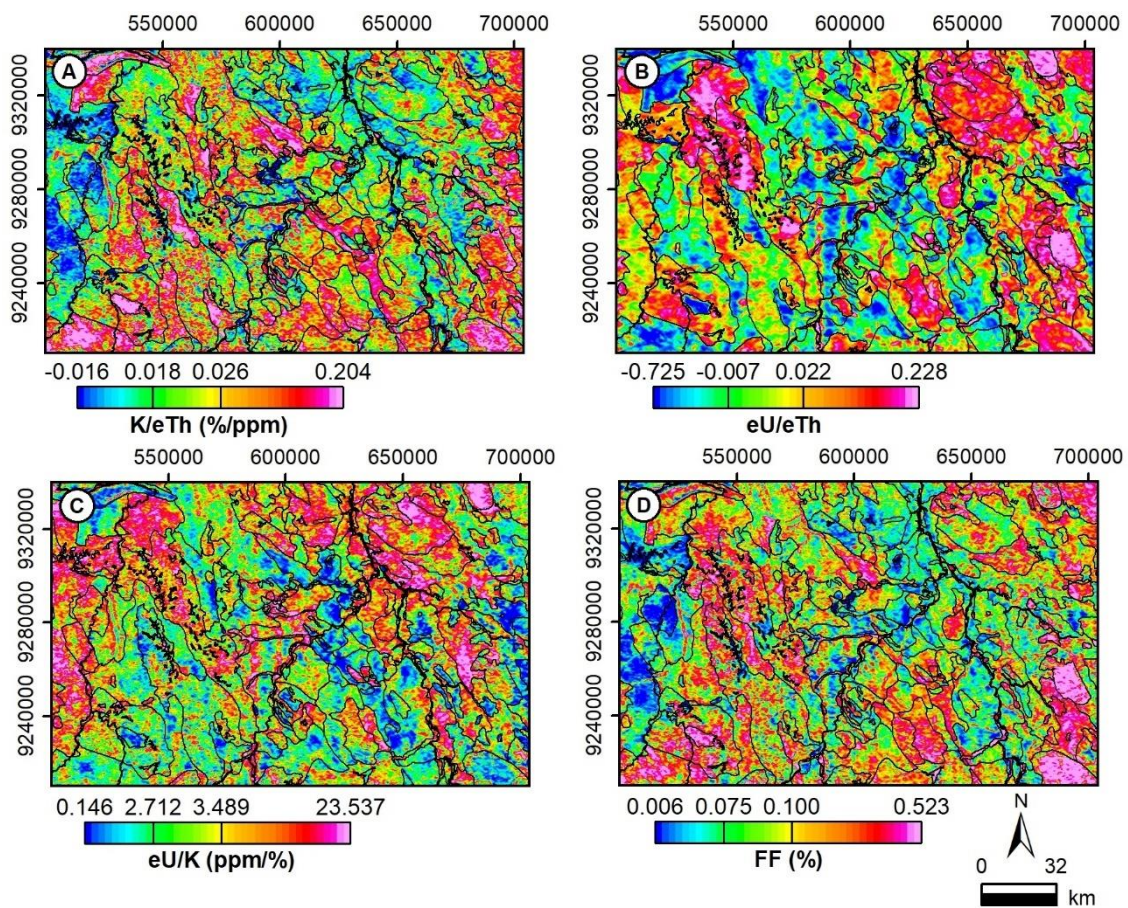


Figura 19 - Mapas radiométricos de razão de elementos (A) K/eTh, (B) eU/eTh, (C) eU/K e (D) Fator F com contatos das unidades geológicas propostas por Vasquez et al. (2020).

4.2 Mapas Magnetométricos

As feições estruturais foram interpretadas com a delimitação dos lineamentos ressaltados pelo gradiente magnético. Para realização dos estudos, foram aplicados filtros no mapa de Campo Magnético Anômalo. As interpretações foram principalmente embasadas no mapa *Tilt Angle* com o filtro *Upward Continuation* em superfície (Fig. 14)

e nos níveis 500, 1000 e 2000 m (Fig. 15). O uso dos diferentes níveis de profundidade permitiu uma melhor identificação de estruturas em subsuperfície.

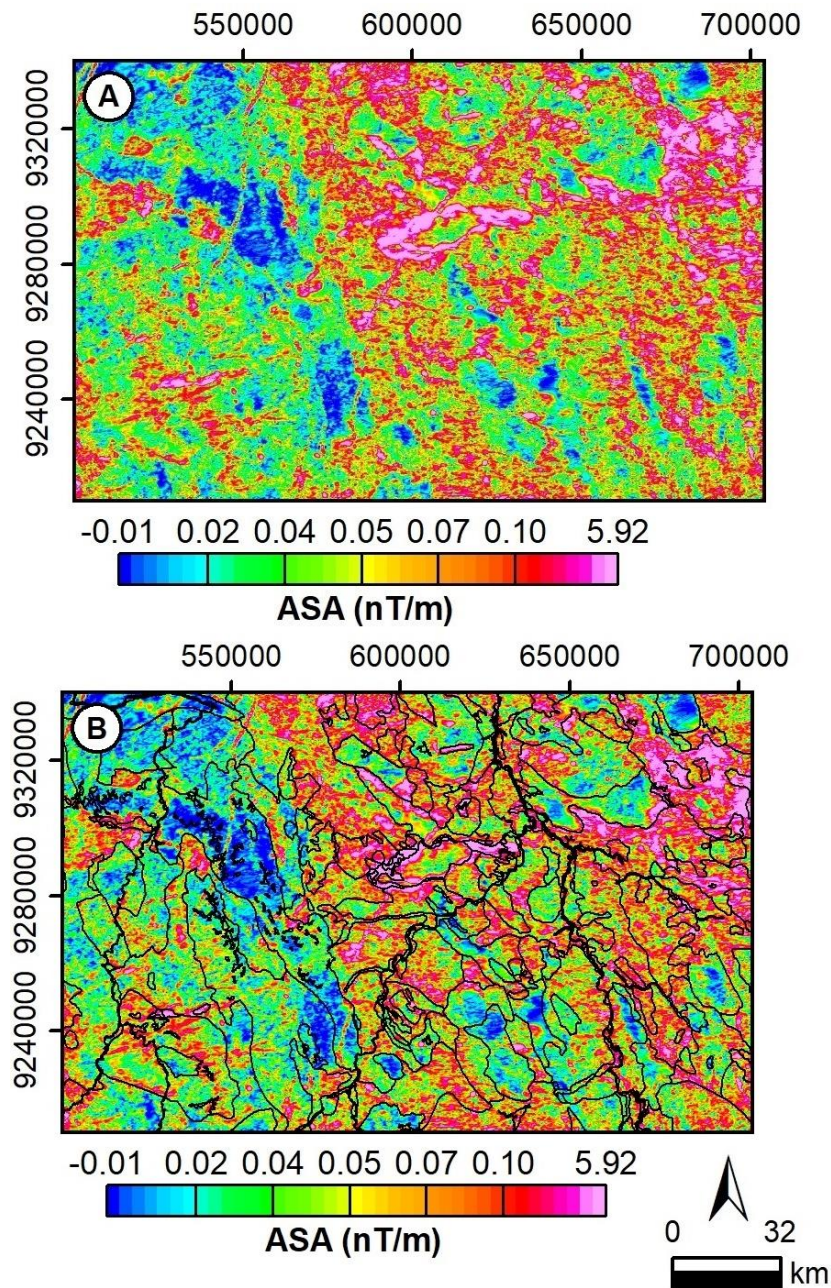


Figura 20 – (A) Mapa ASA da região de estudo e (B) com contatos litológicos por Vasquez et al. (2020).

O mapa ASA (Fig. 13 e 20) revela anomalias na porção central e leste do mapa. Essas anomalias estão principalmente correlacionadas as rochas vulcânicas cálcio-alcalinas de alto potássio de Formação Vila Riozinho (ca. 2,00–1,99 Ga) e da Formação Salustiano (ca. 1,88–1,87 Ga) na porção nordeste do mapa. Entretanto, existem anomalias dispersas por toda essa região sem correlação clara com unidades geológicas de Vasquez et al. (2020). Essas anomalias estão espacialmente associadas principalmente às unidades

Complexo Cuiú-Cuiú e Suíte Creporizão, mas, a oeste, as mesmas unidades geológicas apresentam características magnéticas distintas, sugerindo serem variações de fácies, superposição de eventos de alteração hidrotermal, ou, até mesmo, podendo corresponder a outras unidades geológicas, o que, tal qual descrito para a Suíte Maloquinha anteriormente, merece estudos mais detalhados, incluindo estudos de campo.

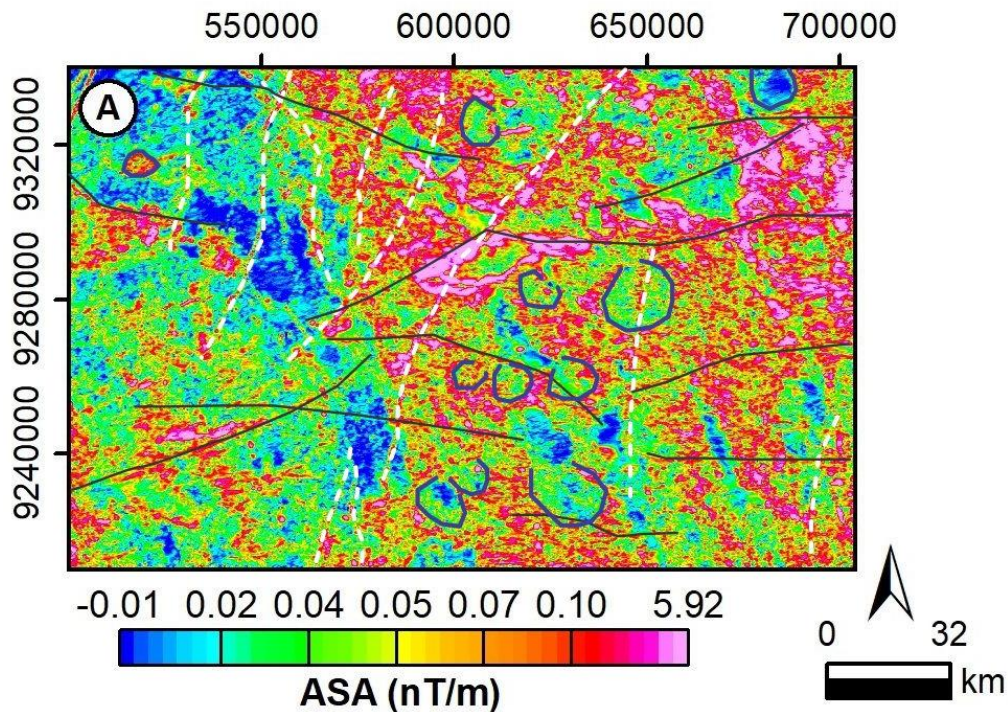


Figura 21 - Mapa ASA com interpretação de lineamentos geofísicos, sendo: Linhas pretas marcando falhamentos orientados preferencialmente E-W, linhas brancas tracejadas como diques tardios orientados NE-SW a NNE-SSW e círculos azuis como possíveis intrusões vulcânicas ou estruturas de caldeiras conforme descrito por Juliani et al. (2005).

Observam-se lineamentos esparsos orientados NNE-SSW a NE-SW, principalmente na porção superior do mapa, possivelmente representativos de estruturas mais rasas relacionadas a diques de um contexto tardi- a pós-orogênico (Fig. 21, Carneiro et al., 2018; Dutra e Cellier, 2020). Essas estruturas, marcadas em branco na Figura 21, se correlacionam a algumas marcações de diques presentes no mapa geológico. Não foram identificadas nos mapas deste estudo as principais estruturas NW-SE associadas às zonas de sutura propostos por Tassinari e Macambira (1999, 2004) e Santos et al. (2000). O mapa geológico também apresenta suas estruturas majoritariamente mapeadas em rumo NW-SE (Fig. 16), e parecem condicionar parte das intrusões dos granitos da Suíte Maloquinha e falhas mais tardias.

Observa-se em ambos os mapas magnéticos um domínio de lineamentos E-W, como marcado na Figura 21, além de estruturas circulares, por vezes parcialmente superpostas, que parecem se relacionar a intrusões relacionadas ao vulcanismo da região ou então a estruturas de caldeiras, como descrita por alguns autores (*e.g.* Juliani et al., 2005; Juliani e Fernandes, 2010; Roverato et al., 2019).

Uma estrutura magnética regional no centro do mapa apresenta forma lenticular com orientação E-W, provavelmente corresponde as intrusões de rochas máficas da Suíte Ingarana. É relevante observar nesta estrutura magnética a interseção de falhas E-W com estruturas NE-SW (Fig. 20(A) e 21), o que pode sugerir que essas intersecções podem ser sítios de intrusões ainda não mapeadas.

Por fim, os menores valores ASA ocorrem no oeste do mapa, onde foram mapeados extensos corpos intrusivos de granitos da Suíte Maloquinha. Essa relação fica evidente na relação espacial de grandes feições de cores frias especialmente com a porção norte do maior bloco da unidade localizado no centro-oeste do mapa (Fig. 20).

Nos mapas *Tilt Angle* (Fig. 14 e 15), as estruturas NW-SE, numerosas no mapa geológico, são escassas e incipientes. Há uma dificuldade de correlação das estruturas cartografadas e distribuição das unidades geológicas do mapa geológico da região com os mapas processados neste estudo, o que enfatiza a necessidade de mais estudos geológicos e geofísicos aprofundados na região. Os lineamentos NE-SW que foram observados no mapa ASA (Fig. 20 e 21) são incipientes no mapa *Tilt Angle* (Fig. 14 e 15), com cores frias, demonstram representar lineamentos de baixo magnetismo.

Com o incremento do nível de profundidade com o *Upward Continuation* (Fig. 14 e 15), os lineamentos E-W e ENE-WSW predominam, corroborando com as observações de Carneiro et al. (2018) e Dutra e Cellier (2020), que interpretam as estruturas NW-SE e NE-SW como superficiais e tardias e as associando possivelmente as intrusões félsicas tardi- a pós-tectônicas. Em profundidade, as estruturas E-W prevalecem e podem ser interpretadas como estruturas tectônicas que condicionaram o vulcanismo na região e as intrusões de rochas predominantemente cálcio-alcálicas dos arcos magmáticos continentais paleoproterozoicos da região.

Os autores discutem que as estruturas E-W arqueadas associadas as zonas de cisalhamento na Província Mineral dos Carajás alinham-se e parecem estar em continuidade com as estruturas observadas na PMT, o que pode ser interpretado como uma continuidade dos terrenos granito-gnássicos arqueanos sob os arcos magmáticos

continentais paleoproterozoicos que constituem grande parte das unidades geológicas estudadas neste trabalho.

