UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Modelagem Geológica e Avaliação dos Recursos Minerais
de Ouro do Sistema União do Norte, Província Aurífera de
Alta Floresta (MT).**

Taís Celestino dos Santos

São Paulo
2018

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

TAÍS CELESTINO DOS SANTOS

**Modelagem Geológica e Avaliação dos Recursos Minerais
de Ouro do Sistema União do Norte, Província Aurífera de
Alta Floresta (MT).**

Orientador: Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de
Recursos Minerais e Hidrogeologia para
obtenção do título de Mestra em Geociências

São Paulo
2018

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Modelagem Geológica e Avaliação dos Recursos Minerais
de Ouro do Sistema União do Norte, Província Aurífera de
Alta Floresta (MT)**

TAIS CELESTINO DOS SANTOS

Orientador: Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto

Dissertação de Mestrado

Nº 808

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Jorge Kazuo Yamamoto

Dr. Rafael Rodrigues de Assis

Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

Dr. Giorgio Francesco Cesare de Tomi

SÃO PAULO
2018

*Dedico este trabalho aos que sempre
me apoiaram e me incentivaram a lutar pelos
meus sonhos, meus pais Edneia e Osmar,
meu irmão Bruno e minha Avó Cecília*

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao professor e orientador, Dr. Jorge Kazuo Yamamoto pela oportunidade de trabalharmos juntos durante esses dois anos e meio, pela enorme paciência, compreensão, apoio, incentivo e dedicação ao me orientar e na realização desta pesquisa. Sou especialmente grata por todo conhecimento dividido no âmbito da geoestatística e modelagem, muito obrigada.

Agradeço ao amigo e pesquisador José de Matos por ter cedido os dados alvos desta pesquisa, possibilitando assim esse trabalho, e por toda a disponibilidade, paciência em me auxiliar sempre que preciso. Obrigado pelas inúmeras dúvidas esclarecidas e conhecimento dividido.

Agradeço à empresa *Biogold* pelo acesso aos dados dos depósitos estudados neste trabalho.

Aos colegas de profissão Alexandre, Marco e Pablo, pela compreensão e incentivo durante todo o período do mestrado.

Agradeço especialmente aos meus amigos de vida Julia, Roberta, Graciela, Daniele, Mindinho, Rafael, Helena, Daiana, Felipe e Jan pela amizade, companheirismo e carinho durante esses anos.

To Miles, who make my days better and happier. Thank you for always be there for me with a big smile, for be so kind and for all the support and encouragement.

Por fim, agradeço as pessoas mais importantes da minha vida e responsáveis pela pessoa que sou, aos meus pais, Edneia e Osmar por serem minha base, por me apoiarem, incentivarem e estarem sempre ao meu lado em todos os momentos da minha vida. Ao meu irmão e amigo, Bruno, quem tem sempre uma piada e um sorriso no rosto e sempre será alento. À minha querida avó, Cecília, por todas as horas de colo e carinho.

Muito obrigada a todos!

Modelagem Geológica e Avaliação dos Recursos Minerais de Ouro do Sistema União do Norte, Província Aurífera de Alta Floresta (MT).

RESUMO

***Dissertação de Mestrado
Taís Celestino dos Santos***

A Província Aurífera de Alta Floresta (PAAF), localizada na região centro-sul do Cráton Amazônico, porção norte do estado do Mato Grosso e sudoeste do Pará, aloja uma grande quantidade de depósitos auríferos hospedados por rochas plutônicas e vulcânicas de composição granítica no seu setor leste ao longo do lineamento Peru-Trairão de direção NW-SE. Neste contexto, insere-se a região Distrito União do Norte, onde se encontram os depósitos Luiz e Morro do Carrapato. Estes depósitos se caracterizam pelo forte controle estrutural (filonares) com mineralizações de baixo teor de ouro (<5 t) confinados a veios de quartzo. A mineralização está associada a metais de base (Zn+Pb±Cu) e alojada em rochas granodioríticas. O principal objetivo desse projeto é obter uma descrição quantitativa e qualitativa da variabilidade espacial da geologia correlacionada aos teores de Au, Cu, Pb e Zn nos Depósitos Luiz e Morro do Carrapato. Para isso, elaborou-se o modelo geológico da região, seguido do estudo estatístico e geoestatístico, juntamente com a geração dos modelos de teores dos elementos de interesse. Por fim, correlacionou-se a litologia e os teores dentro de modelos de fusão. O modelo geológico foi elaborado a partir da interpretação do banco de dados disponibilizado e permitiu a visualização da distribuição dos litotipos descritos e de suas relações de contato, além de refletir o forte condicionamento estrutural dos litotipos, de acordo com a anisotropia global 180/85. Na análise estatística univariada, pode-se constatar para os teores de Au, Zn, Pb e Cu distribuições lognormais, com fortes assimetrias positivas, refletindo a acumulação anômala desses elementos. A análise estatística bivariada, condicionada aos litotipo relacionados à mineralização (veios de quartzo, zonas silicificadas e granodiorito sericítico), refletiu a associação da mineralização de ouro com os sulfetos pirita, esfarelita, galena e calcopirita, como esperado para os depósitos estudados. O cálculo de variogramas experimentais na direção de maior continuidade não foi possível devido à amostragem das sondagens dispostas em X. Desta forma, os recursos minerais foram avaliados e modelados com base nas equações multiquádricas. Os modelos de fusão foram gerados a partir do modelo geológico combinado com o modelo de teores. Com base nesses modelos, foi possível afirmar que os maiores teores (> 2ppm) de Au, referentes à principal mineralização, estão localizados nas mesmas regiões das maiores anomalias de Zn, Pb e Cu, confirmando-se o condicionamento estrutural e a associação espacial entre a mineralização e os veios de quartzo, zonas e silicificação e o granodiorito sericítico. Com a visão geral dos modelos, ficou evidente que a região leste da área hospeda teores maiores de ouro e metais de base comparados com a região oeste. Mediante o exposto, o modelo geológico e os modelos de fusão gerados para a área de estudo podem ser considerados eficazes no seu objetivo em representar a realidade do depósito, fazendo o melhor uso dos dados disponíveis.

Palavras chaves: Modelagem geológica, modelagem de fusão, estatística e geoestatística.

Geological Modeling and Evaluation of Gold Resources in the União do Norte System, Alta Floresta Gold Province (MT).

ABSTRACT

***Master's Thesis
Taís Celestino dos Santos***

The Alta Floresta Gold Province, (PAAF) located in the southern portion of the Amazon Craton, has a significant number of gold deposits in its easternmost segment, distributed along a NW-SW striking belt (Peru – União do Norte belt) and hosted by plutonic and volcanic rocks of granitic composition. Within this context are the two main areas of study, including the Luiz and Morro do Carrapato gold deposits of the União do Norte District. These deposits are structurally controlled and characterized by low gold mineralized to quartz veins and hosted by granodioritic rocks. The main objective of this projectization (<5 t) associated with base metals (Zn + Pb ± Cu), mainly confine is to obtain a quantitative and qualitative description of the specific geological variability correlated to gold mineralization associated with base metals (Au, Cu, Pb, Zn) in the Luiz and Morro do Carrapato deposits. To achieve this objective, a geological model has been elaborated, followed by a statistical and geostatistical study and development of mineral content models. Finally, the lithology and the mineral contents were correlated with fusion models. The geological model was created based on database interpretation which allowed for the visualization of all described lithotype distributions and contact relationships. In addition, this reflects the strong lithological structure conditions, according to global anisotropy of 180/85. The univariate statistical analysis shows strong positive asymmetries with lognormal distributions of Au, Zn, Pb and Cu contents, reflecting its anomalous accumulation in the deposits. The bivariate statistical analysis conditioned to the lithotypes associated with mineralization (quartz veins, silicified zones and sericitic granodiorite), reflected positive linear correlation of gold mineralization with pyrite, spharelite, galena and chalcopyrite sulfides, as was expected in these deposits. Experimental variogram calculations in the greater continuity was not possible due to sample boring logs being arranged in “X” formation. Thus, the mineral resources were evaluated and modeled based on multiquadric equations. The fusion models were generated from the geological model combined with the mineral contents models. According to the developed models, it is possible to affirm that the highest Au contents (> 2ppm), related to main mineralization, are located in regions of highest Zn, Pb and Cu anomalies, showing the structural conditioning and the spatial association between it, the quartz veins, silicified zones and sericitic granodiorite. With the model overview, it was evident that the eastern portion hosts the highest gold and base metal content compared to the western portion. Through the above, the elaborated geological and fusion models can be considered effective analyzing and representing the deposits reality and making the best use of available data

Keywords: Geological modeling, fusion modeling, statistics, geostatistics.

Sumário

1.	Introdução.....	1
1.1.	Objetivo.....	4
2.	Localização e Vias de Acesso.....	5
3.	Revisão Bibliográfica	7
3.1	Contexto Geológico Regional.....	7
3.1.1	Setor Leste da Província Aurífera Alta Floresta (PAAF)	7
3.1.2	Região União do Norte	11
3.1.3	Depósitos de Ouro da Região União do Norte	14
3.1.4	Depósitos Luís e Morro do Carrapato	14
3.2	Estatística descritiva- Análises univariada e bivariada.....	17
3.3	Equações multiquádricas	19
3.4	Modelagem geológica.....	22
3.5	Modelagem de teores.....	24
3.6	Modelo de Fusão.....	24
4	Materiais e Métodos.....	27
4.1	Levantamento bibliográfico	28
4.2	Validação do banco de dados de entrada.....	29
4.3	Modelo geológico.....	30
4.4	Análise estatística.....	31
4.5	Modelo de teores.....	32
4.6	Modelo de fusão	33
4.7	Curva teor-tonelagem.....	33
5	Resultados e Discussão.....	35
5.1	Estudo de caso: Geologia dos depósitos Luiz e Morro do Carrapato	35
5.2	Modelagem Geológica	36
5.3	Análise estatística univariada.....	41
5.4	Análise estatística bivariada.....	45
5.5	Análise estatística bivariada condicionada à litologia.....	50
5.6	Variogramas	55
5.7	Modelo de teores e modelos de fusão	57
5.8	Ouro	58
5.9	Chumbo	63
5.10	Zinco.....	67

5.11 Cobre.....	71
5.12 Curva teor tonelagem	76
6 Conclusões	78
Referências	80
Apêndice A	84
Amostras do banco de dados: Arquivos de entrada para modelagens.	84
Apêndice B	86
Seções geológicas	86

Apêndices

Apêndice A – Amostras do banco de dados: Arquivos de entrada para modelagens.

Apêndice B – Seções geológicas

Lista de ilustrações

Figura 1. Mapa simplificado dos principais domínios geológico da Província Aurífera de Alta Floresta (PAAF) e a localização de alguns depósitos auríferos (Modificado de Paes de Barros, 2007)----- Pág.1

Figura 2. Localização Sistema União do Norte. ----- Pág.5

Figura 3: Mapa Geológico do lineamento Peru-Trairão, setor leste da Província Aurífera de Alta Floresta (Modificado por Matos & Xavier, 2016 e Assis, 2015 de Miguel Jr., 2011) ----- Pág.10

Figura 4: Mapa geológico da região do Distrito União do Norte (Miguel Jr., 2011).----- Pág.11

Figura 5: Porção extremo leste da PAAF (União do Norte) com a localização dos depósitos Luiz, Morro do Carrapato e Ana e área de estudo em destaque (mapa disponibilizado pela BioGold e alterado de Matos & Xavier, 2016). ----- Pág.16

Figura 6: Zona de incerteza definida para variância de interpolação superior a 0,20 (Yamamoto *et al.* 2012). ----- Pág.22

Figura 7: Modelo tridimensional de blocos. ----- Pág.23

Figura 8: Localização dos pontos de dados vizinhos próximos a um bloco a ser calculado. ----- Pág.23

Figura 9: Distribuição espacial, localização e agrupamento das sondagens para a modelagem geológica dos depósitos Luiz, Morro do carrapato e Ana (Imagem disponibilizada pela *BioGold*). ----- Pág.28

Figura 10: Modelo Geológico- Visão geral----- Pág.38

Figura 11: Modelo Geológico: (A) visão lateral da região oeste; (B) visão lateral da região leste.----- Pág.38

Figura 12: Modelo Geológico: (A) visão central a leste - Luiz e Morro do Carrapato; (B) visão central à oeste- Luiz. ----- Pág.39

Figura 13: Modelo Geológico com os litotipos correlacionados a mineralização de ouro- Visão geral. ----- Pág.40

Figura 14: Modelo Geológico com os litotipos correlacionados a mineralização de ouro: (A) visão central à oeste - Luiz; (B) visão central à leste- Luiz e Morro do Carrapato. ----- Pág.41

Figura 15: Análise estatística dos dados de Au, Zn, Pb, Cu, K e Fe nos depósitos Luiz e Morro do Carrapato ----- Pág.44

Figura 16: Diagramas de dispersão do (A) Au vs. Cu; (B) Au vs. Pb; (C) Au vs. Zn; (D) Au vs. K; e (E) Au vs. Fe. ----- Pág.48

Figura 17: Diagramas de dispersão de As vs. Fe. ----- Pág.49

Figura 18: Diagramas de dispersão de (A) Cu vs. Fe; (B) Cu vs. Zn; (C) Cu vs. Pb; (D) Zn vs. Fe; (E) As vs. Cu; e (F) Pb vs. Zn. ----- Pág.50

Figura 19: Diagramas de correlação condicionados aos Veios de Quartzo: (Ai) Au vs. Pb; (B) Au vs. Fe; (C) Au vs. Zn; (D) Cu vs. Fe; (E) Au vs. Cu; (F) Zn vs. Cu; e (G) Zn vs. Fe.----- Pág.52

Figura 20: Diagramas de correlação condiciona às Zonas Silicificadas: (A) Fe vs. Cu; (B) Cu vs Pb; (C) Au vs. Fe; (D) Au vs. Cu; e (E) Zn vs. Cu. ----- Pág. 54

Figura 21: Diagramas de correlação condiciona ao Granodiorito Sericítico: (A) Au vs. Cu; (B) Cu vs. Pb; (C) Cu vs. Zn; e (D) Fe vs. Cu. ----- Pág.56

Figura 22: Semi-variogramas experimentais nas direções de maior continuidade.----- Pág.57

Figura 23: Semi-variogramas experimentais calculados ao longo das sondagens em X.----- Pág.58

Figura 24: Modelo de teor de Au: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; e (C) visão da região leste. ----- Pág.60

Figura 25: Modelo de variância para Au- visão geral. ----- Pág.61

Figura 26: Modelo de fusão de Au: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; (C) visão da região leste; (D) visão central à leste; (E) visão central à oeste.----- Pág.62

Figura 27: Modelo de teor de Pb: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; e (C) visão da região leste. ----- Pág.64

Figura 28: Modelo de variância para Pb- visão geral----- Pág.66

Figura 29: Modelo de fusão de Pb: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; (C) visão da região leste; (D) visão central à leste; (E) visão central à oeste.----- Pág.67

Figura 30: Modelo de teor de Zn: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; e (C) visão da região leste. ----- Pág.69

Figura 31: Modelo de variância para Zn- visão geral. ----- Pág.70

Figura 32: Modelo de fusão de Zn: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; (C) visão da região leste; (D) visão central à leste; (E) visão central à oeste. ----- Pág.71

Figura 33: Modelo de teor de Cu: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; e (C) visão da região leste.----- Pág.73

Figura 34: Modelo de variância para Cu- visão geral.----- Pág.74

Figura 35: Modelo de fusão de Cu: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; (C) visão da região leste; (D) visão central à leste; (E) visão central à oeste.----- Pág.75

Figura 36: Curva teor-tonelagem para ouro (Au).----- Pág.77

Lista de Tabelas

Tabela 1: Amostra do banco de dados de entrada para modelagem geológica. -----
----- Apêndice A

Tabela 2: Amostra do banco de dados de entrada para modelagem
de teores.----- Apêndice A

Tabela 3: Amostra do banco de dados de entrada para os cálculos
estatísticos. ----- Apêndice A

Tabela 4: Parâmetros do modelo de blocos----- Pág.31

Tabela 5: Dados estatísticos descritivos para o depósito Luiz e Morro do
Carrapato. ----- Pág.42

Tabela 6: Tabela 5: Coeficientes de correlação globais calculados para todos os
elementos estudados. ----- Pág.47

1. Introdução

A Província Mineral de Alta Floresta (PAAF), denominada também de Domínio Alta Floresta (Santos *et al.*, 2001), Província Mineral de Alta Floresta (Souza *et al.*, 2005), ou Província Aurífera Juruena – Teles Pires (Silva & Abram, 2008), está localizada na região sul do Cráton Amazônico, porção norte do estado do Mato Grosso e insere-se numa faixa de terrenos paleoproterozoicos com 500 km de extensão alongada na direção W-E a SE-NW (Paes de Barros, 2007) limitada a sul pelo Gráben dos Caiabis e a norte pelo Gráben do Cachimbo, que a separa da província Aurífera do Tapajós (Souza *et al.*, 2005; Silva & Abram, 2008; **Figura 1**).