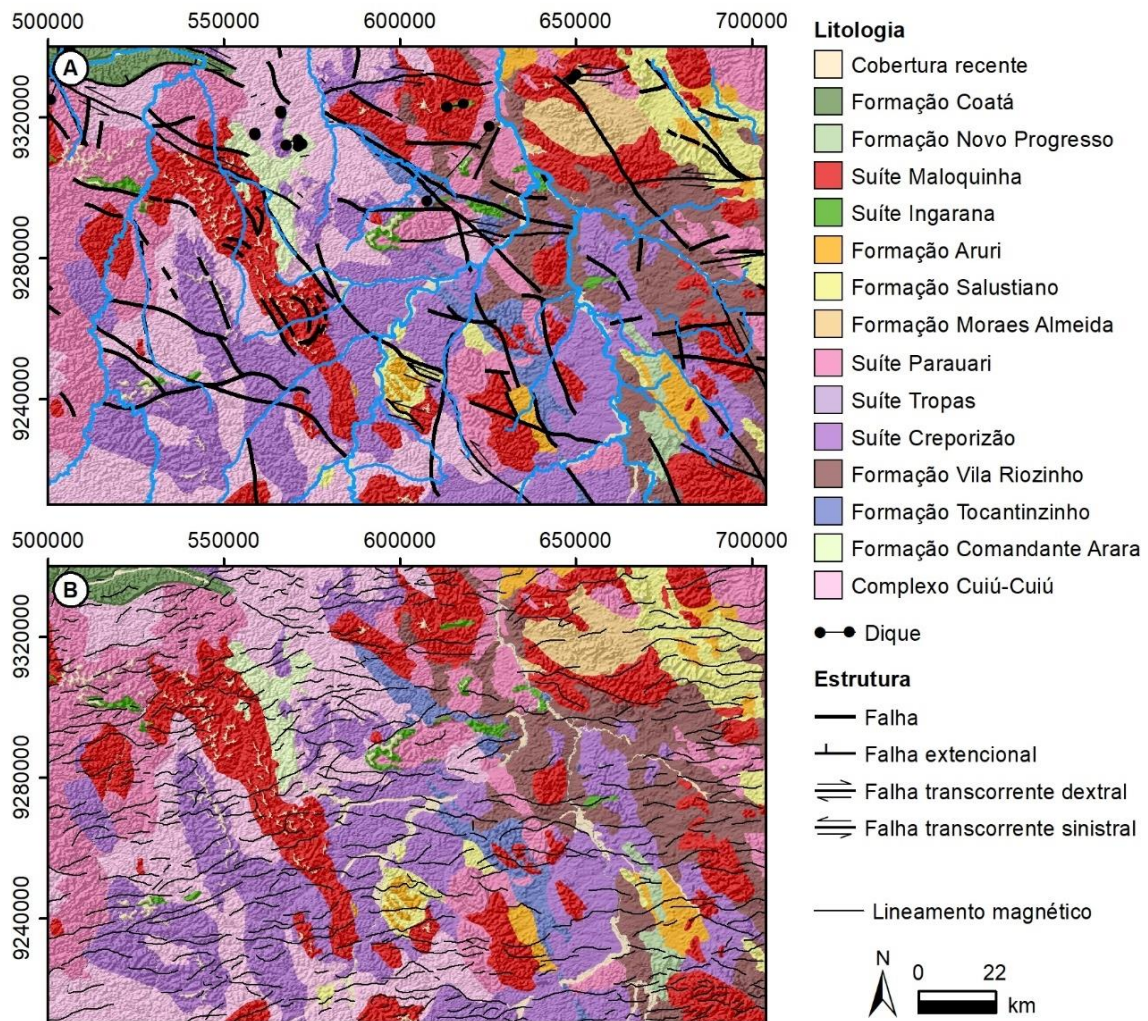


Figura 22 - Recorte da região de estudo no mapa geológico da PMT com estruturas identificadas por (A) Vasquez et al. (2020) e (B) pelo autor, a partir de lineamentos observados no mapa *Tilt Angle* com UC em 500 metros de profundidade.

A Figura 22(B) demarca as estruturas observadas no mapa *Tilt Angle* com *Upward Continuation* no nível de 500 metros e as sobrepõe ao mapa geológico da PMT de Vasquez et al. (2020) e indicam que não há uma clara correlação dos lineamentos observados com as estruturas cartografadas no mapa geológico (Fig. 22(A)). Contudo, percebe-se alguma possível relação de estruturas marcadas com alguns corpos graníticos da Suíte Maloquinha, essa relação é mais bem vista nos corpos a nordeste da unidade.

4.3 Unidades litogeofísicas a partir de domínios gamaespectrométricos

O mapa ternário (Fig. 12 e 23(A)) permite analisar a contribuição de cada elemento em determinado espaço e a delimitação de domínios gamaespectrométricos (Fig. 23(B)), que neste trabalho foram denominados como unidades litogeofísicas. A delimitação destas unidades foi baseada na interpretação visual do mapa ternário, e permitiu a correlação com unidades delimitadas no mapa geológico da região, mas também podem representar variações faciológicas ou composicionais em uma mesma unidade, ou ainda, alguma variação não descrita ou mesmo corpos que não foram representados no mapa geológico.

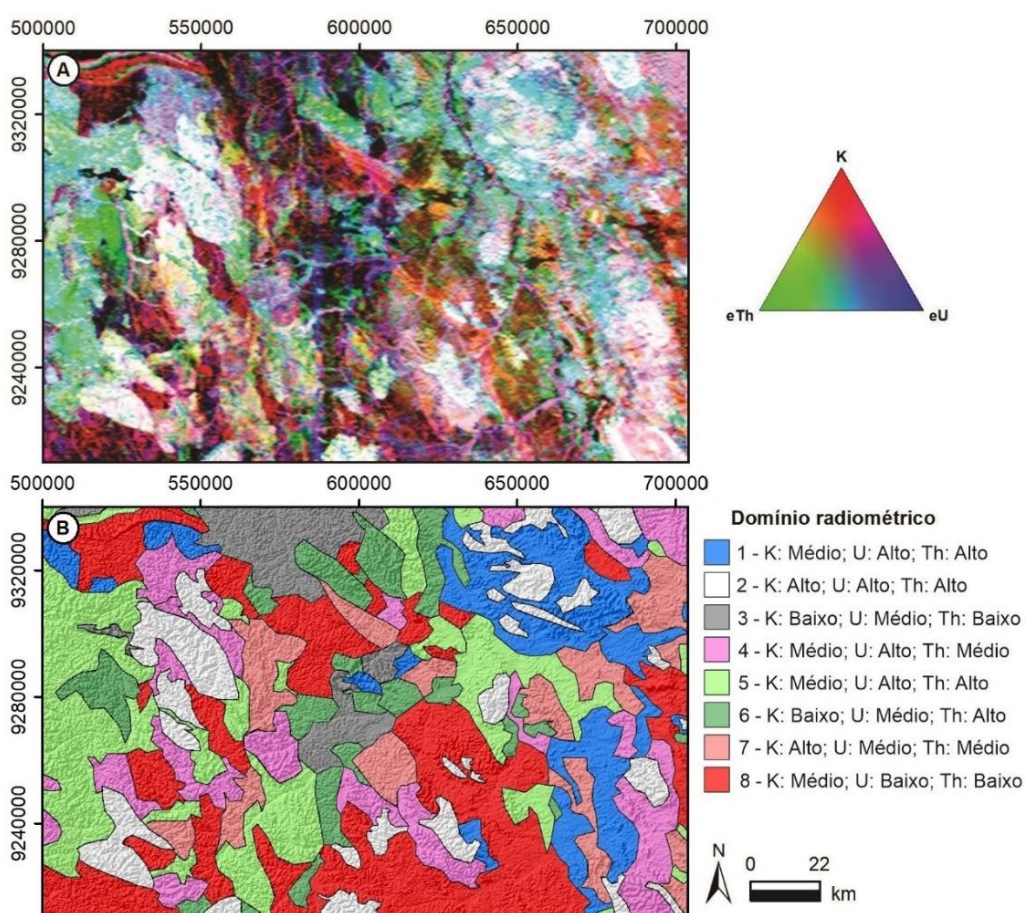


Figura 23 - (A) Mapa de composição ternária RGB de gamaespectrometria da região de estudo e (B) unidades litogeofísicas no mapa ternário e seus teores K, eU e eTh interpretados visualmente.

Ao todo foram individualizados oito unidades litogeofísicas, considerando os teores estimados para cada elemento representado no mapa ternário (K, eU e eTh), com variações entre teores alto, médio e baixo. A Figura 23 permite a comparação entre o mapa ternário e o mapa com unidades litogeofísicas traçados a partir de interpretação visual.

Na Figura 24 são apresentados para comparação o recorte da região de estudo no mapa geológico de Vasquez et al. (2020) e o mapa com as unidades litogeofísicas interpretadas visualmente a partir do mapa ternário.

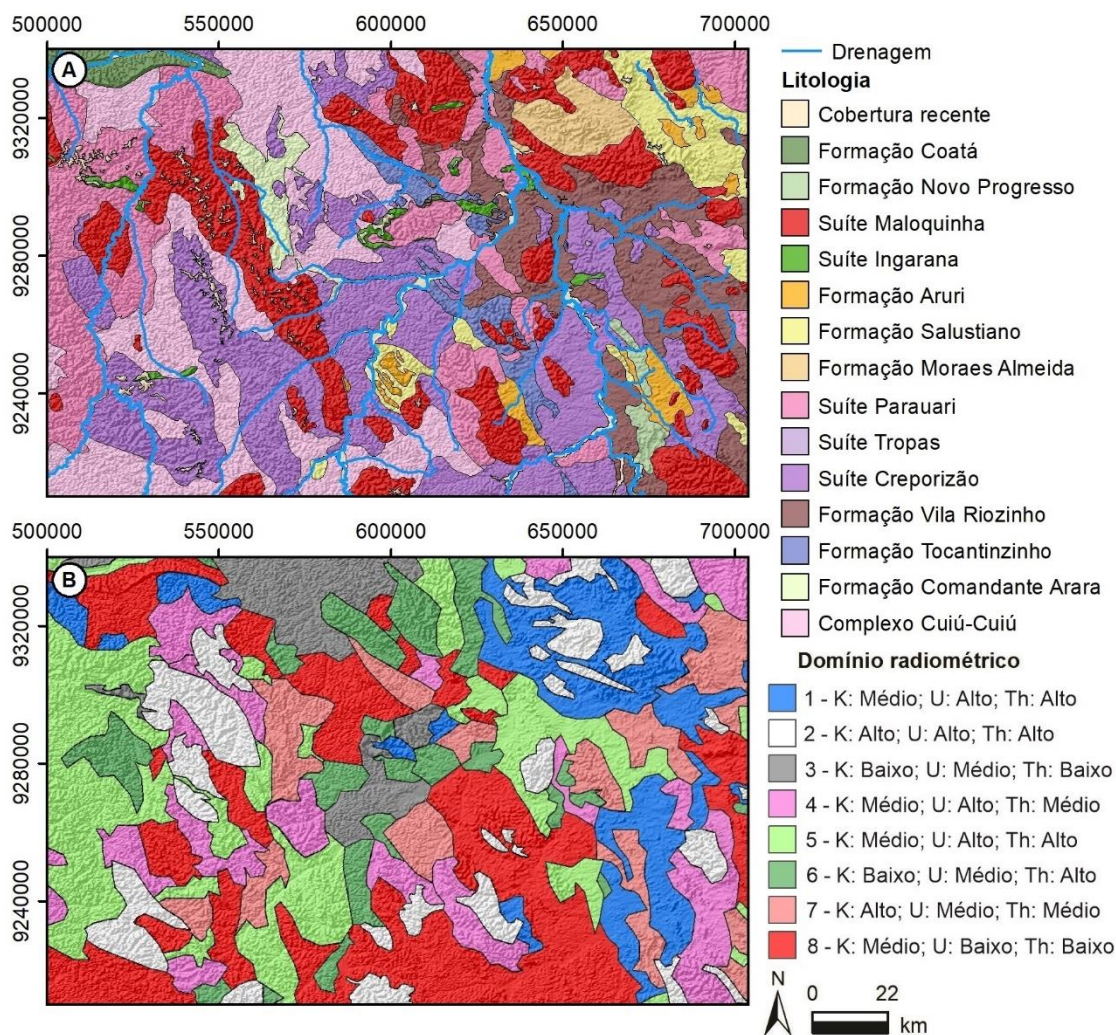


Figura 24 – Comparativo entre (A) mapa geológico da PMT e (B) unidades litogeofísicas interpretadas a partir do mapa ternário RGB.

4.3.1 Domínio 1

O Domínio 1 foi caracterizado por altos índices de urânio e tório e médio para potássio. Sua ocorrência é predominante a leste, em uma faixa registrada quase de forma ininterrupta NE-SE. Algumas áreas menores foram delimitadas próximas a essa região e alguns registros esparsos a noroeste e sul.

Espacialmente se correlaciona principalmente com a Formação Vila Riozinho e alguns blocos com a Formação Aruri. Correlação semelhante foi feita por Vasquez et al. (2020) no mapa geológico, com muitos contatos apresentando semelhanças.

As rochas da Formação Vila Riozinho são caracterizadas por vulcânicas diversas cálcio-alcálicas de alto potássio e shoshoníticas de idade ca. 2,0 a 1,99 Ga. Representam algumas das rochas mais antigas da região e devido sua composição cálcio-alcálica de alto potássio, é esperado que apresenta altos índices de elementos na gamaespectrometria.

A Formação Aruri é representada por depósitos piroclásticos riolíticos e radiocáclicos e sedimentares vulcanogênicos riolíticos de idades U-Pb de ca. 1,88 a 1,87 Ga.

Em diferentes pontos desta faixa ocorrem corpos definidos no mapa por cores claras com bordas relativamente regulares, especialmente na porção sul e norte. Na porção central a unidade está em contato com diferentes unidades litogeofísicas, como indicado pelas variações nas cores.

4.3.2 Domínio 2

O Domínio 2 é representado no mapa pela coloração branca, indicando alto potássio, urânio e tório. Ocorre em forma de feições relativamente arredondadas dispersas principalmente no leste, oeste e sul. A unidade apresenta contato direto e discordante com diferentes unidades do mapa e é comumente relacionada as maiores altimetrias no mapa MDT. Essas características são sugestivas de corpos graníticos tardios relacionados a Suíte Maloquinha. Essa suíte é representada por corpos graníticos, especialmente sieno- e monzogranitos do tipo A com idades ca. 1,89 e 1,87 Ga. Devido seu caráter alcálico, espera-se altos índices dos três elementos medidos.

No entanto, há discordâncias entre as interpretações e o mapa litológico da PMT, especialmente no oeste do mapa. Nesta região, um corpo alongado orientado NNW-SSE da Suíte Maloquinha, o Granito Igarapé Samaúma (Vasquez et al., 2020) chama a atenção por sua dimensão e formato, único dentre os granitos da Suíte Maloquinha na região. Sua extensão não é suportada pelos dados aerogeofísicos obtidos neste estudo e não parecem ser típicos de intrusões tardias e nem da característica de blocos de forma aproximadamente circular presente nos mapas geológicos da região (*e.g.* Almeida et al., 2000; Bahia e Quadros, 2000; Klein e Vasquez, 2000).

Na porção norte deste bloco, o mapa ternário se caracteriza por áreas de cor branca, que se correlacionam fortemente com a Suíte Maloquinha, no entanto, seguindo a sul, os tons verdes predominam, associando a maiores valores de tório. Essas observações corroboram outras feitas em outros mapas presentes neste estudo. Essa distinção a sul de suas características sugerem não terem sido mapeadas com detalhes

suficientes, justificando uma discussão mais aprofundada sobre a geologia e caracterização da petrogênese desta unidade. Em muitos casos, alterações potássicas intensas tendem a conferir as rochas cálcio-alcálicas de outras suítes cores vermelhas semelhantes as observadas nas rochas da Suíte Maloquinha, o que poderia explicar as feições descritas. A importância dessas observações é também metalogenética, uma vez que as alterações potássicas se associam as rochas intrusivas subvulcânicas do sistema epitermal-pórfiro, sistema cada vez mais caracterizado em depósitos na região (e.g. Echeverri-Misas, 2015; Guimarães et al., 2021; Juliani et al., 2002, 2005; Tokashiki, 2015).

Nesta mesma região, uma feição de coloração branca N-S foi individualizada associada a porção NW do Granito Patrocínio, parte da Suíte Creporizão. Chama a atenção que essa coloração se limita a essa porção do Granito Patrocínio, que conta com tons esverdeados ou mesmo avermelhados e róseos no restante de sua extensão. A Suíte Creporizão, amplamente representada no centro-sul da região de estudo, de modo geral, apresenta outras cores no mapa ternário (Fig. 24).

Ainda a sudoeste, outra feição é associada espacialmente a Suíte Creporizão, desta vez relacionada ao Granito Creporização. Semelhante ao Granito Patrocínio, apenas parte do seu corpo conta características do Domínio 2 e o restante apresenta tons mais fracos e esverdeados. Essas duas discrepâncias são observadas em outros mapas apresentados neste estudo.

Por fim, nota-se uma associação de feições do Domínio 2 com a Formação Moraes de Almeida a nordeste. As escassas ocorrências da unidade estão associadas ao Domínio 2 ou cores claras no mapa ternário, comportamento condizente com sua descrição de rochas ácidas do tipo A. São vulcânicas representadas principalmente por ignimbritos e derrames riolíticos.

4.3.3 Domínio 3

O Domínio 3 é associado ao preto, indicando baixos índices de potássio, urânio e tório. Essas feições localizam-se principalmente na porção central e se relacionam principalmente com o Complexo Cuiú-Cuiú no mapa geológico. Essa unidade representa os registros mais antigos da região com idades ca. 2,03 a 2 Ga. O complexo é definido por granitoides cálcio-alcálicos a cálcio-alcálicos de alto potássio, o que explica a existência de pequenas áreas e feições de cores avermelhadas associadas ao domínio.

Uma área deste domínio na região central associa-se espacialmente a Suíte Creporizão, no entanto essa associação é restrita a essa área, embora seja observado áreas com cores escuras associadas a essa mesma suíte. Essa região central é especialmente associada a baixas radiometrias.

Complementarmente, pequenos corpos de rochas gabróicas da Suíte Ingarana (ca. 1,88 a 1,87 Ga) estão relacionados a feições características do Domínio 3.

4.3.4 Domínio 4

O Domínio 4 é caracterizado por áreas irregulares e dispersas em todo o mapa. Sua assinatura gamaespectrométrica representa teores médios de potássio e tório e altos de urânio.

Algumas áreas a nordeste, noroeste e centro-sul se correlacionam espacialmente à Suíte Parauari. Áreas menores ocorrem associadas a grandes corpos cartografados como do Complexo Cuiú-Cuiú e Suíte Creporizão. Essas feições menores por vezes podem representar variações composicionais em uma mesma unidade, no entanto, algumas são marcadas por contatos bruscos, o que abre espaço a discussões quanto sua relação com a unidade a qual está espacialmente relacionada no mapa geológico. Essas características são sugestivas de intrusões ou de zonas de alteração hidrotermal em meio as unidades.

4.3.5 Domínio 5

As áreas mapeadas como Domínio 5 ocorrem dispersas por todo o mapa e algumas delas representam grandes regiões do mapa ternário. Esse domínio é definido por teores médios de potássio e altos de tório e urânio.

As características gamaespectrométricas deste domínio não parecem ter correlação específica com uma unidade, pois há correlação espacial com diferentes unidades presentes no mapa litológico.

A maior área, localizada a oeste no mapa, tem clara relação espacial com o Granito Rio Pacu, cálcio-alcálico de alto potássio da Suíte Parauari. Nota-se uma correlação de corpos desta unidade com áreas de tons esverdeados no mapa ternário, sinalizando uma forte contribuição de teores de eTh na sua radiometria. No entanto, alguns desses blocos apresentam tons mais escuros de verde, neste estudo definidos como outro domínio gamaespectrométrico, o Domínio 6.

Observa-se clara ligação espacial da área associada ao domínio a leste com a Formação Vila Riozinho, incluindo semelhanças nos contatos de sua porção a noroeste. Entretanto, essa relação não é contínua ao longo do corpo a sudeste, embora a coloração azul predominante nesta região esteja presente, mas de forma mais discreta, no Domínio 5. Esta variação é aqui considerada como uma variação composicional dentro desta unidade litogofísica. Situação semelhante ocorre na maior área deste domínio a sul, que tem formato semelhante ao do corpo do Granito Patrocínio, parte da Suíte Creporizão, cartografada na mesma localidade, apesar de não haver a continuidade para norte observada no mapa geológico, tampouco no restante do registro da suíte a leste.

As duas unidades discutidas representam rochas cálcio-alcálicas de alto potássio, sendo a Formação Vila Riozinho definida por rochas vulcânicas de ca. 1,99–1,95 Ga e a Suíte Parauari por granitoides mais novos, de 1,90 a 1,87 Ga.

4.3.6. Domínio 6

As áreas deste domínio ocorrem dispersas por todo o mapa, de modo geral compreendendo feições menores e muitas vezes próximas a feições esverdeadas relacionadas ao Domínio 5. Apresenta teor baixo de potássio, médio de urânio e alto de tório e é representada por cor verde escuro.

Vale notar que são comuns ocorrências de cor semelhante relacionadas a drenagens, em especial na região central do mapa. Também ocorrem como áreas sem limites bem definidos espacialmente relacionadas a drenagens e porções de menores altimetrias, que parece indicar que depósitos aluvionares e paleoaluviões tem composições semelhantes a este domínio.

Além dessas áreas, mais comuns na porção central do mapa, outras foram delimitadas no centro-norte e no oeste. Essas áreas estão correlacionadas espacialmente a corpos graníticos da Suíte Maloquinha e porções da Suíte Creporizão e Parauari. As associações com a Suíte Maloquinha são incomuns, já que essa unidade está fortemente associada ao Domínio 2, de cor branca. Esses três blocos associados a unidade também apresentam comportamento distinto da unidade em outros mapas aerogeofísicos deste estudo.

4.3.7. Domínio 7

Este domínio é definido pela cor salmão e conta com teor alto de potássio e médio de urânio e tório. Sua ocorrência é dispersa, mas concentra-se no leste do mapa.

A relação espacial mais evidente deste domínio se dá com os corpos alongados NW-SE e NNW-SSE da Formação Tocantzinho, localizada na parte central do mapa. A unidade é definida como depósitos vulcanoclásticos ressedimentados e sedimentares vulcanogênicas como arenitos vulcanogênicos, brechas vulcânicas com ignimbritos e derrames andesíticos a riolíticos associados.

Percebe-se uma certa correlação espacial com o único bloco da Formação Novo Progresso, definida por sequencias epiclásticas relacionadas a ambientes fluviais entrelaçados e lagos com leques aluviais. Essa unidade representa parte da sedimentação que ocorreu na região no final do Orosiriano.

Por fim, alguns corpos são relacionados com a Formação Salustiano, de rochas vulcânicas e piroclásticas cálcio-alcálicas de alto potássio, principalmente relacionado ao maior bloco da unidade no nordeste da região do estudo.

Desta forma, nota-se que esse domínio se correlaciona predominantemente com unidades relacionadas a rochas vulcânicas, piroclásticas e sequencias sedimentares e vulcanossedimentares da PMT.

4.3.8. Domínio 8

O Domínio 8, de cor vermelha, é definido por teores altos de potássio e baixos de urânio e tório. Ocorre majoritariamente na porção central e sul do mapa.

Há clara correlação espacial com o Complexo Cuiú-Cuiú, incluindo contatos semelhantes aos presentes no mapa geológico da PMT, por exemplo no extremo sudoeste. Essa forte correlação é mais uma evidência da influência de dados aerogeofísicos na elaboração do mapa geológico da PMT de Vasquez et al. (2020), que se justifica devido as dificuldades que a região impõe na realização de levantamentos de campo.

O Complexo Cuiú-Cuiú associou-se fortemente com o Domínio 3, de cor preta, o relacionado com baixos teores de elementos, mas que contava com feições avermelhadas, porém insuficientes para uma associação ao Domínio 8. De modo análogo, o Domínio 8 conta com porções dentro de suas áreas com colorações mais escuras, mas não o suficiente para classificação associada ao Domínio 3.

Essa característica, de comum ocorrência nos domínios caracterizados por cores escuras, foram interpretadas como variações composicionais dentro de uma mesma unidade litogeofísica.

4.4 Discussão e Comentários

A interpretação dos dados processados evidenciou a importante contribuição que os levantamentos aerogeofísicos tiveram na produção do mapa geológico da região da PMT de Vasquez et al. (2020). Destaca-se a delimitação de contatos de unidades geológicas e a definição de localizações e dimensões de unidades localizadas em regiões que não foram cobertas por levantamentos de campo.

Algumas unidades apresentam maior correlação dos mapas radiométricos com o mapa geológico, a exemplo das unidades formadas por rochas graníticas do tipo A da Suíte Maloquinha, que possuem teores elevados dos três elementos mapeados, comportamento análogo no mapa de CT (Fig. 17) e forte correlação com as áreas de maiores altimetrias. Além disso, nota-se o formato arredondado das ocorrências e sua interação com diferentes unidades, características associadas a intrusões tardias. Já a Formação Moraes de Almeida, formada por ignimbritos e riolitos tipo A, apresentam características semelhantes as rochas da Suíte Maloquinha, em sua única ocorrência na área de estudo. No mapa ternário essas unidades se relacionaram a domínios associados a altos teores dos elementos químicos, especialmente os domínios 1 e 2, de cor azul clara e branca, respectivamente.

A Suíte Ingarana, composta por gabros, apresenta baixos valores radiométricos e se destaca no mapa ASA (Fig. 20), devido às maiores concentrações de ferro em sua composição comparativamente às rochas graníticas de alto potássio comuns em toda a região.

O Complexo Cuiú-Cuiú, formado por granitoides cálcio-alcalinos e cálcio-alcalinos de alto potássio, caracteriza-se por teores baixos a médios nos mapas radiométricos, se associando a tons esverdeados e azulados. Os limites dos corpos da unidade, de modo geral, se assemelham aos definidos no mapa geológico de Vasquez et al. (2020).

Foram identificadas no mapa feições com radiometria e comportamentos distintos em uma mesma unidade geológica. Muito embora variações composicionais ou faciológicas possam ocorrer em uma unidade, algumas das feições observadas parecem

indicar imprecisões na identificação dos contatos ou agrupamento de corpos de rochas muito distintas, provavelmente não pertencentes à unidade mapeada.

Na porção central do mapa predominam unidades com baixos valores radiométricos espacialmente relacionada à Suíte Creporizão, mas essa unidade no mapa geológico apresenta áreas e regiões com comportamentos distintos do observado na porção central. Essas características são citadas por Vasquez et al. (2020) na descrição da unidade, identificada como PP3γczgd (granitoides cálcio-alcálicos) que “apresentam baixo arrasado e radiometria baixa no mapa K-Th-U”. As baixas radiometrias podem ser associadas ao relevo mais baixo e a confluência de drenagens na região, que contribuem para maior lixiviação dos radioelementos, sobretudo o potássio. No entanto, outras regiões atravessadas por drenagens não necessariamente apresentaram baixas radiometrias como nesta região, inclusive em blocos da mesma suíte.

A Suíte Parauari, definida por granitoides cálcio-alcálicos de alto potássio, é cartografada em uma grande área no limite oeste do mapa e várias áreas menores dispersas no mapa, especialmente a leste. A área oeste difere por apresentar radiometrias de eU, eTh e CT altas (Fig. 10 e 17), comportamento não identificado na maioria das outras áreas associadas a mesma unidade no mapa geológico. Além disso, chama a atenção a variação dos dados radiométricos em diferentes ocorrências da unidade. Por exemplo, a nordeste, uma área arredondada apresenta alto potássio e urânio e baixo tório, característica radiométrica distinta de qualquer outra ocorrência relacionada a unidade.

Duas áreas na região sudoeste do mapa se destacam pelas características radiométricas semelhantes as observadas nas rochas do tipo A da região. Essas duas feições constam no se relacionam a Suíte Creporizão no mapa geológico (Fig. 16), definida por granitos cálcio-alcálicos, mas destoam consideravelmente das médias dos teores observados em outros registros relacionados à mesma suíte (Fig. 25). Chama a atenção a considerável variação radiométrica associada dentro de um mesmo bloco da unidade, com mudanças bruscas nos teores que não parecem ser relacionar a variações composicionais observadas normalmente ao longo de uma mesma unidade.

Uma das áreas é cartografada como Granito Patrocínio, que conta com porção de alta radiometria no noroeste do bloco em uma extensão NNW-SSE em região de elevada altimetria. Seguindo a sul, a radiometria diminui em todos os mapas, especialmente de eU, eTh e CT. Situação semelhante é descrita no corpo semianelar a sudoeste deste, que conta com altas radiometrias limitadas a oeste. Rumo a leste os teores diminuem. Curiosamente as menores radiometrias estão associadas a maiores altimetrias e as maiores

radiometrias em relevo mais baixo (Fig. 25), destoando do comportamento observado no Granito Patrocínio, parte da mesma suíte ígnea, e do normalmente observado na região.

A Suíte Maloquinha, em geral, exibe forte correlação espacial com altas concentrações de elementos e com regiões de elevada altimetria. No entanto, duas áreas desta suíte, os granitos Serra Alta e Mamoal, localizados no centro-norte do mapa, apresentam teores mais baixos nos elementos, especialmente o potássio, com valores médios a baixos (Fig. 17). Vale notar que esses blocos estão em regiões de elevada altimetria, único aspecto realmente similar ao normalmente associado as ocorrências da unidade.

Faz parte dessa suíte a área que mais chama a atenção no estudo, relacionado ao bloco NNW-SSE no centro-oeste do mapa, que apresenta proporções muito maiores que das outras ocorrências da Suíte Maloquinha (Fig. 25). Essa característica junto com discrepâncias observadas nos mapas aerogeofísicos permitem considerar a classificação desta área como discutível.

A mudança das concentrações dos elementos radioativos é evidente, onde normalmente os granitos da Suíte Maloquinha se associam a tons quentes nos mapas de contagem de elementos (Fig. 10 e 17), cor branca no mapa ternário, associado ao Domínio 2 (Fig. 23 e 24) e altos valores nos mapas eU/eTh, eU/K e FF (Fig. 11 e 19). Em todos esses mapas é notável uma considerável mudança a partir da região central do bloco e em área a sul, ilustrado na Figura 25. Observa-se mudanças na região também no mapa ASA (Fig. 20 e 25(E)), onde os tons azuis que acompanham os limites do corpo, desaparecem em um trecho central e retornando a sul. Essa associação de cores frias no mapa ASA a Suíte Maloquinha é descrita em outras ocorrências associadas a unidade no mapa.

Observa-se também incongruências no mapa MDT (Fig. 18 e 25(F)), onde ocorre uma diminuição da altimetria na região discutida, onde passa uma drenagem. A drenagem poderia resultar em menores concentrações dos elementos por lixiviação, no entanto, no mesmo granito ao norte, com topografia e drenagens semelhantes, a radiometria característica da unidade não é afetada.

No mapa ASA (Fig. 20) é observado uma grande anomalia magnética de formato lenticular na região central, que é relacionada aos gabros da Suíte Ingarana, único registro máfico descrito na região. Outras áreas com altos valores se associam principalmente as unidades de rochas vulcânicas, nomeadamente as formações Vila Riozinho e Salustiano. Ainda se observa áreas semelhantes dispersas principalmente no centro e leste que,

espacialmente, se correlacionam principalmente com a Suíte Creporizão e Complexo Cuiú-Cuiú.

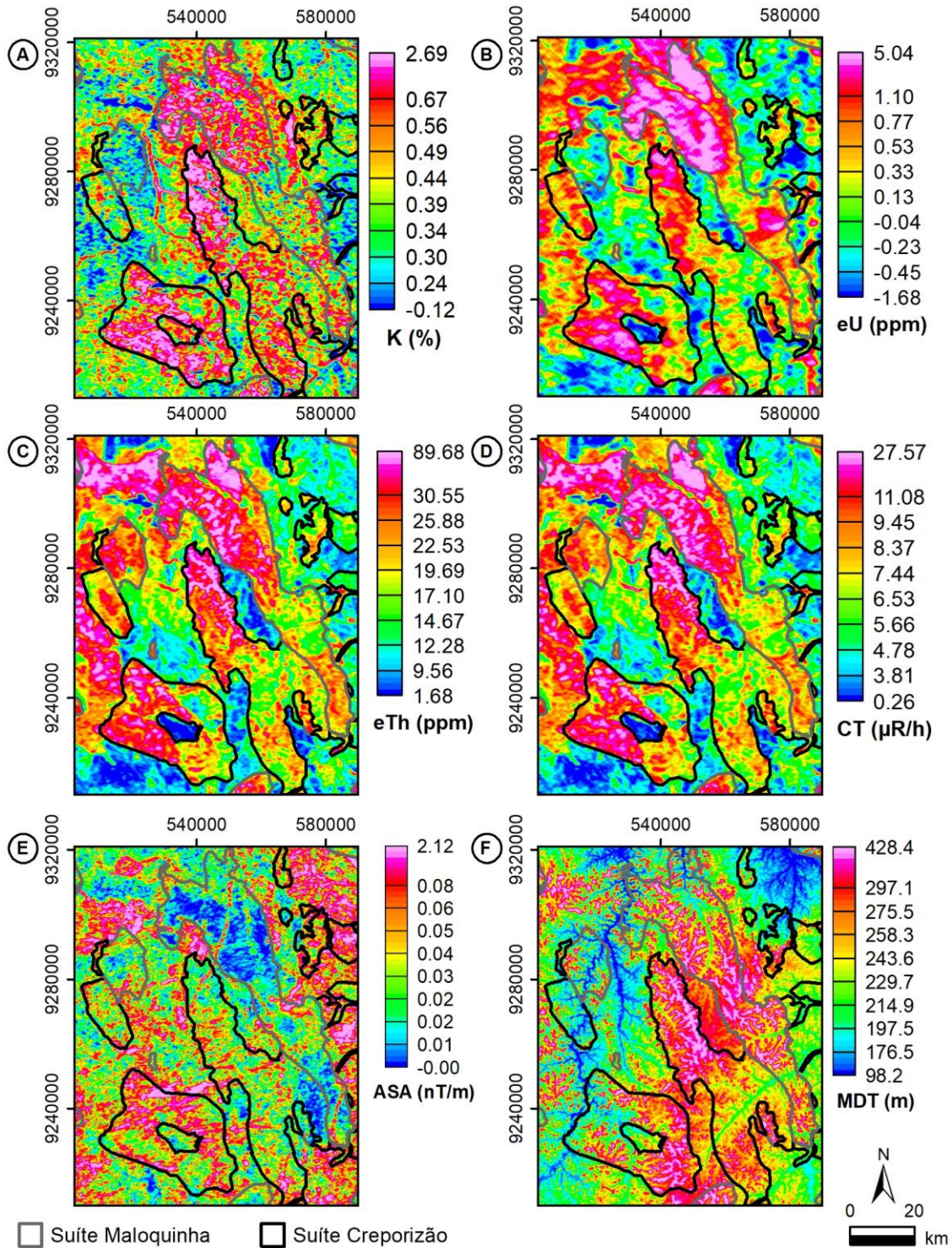


Figura 25 - Mapas aerogeofísicos de contagem de elementos (A) K, (B) eU, (C) eTh, (D) Contagem Total, (E) Mapa ASA e (F) Mapa MDT sobrepostos por contatos da Suíte Maloquinha (cinza) e Suíte Creporizão (preto) definidos por Vasquez et al. (2020).