Figura 1: Mapa simplificado dos principais domínios geológico da Província Aurífera de Alta Floresta (PAAF) e a localização de alguns depósitos auríferos (Modificado de Paes de Barros, 2007).

A PAAF é considerada como parte de diferentes províncias a depender do modelo geotectônico adotado. De acordo com Tassinari & Macambira (1999), a PAAF insere-se entre as províncias geocronológicas Ventuari – Tapajós (1,95-1,8 Ga), ao norte, e Rio Negro – Juruena (1,8-1,55 Ga), ao sul, definidas por esses autores essencialmente com base em datações geocronológicas e em dados disponíveis sobre a geologia. De acordo com o modelo Santos *et al.* (2001), a PAAF insere-se entre as províncias tectônicas Tapajós – Parima (2,1-1,87 Ga) e Rondônia

– Jurueña (1,82-1,54 Ga). Ambos os modelos indicam que as unidades plutono-vulcânicas que compõem essas províncias foram desenvolvidas em de arcos magmáticos que se originaram por eventos de subducção dirigidas contra o protocráton representado pela Província Amazônia Central no decorrer do Paleo-Mesoproterozoico (Tassinari & Macambira, 1999; Santos *et al.*, 2006).

Segundo Dardenne & Schobbenhaus (2003), a PAAF foi a maior fonte de ouro no Brasil durante as décadas de 1970 e 1990, com uma produção total estimada entre 200 e 300 t durante esse período, sendo que 160 t foram geradas durante os anos de 1980-1999 (Paes e Barros, 2007). A exploração do ouro nessa região se deu inicialmente por atividades garimpeiras em depósitos aluvionares-coluvionares e de enriquecimento supergênico, que após sua exaustão se estendeu para depósitos primários disseminados e filonares, de baixo teor (<5 t de ouro), sendo esse último a principal fonte atual do metal na região (Paes de Barros, 2007).

Grande parte desses depósitos estão localizados no setor leste da PAAF ao longo do lineamento Peru-Trairão (Miguel Jr., 2011) de direção NW-SE, com aproximadamente 30 km de largura e 140 km de extensão, associado a um sistema de cisalhamento transcorrente predominantemente sinistral, de natureza dúctil, dúctil-rúptil e rúptil (Paes de Barros, 2007).

Trabalhos de pesquisa (Moura, 1998; Paes de Barros, 2007; Silva & Abram, 2008; Assis, 2008; Assis, 2011; Ramos, 2011; Miguel Jr., 2011; Assis *et al.*, 2014) demonstram que a mineralização de ouro nesses depósitos ocorre principalmente na forma de veios ou *stockwork*, e subordinadamente disseminados. Ainda de acordo com esses autores, esses depósitos estão associados principalmente a granitoides paleoproterozoicos do tipo I, oxidados, cálcio-alcalinos a sub-alcalinos, de médio a alto K, metaluminosos a peraluminosos, com composição que varia de tonalito a sienogranito e, mais subordinadamente, a sequências vulcânicas/vulcanoclásticas também de idade paleoproterozoica.

Com base no estilo, paragênese e assinatura geoquímica do minério dos depósitos estudados no setor leste da PAAF, as mineralizações tem sido identificadas em quatro tipologias principais (Moura *et al.*, 2006; Paes de Barros, 2007; Assis, 2008, 2011; Miguel Jr., 2011; Trevisan, 2012, 2015; Assis *et al.*, 2014):

- (i) Sistemas de Au $\pm$ Cu (Bi, Te, Ag, As, Mo) disseminados, predominantemente representados por pirita, além de concentrações variáveis de calcopirita e hematita;
- (ii) Sistemas filonares de Au $\pm$ Cu, majoritariamente constituídos por pirita, porém,

com calcopirita subordinada; e (iii) Sistemas filonares rúpteis de $\text{Au} + \text{Zn} + \text{Pb} \pm \text{Cu}$ constituídos por pirita, esfalerita e galena, além de digenita, calcopirita e covelita subordinada.

Neste contexto, a região do Distrito União do Norte, inserido no extremo leste da PAAF, apresenta um depósito disseminado de $\text{Au}+\text{Cu}$ e $\text{Au}+\text{Mo}$ do tipo I (de acordo com tipologia supracitada), denominado Ana e Jaca e dois depósitos tipo III, estruturalmente controlados (filonares) de baixo teor de ouro (<5 t) associado a metais de base ($\text{Zn}+\text{Pb}\pm\text{Cu}$), denominados depósito Luiz e Morro do Carrapato, esses últimos dois depósitos alvos de estudo desta pesquisa.

Essa região, pouco estudada geologicamente, é segundo Miguel Jr. (2011) e Assis (2008, 2012) composta pela Sequência Vulcanoclástica (2.09 Ga), Granodiorito União do Norte (1,85 Ga), Sequência Granítica Indiferenciada e Pórfiro União do Norte (1,77 Ga).

A fim de obter uma descrição qualitativa da variabilidade espacial da geologia e um entendimento mais preciso da distribuição espacial dos teores dos depósitos minerais acima citados e de indicar possíveis *ore-shoots* na região é desejável se desenvolver uma correlação entre as variáveis geológicas (dados litológicos e estruturais) com os dados geoquímicos de sondagem. Isso se faz interessante, uma vez que dados de teores, modelos de teores, individuais sem a interpretação geológica, fornecem uma informação pouco confiável quanto a distribuição espacial do minério e dos valores de tonelagem e teor (Duke & Hanna, 2001).

Com uma interpretação geológica em formato de modelo de blocos 3D subdividido em domínios e modelos de blocos de teores é possível limitar os teores aos domínios geológicos correspondentes e resulta em um Modelo de Fusão, o qual permite uma interpretação mais precisa da geologia e dos teores de minério do depósito.

Desta forma, o presente trabalho compreende a modelagem geológica e de teores dos depósitos auríferos Luiz e Morro do Carrapato. O resultado almejado são modelos de fusão para a região, possibilitando uma visão ampla da relação entre a geologia e a geoquímica que definem os depósitos.

Para a realização desse projeto foram disponibilizadas pela *BioGold* empresa detentora dos direitos minerários na área, informações de sondagens de reconhecimento com dados geológicos e geoquímicos de rocha total em intervalos regulares.

1.1. Objetivo

O objetivo principal desse projeto é obter uma descrição quantitativa e qualitativa da variabilidade espacial da geologia correlacionada aos teores geoquímicos nos depósitos Luiz e Morro do Carrapato, Sistema União do Norte (PAAF). Para isso, visa-se primeiramente o estudo estatístico e geoestatístico de rocha total, o desenvolvimento de um modelo geológico da área juntamente com modelos de teores e de variância dos elementos de interesse (Au, Cu, Zn, Pb), e por fim a correlação entre litologia e teores dentro de um modelo de fusão.

2. Localização e Vias de Acesso

A área estudada está localizada a sudoeste do Distrito União do Norte, município de Peixoto de Azevedo (MT), centro norte do estado do Mato Grosso, a 735 km de Cuiabá (**Figura 2**).

O acesso à área se dá pela estrada local Travessão 1, que se interliga com Peixoto de Azevedo pela MT-322. O trajeto de Cuiabá a Peixoto de Azevedo se dá em direção ao norte pela rodovia MT-10 até Rosário Oeste (72 km) e segue até Diamantino pela rodovia BR-364 (45km) e a partir daí pela BR-163 (570 km) até Peixoto de Azevedo. Em Peixoto de Azevedo, se acessa a MT-320 até a estrada local Travessão 1 (60 km) que leva até a Mina de Ouro União do Norte.

Figura 2: Localização Sistema União do Norte.

3. Revisão Bibliográfica

O método desse trabalho, de forma resumida, consiste na abordagem estatística e geoestatística das informações disponíveis para a região dos depósitos Luiz e Morro do Carrapato, os quais constituem em descrições litológicas e informações geoquímicas de rocha total de sondagens.

O estudo enfatiza a inserção dos dados geológicos, métodos de interpolação, cálculo de teores, e por fim a construção em modelo de fusão que incorpora a informações geológicas e geoquímicas permitindo uma visão geral das distribuições das propriedades presentes.

3.1 Contexto Geológico Regional

A seguir a geologia da Província Mineral de Alta Floresta (PAAF) será descrita de forma regional e local.

3.1.1 Setor Leste da Província Aurífera Alta Floresta (PAAF)

A PAAF, localizada na porção sul do Cráton Amazônico - segmento crustal estabilizado por volta de 1,0 Ga- limitado pelas faixas móveis neoproterozóicas de Tucavaca na Bolívia, Araguaia-Cuiabá no Brasil Central, e Tocantins no norte do país (Tassinari & Macambira, 1999) é constituída principalmente por sequencias plutono-vulcânicas geradas em arcos continentais paleo- e mesoproterozoicos, e unidades deformadas e metamorizadas em fácies xisto-verde (porções central e noroeste; Assis, 2015).

Especificadamente no setor leste da província, se observa uma complexa variação litológica, onde as unidades geológicas que compõem essa região foram agrupadas em quatro domínios principais por Assis (2015): (1) Embasamento granítico deformado e metamorizado (2,81 a 1,99 Ga), (2) Unidades plutono-vulcânicas cálcio-alcalinas (granitos tipo I; 1,97 a 178 Ga); (3) Unidades plutono-vulcânicas anorogênicas (1,78-1,77 Ga); e (4) Sequências sedimentares (~1,987-1,377 Ga). A **Figura 3** apresenta as principais unidades geológicas do setor leste da PAAF.

O embasamento encontrado nesta porção, o Complexo Cuiú-Cuiú (1,99 Ga; Souza *et al.*, 2005), é composto por migmatitos e gnaisses graníticos a tonalíticos intrudidos por granitóides foliados cálcio-alcalinos de composição tonalítica a

monzogranítica (Paes de Barros, 2007), além de xistos, rochas máficas, ultramáficas e formações ferríferas bandadas (Dardenne & Schobbenhaus, 2001). Datações (U-Pb SHRIMP em zircão) no gnaiss Alto Floresta (Souza *et al.*, 2005) e no gnaiss Alto Alegre (Paes de Barros, 2007) revelam idades entre 1.992 ± 7 Ma e 1.984 ± 7 Ma respectivamente para os gnaisses de composição granítica a tonalítica. Posteriormente, datações feitas por Assis (2015) mostram idades (U-Pb SHRIMP em zircão) de $1.980 \pm 8,8$ Ma no gnaiss Nova Guarita e $1.978 \pm 8,1$ em biotita tonalito foliado.

Na região de Peixoto de Azevedo – Novo Mundo, o Complexo Cuiú-Cuiú é intrudido pelas unidades plutono-vulcânicas cálcio-alcálicas oxidadas (série da magnetita; granitos tipo I) não deformados e/ou metamorfizados com idades de cristalização entre 1.979 a 1.930 Ma e denominados Suíte Intrusiva Pé Quente (Assis, 2011), granitos Novo Mundo (Paes de Barros, 2007), Aragão (Vitório, 2010), Flor da Mata (Ramos, 2011). Juntamente com essas unidades o embasamento é intrudido também pelos granitos mais jovens de idade entre 1.889 e 1.792 Ma denominados granitos Nhandu (Silva & Abram, 2008; Moreton & Martins, 2005). Essas unidades, com exceção de Flor da Mata, hospedam mineralizações auríferas filonares ou disseminadas. Recobrindo ainda o embasamento ocorre a Unidade Vulcanoclástica Serra Formosa de idade máxima 2.009 Ma (Assis, 2011; Miguel Jr., 2011), e truncando os granitos mais antigos ocorrem as suítes Matupá (Moura, 1998; Souza *et al.*, 2005), Granodiorítica União (Assis, 2011; Miguel Jr., 2011), Granítica Indiferenciada União do Norte (Assis, 2008) e Colíder (Silva & Abram, 2008).

Essas unidades são ainda truncadas por 02 unidades plutônicas-vulcânicas anorogênicas formadas em ambiente pós-orogênicas de idade entre 1.782 a 1.757 Ma, denominadas Suíte Intrusiva Teles Pires (Souza *et al.*, 2005; Santos, 2000; e Silva & Abram, 2008), e Pórfiro União do Norte (Assis, 2011; Miguel Jr., 2011).

Todas as unidades anteriores são, por fim, cobertas por sequências de arenito e arenito arcoseano mesoproterozoicos, ambos de granulometria média e com frequentes níveis conglomeráticos, depositados em ambiente de bacia *pull-apart* pertencentes à Formação Dardanelos do Grupo Caiabis (Moreton & Martins, 2005), e por sedimentos clásticos e pelitos inconsolidados de ambiente intracratônicos denominados Coberturas Tércio-Quaternárias (Souza *et al.*, 2005).

Os depósitos dessa região se encontram na faixa de direção NW-SE denominada lineamento Peru – Trairão, que possui aproximadamente 30 km de largura e 140 km de extensão (Paes de Barros, 2007; e Miguel Jr., 2011). As mineralizações auríferas ocorrem principalmente associadas à veios ou sistemas de veios de quartzo e subordinadamente disseminada e estão hospedadas ou possuem uma associação espacial com suítes graníticas paleoproterozóicas (Miguel Jr., 2011). Os veios e sistemas de veios de quartzo nesta faixa estão relacionados a uma gênese magmática-hidrotermal e estão associados a fraturas e/ou zonas de cisalhamento dúctil a rúptil-dúctil. Os veios de quartzo confinados a estrutura rúptil e dúctil são verticais a sub-verticais, com direções variadas e, em geral, têm extensão inferior a 100m e larguras médias entre 15 a 40cm (Miguel Jr., 2011).