Lineamentos magnéticos NNE-SSW e NE-SW foram identificado no mapa ASA (Fig. 20 e 21). Lineamentos como esses podem representar falhas onde percolaram fluidos

hidrotermais ou diques em subsuperfície ou superfície. Esses lineamentos se correlacionam espacialmente com marcações no mapa geológico de diques ou lineamentos inferidos por magnetometria.

Os mapas ASA (Fig. 20 e 21) e *Tilt Angle*, com UC (Fig. 14 e 15) evidenciam um domínio de feições magnéticas E-W, que apresentam continuidade com o incremento de profundidade na crosta. Lineamentos NE-SW e NW-SE são observados, mas não foram descritas as grandes estruturas NW-SE presentes no mapa geológico da região que seriam resultado das colagens tectônicas propostas por Tassinari e Macambira (1999, 2004) e Santos et al. (2000).

Estruturas E-W em maiores profundidades já foram observadas e discutidas em outros trabalhos na região (e.g. Carneiro et al., 2018; Dutra e Cellier, 2020). Esses autores consideram que essas estruturas seriam mais antigas, presentes no embasamento arqueano e relacionadas ao magmatismo e vulcanismo que ocorreu durante a formação dos arcos magmáticas continentais no Paleoproterozoico (Juliani e Fernandes, 2010). Neste contexto, as estruturas NE-SW e NW-SE seriam estruturas relacionadas a intrusões tardi- a pós-orogênicas que geraram unidades vulcânicas e intrusões tipo A (Juliani e Fernandes, 2010; Fernandes et al., 2011).

Nos mapas interpretados, não foi possível estabelecer uma clara correlação entre os lineamentos observados no mapa *Tilt Angle* com UC 500 (Fig. 14 e 22(B)) e as unidades geológicas. De modo geral, as estruturas foram descritas em toda a área de estudo e se relacionam espacialmente com todas as unidades do mapa geológico. É possível a identificação de alguns lineamentos que parecem seguir de forma incipiente os contatos de alguns corpos graníticos tardios da Suíte Maloquinha.

As estruturas E-W são muito evidentes nos mapas magnetométricos bem como a falta de reflexos dessas estruturas na orientação e colocação dos magmas na PMT. Conclui-se que a região carece de estudos de maior detalhe para verificar se as estruturas identificadas nos mapas magnetométricos são artefatos de processamento dos dados ou se os mapas geológicos da região necessitam de maior detalhamento para melhor caracterização das estruturas presentes na região. Ainda, se carece de uma revisão dos conceitos sobre a evolução tectônica da parte sul do Cráton Amazônico.

5. MODELAGEM LITOLÓGICA PREDITIVA POR MÉTODO SOM

A aplicação da técnica de SOM feita com o algoritmo IntraSOM (De Gouvêa et al., 2023) desenvolvido pelo laboratório InTRA (*Integrated Technology for Rock and Fluid Analysis*) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Campus Baixada Santista. Neste capítulo serão discutidos os parâmetros estatísticos das variáveis que foram utilizadas no ambiente SOM e apresentados os produtos gerados no processamento e suas interpretações, à luz do atual mapa geológico da região de Vasquez et al. (2020) e dos mapas processados por meio dos dados aerogeofísicos, presentes no capítulo anterior.

5.1 Parâmetros estatísticos das variáveis de entrada

Os parâmetros estatísticos foram calculados a partir da base de dados das variáveis utilizadas no treinamento no ambiente SOM (Tabela 4). A base de dados foi composta pelos valores obtidos dos pontos relacionados aos *pixels* produzidos nos mapas aerogeofísicos relativos a cada variável. Os cálculos foram efetuados na plataforma web Jupyter Notebook (Kluyver et al., 2016)

Os valores de referência obtidos a partir do conjunto total dos dados são apresentados na Tabela 5. Esses valores foram utilizados para classificar a contribuição e os índices de cada variável em relação a um *cluster*, definidos a partir de um valor que mede a influência desta variável em um determinado agrupamento (Tabela 6). A classificação foi baseada no conjunto total de valores de cada variável, onde esses valores foram ordenados, divididos em partes iguais e depois separados em três classes: baixos, médios e altos valores (Tabela 7). Para se chegar nessa classificação, o conjunto dos valores foi dividido em quartis, com o primeiro quartil como limiar entre baixos e médios valores e o terceiro quartil como limiar entre médios e altos valores (Tabela 5).

Tabela 5 – Valores de referência para classificação das variáveis analisadas.

	Mediana	1º Quartil (< baixos valores)	3º Quartil (> altos valores)
K	0,4271	0,3285	0,5939
eU	0,3066	-0,1626	0,9502
eTh	18,7718	14,1059	24,7124
CT	7,1422	5,3469	9,2505
ASA	0,0448	0,0352	0,0829
MDT	235,1628	210,4008	273,7824

Tabela 6 – Influência das variáveis em cada cluster das análises SOM.

	q-error	K	eU	eTh	CT	ASA	MDT
Cluster 1	0,3001	0,3213	0,0342	15,5498	5,6705	0,0586	209,3828
Cluster 2	0,8316	0,4081	0,1004	17,2761	6,5498	0,6167	257,0907
Cluster 3	0,7930	1,5340	2,2051	34,7371	14,7785	0,0471	328,5008
Cluster 4	0,2931	0,4938	0,2395	17,6234	6,7203	0,0437	239,6169
Cluster 5	0,4785	0,4043	1,3200	31,7715	11,3462	0,0402	219,5026
Cluster 6	0,3711	0,3537	-0,2246	11,3253	4,4752	0,0431	154,8168
Cluster 7	0,4183	0,7992	0,1272	17,6198	7,2537	0,0449	267,1064
Cluster 8	0,5589	0,8582	2,0742	33,3632	13,1443	0,0350	287,0073
Cluster 9	0,3341	0,3353	0,5424	23,7961	8,3882	0,0429	215,8159
Cluster 10	0,2953	0,3525	-0,5715	10,6774	3,9413	0,0421	228,4229
Cluster 11	0,3593	0,4066	-0,2062	13,0761	5,0715	0,0445	283,3205
Cluster 12	0,6310	0,3505	1,0623	45,1271	15,2922	0,0307	337,3412
Cluster 13	0,4073	0,5419	1,2341	21,3416	8,5821	0,0483	211,2452
Cluster 14	0,9804	0,8066	4,5150	49,0168	19,5284	0,0254	373,6921
Cluster 15	0,5414	0,3998	0,1169	16,0794	6,0878	0,2764	233,7187
Cluster 16	1,8928	0,4717	0,0687	16,9065	6,4537	1,3160	268,2257
Cluster 17	0,4362	0,4383	0,7204	24,3660	8,8507	0,0402	314,1206
Cluster 18	0,5203	0,9986	1,0635	23,2775	10,0043	0,0488	297,5441

Tabela 7 – Classificação da influência das variáveis em cada cluster das análises SOM.

	K	eU	eTh	CT	ASA	MDT
Cluster 1	Baixo	Médio	Médio	Médio	Médio	Baixo
Cluster 2	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Médio
Cluster 3	Alto	Alto	Alto	Alto	Médio	Alto
Cluster 4	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
Cluster 5	Médio	Alto	Alto	Alto	Médio	Médio
Cluster 6	Médio	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Baixo
Cluster 7	Alto	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
Cluster 8	Alto	Alto	Alto	Alto	Baixo	Alto
Cluster 9	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio
Cluster 10	Médio	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Médio
Cluster 11	Médio	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Alto
Cluster 12	Médio	Alto	Alto	Alto	Baixo	Alto
Cluster 13	Médio	Alto	Médio	Médio	Médio	Médio
Cluster 14	Alto	Alto	Alto	Alto	Baixo	Alto
Cluster 15	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Médio
Cluster 16	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Médio
Cluster 17	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto
Cluster 18	Alto	Alto	Médio	Alto	Médio	Alto

5.2 Resultados das análises SOM

O primeiro treinamento vetorial, também chamado de *rough training*, foi realizado com 40 interações, com um raio inicial de 70 neurônios e um raio final de 20 neurônios. O segundo treinamento, ou *fine training*, contou com 300 interações, raio inicial de 20 neurônios e raio final de 1 neurônio. Atingiu-se o erro de quantização de 0,402 e um erro topográfico de 0,0021 durante o processamento para criação do mapa, que são valores considerados adequados, onde busca-se valores próximos de 0.

A fim de verificar a qualidade do treinamento feito pelo SOM, foram elaborados mapas de parcelas componentes e de Matriz-U (Fig. 26). Estas plotagens representam uma projeção planar de uma superfície toroidal, sendo assim, os neurônios da borda de cima continuam na borda de baixo e os da esquerda continuam na borda direita.

Nas plotagens de parcelas componentes (Fig. 26(A-F)) foram observados dois tipos de distribuição dos altos valores, bem ilustrados no MDT: (i) restrito a apenas um ponto com altos valores, observado no ASA e, (ii) altos valores dispersos pelo mapa e amplos. Os plots eU e eTh apresentam dispersão similar, que também se observa no CT. Essa relação é esperada, dado que nas interpretações dos produtos geofísicos os mapas eTh e CT (Fig. 10 e 17) são semelhantes. Esses altos valores sugerem distribuição similar desses parâmetros no espaço SOM. A plotagem MDT (Fig. 26(F)) conta com um pico de alto valor coincidindo com eU, eTh e CT, mas conta com outros pontos de altos valores.

Observa-se no mapa Matriz-U (Fig. 26(G)), que há duas áreas de maior dissimilaridade (cores quentes), a maior, no centro da figura, coincide com altos valores de ASA, enquanto a outra coincide com os pontos de altos valores de eU, eTh e CT e um dos pontos de MDT, sugerindo maiores contribuições destas variáveis. Pontos de maiores similaridades, com tons azuis, são relacionados principalmente ao K e MDT.

A etapa seguinte consistiu na aplicação do Índice de Davies-Bouldin (Davies e Bouldin, 1979), por meio da plataforma web Jupyter Notebook (Kluyver et al., 2016), para a definição do número ideal de *clusters* para os neurônios resultantes das análises SOM. Assim, foi obtido o número 18, baseado na classificação utilizando o método k-means.

O produto é o mapa representado pela Figura 27, com os 18 *clusters* com os valores de referência apresentados na Tabela 7, para classificação a partir de suas médias de cada parâmetro utilizado como variável nas análises no ambiente SOM.

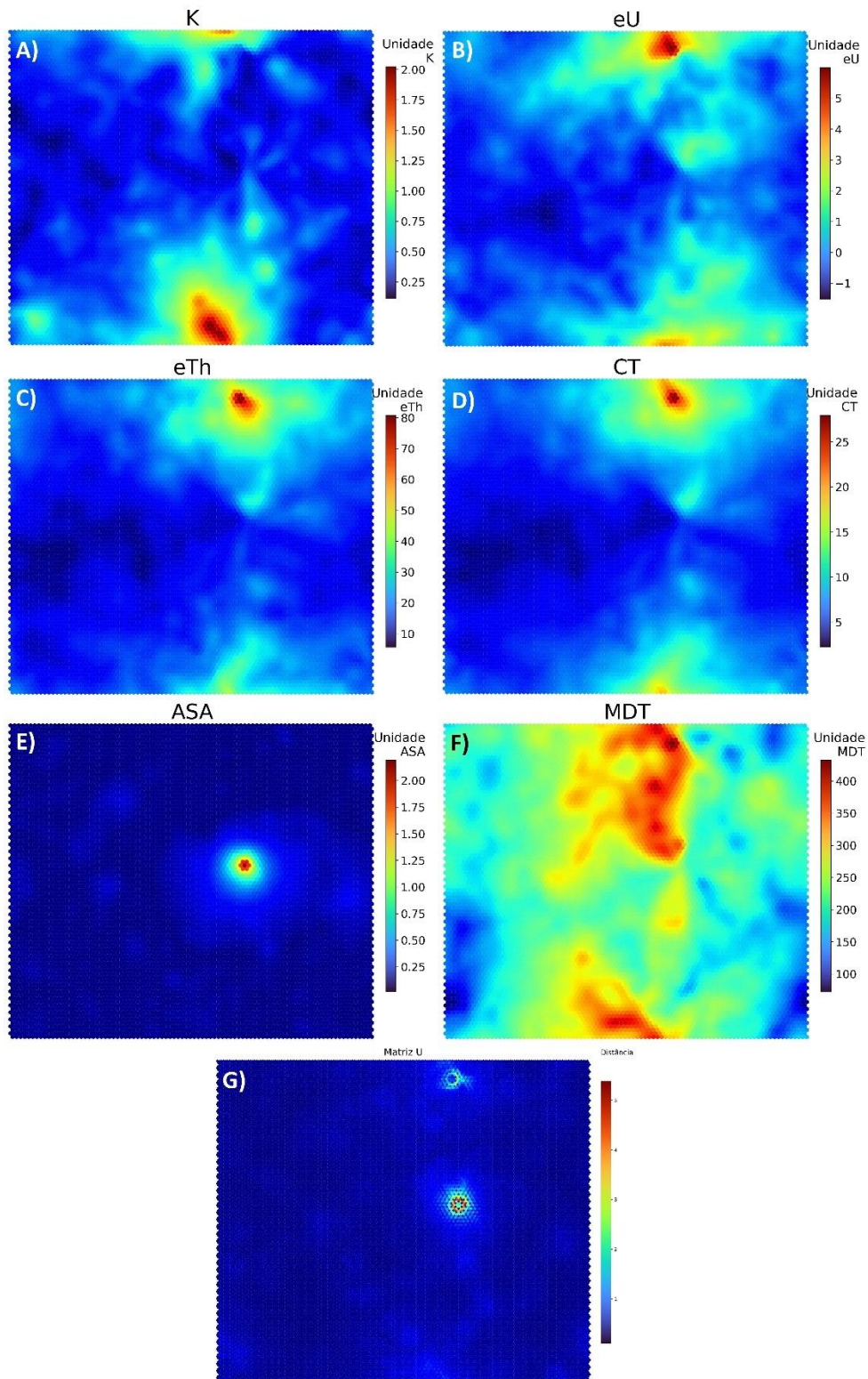


Figura 26 – (A-F) Plotagens de parcelas componentes demonstrando visualmente as principais relações entre as variáveis utilizadas nas análises SOM: (A) Potássio (K); (B) Urânio equivalente (eU); (C) Tório equivalente (eTh); (D) Contagem Total (CT); (E) Amplitude do Sinal Analítico (ASA); (F) Modelo Digital de Terreno (MDT), onde as cores quentes representam altos valores e contribuições para a análise e as cores frias baixos valores e contribuições; (G) Matriz-U, cores quentes representam alta dissimilaridade e cores frias altas similaridades.