Figura 3: Mapa Geológico do lineamento Peru-Trairão, setor leste da Província Aurífera de Alta Floresta (Modificado por Matos & Xavier, 2016 e Assis, 2015 de Miguel Jr., 2011).

Segundo Miguel Jr. (2011) os sistemas filonares auríferos desta região são agrupados em quatro principais sistemas estruturais, com base na disposição das estruturas mineralizadas: (a) Sistema Novo Mundo: WNW-ESE e N-S em regime dúctil e NW-SE em regime rúptil (e.g. região de Novo Mundo); (b) Sistema Flor da Serra: NNE-SSW e WNW-ESE em regime rúptil (região de Flor da Serra); (c) Sistema Peixoto: N-S, NNE-SSW e NW-SE em regime dúctil a rúptil (região de Peixoto de Azevedo) e; (d) Sistema União do Norte: NE-SW e E-W regime dúctil em regime rúptil (sudoeste de Vila União do Norte).

As unidades geológicas do Sistema União do Norte, relevantes para este trabalho, foram estudadas até o momento por Miguel Jr. (2011), Assis (2008; 2011; 2015), Trevisan, 2015 e posteriormente por Matos & Xavier (2016).

3.1.2 Região União do Norte

Miguel Jr. (2011) e Assis (2008; 2011) estabeleceram a compartimentação dessa porção nas unidades: (i) Suíte Granodiorítica União; (ii) Suíte Granítica Indiferenciada União do Norte; (iii) Pórfiro União do Norte; (iv) Unidade Vulcanoclástica; e (v) arenitos de cobertura correlacionados a Formação Dardanelos (**Figura 4**).

Figura 4: Mapa geológico da região do Distrito União do Norte (Miguel Jr., 2011).

Essas unidades estão descritas conforme a seguir:

(i) Unidade Vulcanoclástica

Unidade descrita por Assis (2008) e por Miguel Jr. (2011) como composta por epiclásticas que incluem grauvaque-feldspática e areno-conglomerados silicificados, gerados em ambiente de bacia de ante-país retro-arco em margem continental ativa.

Miguel Jr. (2011) descreve essa unidade como rocha de granulometria arenítica conglomerática fina de acinzentado a branca rosada, com acamamento gradacional local de direção NE-SW, com mergulhos moderados a altos para SE.

(ii) Suíte Granodiorítica União do Norte

Assis (2008, 2011), Miguel Jr. (2011), e Assis *et al.* (2012) descreveram essa unidade como sendo uma suíte intrusiva na Unidade Vulcanoclástica Serra Formosa, gerada em ambiente de arco vulcânico, e composta por biotita-hornblenda granodiorito e biotita-hornblenda tonalito e quartzo monzoniorito subordinados.

Miguel Jr. (2011) por meio de datação U-Pb em zircão por LA-ICP-MS obteve a cristalização dessa suíte em 1853 ± 23 Ma.

Ainda segundo Assis (2011), tratam-se de rochas cinza escuras a claras com porções rosadas dadas pela presença de feldspato potássico em alguns afloramentos. São rochas isotrópicas inequigranulares, com textura essencialmente fanerítica média a grossa.

(iii) Suíte Granítica Indiferenciada União do Norte

Assis (2008) descreve essa unidade como composta por granito, sienogranito e monzogranito, gerados em ambiente de arco vulcânico, em nível crustal mais raso quando comparada a Suíte Granodiorítica por apresentar textura (micro)-gráfica e porfirítica. A idade de cristalização desta unidade é indeterminada, e Assis (2008) sugere que ela seja mais jovem ou contemporânea a Suíte Granodiorítica União, uma vez que apresenta enclaves do biotita-hornblenda granodiorito nas zonas de contato.

Segundo Miguel Jr. (2011) são rochas inequigranulares, não-magnéticas, vermelhas róseas, faneríticas média (alguns casos) a grossa/ porfirítica.

(iv) Pórfiro União do Norte

Unidade também intrusiva na Unidade Vulcanoclástica Serra Formosa, corresponde a uma sequência sub-vulcânica formada em ambiente pós-colisional (Assis, 2011) com idade de cristalização $1773 \pm 8,8$ Ma (U-Pb LA-ICP-MS em zircão; Miguel Jr., 2011) e constituída por álcali-feldspato granito porfirítico a monzogranito porfirítico (Assis, 2011; Assis *et al.*, 2012).

Assis (2011) descreveu um alto topográfico na direção NE-SW em afloramentos e uma significativa quantidade de veios e venulas de quartzo próximo ao contato com a unidade vulcanoclástica. Segundo esse mesmo autor, essa unidade é representada por uma rocha isotrópica, avermelhada, não magnética, fanerítica fina a média, equigranular com texturas porfiríticas e micrográficas bem desenvolvidas e na zona de contato com rochas da sequência vulcanoclástica exibe estilo de alteração hidrotermal pervasivo a base de clorita.

Assis (2015) sugere que esta unidade está relacionada espacial e geneticamente à gênese de sistemas epitermais de intermediária sulfetação mineralizados a ouro e metais de base (ex.; Bigode [Assis, 2008] e Francisco [Assis, 2011]).

(v) Arenitos correlacionados a Formação Dardanelos

A Formação Dardanelos, segundo Leite & Saes (2003), apresenta idades U-Pb em de zircão detrítico entre 1987 ± 4 Ma e 1377 ± 13 Ma, e ainda Souza *et al.* (2005) sugere a idade máxima de 1,44 Ga para o início da sua sedimentação. Essa cobertura é interpretada como um sistema de leques aluviais de rios entrelaçados e representada por sequências de arenitos e arenitos arcoseanos de granulometria média com alguns níveis conglomeráticos mostrando estratificações plano-paralelas e cruzadas acanaladas (Moreton & Martin, 2005).

Adicionalmente, Assis (2012) descreveu Diques Máficos á Félsicos nessa região, como rochas que intrudem em todas as unidades plutônicas descritas anteriormente com direção preferencial de N20-59E e comprimento na ordem de grandeza de dezenas e largura menor que 10-15 m. Os Diques Máficos foram ainda individualizados em três grupos, devido a distintas características petrográficas e geoquímicas: (i) rocha de tonalidade cinza escura, textura subofítica de cristais de plagioclásio e raramente allanita; (ii) rocha de coloração

cinza-esverdeada, granulação fina e textura porfirítica com fenocristais de plagioclásio e quartzo e raramente piroxênio; (iii) rochas de coloração cinza-escura a cinza-amarronado de matriz quartzo-feldspática com fenocristais euedrais e biterminados de quartzo e plagioclásio.

3.1.3 Depósitos de Ouro da Região União do Norte

No sistema União do Norte, se encontram os depósitos auríferos associados a metais de base (Zn+Pb±Cu) Francisco, Bigode, Luís e Morro do Carrapato e o depósito aurífero com cobre subordinado Ana. Os depósitos auríferos associados a metais de base estão em geral hospedados em sedimentos epiclásticos, rochas plutônicas e sub-vulcanicas de idade paleoproterozoica e de composição que varia de granodiorítico a álali-feldspato granito (Assis, 2011; Assis *et al.*, 2014; Trevisan, 2015). No depósito Ana a mineralização se encontra hospedada nas intrusões de quartzo-feldspato pórfiro (Pórfiro Ana) e está associada com cobre e molibdênio, sendo de dois tipos, Au+Cu estruturalmente controlados e Cu+Mo disseminados (Matos & Xavier, 2016).

3.1.4 Depósitos Luís e Morro do Carrapato

Segundo Matos & Xavier (2016), os depósitos Luís e Morro do Carrapato se encontram hospedados na unidade Granodiorito União do Norte e possuem relação espacial com o Pórfiro União do Norte e Diques Máficos. Trevisan (2015) descreveu os litotipos encontrados na região que estariam correlacionados a essas unidades descritas anteriormente, e as diferenciou em grupos individuais: (i) biotita granodiorito (Granodiorito Luiz); (ii) feldspato pórfiro (Pórfiro Luiz); e (iii) Diques máficos. A **Figura 5** apresenta o mapa geológico representando o conhecimento atual da região.

Conforme Trevisan (2015), o Granodiorito Luiz corresponde à rocha hospedeira da mineralização de ouro, com idade de cristalização 1.962 ± 8.4 Ma (U-Pb SHRIMP em zircão), e é descrita como uma rocha avermelhada, com granulometria fina a média, magnética, equigranular e isotrópica a localmente anisotrópica composta por plagioclásio (44,2%), quartzo (37,7%), biotita (10,6%) e feldspato microclínio (7,5%). O granodiorito apresenta principalmente alteração hidrotermal potássica, sericítica, propilitica, e zonas de silicificação.

O Pórfiro Luiz, intrudido no Granodiorito Luiz de composição modal tonalítica, é composto por fenocristais de plagioclásio (3-4 mm) imersos numa matriz afanítica a fanerítica de quartzo e plagioclásio, alterado principalmente pela alteração hidrotermal potássica (Trevisan, 2015). Os Diques Máficos, também intrudidos no Granodiorito Luiz, estão fortemente alterados por alteração clorítica e sericítica. Ambos o Pórfiro Luiz como os Diques Máficos possuem pirita disseminada muito fina, mas não hospedam a principal mineralização (Trevisan, 2015).

As alterações hidrotermais encontradas na área de estudo que são descritas e identificadas no banco de dados compreendem as alterações sílica (silicificação e *quartzo infill*), potássica, sericítica e propolítica.

As zonas de silicificação e *quartzo infill* representam uma importante alteração hidrotermal com grande abrangência e geralmente forte intensidade de alteração. As zonas de silicificação ocorrem de maneira pervasiva e com alta intensidade onde os minerais ígneos ou secundários são inteiramente substituídos por frentes de silicificação com cristais de quartzo associados a pirita e por vezes descaracterizando a rocha original (Trevisan, 2015). As zonas de *quartzo infill*, ocorrem de maneira filonar em forma de veios de quartzo, zonas de *stockwork* e brechas hidrotermais (Trevisan, 2015). As brechas hidrotermais apresentam fragmentos da rocha hospedeira alterada em matriz de quartzo com textura *crustiform* e zonal (Trevisan, 2015).

A alteração potássica é responsável pela coloração avermelhada às rochas graníticas devido à presença de inclusões de hematita sub-microscópicas no feldspato potássico alterado (Trevisan, 2015). Essa alteração possui intensidade variada, com resquício do feldspato microclínio nas regiões de menor intensidade, e k-feldspato hidrotermal substituindo e alterando toda a textura ígnea nas regiões de maior intensidade. A assembleia mineral desta alteração é definida por ortoclásio + quartzo + hematita $\pm$ microclínio (Trevisan, 2015). A alteração propolítica é caracterizada por ser pervasiva, distal, de menor intensidade e mais espacialmente restrita em comparação com a alteração potássica (Trevisan, 2015; Assis, 2015).

epitoto + clinzoisite + clorita + carbonato $\pm$ quartzo $\pm$ magnetita $\pm$ rutílio $\pm$ titanita $\pm$ pirita $\pm$ calcopirita (Trevisan, 2015). A alteração sericitica sobrepõe-se à alteração potássica e com distribuição pervasiva e proximal aos veios de quartzo mineralizados (Trevisan, 2015; Assis, 2015). Essa alteração é definida pela

assembleia sericita/muscovita + quartzo $\pm$ carbonato $\pm$ magnetita $\pm$ sulfetos (pirita, calcopirita, galena e esfalerita), e os sulfetos ocorrem disseminados no interior do halo sericítico (Trevisan, 2015).

A mineralização de ouro em ambos os depósitos está associada a metais de base (Au+Zn+Pb $\pm$ Cu) e é estruturalmente controlada, caracterizada por sistemas de veios maciços (espessura de 3 cm a 2 m) de quartzo sulfetados mineralizados envolto por alteração sericítica pervasiva ao longo de uma falha E-W (Trevisan, 2015; Assis, 2015; Matos & Xavier, 2016).

O minério em Luiz é composto por pirita + esfarelita + galena $\pm$ calcopirita com fases de bornita, apatita, rutilo em concentrações subordinadas. Segundo descrito por Trevisan (2015), a esfarelita comumente contém inclusões de pirita e calcopirita; a galena e calcopirita são disseminadas na matriz de quartzo ou ocorrem em fraturas de preenchimento dentro da pirita; a calcopirita é comumente substituída por bornita; e o ouro ocorre como inclusões dentro de pirita e calcopirita, mas também como ouro livre ou preenchendo fraturas na pirita associado a galena e/ou calcopirita.

Com relação à estrutura da região União do Norte, Matos & Xavier (2016) identificaram duas famílias de estruturas principais. A primeira, formada em um nível crustal mais profundo, é caracterizada por foliação milonítica discreta, com direção E-W a NW, vertical a sub-vertical, e configura uma zona de cisalhamento com 4 km de extensão, a qual, nas inflexões E-W, hospedam os depósitos estudados e veios maciços de quartzo sulfetados mineralizados em Au (União Luis e Morro do Carrapato). A segunda estrutura, produto de estágios tardios rúpteis do mesmo evento da primeira estrutura, é caracterizada por veios de quartzo não mineralizados com texturas em pente, crustiforme, zonada, *flamboyant* e vuggy, as quais também foram descritas por Trevisan (2015). A segunda estrutura corta as foliações miloníticas e configuram um conjunto de falhas transcorrentes sinistrais com atitude N35-45E vertical (1,5 km de extensão) além de deslocar os veios e foliações E-W.

3.2 Estatística descritiva- Análises univariada e bivariada

A análise estatística univariada objetiva caracterizar e descrever estatisticamente as distribuições dos dados para melhor entendimento do

comportamento das variáveis de interesse dentro de um depósito, além de determinar o teor médio do depósito, a distribuição de frequência e a dispersão dos teores. Estas duas últimas estão relacionadas, principalmente, com a variabilidade natural dos depósitos (Yamamoto *et al.*, 2001).

A distribuição das frequências descreve o modo como as unidades de uma amostra estão distribuídas sobre o intervalo amostrado, de forma simples ou acumulada. A distribuição de frequência simples é construída tabulando-se os dados de alguma característica medida do depósito em intervalos constantes, a função resultante se chama função de distribuição; a distribuição acumulada se faz da mesma forma, porém, os dados agrupados nos intervalos são acumulados, e dão origem à função de distribuição acumulada, a qual descreve a proporção da população que é menor ou maior que um dado valor de referência (ex. teor de corte; Yamamoto & Landim, 2013).

Para a caracterização numérica da distribuição de frequência, pode-se obter a média, mediana, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e a curtose. Essas estatísticas permitem estudar as propriedades da amostra em termos de valor médio medido e como os demais valores estão distribuídos em torno deste valor (Yamamoto *et al.*, 2001).