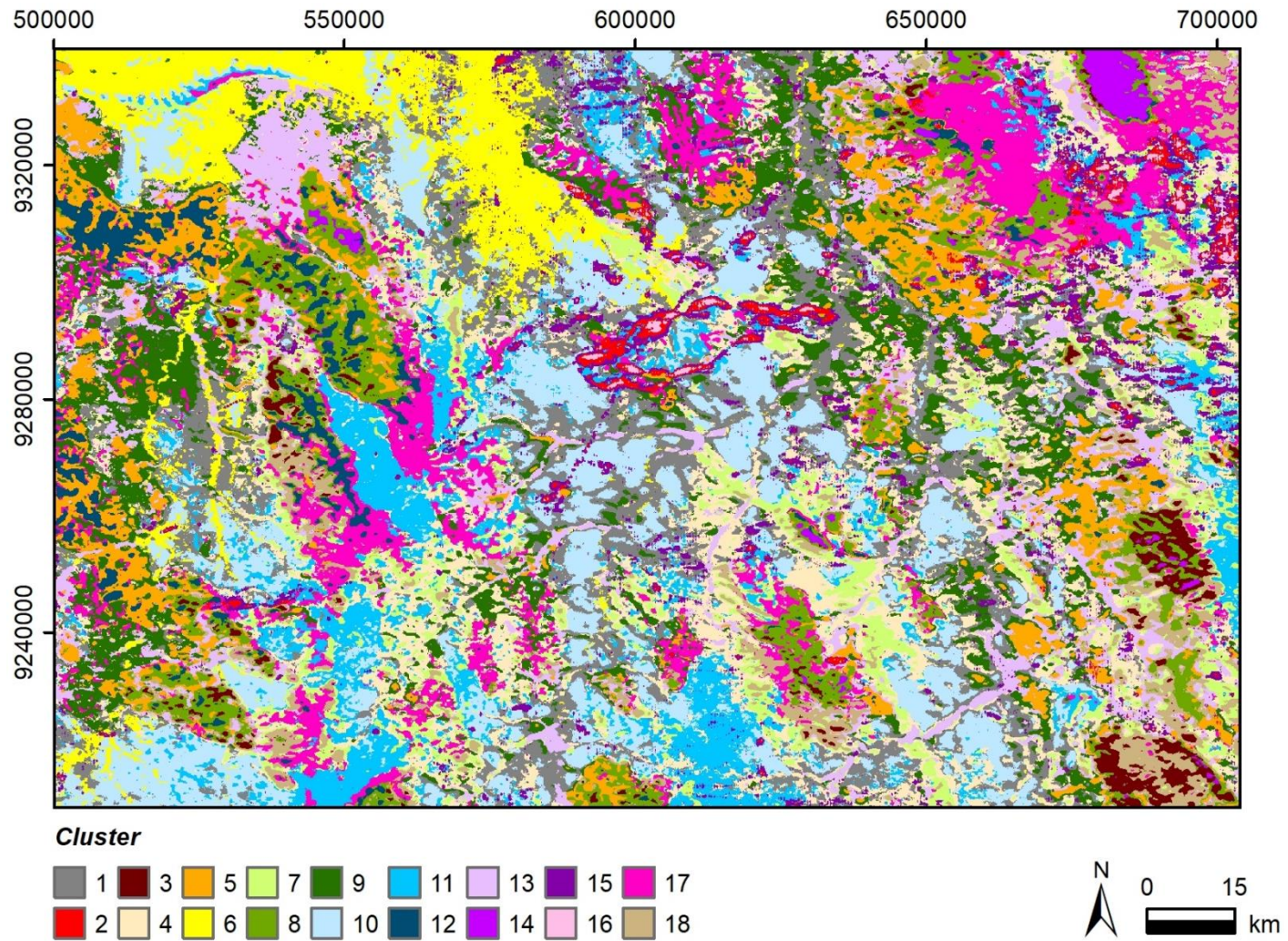


Figura 27 - Modelo espacializado mostrando cada amostra codificada pela cor representativa de cada cluster a partir das análises SOM. Os valores de referência das variáveis que caracterizam cada *cluster* estão representados nas Tabelas 6 e 7.

5.3 Caracterização dos *clusters* do mapa litológico preditivo

A partir da composição mineralógica das rochas predominantes em cada unidade identificada no mapa geológico de Vasquez et al. (2020), é possível estimar as assinaturas gamaespectrométricas e magnetométricas que podem ser utilizadas para individualização das unidades geológicas, identificação de estruturas, caracterização de zonas homólogas e zonas possivelmente afetadas por atividade hidrotermal.

Com base no banco de dados obtido a partir do processamento dos levantamentos aerogeofísicos realizados neste estudo, um modelo dirigido por dados foi elaborado baseado na técnica de *Self-Organizing Maps*. Um mapa foi criado (Fig. 27 e 28(B)) por meio da classificação e agrupamento desses parâmetros em *clusters* conforme suas disposições naturais.

Esse mapa elaborado em ambiente SOM foi interpretado em conjunto com o mapa geológico de Vasquez et al. (2020) e dos mapas geofísicos elaborados neste estudo. A Figura 28 foi elaborada de forma a facilitar a visualização dos contatos do mapa geológico em relação ao mapa SOM, com o segundo mapa apresentando os contatos sobrepostos.

O *Cluster 1* apresenta baixos valores de K e de MDT e valores médios de eTh, eU, CT e ASA. Percebe-se uma clara relação com as drenagens, justificando os baixos valores de potássio, o elemento mais móvel, e as baixas altimetrias associadas. Devido essa relação, este *cluster* não se associa a uma unidade geológica, pois ocorre em regiões espacialmente associadas a diferentes unidades. Valores médios de urânio e tório podem se relacionar à menor mobilidade destes elementos, ou acúmulo de minerais resistentes e pesados contendo estes elementos, como o zircão e a monazita nos solos de drenagens.

O *Cluster 2* apresenta alto valor de ASA e valores médios de K, eTh, eU, CT e MDT, que podem ser correlacionados aos gabros da Suíte Ingarana. Esta correlação é muito evidente nos agrupamentos na região central do mapa, onde está a maior anomalia magnética no mapa ASA (Fig. 20). Há correlação do *cluster* com outras ocorrências da Suíte Ingarana dispersas pela região de estudo. Na parte nordeste do mapa, alguns blocos deste *cluster* parecem se associar principalmente a Formação Aruri, o que não seria esperável, considerando-se que esta unidade é formada por rochas vulcanoclásticas félsicas e sedimentares.

O *Cluster 3*, de ocorrências restrita, está predominantemente associado aos granitos tipo A da Suíte Maloquinha, especialmente a dois blocos localizados na parte sudeste do mapa. A associação deste *cluster* é explicada pelos valores elevados em todos os parâmetros, exceto o ASA, que apresenta valores médios, como esperado para rochas graníticas relativamente pouco

oxidadas. Além disso, foi identificadas ocorrências na região sudoeste do mapa, na extensão noroeste do Granito Patrocínio, e a leste do Granito Creporizão. Essas regiões são caracterizadas por altas radiometrias, comportamento que contrastam com o tipicamente associado a Suíte Creporizão, as quais fazem parte, e se assemelham as assinaturas normalmente associadas as rochas tipo A da Suíte Maloquinha.

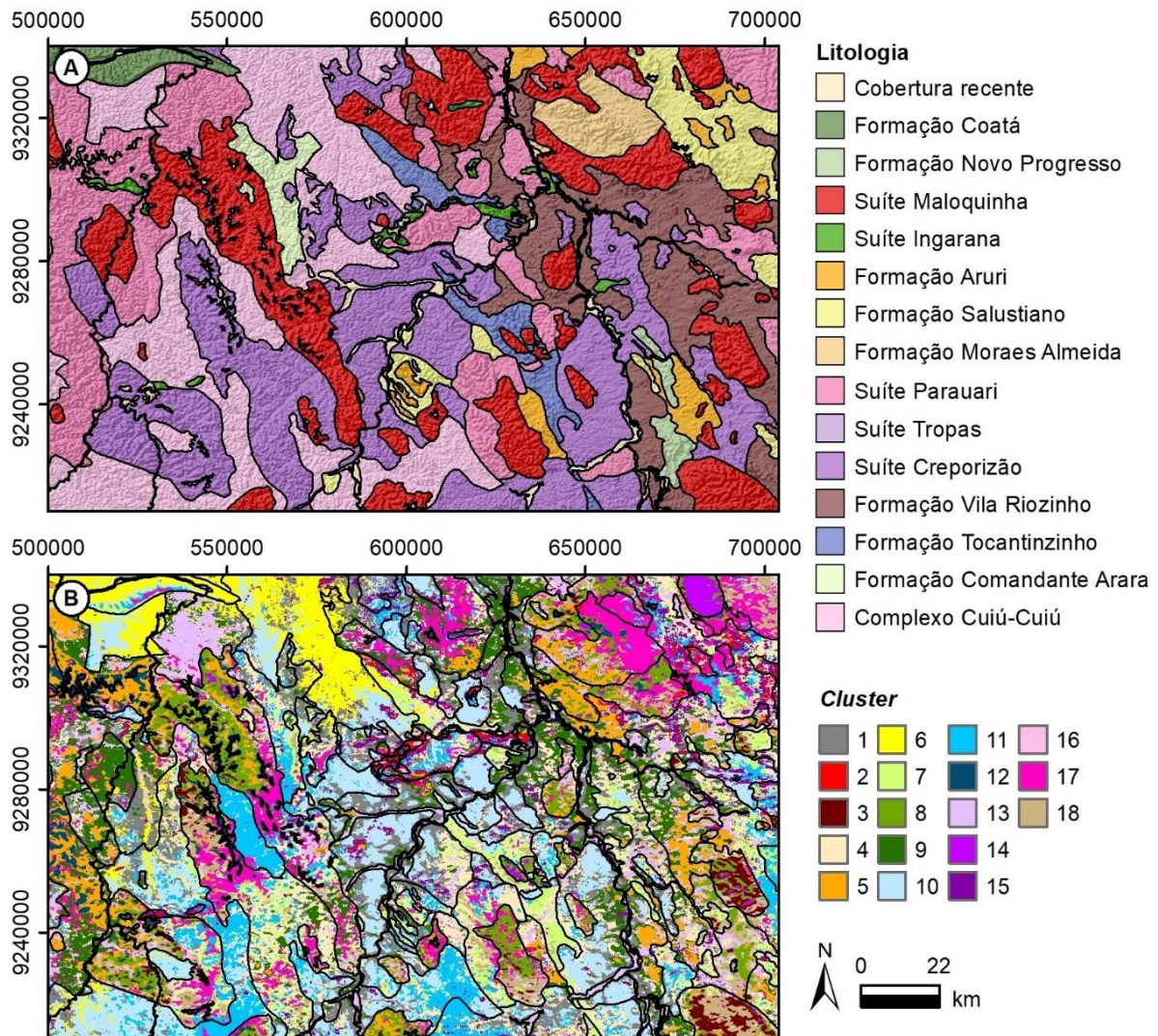


Figura 28 - Comparativo entre a área de estudo no mapa geológico de Vasquez et al. (2020) e (B) Modelo elaborado pelo IntraSOM com contatos das unidades litológicas e drenagens do mapa 28(A) sobrepostos.

O *Cluster* 4 ocorre distribuído de forma dispersa no mapa, se associando a diferentes unidades geológicas. Este *cluster* apresenta valores médios em todas as variáveis, com ocorrência mais expressiva na parte sul do mapa. Nota-se um certo nível de associação com os depósitos vulcanoclásticos e vulcanogênicos da Formação Tocantinzinho, principalmente na sua

extensão sul, onde ocorre também associado a Suíte Parauari e Creporizão em torno de um bloco cartografado como pertencente a Suíte Maloquinha. Uma área considerável localiza-se a sudoeste do mapa na porção sul do Granito Patrocínio, inclusive com distribuição espacial semelhante aos contatos delimitados no mapa geológico da região. Essa grande ocorrência associada ao Granito Patrocínio é mais uma demonstração da discrepância composicional, descrita anteriormente e evidenciada na Figura 25.

Outras ocorrências deste *cluster* estão associadas à porção norte da Formação Salustiano, na parte nordeste do mapa, além de várias áreas menores dispersas no grande corpo a leste associado a Formação Vila Riozinho e em blocos da Suíte Parauari, a sul do mapa. Essas regiões no mapa ternário (Fig. 12 e 23(A)) apresentam tons mais claros, indicando radiometria relativamente mais elevadas.

O *Cluster 5*, ocorre predominantemente associado à maior área de rochas da Suíte Parauari, na porção oeste do mapa geológico. Esta área apresenta radiometrias elevadas de eU e eTh (Fig. 10 e 17), o que difere do comportamento observado nesta unidade em geral. O referido *cluster* exibe valores médios de potássio, MDT e ASA e valores altos de eU, eTh e CT. Um notável agrupamento deste *cluster* é observado na porção nordeste do mapa, mas sem correlação com uma unidade geológica específica. Tal qual a área anterior, essa também apresenta subáreas com radiometria elevada de eU e eTh (Fig. 10 e 17).

Este *cluster* ocorre também como áreas menores da Formação Vila Riozinho, formada por rochas vulcânicas cálcio-alcálicas de alto potássio e da Formação Moraes de Almeida, constituída por ignimbritos e riolitos tipo A, bem como na Suíte Maloquinha, caracterizada por afloramentos de granitos do tipo A. De modo geral, é notável sua associação com unidades magmáticas do tipo A, que tipicamente apresentam altos teores de potássio. No entanto, a ocorrência deste *cluster* em regiões de onde afloram rochas com menores teores de potássio indicados pela radiometria, sugere a existência de intrusivas menores (pequenos *stocks* e diques) e/ou zonas de metassomatismo potássico, característicos de alterações hidrotermais do tipo pórfiro associadas a essas unidades geológicas petrologicamente menos evoluídas, de afinidades cálcio-alcálicas.

O *Cluster 6* é caracterizado por apresentar valores médios de ASA e K e baixos valores de eU, eTh, CT e MDT. Sua associação principal é com o Complexo Cuiú-Cuiú e Formação Coatá a noroeste. Observa-se neste *cluster* forte influência da altimetria na formação dos agrupamentos, que se associa a áreas de menores altitudes (Fig. 18). Esses agrupamentos são

também observados nas regiões mais planas e com altitudes menores intimamente associadas aos sistemas de drenagem no extremo oeste do mapa.

O *Cluster 7* apresenta forte associação com o *Cluster 4*, ocorrendo em porções menores dentro deste *cluster*. Exibe valores médios em todas as variáveis, exceto pelo K, que é alto, o que o distingue do *Cluster 4*. De modo análogo a este *cluster*, apresenta-se distribuído dispersamente no mapa. Seu agrupamento mais expressivo ocorre na extensão sul da Formação Tocantinzinho. Esse *cluster* é interpretado como uma variação faciológica de rochas com maiores teores de potássio, podendo ser associadas ao magmatismo do tipo A como corpos intrusivos ou extrusivos, e a zonas de alteração hidrotermal potássica.

O *Cluster 8* está predominantemente associado aos granitos tipo A da Suíte Maloquinha. É caracterizado por valores altos de todas as variáveis, exceto pelo ASA, que é baixo. Esse agrupamento é consistente com as características na unidade e sua principal ocorrência está relacionada a baixa anomalia magnética na porção norte do grande bloco da Suíte Maloquinha, a centro-oeste, como observado no mapa ASA (Fig. 20). No entanto, não se observa esse *cluster* nas duas maiores áreas de exposição das rochas da Suíte Maloquinha na região centro-norte, conforme definido por Vasquez et al. (2020).

É também notável a presença deste *cluster* a noroeste do Granito Patrocínio e a oeste do Granito Creporizão, associado a regiões de altas radiometrias, conforme indicado na Figura 25. A exemplo do que ocorre com o *Cluster 3*, que é associado a Suíte Maloquinha, mas também ocorre junto aos granitos cálcio-alcálicos da Suíte Creporizão, essas ocorrências mapeiam concentrações anômalas dos elementos radiométricos, que podem ser associados a intrusões alcalinas ou zonas metassomatizadas.

O *Cluster 9* ocorre disperso pelo mapa, usualmente em áreas próximas às drenagens principais, preferencialmente em regiões com radiometrias médias a altas. Entretanto, destaca-se que o agrupamento deste *cluster* corresponde a quase todo o bloco da Suíte Maloquinha mais a oeste, que se caracteriza por radiometria diferente das normalmente associadas às ocorrências da suíte. Esse *cluster* apresenta valores médios em todos os parâmetros.

O *Cluster 10* está associado principalmente às áreas de ocorrência da Suíte Creporizão e do Complexo Cuiú-Cuiú, apresentando baixos valores de eU, eTh e CT e valores médios de K, MDT e ASA. Este é o *cluster* mais frequente na região central de baixa radiometria do mapa geológico, que se relaciona a maior área de afloramento de rochas da Suíte Creporizão. Sua associação com o Complexo Cuiú-Cuiú é também evidente, especialmente na parte sudoeste

do mapa. Na região central do mapa observa-se forte associação aos blocos da Suíte Parauari, provavelmente devido os baixos teores de eU nessa região.