A média é uma medida da tendência central da distribuição e pode ser obtida com a equação 6 (Yamamoto & Landim, 2013):

$$E[X] = \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

A mediana é outra forma de determinar a tendência central da distribuição, porém é mais robusta que a média, uma vez que não é tão sensível aos dados, especialmente em casos de distribuição assimétrica (Yamamoto & Landim, 2013). A mediana corresponde à metade da distribuição, valor referente a 50% da frequência acumulada (Yamamoto & Landim, 2013).

A variância é a medida da dispersão em torno da média, sendo determinada por meio da equação 2:

$$\text{Var}[X] = S^2 = E[X^2] - (E[X])^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \quad (2)$$

O desvio padrão (S) demonstra o afastamento dos valores em relação à média estimada e, o coeficiente de variação, a precisão com que foi realizado o experimento (Triola, 1999). O desvio padrão é a raiz quadrada da variância e o coeficiente de variação (CV) é obtido pela divisão do desvio padrão pela média. Ambos são valores adimensionais, e o coeficiente de variação é utilizado frequentemente na comparação da dispersão relativa de valores em torno da média entre diferentes distribuições. Esse valor é utilizado para comparação e classificação de depósitos minerais segundo a sua variabilidade natural (Yamamoto *et al.*, 2001).

A estatística bivariada consiste na análise de duas variáveis, onde pode ser ou não estabelecida uma relação de causa/efeito, relação mútua, entre elas (Hair *et al.*, 2005). Alguns métodos de análise estatística bivariada incluem o teste para a independência de duas variáveis e o estudo da relação linear entre duas variáveis, podendo ser realizadas através dos coeficientes de correlação linear de Pearson ou Spearman (correlação por postos ou rankeada; Reis, 1997), e observadas através de um diagrama de dispersão.

O coeficiente linear de Pearson é adimensional e varia entre -1 e +1, onde quando igual a “-1” expressa uma relação linear negativa e quando igual a “+1” expressa uma relação linear positiva, e se próximo a “0”, significa que não há correlação entre as variáveis (Landim, 2003).

A fórmula de Pearson foi desenvolvida para o estudo de variáveis que apresentam distribuições normais, desta forma quando as variáveis são lognormais ou suas distribuições são assimétricas positivas (com valores extremos), a fórmula de Pearson não é a mais adequada (Yamamoto & Landim, 2013). Nestes casos usa-se o coeficiente de correlação não paramétrico de Spearman, no qual a correlação é calculada sobre os dados ordenados por postos (rank; Landim, 2003).

3.3 Equações multiquádricas

Na impossibilidade de se obter variogramas experimentais representativos da variável de interesse, deve-se escolher um método determinístico. Dentre esses métodos, as equações multiquádricas têm sido usadas para fins de avaliação de recursos minerais em blocos. Segundo Yamamoto (2002, p. 30-32),

o estimador por meio das equações multiquádricas pode ser escrito, na forma dual, como:

$$Z^*(x_o) = \sum_{i=1}^n W_i Z(x_i) \quad (3)$$

Essa equação tem a seguinte condição de restrição (Yamamoto e Landim, 2013, p. 111):

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (4)$$

Os ponderadores das equações multiquádricas são calculados pela resolução de um sistema de equações lineares (Yamamoto e Landim, 2013, p. 111):

$$\begin{bmatrix} \phi(x_1 - x_1) & \phi(x_1 - x_2) & \Lambda & \phi(x_1 - x_n) & 1 \\ \phi(x_2 - x_1) & \phi(x_2 - x_2) & \Lambda & \phi(x_2 - x_n) & 1 \\ \text{M} & \text{M} & \Lambda & \text{M} & 1 \\ \phi(x_n - x_1) & \phi(x_n - x_2) & \Lambda & \phi(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & 1 & \Lambda & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \text{M} \\ W_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi(x_o - x_1) \\ \phi(x_o - x_2) \\ \text{M} \\ \phi(x_o - x_n) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde μ é o parâmetro adicional que contempla a condição de não viés no sistema de equações multiquádricas.

Segundo Yamamoto (2002, p. 31, apud Yamamoto & Landim, 2013, p. 111), as funções de base radial mais empregadas atualmente são:

Linear	$\phi(x) = x $
Cúbica	$\phi(x) = x ^3$
Multiquádrica generalizada	$\phi(x) = \left(c + x ^2\right)^{\frac{(2k+1)}{2}} \text{ para } k = -1, 0, K$
Splines	$\phi(x) = x ^2 \log x $
Gaussiana	$\phi(x) = \exp(-c x ^2)$

onde $|\bullet|$ é a norma de um vetor em R^n e c é uma constante positiva.

A incerteza associada à interpolação multiquádrica pode ser calculada pela expressão da variância de interpolação, proposta por Yamamoto (2000, p. 491):

$$S_o^2 = \sum_{i=1}^n (Z(x_i) - Z^*(x_o))^2 \quad (6)$$

Para variáveis discretas, pode-se fazer a interpolação do tipo mais provável, por meio da seguinte equação:

$$I^*(x_o; k) = \sum_{i=1}^n w_i I(x_i; k) \quad (7)$$

$\{w_i, i = 1, K, n\}$ é o conjunto de ponderadores multiquádricos. Observe-se que para cada tipo k , determina-se o valor interpolado, conforme a equação anterior. Os pesos são calculados conforme o sistema de equações multiquádricas (5).

Deve-se determinar o tipo mais provável a partir do maior valor de probabilidade entre os K valores calculados, conforme a seguinte equação:

$$I^*(x_o; k_{\max}) = \max(I^*(x_o; k), k = 1, K, K) \quad (8)$$

Qualquer estimativa para ser completa deve estar acompanhada de sua medida de incerteza. A incerteza associada ao tipo mais provável, pode ser calculada conforme a seguinte equação, segundo Yamamoto *et al.* (2012):

$$S_o^2(x_o; k_{\max}) = I^*(x_o; k_{\max}) (1 - I^*(x_o; k_{\max})) \quad (9)$$

A equação (5) é exatamente a fórmula da variância de Bernoulli, que foi derivada a partir da expressão da variância de interpolação por Yamamoto *et al.* (2012). Ainda segundo esses autores, pode-se definir uma zona de incerteza, como mostra o gráfico da **Figura 6**.

Figura 6: Zona de incerteza definida para variância de interpolação superior a 0,20 (Yamamoto *et al.* 2012).

3.4 Modelagem geológica

A modelagem geológica pode ser feita de várias maneiras: determinística ou probabilística. O objetivo da modelagem geológica está na reconstrução da geologia da região de estudo a partir das sondagens, ou seja, trata-se da integração dos dados discretos disponíveis nas sondagens em um modelo contínuo tridimensional da geologia (Sinclair & Blackwell, 2002). Assim, pontos não amostrados entre as sondagens podem ter suas litologias interpoladas por meio da modelagem. A modelagem determinística pode ser feita quando existem sondagens em número suficiente para o ajuste de funções matemáticas implícitas, onde o contato geológico é determinado implicitamente. Por outro lado, a modelagem probabilística trabalha com probabilidades resultantes da codificação indicadora (eventos mutuamente exclusivos). Geralmente, trabalha-se com um modelo tridimensional de blocos (**Figura 7**), onde cada bloco desse modelo é calculado a partir dos pontos de dados vizinhos (**Figura 8**).

Figura 7: Modelo tridimensional de blocos.

Figura 8: Localização dos pontos de dados vizinhos próximos a um bloco a ser calculado.

Considerando uma variável categórica composta por K tipos, a codificação indicadora de uma variável categórica é feita da seguinte forma (Yamamoto & Landim, 2013, p. 62):

$$I(x, k) = \begin{cases} 0, & \text{se } F(x) \neq \text{tipo } k \\ 1, & \text{se } F(x) = \text{tipo } k \end{cases} \quad (10)$$

Essa transformação atribui o valor 1 se no ponto x , ocorrer o litotipo k , caso contrário atribui o valor zero. Trata-se de uma codificação de eventos mutuamente exclusivos, pois se um litotipo ocorrer, nenhum outro pode ocorrer. A codificação binária transforma as observações em probabilidades (zeros ou uns). Assim, o resultado da manipulação matemática irá refletir também uma probabilidade. Considerando que a codificação indicadora produz K vetores de zeros e uns, tem-se K valores de probabilidade calculados nos pontos não amostrados. Dessa forma, o tipo mais provável é aquele que apresentar a maior probabilidade.

Para o cálculo das probabilidades nos pontos não amostrados, o método da krigagem indicadora seria o mais indicado. Porém, este método requer o cálculo e a modelagem de K variogramas experimentais, o que é impossível na prática, pois nem todos os tipos apresentam pontos suficientes para a determinação de variogramas. Assim, Yamamoto *et al.* (2012) optaram pelas equações multiquádricas, conforme apresentadas anteriormente.

3.5 Modelagem de teores

A modelagem de uma variável contínua, por meio da krigagem ordinária, resulta em um modelo tridimensional de blocos, onde os blocos são calculados com base nos vizinhos próximos como foi descrito anteriormente (Yamamoto & Landim, 2013). Entretanto, no caso em estudo, a krigagem não pôde ser aplicada, devido à impossibilidade de se obter variogramas experimentais. Assim, foram usadas as equações multiquádricas, conforme descrito no **item 3.4**.

3.6 Modelo de Fusão

Como dito anteriormente, a maioria das estimativas de recursos (teores) são realizadas com o método de modelagem de bloco 3D, porém, segundo Duke & Hanna (2001) para que os modelos de blocos de teor de minério sejam mais precisos é necessário que eles estejam limitados por elementos geológicos controladores do depósito, tais como a litologia, estruturas caracterizando a distribuição espacial dos teores.

Com o intuito da visualização e a representação dos teores de minério limitados à interpretação geológica e estrutural da área, sugeriu-se a modelagem de fusão. O modelo de fusão é o resultado de uma sobreposição do modelo geológico e do modelo de teores criados em uma etapa anterior do estudo. Esse

modelo tridimensional é uma aproximação da real forma e das características do depósito mineral.

Portanto, a fusão do modelo geológico ao modelo de teores, irá auxiliar na representação mais clara da distribuição espacial dos teores dentro do entendimento geológico no depósito (Duke & Hanna; 2001).

4 Materiais e Métodos

Para a realização desse trabalho foi disponibilizado um banco de dados com informações de 89 sondagens de reconhecimento, sendo 53 sondagens referentes ao Depósito Luiz, 09 ao Morro do Carrapato e 27 ao Ana.

As sondagens possuem profundidade que variam de 50 a 300 metros e foram executadas com rumo de manobra entre de 0° e 180° e mergulho de 50°-60°, formando um *grid* em pente.

Devido a quantidade e a qualidade das informações disponíveis por depósito, a concentração geográfica dessas informações, e a similaridade dos depósitos, decidiu-se enfocar o presente projeto na região dos Depósitos Luiz e Morro do Carrapato, totalizando uma área com aproximadamente 2 km². Ambos os depósitos, geograficamente próximos, possuem o mesmo estilo de mineralização e associação mineral similar. A **Figura 9** mostra a localização e distribuição das sondagens de reconhecimento na área de estudos.

O banco de dados disponibilizado é composto pelas seguintes informações separadas por depósito e organizadas em intervalos regulares em formato “DE-ATÉ” quando conveniente:

- Coordenadas UTM e cotas altimétrica das sondagens;
- Orientação (rumo e mergulho) e profundidade das sondagens;
- Descrição do litotipo;
- Descrição da mineralogia macroscópica;
- Tipo e grau da alteração hidrotermal; e
- Dados geoquímicos (concentração) dos elementos traços (ppm): Au, Ag, As, B, Ba, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, La, Li, Mo, Ni, Pb, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Th, U, V, W, Y, Zn, Zr; e maiores (%): Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, K, Ti, Na e P.

Figura 9: Distribuição espacial, localização e agrupamento das sondagens para a modelagem geológica (Imagem disponibilizada pela *BioGold*).

O estudo estatístico e geoestatístico, e o desenvolvimento de modelos geológico e de teores dos depósitos foram realizados a partir dos programas *Geovisual* e *Geokrige*, escritos pelo orientador Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto.

Para atingir os objetivos propostos as seguintes etapas foram executadas:

4.1 Levantamento bibliográfico

Realizou-se um levantamento bibliográfico do referencial teórico referente às técnicas empregadas na pesquisa, como: a modelagem geológica, análises

estatísticas, análises geoestatísticas, interpolação e interpretação de variogramas categóricos, e modelagem de teores por krigagem, e modelagem de fusão.

Foi também realizada a revisão bibliográfica do contexto geológico da PAAF e a metalogênese do ouro na província, com ênfase no setor leste da província, e mais detalhadamente o sistema União do Norte. Teve-se ênfase nos atributos geológicos, como rochas hospedeiras, tipos e estilos de alteração hidrotermal, mineralogia do minério e ambientes tectônicos relacionados a essa região.

4.2 Validação do banco de dados de entrada

A partir das informações disponibilizadas citadas foi criado um banco de dados composto por informações geográficas (coordenadas UTM e Cota), orientação da manobra das sondagens, dados litológicos codificados, detecções de ouro (ppm) e dos metais de base associados a mineralização zinco (ppm), cobre (ppm) e chumbo (ppm) além dos dados de concentração de todos os demais elementos maiores (%), traços (ppm). Essas informações de entrada foram organizadas em três tabelas, uma contendo os dados litológicos (**Tabela 1**); outra com dados litológicos e de teores de ouro, zinco, chumbo e cobre (**Tabela 2**); e outra com os dados de concentração dos demais elementos traços (ppm) e maiores (%) selecionados (**Tabela 3**). Amostras das tabelas de entrada são apresentadas no **Apêndice A**.

Os dados da descrição geológica disponibilizados no banco de dados original foram então organizados e codificados em nove litotipos, descritos no **item 5.2.2** (Contexto Geológico). Cada litotipo possui um código (1-9) que foi atribuído a cada intervalo de profundidade “De-Até” do banco de dados de input (**Tabela 1**) para a modelagem geológica.

Com o objetivo um melhor entendimento da geologia e das estruturas relacionadas, seções geológicas (**Apêndice B**) foram elaboradas a partir dos dados litológicos codificados e compilados da **Tabela 1**.

Apesar de existirem atualmente uma enorme quantidade de programas que permitem a construção de seções em ambiente digital, as seções foram geradas manualmente devido à complexidade da geologia local, caracterizada por camadas com mergulho vertical a sub-vertical. As seções geológicas foram criadas oblíqua a foliação e aos veios de quartzo.

A interpretação geológica, necessária no momento da construção das seções, levou em conta não apenas os dados de sondagem, mas também o conhecimento da geologia local, principalmente das estruturas mais complexas do depósito obtidas por meio da revisão da literatura. Além disso, foram fornecidas algumas seções geológicas interpretadas da região de estudo (LZG001 a LZG014) que serviram como guia para a elaboração das seções geológicas dos furos de sonda.

Adicionalmente, para auxiliar na modelagem geológica durante a interpolação dos dados, foram criadas sondagens virtuais, chamadas de “pseudo-sondagens” (PLZG), onde não havia informação litológica codificada. As pseudo-sondagens foram desenhadas paralelas às sondagens reais nas seções, e as profundidades de contato litológico foram codificadas e os dados adicionadas ao banco de dados de entrada.