O *Cluster* 11 possui parâmetros semelhantes aos do *cluster* anterior, mas com alto MDT, indicando rochas mais resistentes ao intemperismo e à erosão. Sua ocorrência também parece estar associada ao *Cluster* 10, mas restrita a áreas com maiores altitudes. No mapa geológico, este *cluster* se associa principalmente ao Complexo Cuiú-Cuiú, mas também se correlaciona parcialmente com áreas de ocorrência da Suíte Creporizão e da Suíte Parauari, esta, na região extremo leste do mapa. Curiosamente, há também uma associação deste *cluster* e do anterior com gabros da Suíte Ingarana (agrupados majoritariamente no *Cluster* 2) nas partes noroeste e norte do mapa, o que parece indicar a ocorrência de rochas mais diferenciadas na suíte, ou uma definição errônea do registro geológico ou ainda alterações hidrotermais que afetaram as rochas máficas da suíte.

O *Cluster* 12 caracteriza-se por valores elevados de eU, eTh, CT e MDT, valores médios de K e valor baixo de ASA. Sua ocorrência está concentrada na parte oeste do mapa, em regiões de radiometrias altas da Suíte Parauari; na parte norte da maior área de ocorrência da Suíte Maloquinha, e a noroeste do Granito Patrocínio. A Figura 28 evidencia a relação deste *cluster* com as coberturas sedimentares cenozoicas preservadas em altos topográficos. De acordo com Vasquez et al. (2020), esses depósitos são definidos como coberturas lateríticas imaturas, o que é consistente com os teores mais baixos de potássio para esse tipo de depósito.

O *Cluster* 13 está principalmente relacionado à maior região de rochas da Suíte Parauari na porção oeste do mapa, que na sua extensão nordeste apresenta comportamento radiométrico distinto do restante deste bloco. O *cluster* é definido por valores médios para todos as variáveis, exceto eU, que é alto. Também se observa uma forte associação com drenagens, especialmente onde foram cartografados depósitos aluvionares recentes, principalmente na região central e sudeste do mapa.

O *Cluster* 14 se associa fortemente com o corpo relacionado a Suíte Maloquinha no limite nordeste do mapa. O agrupamento conta com altos valores de todos os parâmetros, exceto ASA, que é baixo. É possível identificar ocorrências esparsas desse *cluster* em outras regiões associadas a esta unidade.

O *Cluster* 15 e 16 apresentam clara associação com o *Cluster* 2, vinculado com os gabros da Suíte Ingarana. Estes possuem altos valores de ASA e médios para os demais parâmetros. Sua ocorrência é esparsa no mapa, concentrando-se na estrutura lenticular na região central do

mapa, onde estão as maiores anomalias magnéticas no mapa ASA. O *Cluster 15* ocorre nas bordas dos agrupamentos do *Cluster 2*, enquanto o *Cluster 16* está como pequenas ocorrências nas regiões centrais desses agrupamentos. Também ocorrem áreas desses *clusters* a nordeste do mapa que, possivelmente, estão associados aos pequenos corpos da Formação Aruri, o que não seria esperável dado que essa unidade é composta por rochas vulcanoclásticas félsicas.

O *Cluster 17* forma grandes agrupamentos no mapa, apresentando alto valor para o MDT e médios para os parâmetros restantes. Está intimamente ligado a regiões de altas radiometrias e altimetrias, com certa associação aos *clusters* tipicamente encontrados nessas regiões, mas como um equivalente com menores radiometrias desses *clusters*. Chama a atenção sua ocorrência nos dois corpos maiores cartografados como parte da Suíte Maloquinha no centro-norte do mapa, região discutida no estudo por apresentar radiometrias distintas daquelas normalmente observadas nesta unidade. Há ainda uma ocorrência associada a Formação Moraes de Almeida a leste, unidade composta por rochas vulcânicas e vulcanoclásticas do tipo A. Nesta região ainda se associa com parte da Formação Salustiano e Suíte Parauari, mais a nordeste do corpo, região com características distintas das outras ocorrências da unidade.

Por fim, o *Cluster 18* ocorre como áreas dispersas em regiões de altas radiometrias e, por isso, pode ser associado a alguns corpos da Suíte Maloquinha a sudeste do mapa, e as áreas da Suíte Creporizão a sudoeste do mapa, no noroeste do Granito Patrocínio, principalmente. Na região sudeste do mapa, área que conta com altas radiometrias de modo geral, percebe-se ocorrência desse *cluster* de forma dispersa, sem alguma associação específica. O *cluster* apresenta altos valores de K, eU, CT e MDT e médios de ASA e eTh. Os altos valores de CT e os valores médios de eTh se explicam pela proximidade dos valores de eTh com o limite da classificação de altos valores dessa variável.

5.4 Discussão e Comentários

Os resultados obtidos indicam semelhanças entre os mapas gerados pelo SOM (Fig. 27 e 28) e o geológico da PMT (Fig. 16; Vasquez et al., 2020). Provavelmente, devido ao grande número de *clusters*, as correlações entre as áreas e as unidades geológicas variam bastante, assim como o número de *clusters* associados a uma mesma unidade. Em parte, isto pode ser devido ao elevado número de *clusters* definidos, mas, certamente, fica evidente que o mapa geológico pode ser ainda melhorado de modo significativo. Em muitos casos, a ocorrência de um *cluster* está consistentemente associado à ocorrência de outro, como os *clusters 7* e *16*, que

se inserem nas áreas dos *clusters* 4 e 7, respectivamente. Essas feições nos *clusters* em uma mesma unidade podem indicar variações faciológicas e composicionais ainda não identificadas ou mapeadas, o que é reforçado pelo fato que normalmente esses *clusters* apresentam pequenas diferenças entre seus valores de referência das variáveis, as vezes tão pequena que não altera a classificação das variáveis, conforme a Tabela 5.

A sobreposição dos contatos do mapa geológico com o mapa SOM, mostrados na Figura 28, evidencia a notável coincidência no contato de diversas unidades geológicas. Isso pode indicar excelente resultado do processamento utilizado ou, alternativamente, que devido as dificuldades de afloramentos e acessos na região Amazônica, os mapas geológicos, como o de Vasquez et al. (2020), são elaborados com forte assistência dos dados aerogeofísicos. Esse aspecto é também evidenciado por subdivisões de unidades geológicas em áreas onde não há indicação de amostragens e descrição de afloramentos. Assim, de modo geral, pode-se concluir que o mapa SOM (Fig. 27 e 28(B)), por ser baseado fortemente em dados aerogeofísicos, apresenta grande utilidade na elaboração de mapas geológicos preditivos.

A topografia na região evidencia correlações com algumas unidades geológicas, como dos granitos tipo A da Suíte Maloquinha a elevadas altimetrias. Esse aspecto é explicável pelo alto teor de quartzo e pela granulação grossa destas rochas, que sofrem intemperismo e erosão mais lentamente e que, tipicamente, afloram como grandes afloramentos e campos de matações, ao passo que as rochas ígneas cálcio-alcálicas menos diferenciadas na região, como as associadas ao Complexo Cuiú-Cuiú e as suítes Creporizão e Parauari, são mais suscetíveis ao intemperismo e a erosão. Percebe-se influência da altimetria na definição de contatos e caracterização de feições nos mapas geológicos e no mapa SOM (Fig. 28), influenciando no agrupamento de com variações mineralógicas, além de pôr vezes marcar estruturas tectônicas, de apontar diferenças na granulação das rochas e de delimitar ou direcionar o acesso de águas pluviais nessas zonas.

O extenso corpo da Suíte Maloquinha a centro-oeste, junto com a porção noroeste do Granito Patrocínio e a porção oeste da estrutura anelar do Granito Creporizão, no sudoeste do mapa, destacados na Figura 25, representam áreas que as extensões de suas ocorrências no mapa geológico de Vasquez et al. (2020) são bastante discutíveis, por não serem adequadamente suportados pelas características geofísicas, tampouco pelo mapa preditivo desenvolvido neste trabalho. Os mapas de contagem de elementos (Fig. 25(A-C)) apresentam diminuição considerável dos seus teores ao longo das continuidades destes corpos. Com resultados

evidentemente discrepantes, pode-se citar o maior corpo relacionado à Suíte Maloquinha, por Vasquez et al. (2020), que apresenta drástica diminuição de sua topografia, além de variações radiométricas (Fig. 25) e dos valores associados aos *clusters* (Fig. 27 e 28), que não embasam uma união da parte norte e sul em um único corpo.

Os resultados obtidos no mapa SOM vão de encontro com essa discussão, pois observa-se características semelhantes as observadas na Figura 24. As áreas a norte da Suíte Maloquinha, noroeste do Granito Patrocínio e oeste do Granito Creporizão são caracterizados por *clusters* semelhantes incluindo o 8 (verde escuro), 3 (vinho) e 5 (laranja), com altos valores nos elementos, como às tipicamente associadas à Suíte Maloquinha. Essa discrepância nas composições das rochas fica evidente quando considerado a forte colocação dos *clusters* 4 (bege claro) a sul do Maloquinha e Granito Patrocínio e do 11 (azul) a leste do Granito Creporizão, que contam com valores menores dos elementos químicos, o 11 sendo fortemente relacionado ao Complexo Cuiú-Cuiú, caracterizado por menores teores por ser uma rocha menos evoluída.

Outro *cluster* de forte associação a essas regiões é o 17 (rosa), de valores médios em todos as variáveis e alto MDT. Sua forte presença atesta uma queda nos teores registrados ao longo das continuidades destas unidades, os valores apresentados na Tabela 6 demonstram ser uma diminuição relevante. Uma comparação entre os valores médios das variáveis do *Cluster* 17 e outros que ocorrem nessas regiões com *clusters* associados a altos valores radiométricos, associados a Suíte Maloquinha reforçam esse argumento (Tabela 6).

Essas divergências em relação as características da clusterização do mapa SOM (logo, de certa forma, dos mapas aerogeofísicos) com o mapa geológico da região não se limitam a essas ocorrências. Por exemplo, blocos da Suíte Maloquinha no centro-norte e extremo oeste aparecem fortemente associados a *clusters* com menores valores de variáveis e rochas da Suíte Parauari a oeste aparecem fortemente associadas a *clusters* de altos valores de referência como o 5 (laranja) e o 12 (azul escuro), enquanto blocos dispersos na região central associados a unidade se contam com forte presença do *Cluster* 10 (azul claro), de baixos valores das variáveis.

Essas interpretações reforçam a necessidade de maiores estudos, incluindo levantamento de campos e estudos de detalhe, nessas regiões. Segundo o mapa de projetos consultados para produção do mapa geológico, algumas dessas regiões contam com pouco a nenhuma cobertura de levantamentos de campo. Além disso, algumas áreas contam com estudos realizados há décadas, onde o conhecimento da região era mais limitado e o acesso a

técnicas de análise e identificação eram mais escassas e menos precisas. Soma-se a isso a possibilidade de haver áreas, talvez extensas, onde as alterações hidrotermais associadas ao sistema mineral epitermal-pórfiro podem estar alterando as características físico-químicas das rochas, resultando em *clusters* distintos daqueles típicos e esperados a determinada unidade geológica.

6. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Esta pesquisa buscou o estudo da geologia da porção leste da PMT a partir da modelagem espacial, aplicando técnicas relacionados ao processamento e interpretação de dados gamaespectrométricos e magnetométricos, e utilizando dados desse estudo para a produção de um mapa litológico preditivo a partir da técnica de *Self-Organizing Maps*.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a forte influência dos dados aerogeofísicos na elaboração do mapa geológico da PMT de Vasquez et al. (2020). De certa forma, essa correlação é esperada devido as extensas áreas da província que ainda não contam com levantamentos de campo, ou que contam com uma amostragem ainda muito restrita.

Essa realidade atesta a grande necessidade da realização de maiores estudos na PMT, de caráter regional e de detalhamento, para que possa se chegar em um melhor entendimento da geologia da região, de sua evolução tectônica e de seu potencial metalogenético, em especial para ocorrência de mineralizações epitermais de metais preciosos e do tipo pórfiro para metais de base e preciosos. No entanto, deve ser destacado o mérito e a evolução do conhecimento geológico realizados nas últimas décadas, incluindo o recente mapa geólogo da PMT por Vasquez et al. (2020), fruto de pesquisas feitas pelo Serviço Geológico do Brasil, além de trabalhos acadêmicos que propiciaram muitos avanços no reconhecimento petrogenético, tectônico e metalogenético da região (*e.g.* Lamarão et al., 2002; Carneiro et al., 2018; Juliani et al. 2002, 2005, 2021). Nesse contexto, esse trabalho constitui mais uma contribuição para a caracterização geológica da região leste da PMT, além de fomentar discussões e demonstrar a utilidade do uso do método SOM, e do algoritmo IntraSOM (de Gouvêa et al., 2023), para a realização de mapeamento preditivo a partir de parâmetros geofísicos.

Nos estudos geofísicos, as interpretações relacionadas a caracterização das unidades geológicas se deram em conjunto dos mapas gamaespectrométricos e magnetométricos. Nestes mapas, algumas unidades geológicas são de mais fácil distinção, permitindo uma melhor correlação em áreas sem dados de campo, como, por exemplo, a forte associação dos granitos tipo A tardios da Suíte Maloquinha com altas radiometrias e altos topográficos. Essas características estão ligadas com o caráter mais evoluído dessa unidade, que apresenta maiores concentrações de potássio e quartzo que, por sua granulação grossa, torna as rochas mais resistentes ao intemperismo e erosão.

No entanto, diversas áreas associadas à Suíte Maloquinha no mapa geológico são discutíveis. Chama a atenção nestas áreas as menores concentrações de elementos, em especial

em corpos situados no extremo leste, centro-norte e na continuidade a sul do maior corpo da suíte no centro-oeste do mapa. O último, adicionalmente, conta com forma muito alongada, não esperada para intrusões tardias, proporções consideravelmente maiores que o normalmente observado na unidade, baixas altimetrias e a caracterização não ser suportada por nenhum mapa geofísico ou pelo mapa SOM (Fig. 25). Nota-se também que grande parte da região onde o corpo é mapeado não conta com levantamentos de campo e era anteriormente associada à Suíte Creporizão pelo mesmo autor (Vasquez et al., 2008), ou em mapas anteriores (*e.g.* Almeida et al., 2000; Klein e Vasquez, 2000; Vasquez e Klein, 2000). Sendo assim, não parece haver uma justificativa evidente para a mudança de associação geológica do local, deixando dúvida essa definição. Por outro lado, alterações hidrotermais típicas da zona de alteração potássica dos pórfiros podem conferir as rochas granodioríticas e tonalíticas, como as relacionadas a Suíte Creporizão, ou até mesmo a granitos menos evoluídos de diversas suítes pré-Maloquinha, cores e texturas que podem ser confundidas com as rochas graníticas mais evoluídas petrologicamente da Suíte Maloquinha, mas sem as suas assinaturas gamaespectrométricas e magnetométricas características.

Foram definidos 8 domínios litogeofísicos a partir das contribuições de cada elemento no mapa ternário (Fig. 23). O domínio 2, de cor branca, é associado a valores elevados e equivalentes dos três elementos, e colorações claras como as associadas aos domínios 1, 4 e 5 indicam enriquecimento entre dois elementos. As áreas brancas se associam usualmente a rochas graníticas do tipo A da Suíte Maloquinha, mas, no entanto, observa-se relação de áreas desse domínio 1 associadas especialmente às suítes Creporizão, Parauari e Formação Vila Riozinho. Essas unidades são definidas como formadas por rochas cálcio-alcálicas a cálcio-alcálicas de alto potássio, petrologicamente menos evoluídas.

Essas associações de regiões com maiores concentrações de elementos, normalmente associadas a rochas alcálicas mais evoluídas, em áreas com rochas cálcio-alcálicas podem indicar: (i) Imprecisões na identificação da unidade geológica na região; (ii) Possível ocorrência de intrusões menores (*e.g.* *stocks* e diques), associados a rochas alcálicas e; (iii) Zonas de metassomatismo potássio, características alterações hidrotermais associadas a mineralizações magmático-hidrotermais.

Relações como a descrita são observadas amplamente nos mapas deste estudo, com áreas com feições radiométricas, magnetométricas e com *clusters* distintos associados a uma mesma unidade geológica. Deve-se levar em conta que variações composicionais ou

faciológicas podem ocorrer em uma unidade, porém, diferentes feições descritas parecem estar associadas as hipóteses apresentadas no parágrafo anterior e não apenas a uma variação faciológica em uma mesma unidade geológica.