Nas **Tabelas 2 e 3**, elaboradas para o modelo de teores e para o estudo estatístico e geoestatístico do depósito, nos intervalos em que não havia informação da concentração do elemento químico ou com valores de concentração menores que o valor de detecção do laboratório, utilizou-se para representar essa situação o código “-99”. Essa medida foi tomada a fim de se evitar o “Zero *Effect*” descrito por Chilès & Delfiner (1999; pg.392) nas análises estatísticas e geoestatísticas devido à grande dispersão dos dados geoquímico da região.

Devido à limitação computacional, o banco de dados dos elementos maiores e traços foi reorganizado selecionando-se alguns elementos para serem descartados das análises. Essa escolha teve como base a separação dos elementos com frequência de ocorrência menor que 90% do total em todas as amostras. Desta forma a **Tabela 3**, é composta pelos elementos traços: Au, Ag, As, Ba, Co, Cr, Cu, La, Li, Mo, Ni, Pb, Sr, V, Y, e Zn; e pelos elementos maiores: Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P e Ti.

4.3 Modelo geológico

O modelo geológico é uma representação idealizada a partir dos dados de sondagens e interpretações geológicas. Na realidade, faz-se uma integração dos dados a partir de métodos matemáticos de interpolação. No caso em estudo, foram usadas as equações multiquádricas para tal fim.

Para a modelagem geológica, como supracitado, se utilizou o programa computacional *Geokrige*. Inicialmente se definiu a área a ser modelada, a partir do mapa base disponibilizado (**Figura 9**) e em seguida importou-se o banco de dados de *input* (**Tabela 1**) com as informações litológicas.

Posteriormente, foi criado o modelo geológico 3D a partir da interpolação multiquádrica da variável categórica “litologia”, levando em consideração apenas as informações das sondagens. Esse modelo foi elaborado com 9302400 blocos, sendo 408 no eixo X, 120 no eixo Y e 190 no eixo Z. As dimensões dos blocos foram: 6,25 nos eixos X e Y e 1 metro no eixo Z (**Tabela 4**). Evidentemente, nem todos os blocos foram calculados por estarem fora do domínio de interesse. A modelagem foi feita conforme a metodologia descrita anteriormente, mas devido à complexidade, cada litologia foi modelada independentemente e depois empilhada. À exceção do solo, as demais litologias foram modeladas com uma anisotropia global igual a 180° de rumo do mergulho e 85° de ângulo de mergulho. O elipsoide de anisotropia foi definido pelos seguintes valores dos eixos: eixo maior e médio iguais a 88,39 m. e eixo menor igual a 5 m. Além disso, foram usados dois pontos por octante, totalizando no máximo 16 pontos de dados vizinhos.

Parâmetros do modelo de blocos		
Modelo de Blocos	Número de blocos	Tamanho
X	408	6,25
Y	120	6,25
Z	190	1,00

Tabela 4. Parâmetros do modelo de blocos

4.4 Análise estatística

A análise estatística univariada dos dados foi realizada com o auxílio do programa *Geovisual* e a partir do banco de dados organizados na **Tabela 3**.

A representação gráfica da distribuição de frequências dos dados de teores se deu por meio de histogramas e curvas cumulativas, ilustrando o tipo de

distribuição e dos valores extremos além da dispersão desses dados. Para a descrição quantitativa da distribuição de frequência, calculou-se a média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e a curtose. Os dados quantitativos foram organizados e apresentados em forma de tabela para todos os elementos químicos fornecidos.

A estatística bivariada se deu inicialmente com os dados globais dos dois depósitos estudados, isso quer dizer sem a separação por litologia ou por área. Inicialmente se calculou o coeficiente de correlação linear de Pearson e o coeficiente de correlação não paramétrico de Spearman (ambos variando de -1 a +1) entre todos os elementos químicos dos depósitos. Para fins quantitativos, foi escolhido o coeficiente que apresentou maior valor, o que reflete a distribuição normal ou lognormal (distribuição assimétrica positiva) das variáveis.

Dentre os valores de coeficiente de correlação (de Pearson ou de Spearman) global, foram selecionadas as correlações que apresentaram maior relação linear positiva (valores próximos de +1) e se gerou gráficos de dispersão, a fim de ilustrar essa correlação.

Posteriormente, devido os dados globais apresentarem uma dispersão muito grande e uma relação linear positiva muito baixa, foram calculados coeficientes de correlação linear e gerados gráficos de dispersão condicionado à litologia mineralizada. Desta forma, os dados utilizados para a análise estatística bivariada foram limitados as litologias, diminuindo a dispersão dos valores e evidenciando as relações de dependência mútua entre as variáveis. A partir do modelo geológico, as litologias foram combinadas com os modelos de teores, de tal forma que para cada litologia foi possível separar um subconjunto de teores para a análise bivariada.

A escolha dos elementos correlacionados, para a verificação da existência de relação mútua entre eles, se deu com o intuito de confirmar e diagnosticar as correlações entre os teores de ouro e dos metais de base à mineralogia dos depósitos.

4.5 Modelo de teores

Para as variáveis contínuas (teores de Au, Zn, Cu e Pb), os blocos do modelo tridimensional de blocos foram calculados com os mesmos parâmetros utilizados para o modelo geológico e com base nas equações multiquádricas. As equações

multiquádricas foram utilizadas pois não foi possível determinar os variogramas experimentais nas direções de maior continuidade dos eixos de anisotropia. A título de ilustração, os semi-variogramas calculados para a variável Au estão apresentados no **item 6.5**.

Os resultados dos teores nos blocos foram representados em escala Gaussiana, para melhor visualização dos teores. Quando os dados apresentam uma distribuição lognormal, deve-se fazer a representação em uma escala normalizada, que pode ser logarítmica ou Gaussiana. Nesse caso, adotou-se a escala Gaussiana. Para representação dos dados em escala Gaussiana, faz-se a transformação dos dados para os escores da distribuição normal e, em seguida, os valores normais são divididos em 21 classes de valores. Essas classes normais são recalculadas para os valores originais por transformação reversa.

4.6 Modelo de fusão

Uma vez obtidos os modelos de teores e de litologia, pôde-se proceder à fusão dos modelos, que tem por objetivo determinar a distribuição de teores conforme a litologia.

Os modelos de fusão foram criados com a sobreposição matemática dos dois modelos gerados (geológico e de teor), ambos gerados com os mesmos parâmetros de modelagem (número e tamanho de blocos e elipsoide de anisotropia). A sobreposição foi feita dentro do programa *GeoKrige* com a seleção das variáveis de teor de interesse obtidas no modelo de teor e das litologias de interesse modeladas no modelo geológico. A partir da seleção das variáveis de interesse (teor e litotipo) dos dois modelos base, o novo modelo de fusão foi gerado, onde apenas os teores dentro dos litotipos selecionados foram levados em conta no cálculo de recurso.

Desta forma foram geradas imagens que auxiliaram na interpretação e na confirmação distribuição do minério no depósito e sua relação com a litologia.

4.7 Curva teor-tonelagem

A curva teor-tonelagem tem como objetivo fazer a parametrização dos recursos minerais, em função de diferentes teores de corte, determinando-se a

tonelagem e o teor médio para cada teor de corte. A expressão reserva mineral implica que medidas físicas do teor e a quantidade de concentração mineral tenham sido feitas *in situ* e que a extração seja viável economicamente, caso contrário deve ser mantido como recurso geológico (Zwartendyk,1972 apud Machado, 1989). A reserva corresponde a uma pequena fração do recurso, e varia de acordo com o estágio de pesquisa da mina (Noble,1993).

Após a modelagem de teor do ouro, ainda com o auxílio do programa computacional *Geokrige*, a curva teor-tonelagem foi gerada para essa variável.

5 Resultados e Discussão

A seguir são apresentados todos os resultados obtidos durante esse projeto de mestrado juntamente com as discussões e implicações destes resultados na utilização do método das equações multiquádricas para a modelagem geológica e de teores além da representação do conhecimento geológico da região.

5.1 Estudo de caso: Geologia dos depósitos Luiz e Morro do Carrapato

A partir do banco de dados e do conhecimento da geologia local, foram definidos seis litotipos para a região:

Granodiorito

Rocha verde-acinzentado, vermelha-acinzentado, branca-levemente rosado, dependendo da alteração hidrotermal prevalecente. Textura subfanerítica á fanerítica média a grossa e equigranular média. Estrutura maciça, localmente foliada e fraturada. Quando foliada, a foliação é milonítica, incipiente e vertical a sub-vertical.

O granodiorito exhibe alteração hidrotermal potássica pervasiva, de intensidade moderada a forte; propilítica pervasiva e fissural de intensidade moderada; e sericitica pervasiva de intensidade forte. Esse litotipo é correlacionado com a unidade Granodiorito Luiz.

Pórfiro

Rocha vermelho pálido, com textura fanerítica fina e estrutura maciça. As principais alterações hidrotermais identificadas foram as sericitica e propilítica. Esse litotipo se corresponde com a unidade Pórfiro Luiz.

Diques Máficos

Rocha verde escura com tons avermelhados, textura afanítica a fanerítica fina, maciça e por vezes com estrutura foliada a 60°. Afetados principalmente pela alteração sericitica pervasiva e secundariamente pela silicificação e propilitização. Pode ser correlacionado com os Diques Máficos descritos na área.

Zona Silicificada

Rocha altamente silicificada em estilo pervasiva, com substituição dos minerais primários e secundários, impossibilitando a identificação da rocha original. Possui textura fanerítica fina a subfanerítica inequigranular e com estrutura maciça.

Brecha Hidrotermal

Rocha acinzentada, estrutura brechada com fragmentos de granodiorito e diques máficos altamente afetados pelas alterações hidrotermais potássica, propilítica, e sericitica em matriz de quartzo geralmente com texturas em pente e crustiforme.

Veios de Quartzo

Branco-amarelado a branco-esverdeado associado a sulfetos e com material oxidado. Na maior parte das vezes com textura maciça, porém descrito por vezes com texturas em pente.

Solo/ Saprólito

Corpo não mineralizado horizontal.

No **Apêndice B** são apresentadas algumas das seções geológicas interpretadas a partir dos dados de sondagem do depósito Luiz, sendo apresentadas as seções mais relevantes para esse estudo. As seções que foram previamente disponibilizadas pela BioGold (LZG001 a LGZ014) serviram como base e foram reinterpretadas e modificadas segundo a nova interpretação geológica da autora

Com a interpretação geológica dos furos de sonda, e pela construção das seções geológicas é possível visualizar de forma preliminar as feições e estruturas geológicas do depósito.

5.2 Modelagem Geológica

Os dados e interpretações geológicas, o que caracteriza litologicamente e estruturalmente um depósito, constituem a base para a avaliação e o planejamento de uma mina, sendo essas informações essenciais para a estimativa dos recursos e reservas, assim como para o controle dos processos de

lavra e beneficiamento (Souza, 2017). A elaboração de um modelo geológico permite a compilação de todos esses dados geológicos e das observações e estudos realizados na área. O modelo deve ser criado de maneira a demonstrar e explicar as informações no ponto de vista empírico e conceitual (Souza, 2017). O modelo descritivo representa a soma e a integração de estudos mineralógicos, químicos e estruturais, enquanto o modelo conceitual esclarece a origem e a distribuição destas características de forma útil e significativa (Erickson Jr, 1992).

Os modelos geológicos devem demonstrar a realidade observável da geologia, incluindo a geometria do depósito, e deve ser criado de forma a prever as necessidades técnicas dos profissionais que iriam usar essa informação, como hidrogeólogos, engenheiros geotécnicos, de exploração ou de minas (Otoya, 2011). O modelo pode ser simples (quantidade pequena de detalhes) ou complexo (muitos detalhes), a depender da geologia a ser modelada, dos dados disponíveis e o grau de sofisticação na pesquisa (Souza, 2017).

Diante desse cenário, a partir da interpretação geológica com base nas seções e do banco de dados criado na **Tabela 1**, e com o auxílio do programa computacional *Geokrige*, foi gerado o modelo geológico 3D para a área dos depósitos Luiz e Morro do Carrapato. Como citado anteriormente, o modelo foi criado com o método de interpolação multiquádrica da variável categórica “litologia”.

Como descrito anteriormente no **item 3.1.4**, a estrutura local, pouco estudada e documentada, possui *trend* principal NE-SW a E-W com caimento vertical a sub-vertica. Desta forma, afim da elaboração dos modelos, considerou-se a anisotropia global do sistema com estrutura regional de direção Leste-Oeste mergulhando 85 graus a Sul.

As **Figuras 10 a 12** apresentam o modelo geológico 3D para esses depósitos.

Figura 10: Modelo Geológico- Visão geral 3D.

Figura 11: Modelo Geológico: (A) visão lateral da região oeste; (B) visão lateral da região leste.

Figura 12: Modelo Geológico: (A) visão central à leste - Luiz e Morro do Carrapato; (B) visão central à oeste- Luiz.

Na falta de dados estruturais mais precisos, a informação estrutural regional foi usada para fazer a modelagem geológica, pois os testemunhos das sondagens não foram orientados, impossibilitando interpretações estruturais mais precisas. Além disso, as sondagens não interceptaram perpendicularmente as camadas subverticais, o que também dificultou a interpretação geológica para a geração do modelo geológico. Em vista disso, utilizou-se como eixo menor do elipsoide de anisotropia 5 metros. Por esse motivo, nas **Figuras 11 e 12** é possível visualizar o efeito das sondagens realizadas em X (Rumo do mergulho em torno de “0” e “180” e mergulho variando de 50 a 60), porém as litologias seguem mostrando a orientação conforme 180/85.

O granodiorito ocorre predominante no modelo geológico, caracterizando-o como rocha encaixante e com a alteração potássica prevalecendo em relação às outras duas, sendo possível constatar a característica pervasiva das alterações hidrotermais. Devido a menor abrangência do granodiorito sericitizado e propilitizado e suas relações espaciais e de contato com o granodiorito potássico, evidenciado na **Figura 11A** com um núcleo potássico e um halo propolítico, sugere-se que a alteração potássica seja mais antiga que as alterações sericítica e propilítica.

Nos contatos nas linhas de sondagem entre o granodiorito e os demais litotipos, interpreta-se, que o pórfiro e os diques máficos são intrusivos no granodiorito.

Na **Figura 12A**, os contatos observados mostram um padrão típico de depósitos do tipo Pórfiro.

As **Figuras 13 e 14** apresentam o modelo geológico apenas com os litotipos relacionados com a mineralização de ouro.

Figura 13: Modelo Geológico com os litotipos correlacionados a mineralização de ouro- Visão geral. Minério está localizado nos veios de quartzo.

Devido ao tamanho dos veios de quartzo, muitas vezes centimétricos no depósito, não foi possível mapear e modelá-los em sua totalidade e em detalhe, uma vez que o depósito foi gerado com uma escala de detalhe métrica. Desta forma, os veios de quartzo aqui representados, possuem tamanhos métricos ou representam sistemas de veios menores.