Algumas áreas chamam a atenção por apresentarem feições e comportamentos distintos daqueles normalmente observados em sua unidade geológica característica, incluem: (i) grande corpo da Suíte Parauari, a oeste que conta com altos teores nas assinaturas de eU e eTh e clusterização de altos valores associados, diferente do observado no restante das ocorrências; (ii) extensão a nordeste do corpo citado no item anterior, que conta com assinatura distintas e próprias nos mapas estudados; (iii) divisão da Formação Moraes de Almeida e granitos adjacentes da Suíte Maloquinha na porção nordeste do mapa por feições radiométricas e *clusters* com valores elevados e médios dos elementos, semelhante ao que ocorre a sudoeste com a Suíte Maloquinha e granitos associados a Suíte Creporizão.

Essa última área, discutida em detalhe neste trabalho e realçado na Figura 25, representam duas áreas que chamam a atenção devido discrepância entre radiometrias e entre os *clusters* associados em um mesmo corpo. Os mapas produzidos mostram claramente que há regiões associadas a Suíte Creporizão dos granitos Patrocínio e Creporizão que apresentam radiometrias não compatíveis com o observado tipicamente na unidade, como, por exemplo, na região central, onde ocorrem alguns dos menores valores radiométricos observados em toda a região. Curiosamente, a região de altas concentrações relativas dos elementos do Granito Patrocínio localiza-se em um alto topográfico, enquanto no Granito Creporizão os altos valores estão em baixas altimetrias, enfraquecendo uma possível associação a Suíte Maloquinha ou mesmo concentrações de minerais pesados ricos em tório e urânio, como zircão e monazita.

Essas regiões devem ser estudadas em detalhe, pois podem apresentar intrusões alcalinas menores ou, até mesmo, terem sido afetadas por alterações hidrotermais, o que pode ser indicativos de potencialidade para pesquisa mineral, dado o reconhecimento de várias mineralizações associadas a depósitos magmático-hidrotermais do tipo epitermal e pórfiro ao longo da PMT.

Os mapas magnetométricos, demonstraram a predominância de lineamentos E-W, por vezes orientados a ENE-WSW ou ESE-WNW, e a predominância dessas estruturas em profundidade, quando utilizado o *Upward Continuation* (Fig. 15). Essas estruturas vão de encontro com a proposição de um embasamento arqueano sob as rochas paleoproterozoicas da PMT, onde essas estruturas E-W são contínuas (Fig. 2) e são relacionadas com zonas de

cisalhamento arqueanas presentes a leste na Província Mineral do Carajás (Carneiro et al., 2018; Dutra e Cellier, 2020; Juliani, 2019, Juliani et al., 2009, 2013). O mapa ASA (Fig. 21) evidenciou algumas estruturas circulares orientadas, parcialmente superpostas, que podem ser relacionadas a estruturas de caldeiras vulcânicas, como as descritas por Juliani et al. (2005) e/ou intrusões relacionadas ao vulcanismo na região. A orientação das intrusões E-W é compatível com a formação de arcos magmáticos continentais por um evento de subducção com a mesma orientação, como já discutido por diversos autores, o que também corrobora com as interpretações da existência de um embasamento arqueano na região, cortado pelas mesmas zonas de cisalhamento arqueanas que limitam os terrenos a leste como o Carajás, Bacajá e Rio Maria.

Poucos lineamentos NW-SE foram observados nos dados magnetométricos neste trabalho, em desacordo com o mapa geológico de Vasquez et al. (2020), onde essas estruturas são dominantes e parecem associadas a unidades geológicas, principalmente as intrusões alcalinas da Suíte Maloquinha. O mapa ASA evidenciou grandes lineamentos NE-SW a NNE-SSW (Fig. 21), que parecem associar-se com diques que cortam a região e se alinham com algumas marcações de diques presentes no mapa geológico da PMT.

Por fim, o estudo demonstrou a eficácia do método de *Machine Learning* não supervisionado *Self-Organizing Maps*, usando o algoritmo IntraSOM (de Gouvêa et al., 2023), para criar um mapa preditivo com dados aerogeofísicos (Fig. 27 e 28(B)). Essa ferramenta se mostra valiosa para estudos, principalmente em regiões que impõe dificuldades para realização de levantamentos de campo. O uso dessa metodologia parece eficaz em duas situações: no planejamento de atividades de campo, como identificando áreas com concentrações anômalas de elementos, que podem ser indícios de atividade hidrotermal, ou na delimitação de áreas de contatos entre unidades geológicas e; refinamento de um mapa geológico já existente, observando feições que possam indicar mudanças litológicas ou estruturas que não tenham sido mapeadas durante os trabalhos de campo.

Embora no mapa SOM não tenha ocorrido uma equivalência 1:1 entre *cluster* e unidade geológica, ficou claro que muito dos contatos presentes em diversas unidades geológicas foram replicados no mapeamento SOM (Fig. 28), e que claras associações entre um ou mais *clusters* com determinadas unidades geológicas ocorreram. Sendo assim, conclui-se que o método pode representar um processo ágil de interpretação de diferentes bancos de dados formando um mapa que pode ser uma útil ferramenta junto a estudos geológicos. O crescente número de trabalhos

realizados a partir de diferentes técnicas de *Machine Learning*, incluindo o *Self-Organizing Maps*, com banco de dados variados e com diferentes objetivos nas geociências parecem reforçar essa colocação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, J.A.S., Gasparini, P., 1970. Gamma-ray spectrometry of rocks, Elsevier Publ. Co., New York, 295 p.
- Agarwal, P., Skupin, A., 2008. Self-Organising Maps: Applications in the Geographic Information Science. John Wiley & Sons, 230 p.
- Aguja-Bocanegra, M.A. 2013. Mineralizações epitermal low-sulfidation e do tipo pórfiro superpostas associadas ao magmatismo félsico de 1,88 Ga na parte norte da Província Mineral do Tapajós (PA). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Sao Paulo, 235 p.
- Almeida, C.A.S, Collyer, T.A., Pereira, J.L., Seabra, A.S., Furtado, A.M.M., Soubés, L.F., 1977. Relatório final de reconhecimento (1). Projeto Santarém–Cachimbo - Pesquisa Mineral. Pólo Amazônico/Pólo Tapajós. Convênio SUDAM/IDESP.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews* 17, 1-29.
- Almeida, F.F.M., Brito Neves, B.B., Dal Ré Carneiro, C., 2000. The origin and evolution of the South American Platform. *Earth-Science Reviews* 50, 77–111.
- Almeida, M.E., Brito, M.F.L., Ferreira, A.L., Monteiro, M.A.S., 2000. Geologia e recursos minerais da Folha 16 Mamãe Anã (SB.21-V-D). Estados do Amazonas e Pará. Escala 1:250.000. PROMIN Tapajós, CPRM, Brasília, Brazil (CD-ROM).
- Amaral, G. 1974. Geologia Pré-Cambriana da Região Amazônica. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 212p.
- Bahia, R.B.C., Quadros, M.L.E.S., 2000. Geologia e recursos minerais da Folha Caracol (SB.21-X-C). Estado do Pará. Escala 1:250.000. PROMIN Tapajós, CPRM, Brasília, Brazil (CD-ROM).
- Bea, F., 1999. Uranium. In: Marshall, C.P., Fairbridge, R.W. (eds). 1999. *Encyclopedia of Geochemistry*, Kluwer Academic Publishers, London, 712 p.
- Bergen, K.J., Johnson, P.A., De Hoop, M.V., Beroza, G.C., 2019. Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience. *Science*, 363, 1299.
- 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., 2016. 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* 68, 22–49.
- Biondi, J.C., Borgo, A., Chauvet, A., Monié, P., Bruguier, O., Ocampo, R., 2018. Structural, mineralogical, geochemical and geochronological constraints on ore genesis of the gold-only Tocantinzinho deposit (Para State, Brazil). *Ore Geology Reviews* 102, 154–194.
- Borges, R.M.K., Dall’Agnol, R., Lamarão, C.N., Figueiredo, M.A.B.M., Leite, A.A. da S., Barros, C.E. de M., Costi, H.T., 2009. Petrografia, química mineral e processos hidrotermais associados ao depósito de ouro São Jorge, Província Aurífera do Tapajós, Cráton Amazônico. *Rev. Bras. Geociênc.* 39, 375–393
- Borgo, A., Biondi, J.C., Chauvet, A., Bruguier, O., Monié, P., Baker, T., Ocampo, R., Friedman, R., Mortensen, J., 2017. Geochronological, geochemical and petrographic constraints on the Paleoproterozoic Tocantinzinho gold deposit (Tapajós Gold Province, Amazonian Craton - Brazil): Implications for timing, regional evolution and deformation style of its host rocks. *Journal of South American Earth Sciences* 75, 92–115.
- Briggs, I.C., 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39(1), 39-48.
- Carneiro, C.C., 2010. Modelagem espacial de dados aerogeofísicos e interpretação de imagens SAR aplicados ao mapeamento geológico e metalogenético da região central do Domínio Bacajá, Estado

- do Pará: Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Campinas.
- Carneiro, C.C., Fraser, S.J., Crósta, A.P., Silva, A.M., Barros, C.E.M., 2012. Semiautomated geologic mapping using self-organizing maps and airborne geophysics in the Brazilian Amazon: Geophysics, 77, no. 4, K17–K24.
- Carneiro, C.D.C., Juliani, C., Carreiro-Araujo, S.A., Monteiro, L.V.S., Crosta, A.P., Fernandes, C.M.D., 2018. New crustal framework in the amazon craton based on geophysical data: Evidences of deep east-west trending suture zones. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 16, 20–24.
- Carter-McAuslan, A., Farquharson, C., 2021. Predictive geologic mapping from geophysical data using self-organizing maps: A case study from Baie Verte, Newfoundland, Canada. *Geophysics*, 86(4), B249-B264.
- Cassini, L.V., Moyon, J.F., Cellier, G., de Freitas, B., Juliani, C., Laurent, O., 2022. Towards the fertility trend: Unraveling the economic potential of igneous suites through whole-rock and zircon geochemistry (example from the Tapajós mineral Province, Northern Brazil). *Ore Geology Reviews*, v. 142. 104643.
- Cordani, U.G., Tassinari, C.G.C., Teixeira, W., Basei, M.A.S., Kawashita, K., 1979. Evolução Tectônica da Amazônia com Base nos Dados Geocronológicos. In: *Congreso Geologico Chileno, Anais*, p. 137-138.
- Cordani, U.G., Neves, B.B.B., 1982. The geologic evolution of South America during the Archean and Early Proterozoic. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 12, n.1/2/3, p. 78-88.
- Corrêa-Lima, R.G., Klein, E.L., 2020. Hydrothermal alteration, mineralization and fluid inclusions in the Pista and Fofão Prospects: implications for the genetic model of the Coringa polymetallic deposit, SE Tapajós Mineral Province, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of the Geological Survey of Brazil*, 3, 33–59.
- Corrêa-Silva, R.H., Juliani, C., Chissini, G.B., Benevides, T., 2002. Estruturas e texturas de um sistema epitermal low-sulfidation paleoproterozóico na Província Aurífera do Tapajós. In *Proceedings of the II Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados*; Belém, Brazil, 20–21.
- Cracknell, M. J., Reading, A.M., 2014. Geological mapping using remote sensing data: A comparison of five machine learning algorithms, their response to variations in the spatial distribution of training data and the use of explicit spatial information. *Computers and Geosciences*, 63, 22–33.
- Cracknell, M. J., Reading, A.M., McNeill, A.W., 2014. Mapping geology and volcanic-hosted massive sulfide alteration in the Hellyer-Mt Charter region, Tasmania, using random forests and self-organising maps. *Australian Journal of Earth Sciences*, 61, 287–304.
- Dai, H., MacBeth, C., 1995. Automatic picking of seismic arrivals in local earthquake data using an artificial neural network. *Geophys. J. Int.* 120, 758–774.
- Dall’agnol, R., Silva, C.M.G. Da; Scheller, T., 1999. Fayalite-Hedembergite Rhyolites of The Iri Formation, Tapajós Gold Province, Amazonian Craton: Implications for The Uatumã Volcanism. In: *Simpósio Sobre Vulcanismo E Ambientes Associados*, 1, 31.
- Davies, D. L., Bouldin, D.W., 1979. A cluster separation measure: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-1, 224–227.
- Dentith, M., Mudge, S.T., 2014. *Geophysics for the Mineral Exploration*. Cambridge University Press, New York.
- De Gouvêa, R.C.T., Gioria, R.S., Marques, G.R., Carneiro, C.C., 2023. IntraSOM: A comprehensive Python library for Self-Organizing Maps with hexagonal toroidal maps training and missing data handling. *Software Impacts*, 17(1), 100570.
- Dickson B.L., Scott K.M., 1997. Interpretation of aerial gamma ray surveys-adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2), 187-200.

- Dowla, F.U., Taylor, S.R., Anderson, R.W., 1990. Seismic discrimination with artificial neural networks: Preliminary results with regional spectral data. *Bulletin of Seismological Society of America*, 80(5), 1346–1373.
- Dreher, A.M. Vlach, S.R.F. Martini, S.L., 1998. Adularia associated with epithermal gold veins in the Tapajós Mineral Province, Pará State, Northern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 28, 397–404.
- Dunham, M.W., Malcolm, A., W, Welford, J.K., 2023. Predictive lithology mapping using semisupervised learning: Practical insights using a case study from New South Wales, Australia. *Geophysics*, 88(3), JM1-JM17.
- Dutra, L.F., Cellier, G., 2020. Crustal Framework of Carajás and Tapajós Mineral Province Inferred from Aeromagnetometry Data. In: 50th Brazilian Congress of Geology, Brasília, v. 1, p. 349
- Echeverri-Misas, C.M., 2010. Evolução Magmática, Alteração Hidrotermal e Gênese da Mineralização de Ouro e Cobre do Palito, Província Aurífera Do Tapajós (PA). Unpublished M.Sc dissertation, University of São Paulo, Brazil, 235 pp.
- Echeverri-Misas, C.M., 2015. Geologia e Alteração Hidrotermal nas Rochas Vulcânicas e Plutônicas Paleoproterozoicas na Porção Sul da Província Mineral do Tapajós (PA). Unpublished Ph.D thesis. University of São Paulo, Brazil 285 pp.
- Efimov, A. V., 1978. Multiplikativnyj pokazatel dlja vydelenija endogennyh rud aerogamma-spektrometricheskim dannym. In: *Metody rudnoj geofiziki*, Naucnoproizvodstvennoje objedinenie “Geofizika” Leningrad Ed., p. 59–68.
- Ferreira, A.L., Almeida, M.E., Brito, M.F.L., Monteiro, M.A.S., 2000. Geologia e recursos minerais da Folha Jacareacanga (SB.21-Y-B), Estados do Amazonas e Pará. Escala 1:250.000. PROMIN Tapajós, CPRM, Manaus, Brazil (CD-ROM).
- Fernandes, C.M.D., Juliani, C., Monteiro, L.V.S., Lagler, B., Echeverri-Misas, C.M., 2011. High-K calc-alkaline to A-type fissure-controlled volcano-plutonism of the São Félix do Xingu region, Amazonian craton, Brazil: exclusively crustal sources or only mixed Nd model ages? *J. S. Am. Earth Sci.* 32, 351–368.
- Fernandes, C.M.D., Juliani, C., 2019. The tectonic controls on the Paleoproterozoic volcanism and the associated metallogeny in the South Amazonian craton, Brazil: Sr–Nd–Pb isotope constraints. *Precambrian Res.* 331, 105354.
- Forman, J.H.A., Nardi, J.I.S., Marques, J.P.M., Lima, M.I.C. 1972. Pesquisa Mineral no Iriri/Curuá: relatório preliminar. Belém: Sudam/ Departamento de Recursos Naturais, 62.
- Fraser, S. J., Dickson, B.L., 2007, A new method for data integration and integrated data interpretation: Self-organising maps: 5th Decennial International Conference On Mineral Exploration, Expanded Abstracts, 907-910.
- Gabtni, H., Jallouli, C., 2017. Regional-residual separation of potential field: an example from Tunisia. *J. Appl. Geophys.* 137, 8–24.
- Gómez-Gutiérrez, D.F., 2018. Petrogênese e Metalogenia do Magmatismo Paleoproterozoico na Porção sul da Província Mineral do Tapajós, Cráton Amazônico. Ph.D. Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil.
- Gnojek, I., Prichystal, A., 1985. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in Northern Moravia, Checoslováquia. *Geoexploration*, 23, 491-502.
- Guimarães, S.B., Klein, E.L., Harris, C., Costa, I.S.L. 2021. Metallogenesis of the orosirian epithermal coringa gold-silver (Cu-Pb-Zn) deposit, southeastern Tapajós mineral Province, Amazon craton, Brazil. *Ore Geology Reviews*, v. 128, 103908.
- IAEA, International Atomic Energy Agency., 2003. Guidelines for radioelement using gamma ray