A partir das **Figuras 14** pode-se observar que a alteração sericitica possui uma relação proximal com os veios de quartzo e com as zonas silicificadas, que por sua vez também apresentam uma relação espacial com os veios de quartzo.

Figura 14: Modelo Geológico com os litotipos correlacionados a mineralização de ouro: (A) visão central à oeste - Luiz; (B) visão central à leste- Luiz e Morro do Carrapato.

O modelo geológico obtido, ilustrado por imagens de seções, representa os depósitos de acordo com a quantidade e qualidade dos dados disponíveis, sendo que um estudo mais detalhado da estrutura local e uma campanha de sondagens de mais densa, resultaria em um modelo mais fiel a realidade geológica.

5.3 Análise estatística univariada

Com o auxílio do programa *Geovisual*, foi realizada a análise estatística descritiva univariada, que englobou todas as concentrações dos elementos químicos disponibilizados para área de estudos. A **Tabela 5** apresenta os valores estatísticos quantitativos obtidos desta análise: dimensão do espaço amostral (N), média (X), desvio padrão (S), coeficiente de variação (CV), valor máximo (Max), quartil superior (QS), mediana (Med), quartil inferior (QI) e valor mínimo (Min).

Estatística	Au	Ag	As	Ba	Co	Cr	Cu	La	Ti
N	3342	966	1405	2481	2109	2418	2481	2281	1895
X	0.55	8.29	40.07	72.67	9.67	25.20	118.24	33.30	0.09
S	3.79	22.26	107.52	131.50	8.74	97.13	380.87	82.10	0.11
CV	6.85	2.69	2.68	1.81	0.90	3.86	3.22	2.47	1.29
Max (ppm)	85.78	306.00	2268.00	2316.00	104.00	1565.00	10000.00	2402.00	1.00
QS (ppm)	0.18	6.15	35.34	63.95	9.19	9.15	78.95	28.72	0.11
Med (ppm)	0.05	2.05	13.60	44.87	6.51	5.98	19.70	21.63	0.06
QI (ppm)	0.02	0.02	7.98	31.87	4.99	3.81	7.92	16.65	0.03
Min (ppm)	0.01	1.00	1.00	3.00	2.00	1.00	1.00	1.99	0.01
Estatística	Li	Mo	Ni	Pb	Sr	V	Y	Zn	
N	2522	1540	2385	2309	2477	2448	2414	2546	
X	34.18	7.33	15.16	380.88	31.81	26.63	7.02	723.28	
S	42.82	18.13	45.88	1319.74	27.55	22.98	14.57	1865.96	
CV	1.25	2.47	3.03	3.47	0.87	0.86	2.08	2.58	
Max (ppm)	508.00	328.00	538.00	10000.00	280.00	191.00	455.00	10000.00	
QS (ppm)	38.73	4.88	7.36	113.19	45.71	30.86	6.76	292.00	
Med (ppm)	23.38	3.01	3.92	23.15	22.04	20.40	4.79	93.29	
QI (ppm)	13.31	1.58	2.56	7.88	10.53	12.12	3.46	51.97	
Min (ppm)	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	3.00	1.00	1.00	
Estatística	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	
N	2547	2524	2547	2541	2539	2532	1913	2449	
X	1.17	0.66	2.35	0.26	0.89	0.17	0.07	0.06	
S	0.88	0.60	1.41	0.42	1.18	0.25	0.14	0.08	
CV	0.75	0.91	0.60	1.61	1.32	1.46	1.98	1.25	
Max (%)	8.00	7.32	15.00	5.74	13.12	2.59	1.00	1.00	
QS(%)	1.30	0.91	2.59	0.27	0.95	0.17	0.06	0.07	
Med(%)	0.98	0.55	2.11	0.17	0.62	0.09	0.04	0.05	
QI(%)	0.69	0.21	1.58	0.11	0.33	0.05	0.02	0.03	
Min(%)	0.03	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	

Tabela 5: Dados estatísticos descritivos para o depósito Luiz e Morro do Carrapato.

Para o teor de ouro, observa-se uma relativa distância entre os valores de média e mediana e um valor máximo muito maior que o valor mínimo, evidencia que os dados apresentam valores extremos. O valor máximo de 85,78 ppm aponta para a existência de ouro nativo nos depósitos. O quartil superior demonstra que os teores amostrados maiores que 0,18 ppm, representam apenas 25% do total. Com relação ao coeficiente de variação (CV), que caracteriza a variabilidade natural de um depósito, o alto valor encontrado (6,85) nessa análise demonstra a acumulação

anômala do ouro, como era esperado, porém, com um valor mais alto do que o valor normalmente esperado para depósito de ouro. Isso ocorre devido à estrutura do depósito (sub-vertical e estruturalmente controlado) refletindo na coexistência entre valores extremos de teores, que caracterizaria o efeito pepita.

Para os metais de base de interesse, zinco, chumbo e cobre, os valores obtidos da análise estatística apresentaram distribuições assimétricas e semelhantes nos depósitos estudados. O zinco ocorre com maiores concentrações, com mediana em 93,29 ppm (50% da frequência acumulada) e quartil superior de 292,00 ppm (25% dos maiores valores), seguido do chumbo (med: 23,15 ppm; e QS: 113,19 ppm) e por último, com menores concentrações quando comparados com os dois anteriores o cobre (med:19,70ppm; QS: 78,95 ppm). Para os três elementos, os valores entre a média e a mediana também estão muito distantes entre si, evidencia que os dados contêm valores extremos. Os valores de desvio padrão (S) se apresentam muito mais altos tanto para zinco como para o chumbo quando comparados com o cobre, apontando para uma maior variação em torno da média para esses dois elementos. Com relação ao coeficiente de variação (CV), foram encontrados valores maiores que 1,2 (valor estabelecido para distribuição lognormal por Finney, 1941), apontando para uma alta dispersão das distribuições de frequência.

Para o ferro e potássio, o valor de coeficiente de variação ficou em torno de um, demonstrando uma baixa dispersão das frequências, confirmada pela proximidade entre os valores de média e mediana e baixo valor de desvio padrão. Porém, o CV do potássio é maior que 1,2 o que indica uma distribuição lognormal das frequências.

A fim de resumir e visualizar as informações estatísticas foram gerados histogramas e curvas de distribuição acumulada para os teores de Au, Pb, Zn e Cu e para os elementos K e Fe, devido suas relações com a mineralização de ouro pelos sulfetos e pelas alterações hidrotermais (**Figura 15**).

Nos histogramas e as curvas de distribuição representados, observa-se que as distribuições das frequências são fortemente assimétricas para Au, Zn, Pb, Cu e K, características de distribuições lognormais. Distribuições lognormais são típicas de depósitos minerais que, por sua vez sempre apresentam acumulações anômalas do elemento de interesse, como é o caso do ouro. Pelos histogramas também se observa que o conjunto de dados se distribuem semelhantemente para

os metais Au, Zn, Pb e Cu, onde há concentração de valores em uma faixa estreita de teores, e pontos aleatórios de maior concentração.

Para o ferro, a distribuição da frequência se aproxima um de uma distribuição simétrica, mostrando uma distribuição normal para esse elemento, com os valores melhor distribuídos em torno da média.

Figura 15: Análise estatística dos dados de Au, Zn, Pb, Cu, K e Fe nos depósitos Luiz e Morro do Carrapato.

Figura 15- continuação: Análise estatística dos dados de Au, Zn, Pb, Cu, K e Fe nos depósitos Luiz e Morro do Carrapato.

Outros elementos que nos chamam a atenção são a prata e arsênio devido aos valores máximos relativamente altos. Ambos apresentam coeficientes de variação próximos a 2,0 (distribuição lognormal), e apesar dos valores máximos se apresentarem altos (306 ppm para Ag e 2268 ppm para As), o número de ocorrência (N) é baixa (966 e 1405 vezes respectivamente) quando comparados com os outros minérios, que descaracteriza esses elementos como de interesse econômico nos depósitos estudados.

5.4 Análise estatística bivariada

A análise estatística bivariada, englobando todas as concentrações dos elementos químicos disponibilizados para área de estudo, foi realizada também com o auxílio do programa computacional *Geovisual*. A **Tabela 6** apresenta os coeficientes de correlação calculados.

Os maiores valores de correlação ($>0,3$), apontando para uma correlação linear positiva, do ouro ocorreu com os elementos: Ag, As e Cu; e valores menores, porém ainda sugerindo uma correlação positiva, com Pb, Zn, Fe e K. Essas correlações positivas foram representadas nos diagramas de correlação da **Figura 16**, onde todos os diagramas mostram um *trend* sutil de enriquecimento

dos metais com o acréscimo de Au. Essas correlações positivas sugerem uma associação entre a mineralização de ouro e os metais de base por meio dos sulfetos pirita (FeS_2), esfalerita (Zn,FeS), galena (PbS) e calcopirita (CuFeS_2). O diagrama Au versus K sugere ainda a associação da alteração hidrotermal sericítica (sericita $\pm$ muscovita $\pm$ quartzo) com a mineralização de Au. A relação entre Au e As sugere a presença de pirita arsênica entre os sulfetos mineralizados, essa relação não é descrita na literatura, porém é reforçada observando-se o diagrama Fe vs. As da **Figura 17**. Não existem correlações negativas significativas para o ouro.

	Ba	Co	Cr	Cu	La	Li	Mo	Ni	Pb	Sr	V	Y	Zn	Al	Ca	Fe	k	Mg
	-0.17	0.28	0.08	0.61	0.00	-0.01	0.36	0.23	0.36	-0.36	-0.16	-0.09	0.31	-0.05	-0.17	0.18	0.30	-0.01
	-0.16	0.18	0.05	0.64	-0.14	-0.08	0.29	0.09	0.52	-0.24	-0.12	-0.14	0.50	-0.22	-0.08	0.36	-0.02	-0.01
	-0.17	0.15	-0.09	0.48	-0.32	0.01	0.12	0.07	0.30	-0.25	-0.20	-0.08	0.29	-0.21	-0.07	0.38	0.19	-0.01
	-	0.25	0.17	-0.13	0.24	-0.09	-0.11	0.20	-0.17	0.28	0.15	0.28	-0.08	0.12	-0.07	0.15	0.14	-0.01
		-	0.60	0.29	0.16	0.39	0.29	0.73	0.11	0.01	0.50	0.21	0.21	0.47	0.01	0.71	0.01	0.01
			-	0.12	-0.07	0.35	0.09	0.82	0.04	0.17	0.55	0.02	0.22	0.44	0.11	0.41	-0.15	0.01
				-	-0.28	0.00	0.23	0.24	0.62	-0.32	-0.03	-0.11	0.60	-0.06	-0.15	0.42	0.17	-0.01
					-	-0.29	0.27	-0.15	-0.30	-0.15	-0.08	0.65	-0.43	0.02	-0.25	-0.43	0.58	-0.01
						-	-0.13	0.48	-0.10	0.28	0.41	-0.12	0.21	0.71	0.45	0.36	0.27	0.01
							-	0.15	0.03	-0.27	-0.07	0.10	-0.13	0.05	-0.11	-0.13	0.26	-0.01
								-	0.07	0.09	0.49	0.04	0.28	0.52	0.22	0.56	0.02	0.01
									-	-0.25	-0.08	-0.28	0.82	-0.15	-0.06	0.31	0.01	-0.01
										-	0.45	0.01	-0.07	0.34	0.77	0.09	-0.10	0.01
											-	0.11	0.15	0.73	0.28	0.68	-0.09	0.01
												-	-0.32	0.03	-0.21	0.00	-0.07	-0.01
													-	0.04	0.12	0.52	-0.04	0.01
														-	0.36	0.24	0.38	0.01
															-	0.16	0.13	0.01
																-	-0.26	0.01
																	-	0.01
																		-

Tabela 6: Coeficientes de correlação (R) globais calculados para todos os elementos estudados.

Figura 16: Diagramas de dispersão do (A) Au vs. Cu; (B) Au vs. Pb; (C) Au vs. Zn; (D) Au vs. K; e (E) Au vs. Fe.

Figura 17: Diagramas de dispersão de As vs.Fe.

Entre os metais de base, as maiores correlações positivas se apresentaram entre: Cu vs. Pb, Cu vs. Zn, Pb vs. Zn, e Cu vs. As e menor entre Cu vs. Fe e Zn vs. Fe. Essas correlações são ilustradas nos diagramas da **Figura 18** os quais demonstram um *trend* positivo para todas as combinações.

Essas correlações refletem a presença dos sulfetos calcopirita (Figura 21.A: Cu vs. Fe) e esfarelita (Figura 21.D: Zn vs. Fe) além de sugerirem uma paragênese e correlação com as alterações hidrotermais para os depósitos estudados. A paragênese típica, encontrada nos depósitos Luiz e Morro do Carrapato, é composta por pirita + esfarelita + galena ± calcopirita associado com um halo sericítico (Trevisan, 2015; Matos & Xavier, 2016).

O diagrama de correlação entre Cu vs. As (Figura 21.E) aponta para a hipótese da paragênese entre a arsenopirita e calcopirita.

Os diagramas apresentados mostram, apesar do *trend* positivo, uma grande dispersão nos valores de correlação, especialmente próximos à origem. A fim de refinar as correlações e obter um melhor entendimento das mesmas, diagramas de dispersão foram gerados condicionados aos litotipos conhecidamente associados à mineralização.

Figura 18: Diagramas de dispersão de (A) Cu vs. Fe; (B) Cu vs. Zn; (C) Cu vs. Pb; (D) Zn vs. Fe; (E) As vs. Cu; e (F) Pb vs. Zn.

5.5 Análise estatística bivariada condicionada à litologia

A análise bivariada dos elementos que apresentaram uma correlação global positiva agora condicionada aos litotipos associados à mineralização apresentou valores mais expressivos e diagramas mais representativos.

Por outro lado, o condicionamento aos litotipos demonstrou que as relações entre As vs. K, As vs. Fe e As vs. Cu, observadas na análise global dos dados, são na realidade insignificantes e não podem ser apresentadas como evidência de relação mútua entre esses elementos, o que indica a não existência de sulfeto de arsênio (arsenopirita) e reforça a hipótese da presença de pirita arsênica.

Na **Figura 19** são apresentados os diagramas de correlação condicionados aos veios de quartzo que demonstraram uma correlação positiva significativa, apresentando um *trend* positivo na relação entre (A) Au vs. Pb; (B) Au vs. Fe; (C) Au vs. Zn; (D) Cu vs. Fe; (E) Au vs. Cu; (F) Zn vs. Cu; e (G) Zn vs. Fe.

Na zona silicificada, os elementos que apresentaram uma correlação positiva significativa foram: (A) Fe vs. Cu; (B) Cu vs Pb; (C) Au vs. Fe; (D) Au vs. Cu; e (E) Zn vs. Cu. (**Figura 20**).

No granodiorito sericítico, os elementos que apresentaram uma correlação positiva expressiva foram: (A) Au vs. Cu; (B) Cu vs. Pb; (C) Zn vs. Cu; e (D) Fe vs. Cu. (**Figura 21**).