- spectrometry data. Viena, 173p.
- Jacobi, P., 1999. The discovery of epithermal Au–Cu–Mo Proterozoic deposits in the Tapajós Province, Brazil. *Rev. Bras. Geociências*, 29, 277–279.
- Juliani, C., Nunes, C.M.D., Bettencourt, J.S., Corrêa-Silva, R.H., Monteiro, L.V.S., Neumann, R., Alcover Neto, A., Rye, R.O., 2000. Early Proterozoic volcanic-hosted quartz–alunite epithermal deposits in the Tapajós Gold Province, Amazonian Craton, Brazil. In *Proceedings of the Geological Society of America Meeting*, 32, A-49.
- Juliani, C., Corrêa-Silva, R.H., Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Nunes, C.M.D., 2002. The Batalha Au-granite system-Tapajós Gold Province, Amazonian craton, Brazil: hydrothermal alteration and regional implications. *Precambrian Res.* 119, 225–256.
- Juliani, C., Rye, R.O., Nunes, C.M.D., Snee, L.W., Corrêa-Silva, R.H., Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Neumann, R., Neto, A.A., 2005. Paleoproterozoic high-sulfidation mineralization in the Tapajós gold province, Amazonian Craton, Brazil: geology, mineralogy, alunite argon age, and stable-isotope constraints. *Chem. Geol.* 215, 95–125.
- Juliani, C., Fernandes, C.M.D., Monteiro, L.V.S., Misas, C.M.E., Lagler, B., 2009. Possível zonamento metalogenético associado ao evento vulcano–plutônico de ~2,0 A 1,88 Ga na parte sul do Cráton Amazônico. *Simpósio Brasileiro de Metalogênese*.
- Juliani, C., Fernandes, C.M.D., 2010. Well-preserved Late Paleoproterozoic volcanic centers in the São Félix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 191, 167–179.
- Juliani C., Carneiro C.C., Carreiro-Araújo S.A., Fernandes C.M.D., Monteiro L.V.S., Crosta A.P. 2013. Estruturação dos arcos magmáticos paleoproterozóicos na porção sul do Cráton Amazônico: Implicações Geotectônicas e Metalogênicas. In: XIII Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, CD-ROM.
- 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.C., Fernandes, C.M.D., Usero, G., 2014. Metalogenia da Província Tapajós. In: *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*; Silva, M.G., Rocha Neto, M.G., Jost, H., Kuyumjian, R.M., Eds.; CPRM—Serviço Geológico do Brasil: Belo Horizonte, Brazil, 2014; Vol. 1, 229–268.
- Juliani, C., Fernandes, C.M.D., Monteiro, L.V.S., 2015. Características da Subducção, Paleoclima e Eventos Erosivos Paleoproterozóicos (2,1-1,88 Ga) e Seus Efeitos na Estruturação da Parte Sul do Cráton Amazônico. *The 14th Simpósio de Geologia da Amazônia, Marabá, Brazil (in Portuguese)*.
- Juliani, C., 2019. Epithermal and porphyry mineralization potential in well preserved Paleoproterozoic (ca. 2.0 to 1.78 Ga) continental magmatic arcs in the Amazonian Craton, Brazil. In: *Proceedings of the SEG 2019: Conference South American Metallogeny: Sierra to Craton*, Society of Economic Geologist, Santiago, Chile, 7–10.
- Juliani, C., Assis, R.R., Monteiro, L.V.S., Fernandes, C.M.D., Martins, J.E.Z.S., Costa e Costa, J.R., 2021. Gold in Paleoproterozoic (2.1 to 1.77 Ga) Continental Magmatic Arcs at the Tapajós and Juruena Mineral Provinces (Amazonian Craton, Brazil): A New Frontier for the Exploration of Epithermal–Porphyry and Related Deposits. *Minerals*, 11, 714.
- Klein E.L., Vasquez M.L., 2000. Geologia e recursos minerais da Folha Vila Riozinho (SB.21-Z-A). Estado do Pará. Escala 1:250.000. PROMIN Tapajós, CPRM, Brasília, Brasil, CD-ROM.
- Klein, E.L., Rodrigues, J.B., Queiroz, J.D.S., Oliveira, R.G., Guimarães, S.B.; Chaves, C.L., 2017. Deposition and tectonic setting of the Palaeoproterozoic Castelo dos Sonhos metasedimentary formation, Tapajós Gold Province, Amazonian Craton, Brazil: Age and isotopic constraints. *Int. Geol. Rev.*, 59, 864–883.
- Kluyver, T., Ragan-Kelly, B., Pérez, F., Granger, B., Bussonnier, M., Frederic, J., Kelley, K., Hamrick,

- J., Grout, J., Corlay, S., Ivanov, P., Avila, D., Abdalla, S., Willing, C., Team, J.D., 2016. Jupyter Notebooks – A publishing format for reproducible computational workflows. In: Positioning and power in academic publishing: Players, agents and agendas; Loizides, F., Schmidt, B. (Eds.), 87–90.
- Köhler, A., Ohrnberger, M., Scherbaum, F., 2010. Unsupervised pattern recognition in continuous seismic wavefield records using Self-Organizing Maps. *Geophys. J. Int.*, 182, 1619–1630.
- Kohonen, T., 1982. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics*, 43, 59–69.
- Kohonen, T., 2001. *Self-organizing maps*. Springer.
- Kohonen, T., 2013. Essentials of the self-organizing map. *Neural Networks*, 37, 52–65.
- Kong, Q., Allen, R.M., Schreier, L., Kwon, Y.-W., 2016. MyShake: A smartphone seismic network for earthquake early warning and beyond. *Science Advances*, 2(2), e1501055.
- Kuhn, S., Cracknell, M.J., Reading, A.M., 2018. Lithologic mapping using random forests applied to geophysical and remote-sensing data: A demonstration study from the Eastern Goldfields of Australia. *Geophysics*, 83, 4, B183–B193.
- Kuhn, S., Cracknell, M.J., Reading, A.M., 2019. Lithological mapping in the Central African Copper Belt using random forests and clustering: Strategies for optimised results. *Ore Geology Reviews*, 112, 103015.
- Lamarão, C.N., 2001. *Geologia, Geoquímica e Geocronologia do Magmatismo Paleoproterozoico da Região de Vila Riozinho, Província Aurífera do Tapajós, Cráton Amazônico*. 2001. 285 f. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 2001.
- Lamarão, C.N., Lafon, J.M., Lima, E.F., 1999. As associações vulcânicas e plutônicas de Vila Riozinho e Morais Almeida, Província Aurífera do Tapajós, SW do Estado do Pará. *Simpósio Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados*, 1. Boletim de Resumos..., Gramado, p. 93.
- Lamarão, C.N., Dall’Agnol, R., Lafon, J., Lima, E.F., 2002. Geology, geochemistry, and Pb-Pb zircon geochronology of the Paleoproterozoic magmatism of Vila Riozinho, Tapajós Gold Province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Res.* 119, p. 189–223.
- Lamarão, C.N., Dall’Agnol, R., Pimentel, M.M., 2005. Nd isotopic composition of Paleoproterozoic volcanic rocks of Vila Riozinho: implications for the crustal evolution of the Tapajós gold province, Amazon craton. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 18, p. 277-292.
- Lamarão, C.N., Souza, K.S., Dall’Agnol, R., Galarza, M.A., 2008. Granitos pórfiros da região de Vila Riozinho, província aurífera do Tapajós: petrografia e geocronologia. *Revista Brasileira de Geociências* 38(3), p 533-543.
- 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.
- Miller, H.G., Singh, V., 1994. Potential Field Tilt a New Concept for Location of Potential Field Sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32, 213-217.
- Minty, B. R. S. (1997). Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2): 39-50.
- Nabighian, M.N., 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal crosssection: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37: 507-517.
- Pessoa, M.R., Santiago, A.F., Andrade, A.F., Barreto, E.L., Nascimento, J.O., Oliveira, J.R., Prazeres, W.V., 1977. Projeto Jamaxim, VIII Relatório final, DNPM/CPRM, Manaus.
- Ramos, L.N.R.A., 2010. Dados Gamaespectrométricos e Magnetométricos Aéreos Aplicados ao Mapeamento Geológico e à Exploração de Ouro na Região de Fazenda Nova, Porção Leste do Arco

- Magmático de Arenópolis-Go. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília.
- Reddy, R., Nair, R.R., 2013. The efficacy of support vector machines (SVM) in robust determination of earthquake early warning magnitudes in central Japan. *Journal of Earth System Science*, 122, 1423–1434.
- Ribeiro, V.B., Mantovani, M., Louro, V.H.A., 2014. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. *Terrae Didat.* 10, 29-51.
- Ricci, P.S.F., Santos, A., Klein, E.L., Jorge-João, X.S., Martins, R.C. 1999. Suíte Intrusiva Creporizão – Província Tapajós; proposta e critérios de definição. In: S.N. Norte (Editor), *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 6, Anais, Manaus, p. 519-522.
- Roverato, M., Giordano, D., Giovanardi, T., Juliani, C., Polo, L. 2019. The 2.0–1.88 Ga Paleoproterozoic Evolution of the Southern Amazonian Craton (Brazil): An interpretation inferred by lithofaciological, geo-chemical and geochronological data. *Gondwana Research*, v. 70, p. 1-24.
- Santos, J.O.S., Hartmann, L.A.; Gaudette, H.E. 1997. Reconnaissance U-Pb in zircon, Pb-Pb in sulfides and review of Rb-Sr geochronology in the Tapajos gold Province, Para and Amazonas States of Brazil. In: *South American Symposium on Isotope Geology*, 1, Campos do Jordao, Sao Paulo, Brazil, Extended Abstracts, p. 280-282.
- 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*, v. 3(4), p. 453-488.
- Santos, J.O.S., Groves, D.I., Hartmann, L.A., Moura, M.A., McNaughton, N.J., 2001. Gold deposits of the Tapajos and Alta Floresta Domains, Tapajos-Parima orogenic belt, Amazon Craton, Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 36, p. 278-299.
- Santos, J.O.S, Rizzotto, G.R., Hartmann, L.A., McNaughton, N.J., Fletcher, I.R. 2001. Ages of sedimentary basins related to the Sunsas and Juruena Orogenic cycles, southwestern Amazon Craton, established by zircon U-Pb geochronology. In: *South American Symposium on Isotope Geology*, 3, Pucon, Chile, Comunicaciones.
- Santos, J.O.S., Van Breemen, O.B., Groves, D.I., Hartmann, L.A., Almeida, M.E., McNaughton, N.J., Fletcher, I.R., 2004. Timing and evolution of multiple Paleoproterozoic magmatic arcs in the Tapajós Domain, Amazon Craton: constraints from SHRIMP and TIMS zircon, baddeleyite and titanite U-Pb geochronology. *Precambrian Res.* 131, 73–109.
- Santos, J.O.S., Hartmann, L.A., Faria, M.S., Riker, S.R., Miguel, M., Almeida, M.E., McNaughton, N.J., 2006. A compartimentação do Cráton Amazonas em províncias: avanços ocorridos no período 2000–2006. *Simpósio de Geologia da Amazônia*, vol. 9, Sociedade Brasileira de Geologia, Belém, Brasil, Resumos Expandidos, CD-ROM.
- Santos, M.D., Aquino, L.B.M., Serra, V.F.H., Gomes, M.V., Galarza, M.A., Lafon, J.M. 2013. Geocronologia das rochas hospedeiras e do minério com implicações na gênese do depósito Aurífero Palito, Província Tapajós, sudoeste do Pará. In *Proceedings of the XIII Simpósio de Geologia da Amazônia*.
- Sato, K., Tassinari, C.C.G. 1996. Idades dos principais eventos de diferenciação manto-crosta do Cráton Amazônico, com base em idade modelo Sm-Nd. In: *V Simp. de Geologia da Amazônia*, Belém. *Boletim de Resumos Expandidos*. Belém, p. 388-389.
- Semblano, F.R.D., Pereira, N.C.S., Vasquez, M.L., Macambira, M.J.B., 2016. Novos dados geológicos e isotópicos para o Domínio Iriri-Xingu, Província Amazônia Central: implicações para a idade do Grupo Iriri. *Geologia USP. Série Científica*, 16(3), 19-38.
- Shoji, D., Noguchi, R., Otsuki, S., Hino, H., 2018. Classification of volcanic ash particles using a convolutional neural network and probability. *Scientific Reports*, 8, 8111.

- Sick, B., Guggenmos, M., Joswig, M., 2015. Chances and limits of single-station seismic event clustering by unsupervised pattern recognition. *Geophys. J. Int.* 201, 1801–1813.
- Sutherland, D., Gradim, R.J., Nilsson, J., Rosario, P.P., McKenzie, W., da Franca, P.R.B., 2019. Technical Report Tocantinzinho Project Brazil; Eldorado Gold Corporation: Vancouver, BC, Canada.
- Tassinari, C.C.G., 1996. O Mapa Geocronológico do Cráton Amazônico no Brasil: Revisão dos Dados Isotópicos. São Paulo, Tese de Livre Docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 139 p.
- Tassinari, C.C.G., Macambira, M.J.B., 1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes* 22, 174–182.
- Tassinari, C.C.G., Macambira, M.J.B., 2004 . A evolução tectônica do cráton amazônico. In: Matessonetto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Britto-Neves, B.B; (Eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano*. São Paulo, SP, Brazil, pp. 471-485.
- 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, p. 213-227.
- Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., 1990. *Applied Geophysics*, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 770 p.
- Titos, M., Bueno, A., García, L., Benítez, C., 2018. A deep neural networks approach to automatic recognition systems for volcano-seismic events. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 11(5), 1533–1544.
- Tokashiki, C.C., Juliani, C., Monteiro, L.V.S., Echeverri-Misas, C.M., Aguja, M.A., Arrais, L.B., 2014. Mineralizações auríferas associadas a eventos vulcânicos de 1,97 Ga de Sistemas Epitermais low- e intermediate-sulfidation do Depósito Coringa – Província Mineral do Tapajós. In: XLVII Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador.
- Tokashiki, C. 2015. Mineralizações Low- e Intermediate-Sulfidation de Ouro e de Metais de Base em Domos de Riólito Paleoproterozóicos na Porção Sul da Província Mineral do Tapajós. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 188 p.
- Tunningley, A.J.; Ackroyd, B. Mineral resource estimate on the São Chico Gold Project, Brazil; Montevideo, Uruguay, 2012;
- Ultsch, A., Vetter, C., 1994. Self-organising feature maps versus statistical clustering a benchmark: Technical Report No. 9, Dept. of Mathematics and Computer Science, University of Marburg, Germany.
- Vasquez M.L., Klein E.L., 2000. Geologia e recursos minerais da Folha Rio Novo (SB.21-Z-C). Estado do Pará, Escala 1:250.000. PROMIM Tapajós, CPRM, Brasília, Brasil, CD-ROM.
- Vasquez, M.L., Klein, E.L., Macambira, M.J.B., Santos, A., Bahia, R.B.C., Quadros, M.L.E.S., 2000. Geochronology of granitoids, mafic intrusions and mineralizations of the Tapajós Gold Province - Amazonian Craton, Brazil. In: International Geology Congress, 31, 2000 (CD-ROM)
- Vasquez, M.L., Sousa, C.S., Carvalho, J.M.A., 2008. Mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Pará, escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil, Belém: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2008. 1 CD-ROM.
- Vasquez M. L., Castro, J. M. R., Chaves, C. L., Neto, M. C. C, Cruz V. 2020. Mapa geológico e de recursos minerais. Província Mineral do Tapajós, Escala 1:500.000. CPRM.
- Wilford, J.R., Bierwirth, P.N., Craig, M.A., 1997. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics* 17(2), 201-216.
- Wu, G., Chen, G., Cheng, Q., Zhang, Z., Yang, J., 2021. Unsupervised machine learning for lithological

mapping using geochemical data in covered areas of Jining, China. *Natural Resources Research*, 30, 1053–1068.