Figura 19: Diagramas de correlação condicionados aos Veios de Quartzo: (A) Au vs. Pb; (B) Au vs. Fe; (C) Au vs. Zn; (D) Cu vs. Fe; (E) Au vs. Cu; (F) Zn vs. Cu; e (G) Zn vs. Fe.

Figura 19- continuação: Diagramas de correlação condicionados aos Veios de Quartzo: (Ai) Au vs. Pb; (B) Au vs. Fe; (C) Au vs. Zn; (D) Cu vs. Fe; (E) Au vs. Cu; (F) Zn vs. Cu; e (G) Zn vs. Fe.

Nos litotipos, observa-se correlação positiva entre Au vs. Fe; Au vs. Cu; e Fe vs. Cu. Essas correlações são explicadas pela ocorrência de ouro em inclusões de pirita (FeS_2) e calcopirita (CuFeS_2) ou preenchendo fraturas na pirita associada a calcopirita. No granodiorito sericitico, a correlação entre Au vs. Fe é quase nula, isso se deve ao ferro, além de estar presente no halo sericítico correlacionado com os veios mineralizados, estar também presente em diversos outros minerais do granodiorito que não possuem correlação apenas com a mineralização de Au.

No veio de quartzo é observado também um enriquecimento de Au com o incremento de Pb e Zn, sugerindo presença dos sulfetos galena (PbS) e esfarelita ((Zn,Fe)S) nos veios de quartzo e a associação da mineralização a esses sulfetos.

O zinco apresenta uma correlação positiva com o cobre nos três litopitos e no veio de quartzo o zinco apresenta correlação com o ferro. Essas correlações sugerem a presença de esfarelita ((Zn,Fe)S) e a relação entre ela e calcopirita (CuFeS_2), o que aponta para a ocorrência da “doença da calcopirita”, onde a esfarelita contém inclusões de pirita e calcopirita.

Figura 20: Diagramas de correlação condicional às Zonas Silicificadas: (A) Fe vs. Cu; (B) Cu vs. Pb; (C) Au vs. Fe; (D) Au vs. Cu; e (E) Zn vs. Cu.

Figura 20-Continuação: Diagramas de correlação condicional às Zonas Silicificadas: (A) Fe vs. Cu; (B) Cu vs Pb; (C) Au vs. Fe; (D) Au vs. Cu; e (E) Zn vs. Cu.

Na zona silicificada e no graodiorito sericítico, o Cu e Pb também apresentam uma mútua relação positiva, explicada pela associação galena e calcopirita encontrada disseminada na matriz de quartzo nas regiões mineralizadas (Trevisan, 2015).

Nos diagramas apresentados, para os três litotipos, apesar das correlações se mostrarem mais refinadas e evidentes do que nos diagramas globais, ainda é possível observar valores dispersos e isolados. Esse comportamento levanta algumas hipóteses quanto aos dados analisados. Primeiramente, essas dispersões podem ser explicadas pela natureza estocástica das variáveis geológicas, considerando as interpolações por probabilidade. Adicionalmente, segundo Trevisan (2015) e Matos & Xavier (2016), existem duas famílias de veios de quartzo, uma maciça e mineralizada, e outra com texturas em pente entre outras, não mineralizada. No banco de dados original, essa diferença entre os tipos de veios de quartzo não foi descrita, o que resultou nas duas famílias categorizadas e modeladas sem distinção, o que também explica o aparecimento das dispersões.

Além disso, essas dispersões poderiam refletir um erro na elaboração e interpretação do banco de dados original disponibilizado, uma vez que ele foi gerado a partir de descrições macroscópicas.

Figura 21: Diagramas de correlação condicionada ao Granodiorito Sericítico: (A) Au vs. Cu; (B) Cu vs. Pb; (C) Cu vs. Zn; e (D) Fe vs. Cu.

5.6 Variogramas

Os variogramas experimentais foram calculados tentativamente conforme a direção principal das litologias leste-oeste com mergulho 85° para o sul. Entretanto, devido à disposição das sondagens em “X”, não foi possível calcular o semi-variograma em todas as direções de continuidade. O semi-variograma na direção de maior continuidade ($az=90$; $dip=0$) resultou em um efeito pepita puro e o semi-variograma na direção ortogonal ($az=180$; $dip=85$) resultou em uma leve estrutura (**Figura 22**). Apesar do semi-variograma em uma das direções

ortogonais apresentar uma estrutura, é necessário seja encontrada estrutura nas 03 direções ortogonais para a realização da krigagem.

Apenas a título de ilustração, apresenta-se o semi-variograma calculado ao longo das sondagens, que mostrara estrutura, mas sem significado geológico, pois não são ortogonais ao plano de maior continuidade (**Figura 23**). Em vista do exposto, não foi possível fazer a krigagem ordinária dos teores de Au.

Figura 22: Semi-variogramas experimentais nas direções de maior continuidade.

Figura 23: Semi-variograma experimental calculado ao longo das sondagens em X.

5.7 Modelo de teores e modelos de fusão

Devido à impossibilidade de se obter variogramas experimentais, os modelos de teores foram calculados a partir das equações multiquádricas. Os modelos de teores de Au, Zn, Pb e Cu gerados em escala Gaussiana são apresentados a seguir. Modelos de variância para esses mesmos elementos também foram gerados a fim de ilustrar a incerteza do modelo. Valores altos de variância demonstram uma alta dispersão em torno da média.

A grande dispersão dos valores baixos (< 2ppm) de Au, Zn, Pb e Cu na região pode gerar uma falsa impressão de uma mineralização disseminada e pode tornar a visualização e a caracterização das regiões com maiores teores difícil. Nos depósitos em questão, tidos como estruturalmente controlados e com a mineralização relacionada aos veios de quartzo, zonas silicificadas e ao granodiorito sericítico, o modelo de teor condicionado a essas litologias (modelo de fusão) se faz interessante para a melhor visualização e representação da mineralização. Os modelos de fusão gerados para os litotipos Veios de Quartzo, Zona Silicificada e Granodiorito Sericítico são apresentados a seguir.

5.8 Ouro

As **Figuras 24A - C** apresentam o modelo de teor gerado para a variável Au, onde podemos observar que a região apresenta anomalia de Au em toda a sua extensão, porém na sua maioria com teores não lavráveis e que não representam a principal mineralização. Valores maiores, representados pelas cores de tonalidade azul, são observados em concentrados em algumas regiões com orientação vertical, sugerindo uma estrutura confinada da mineralização.

Nas **Figuras 24B e C** pode-se observar a estrutura vertical a sub-vertical dos teores.

Modelo de Teor de Ouro

Legenda- Teor de Ouro

	0.010 - 0.010
	0.010 - 0.010
	0.010 - 0.010
	0.010 - 0.010
	0.010 - 0.010

	0.010 - 0.010
	0.010 - 0.010
	0.010 - 0.019
	0.019 - 0.030

	0.030 - 0.060
	0.060 - 0.136
	0.136 - 0.305
	0.305 - 0.671
	0.671 - 1.401

	1.401 - 3.744
	3.744 - 8.887
	8.887 - 23.527
	23.527 - 41.235
	41.235 - 50.918
	50.918 - 81.067

Figura 24: Modelo de teor de Au: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; e (C) visão da região leste.

A **Figura 25** mostra o modelo da variância para o Au, nele fica evidente que a incerteza, dispersão em torno da média, é maior nas regiões de maior teor, o que confirma o efeito proporcional, propriedade das distribuições lognormais e típico de depósitos filonares.

Figura 25: Modelo de variância para Au- visão geral.

As **Figuras 26A - E** mostram o modelo de fusão de Au condicionado aos Veios de Quartzo, Zonas Silicificadas e o Granodiorito Sericítico.

Modelo de Fusão de Ouro

Veios de Quartzo + Zonas Silicificadas + Granodiorito Sericítico

Figura 26: Modelo de fusão de Au: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; (C) visão da região leste; (D) visão central à leste; (E) visão central à oeste.

Legenda- Teor de Ouro (ppm)

■	0.010 - 0.010	■	0.010 - 0.010	■	0.030 - 0.060	■	1.401 - 3.744
■	0.010 - 0.010	■	0.010 - 0.010	■	0.060 - 0.136	■	3.744 - 8.887
■	0.010 - 0.010	■	0.010 - 0.010	■	0.136 - 0.305	■	8.887 - 23.527
■	0.010 - 0.010	■	0.010 - 0.019	■	0.305 - 0.671	■	23.527 - 41.235
■	0.010 - 0.010	■	0.019 - 0.030	■	0.671 - 1.401	■	41.235 - 50.918
						■	50.918 - 81.067

Figura 26- continuação: Modelo de fusão de Au: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; (C) visão da região leste; (D) visão central à leste; (E) visão central à oeste.

A partir do modelo de fusão, comparado com o modelo de teores, é possível afirmar que os maiores teores se destacaram quando condicionados aos litopitos de interesse, o que confirma a associação e confinamento entre eles.

Mesmo no modelo de fusão ainda é possível observar que existem algumas regiões onde o teor de ouro é baixo, o que sugere que existem veios de quartzo/zonas silicificadas mais tardios e não mineralizadas. Possivelmente essas regiões estejam refletindo os veios de quartzo não maciços e não mineralizados descritos na literatura, e ilustrando os valores dispersos observados nos diagramas de dispersão gerados no **item.5.4**. Como citado também no **item.5.4**, nos dados originais disponibilizado dos depósitos, não houve o detalhamento dos veios de quartzo e das zonas silicificadas com, por exemplo, a descrição de texturas, o que impossibilita a separação entre os veios maciços mineralizados e os demais veios descritos na região.

5.9 Chumbo

As **Figuras 27A - C** apresentam o modelo de teor gerado para o Pb, em que pode-se observar uma anomalia para esse elemento em toda a extensão do depósito, com os teores maiores concentrados principalmente na região leste da área estudada, região onde se encontra o depósito Morro do Carrapato, sugerindo a maior ocorrência de Pb (galena) nesse depósito. Ocorrências menos expressivas ocorrem na região oeste.

Figura 27: Modelo de teor de Pb: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; e (C) visão da região leste.

Legenda – Teor de Chumbo (ppm)

	1.000 - 1.000
	1.000 - 1.000
	1.000 - 1.018
	1.018 - 2.265
	2.265 - 3.503

	3.503 - 4.000
	4.000 - 5.000
	5.000 - 6.762
	6.762 - 9.936
	9.936 - 18.974

	18.974 - 43.763
	43.763 - 138.260
	138.260 - 477.913
	477.913 - 1550.540
	1550.540 - 3314.290

	3314.290 - 6416.930
	6416.930 - 8563.134
	8563.134 - 10000.000
	10000.000 - 10000.000
	10000.000 - 10000.000
	10000.000 - 10000.000

Figura 27- continuação: Modelo de teor de Pb: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; e (C) visão da região leste.

As **Figuras 27B e C**, assim como o observado no modelo de teor de Au, ilustram o condicionamento estrutural dos teores.

A **Figura 28** representa o modelo da variância para o Pb. Nele o efeito proporcional entre a incerteza e o teor se mostra mais uma vez evidente, consequência da distribuição lognormal do elemento decorrente do estilo confinado.

Figura 28: Modelo de variância para Pb- visão geral.

As **Figuras 29A - E** mostram o modelo de fusão de Pb condicionada aos litotipos mineralizados.

O modelo de fusão, uma vez que destacou os teores mais elevados de Pb, evidencia a presença desse elemento nos veios de quartzo e nas zonas de alteração sericítica e silicificação. Além disso, ao se comparar com modelo de fusão de Au, é possível observar que os maiores teores dos dois elementos se encontram nas mesmas regiões, reforçando a associação do Au com esse elemento, como também observado nos gráficos de correlação (**item 5.5**) e descrito na literatura. Essa correlação está relacionada com a ocorrência de Au exsolvido e/ou incluso na galena.

Modelo de Fusão de Chumbo

Veios de Quartzo + Zonas Silicificadas + Granodiorito Sericítico

Figura 29: Modelo de fusão de Pb: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; (C) visão da região leste; (D) visão central à leste; (E) visão central à oeste.

Figura 29- continuação: Modelo de fusão de Pb: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; (C) visão da região leste; (D) visão central à leste; (E) visão central à oeste.

5.10 Zinco

As **Figuras 30A - C** apresentam o modelo de teor gerado para a o Zn, onde podemos observar uma distribuição espacialmente semelhante ao Pb, com os maiores teores concentrados na região leste da área estudada, reforçando a maior ocorrência de sulfetos nessa área.

Nas **Figuras 30B e C**, a exemplo dos modelos de teores de Au e Pb, se observa o condicionamento estrutural vertical a sub-vertical dos teores, propriedade conhecida dos depósitos.

Modelo de teor de Zinco

Legenda- Teor de Zinco (ppm)

	1.000 - 1.000		5.188 - 14.164		91.363 - 168.967
	1.000 - 1.000		14.164 - 23.229		168.967 - 438.473
	1.000 - 1.000		23.229 - 38.356		438.473 - 1202.000
	1.000 - 3.000		38.356 - 61.624		1202.000 - 3214.789
	3.000 - 5.188		61.624 - 91.363		3214.789 - 6939.961

Figura 30: Modelo de teor de Zn: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; e (C) visão da região leste.

A **Figura 31** mostra o modelo da variância para o Zn, que assim como para Au e Pb, a incerteza aparece maior nas regiões de maior teor concentradas na região leste da área, coerente com a distribuição lognormal desta variável relacionada com o estilo confinado deste elemento.

Figura 31: Modelo de variância para Zn- visão geral.

As **Figuras 32A - E** mostram o modelo de fusão de Zn condicionada aos litotipos de interesse.

Modelo de Fusão de Zinco

Veios de Quartzo + Zonas Silicificadas + Granodiorito Sericítico

Figura 32: Modelo de fusão de Zn: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; (C) visão da região leste; (D) visão central à leste; (E) visão central à oeste.

Legenda- Teor de Zinco (ppm)

Figura 32-continuação: Modelo de fusão de Zn: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; (C) visão da região leste; (D) visão central à leste; (E) visão central à oeste.

No modelo de fusão, os maiores teores de Zn estão destacados, corroborando para a afirmação da associação esse elemento com os litotipos em questão. Ao se comparar os modelos de fusão de Zn, com os de Au e Pb, é possível observar que os maiores teores desses elementos se encontram nas mesmas regiões, mais uma vez reforçando a associação entre a mineralização de ouro e os metais de base em estudo.

5.11 Cobre

As **Figuras 33A - C** apresentam o modelo de teor gerado para o Cu, onde é possível observar uma distribuição semelhante à distribuição do Zn e Pb, descritos anteriormente, como ocorre em sistemas epitermais.

Modelo de teor de Cobre

Figura 33: Modelo de teor de Cu: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; e (C) visão da região leste.

Figura 33- continuação: Modelo de teor de Cu: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; e (C) visão da região leste.

No geral, o modelo de Cu apresenta teores visualmente menores (tonalidades mais claras de azul) e mais restritos quando comparados com os modelos de teor de Pb e Zn, podendo ou não ocorrer associado às zonas mineralizadas. O mineral corresponde ao Cu para a área é a calcopirita, comum nos depósitos de União do Norte.

A **Figura 34** mostra o modelo da variância para o Cu, ressaltando a maior incerteza nas regiões de maior teor, mais uma vez devido ao efeito proporcional.

Figura 34: Modelo de variância para Cu- visão geral.

As **Figuras 35A - E** mostram o modelo de fusão de Cu com os veios de quartzo, zonas silicificadas e o granodiorito sericítico.

Figura 35: Modelo de fusão de Cu: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; (C) visão da região leste; (D) visão central à leste; (E) visão central à oeste.

Figura 35-continuação: Modelo de fusão de Cu: (A) visão geral; (B) visão da região oeste; (C) visão da região leste; (D) visão central à leste; (E) visão central à oeste.

Os teores maiores de Cu, mesmo menos frequentes, ficam também mais evidentes no modelo de fusão gerado, e estão localizados nas mesmas regiões onde foram observados os maiores teores de Au, Zn e Pb. A correlação, porém é mais fraca do que a observada entre esses elementos.

A concentração dos maiores teores de Au e metais de base (Zn, Pb e Cu) nas mesmas regiões dos modelos gerados, refletem o tipo de mineralização epitermal descrita na literatura para esses dois depósitos estudados (Trevisan, 2015; e Matos & Xavier, 2016). Porém, as ocorrências de teores ainda muito baixos de Au e dos metais de base nos modelos de fusão evidenciam a existência de veios de quartzo/zonas silicificadas tardios não mineralizados no sistema.

5.12 Curva teor tonelagem

Apenas para a variável ouro foi feita a curva teor-tonelagem, com o objetivo de caracterizar os recursos minerais de ouro na região de estudo. Os recursos geológicos de ouro totalizam 6,4 t, coerente, portanto, com a tonelagem dos depósitos descritos na PAAF. Entretanto, esse valor é o recurso geológico in situ, que não é totalmente lavrável. Assim, a título de exercício, considerou-se um teor de corte simulado de 5 g/t, que resultou em um recurso mineral de ouro de 2,122 t (Figura 36).

Figura 36: Curva teor-tonelagem para ouro (Au).

6 Conclusões

Por vezes, análises estatísticas e geoestatísticas podem ser deixadas em segundo plano em detrimento da busca imediata pelos valores dos recursos disponíveis no depósito. Porém, sugere-se que essas análises sejam realizadas na fase que precede o cálculo de recursos minerais, uma vez que é através delas que se tem um melhor entendimento do comportamento das variáveis de interesse e que se analisa a qualidade da base de dados a ser utilizada para o estudo do depósito. Desta forma, a estatística e a geoestatística têm por objetivo extrair o máximo de informação e de forma a fazer o melhor uso dos dados disponíveis.

Nesse sentido, este trabalho procurou obter resultados descritivos e quantitativos da distribuição do minério a partir dos dados de sondagem disponibilizados dos depósitos Luiz e Morro do Carrapato, localizados no extremo leste da PAAF, na região União do Norte, conforme foram apresentados nesta dissertação.

A modelagem geológica, a partir da metodologia probabilística (codificação indicadora de variáveis categóricas), reconstruiu a geologia baseada nas informações litológicas locais e estrutural de anisotropia global 180/85°. O modelo geológico refletiu a propriedade encaixante do granodiorito, mostrou contatos intrusivos entre o granodiorito e o pórfiro e os diques máficos, demonstrou a relação de núcleo e halo de alteração entre as alterações potássica e sericítica, além de evidenciar a correlação espacial entre os veios de quartzo e o granodiorito (sericítico) e as zonas silicificadas.

A análise estatística univariada das variáveis de interesse, ouro, zinco, chumbo e cobre, mostrou que elas apresentam distribuições lognormais, caracterizada por dispersões assimétricas positivas.

A estatística bivariada com o condicionamento aos litotipos, demonstrou fortes correlações positivas entre a mineralização de ouro e os metais de base (Zn, Pb e Cu). As correlações sugerem que paragénese dos sulfetos pirita+ esfarelita+ galena+ calcopirita e a sua relação com o minério de ouro.

A estruturação praticamente vertical das camadas, associada à amostragem das sondagens dispostas em X, não permitiu o cálculo de variogramas experimentais nas principais direções de continuidade. Desta forma, os teores de

minério foram avaliados e os modelos foram gerados com base nas equações multiquádricas.

Por fim, a partir do modelo geológico combinado com o modelo de teores, foi possível fazer a fusão de um ou mais litotipos com a propriedade extraída do modelo de teores, gerando os modelos de fusão.

A partir dos modelos de fusão foi possível afirmar que os maiores teores (> 2ppm) de Au, referentes à principal mineralização, estão localizados onde se observa as maiores anomalias de Zn, Pb e Cu, além de estarem espacialmente associados aos veios de quartzo, às zonas e silicificação e ao granodiorito sericítico.

A concentração dos maiores teores de Au e metais de base (Zn, Pb e Cu) nas mesmas regiões dos modelos refletem o tipo de mineralização destes dois depósitos, onde o Au é encontrado em veios de quartzo associado a pirita, galena, esfarelita e calcopirita e relacionado espacialmente as zonas silicificadas e a alteração sericítica.

Com a visão geral dos modelos, sugere-se que os maiores teores estão localizados no depósito Morro do Carrapato. Com a visão lateral dos modelos, foi ainda constatado o condicionamento estrutural imposto a mineralização.

Por fim, a partir da cura teor-tonelagem, com um teor de corte simulado de 5,0 g/t, o recurso mineral de ouro obtido para os depósitos foi de 2,122 t.

Desta forma, mediante o exposto, mesmo com as limitações de informação (sondagens espaçadas e em “X”), o forte condicionamento estrutural, e a interpolação de 5,0 metros, os modelos de fusão gerados para a área de estudos podem ser considerados eficazes no seu objetivo em representar a realidade do depósito a partir dos dados disponibilizados.

Referências

Assis R.R. Contexto geológico e associação paragenética das mineralizações auríferas de União do Norte, região de Peixoto de Azevedo, Província de Alta Floresta (MT). Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas; Trabalho de Conclusão de Curso, 81p, 2008.

Assis, R. R. Depósitos auríferos associados ao magmatismo granítico do setor leste da Província de Alta Floresta (MT), Craton Amazônico: tipologia das mineralizações, modelos genéticos e implicações prospectivas. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas; Dissertação de Mestrado, 456p, 2011.

Assis R.R., Xavier R.P., Paes de Barros A.J., Barbuena D., Miguel Jr. E. Contexto geológico e litogeoquímica das unidades plutônicas-vulcânicas da região de União do Norte, setor leste da Província Aurífera de Alta Floresta (MT). Revista Brasileira de Geociências, vol. 42, p.130-161, 2012.

Assis R.R., Xavier R.P., Paes de Barros A. J., Barbuena D., Trevisan V.G., Ramos G. S., Teixeira R.V., Miguel-Jr E., Rodrigues R. M., Stabile-Jr A., dos Santos T. J. S., Miranda G. M. T., Barros M. A., Pinho F. E. C. Depósitos de Au e Au+metais base associados a sistemas graníticos Paleoproterozoicos do setor leste da Província Aurífera de Alta Floresta (MT), Cráton Amazônico, 2014.

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

Câmara, G., Monteiro, A M.V., Carvalho, M. S., Druck, S. Análise Espacial de dados Geográficos, 2^a Ed., 2002.

Camargo, E. Camargo, C. G. Druck, S. Câmara, G. Análise Espacial de Superfícies. Análise Espacial de Dados Geográficos, 2015, in. Druck, S. Carvalho, M.S. Câmara, G. Monteiro, A.M.V. (eds.).Brasília, EMBRAPA, p.46-82, 2004.

Chilès J-P. & Delfiner P. Geoestatistics: Modeling Spatial Uncertainty: Jhon Wiley & Sons, Inc. New York, 1st. Ed., 695p, 1999.

Dardenne M.A., Schobbenhaus C. O escudo do Brasil Central. In: Metalogênese do Brasil. Ed.Univ. Brasília/CPRM, Brasília, p.46-105, 2001.

Dardenne M.A., Schobbenhaus C. Depósitos minerais no tempo geológico e épocas metalogenéticas. In: L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.). Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil (textos, mapas & SIG). CPRM, Brasília, p.365-449, 2003.

Duke, J.H., Hanna, P.J. Geological Interpretation for Resource Modelling and Estimation, in Edwards, A. C. ed., Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AusIMM Guide to Good Practice: Melbourne, Australia, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, p.147-156, 2001.

Erickson Jr., A.J. Geologic Intrpretation, Modeling and Representation. SME Mining Engeneering Handbook, S. 5, H. Hartman and D.E. Ranta, Ed. AIME, New York, 2^a Ed., 333p, 1992.

Goovaerts, P. Geoestatistics for natural resources evaluation. New York: Oxford University Press, 483p, 1997.

- Gringarten, E. Deutsch, C.V. Variogram interpretation and modeling – Teacher's Aide Mathematical Geol., v.33(4), p.507–534, 2001.
- Hardy, R.L. Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. J.Geophys. Res., v.76(8), p.1905–1915, 1971.
- Journel, A.G. Huijbregts, J.C.H. Mining geostatistics. London: Academic Press, 1978.
- Hair, J.F. A. *et al.* Análise multivariada de dados. 5^a. Ed. Porto Alegre, 2005.
- Landim, P.M.B. Análise estatística de dados geológicos. 2^a Ed. revista ampliada, São Paulo: Editora Unesp, 253p, 2003.
- Landim, P.M.B. Introdução à análise estatística de dados geológicos multivariados. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Texto Didático 15, 2010.
- Leite, J.A.D., Saes, G.S. Geocronologia Pb/Pb de zircões detríticos e análise estratigráfica das coberturas sedimentares proterozóicas do Sudoeste do Cráton Amazônico. Geologia USP, Revista do Instituto de Geociências – USP, Série Científica. V.3, p.113-127, 2003.
- Machado, I. Recursos minerais-Política e sociedade. São Paulo, Edgard Blücher. 410p, 1989.
- Matos, J.H.S.N., Xavier, R.P. Controle e evolução estrutural de depósitos do tipo pórfiro-epitermal da Província Aurífera de Alta Floresta: Distrito de União do Norte - Mato Grosso. 48^o Congresso Nacional de Geologia- Porto Alegre, 2016.
- Miguel Jr, E. Controle Estrutural das mineralizações auríferas e idades U-Pb das rochas encaixantes ao longo do Lineamento Peru-Trairão: Província Aurífera de Alta Floresta, Mato Grosso. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- Moreton, L.C., Martins E.G. Geologia dos recursos minerais da Folha Vila Guarita, Folha SC. 21-Z-B. MT. Brasília: CPRM, 2005.
- Moura M.A. O Maciço Granítico Matupá e o Depósito de Ouro Serrinha (MT): Petrologia, Alteração Hidrotermal e Metalogenia. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 238p, 1998.
- Moura M.A., Botelho N.F., Olívio G.R., Kyser T.K. Granite-related Paleoproterozoic, Serrinha gold deposit, Southern Amazonia, Brazil: hydrothermal alteration, fluid inclusion and stable isotope constraints on genesis and evolution. Economic Geology, V.101, p.585-605, 2006.
- Noble, A.C. Geologic resources vs. ore reserves. Min. Eng., V.45(2), p.173-176, 1993.
- Otoya, C. P. Modelagem Geológica e Estrutural 3D e Análise de Estabilidade de Taludes 2D em Mina a Céu Aberto Pelo Mé todo SRM (Synthetic Rock Mass), PUC-Rio, 2011.
- Paes de Barros A.J. Granitos da região de Peixoto de Azevedo – Novo Mundo e mineralizações auríferas relacionadas – Província Aurífera Alta Floresta (MT). Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 154p, 2007.
- Ramos G.S. Características geoquímicas de plútons graníticos auríferos e estéreis da Província Aurífera de Alta Floresta (MT). Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 82p, 2011.

Reis, E. Estatística multivariada aplicada. Lisboa, 1997.

Santos, J.O.S., Groves, D.I., Hartmann, L.A., Moura, M.A., and Mc-Naughton, N.J. Gold deposits of the Tapajós and Alta Floresta domains, Tapajós-Parima orogenic belt, Amazon craton, Brazil: Mineralium Deposita, V. 36, p.278–299, 2001.

Santos J.O.S., Hartmann L.A., Faria M.S.G., Riker S.R., Souza M.M., Almeida M.E., McNaughton N.J. A compartimentação do Cráton Amazonas em províncias: avanços ocorridos no período 2000-2006. In: SBG-NO, Simp. Geol. Amaz., 9, Belém, CD-Rom, 2006.

Silva M.G. & Abram M.B. Projeto metalogenia da Província Aurífera Juruena-Teles Pires, Mato Grosso. Goiânia, Serviço Geológico Brasileiro, CPRM, 212p, 2008.

Soares, A. Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente. 2 ed. Lisboa: IST Press, p.214, 2006.

Souza, J.G.M. Potencial para utilização do resíduo de beneficiamento de minério de cobre sulfetado em pavimentação. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

Souza, J.P. Frasca A.A.S., Oliveira C.C. Geologia e Recursos Minerais da província Mineral de Alta Flores Brasília, CPRM, Relatório Integrado, 164 p, 2005.

Tassinari, C.C.G., Macambira, J.B.M. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. Episodes v.22, n.3, p.174–182, 1999.

Trevisan V.G. Metalogênese do ouro no Granito Novo Mundo, setor leste da Província Aurífera de Alta Floresta (MT), Cráton Amazônico: alteração hidrotermal e petrografia do minério. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 110p, 2012.

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

Triola, M. F. Introdução à Estatística. 7^a. Ed. Rio de Janeiro, LTC, 1999.

Vicente, J. Estudos comparativos de métodos geoestatísticos aplicados em agricultura de precisão. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cartográfica). Presidente Prudente: Universidade Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Unesp, 2004.

Vitório J.A. A suíte granítica Teles Pires da Província Aurífera de Alta Floresta: Características petrográficas, geoquímicas e implicações metalogenéticas. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Relatório PIBIC/ CNPq, 20p, 2010.

Yamamoto, J.K. Avaliação e classificação de reservas minerais São Paulo: Edusp, 2001.

Yamamoto *et al.* Computation of global estimation variance in mineral deposits. In: XIE, H.; Wang, Y., Jiang, Y. (Org). Computer applications in the mineral industries. A. A. Balkema Publishers, c.v.1, p.61-65, 2001.

Yamamoto, J.K. Ore reserve estimation using radial basis functions. Rev. do Instituto Geológico, V.23, n.1, p.25-38, 2002.

Yamamoto *et al.*, Mapping an uncertainty zone between interpolated types of a categorical variable. Computers and Geosciences, V.40, p. 146-152, 2012.

Yamamoto, J.K., Landim, Paulo M. B. Geoestatística – conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

Websites

Ramón, G.H., Curso de Geoestadística- Análisis Estructural. Universidad Nacional de Colombia, 2015. <https://slideplayer.es/slide/3890671/> (Acessado Junho, 2018)

Apêndice A

Amostras do banco de dados: Arquivos de entrada para modelagens.

Apêndice B

Seções geológicas