



Paulo Vinícius Tavares Pádua

**MODELAMENTO GEOLÓGICO E ESTIMATIVA DE RECURSO
MINERAL POR KRIGAGEM ORDINÁRIA NO BLOCO E DA MINA
MORRO AGUDO, FAIXA VAZANTE-PARACATU, MINAS GERAIS**

**Trabalho Final de Curso
(Geologia)**

UFRJ
Rio de Janeiro
2023



Paulo Vinícius Tavares Pádua

**MODELAMENTO GEOLÓGICO E ESTIMATIVA DE RECURSO MINERAL
POR KRIGAGEM ORDINÁRIA NO BLOCO E DA MINA MORRO AGUDO, FAIXA
VAZANTE-PARACATU, MINAS GERAIS**

Trabalho Final de Curso de Graduação em
Geologia do Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ,
apresentado como requisito necessário para
obtenção do grau de Geólogo.

Orientador(es):

Cláudio Gerheim Porto (UFRJ)

Daniel Marinzeck de Souza

Rio de Janeiro
Janeiro, 2023

Paulo Vinícius Tavares Pádua

Modelamento geológico e estimativa de recurso mineral por krigagem ordinária no Bloco E Mina Morro Agudo, Faixa Vazante-Paracatu, Minas Gerais / Paulo Vinícius Tavares Pádua - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2022.

52p., 69 f

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2021.

Orientador(es): Claudio Gerheim Porto, Daniel Marinzeck de Souza

1. Geologia. 2. Geoestatística – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Claudio Gerheim Porto. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Título.

Paulo Vinícius Tavares Pádua

**MODELAMENTO GEOLÓGICO E ESTIMATIVA DE RECURSO MINERAL POR
KRIGAGEM ORDINÁRIA NO BLOCO E DA MINA MORRO AGUDO, FAIXA
VAZANTE-PARACATU, MG**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador(es):

Claudio Gerheim Porto – UFRJ

Daniel Marinzeck de Souza

Aprovada em: 16/01/2023

Por:

Orientador: Dr. Claudio Gerheim Porto, UFRJ

Orientador: Daniel Marinzeck de Souza

Dr. José Carlos Sícoli Seoane, UFRJ

Dr., Francisco Jose da Silva UFRRJ

Dedicatória

À Paulo, Carina, Alexandre, Nayara, Betina e Helena.

AGRADECIMENTOS

Registro aqui os devidos agradecimentos a todos àqueles que tiveram uma parcela de participação no meu processo educacional e, ainda mais importante, àqueles que me proporcionaram acolhimento, instrução, companhia, incentivos, conselhos e colaboração através da jornada da graduação e na vida pessoal.

Primeiramente, agradeço ao geólogo, co-orientador e amigo Daniel Marinzeck, por tornar possível a realização deste trabalho, por todos os ensinamentos e experiências que compartilhou comigo no meu processo de profissionalização através do estágio na Nexa Resources S.A. Seus ensinamentos foram um marco para o início da minha carreira.

Agradeço à empresa Nexa Resources e ao José Antônio Lopes pela oportunidade de obter experiência na gerência de recursos minerais e aprender com Vivian Kayser, Leonardo Hiram e Carlos Fonseca, além de obter acesso à infraestrutura da Nexa, a softwares, cursos, viagens de campo e banco de dados para realização deste trabalho, além de todo suporte que me foi oferecido desde o primeiro dia, em prol de meu desenvolvimento. Foi um privilégio.

A todos os profissionais da Mina Morro Agudo que tive o prazer de conhecer e me apropriar de seus ensinamentos, especialmente ao Aender Oliveira, Mauro Muniz, Camilo Freitas, Gustavo Albergaria, Odair, Saul Lenhoso, Marco Aurélio, Diogo Borges e a todos os técnicos da geologia (Alex, Marquinhos, Charles, Cilimaro, entre outros) e demais profissionais dos serviços técnicos.

Aos geólogos da exploração mineral de Paracatu-MG, Anna Luíza, Renato Bezner, Jessica Arruda, Fernando Baia, Helber Thomazella e Iuri Valle. Agradeço pela salutar companhia ao longo dos meses que passei na cidade e por todos os ensinamentos relacionados à Faixa Vazante-Paracatu.

Agradeço à equipe da *Seequent* pela licença acadêmica da extensão *Edge* do *software LeapFrog Geo*. Especialmente ao suporte da Ingrid Araújo e Mayara Marinho, bem como o auxílio do Vinícius Duarte na aquisição de licença.

Serei eternamente grato à professora Kátia Leite Mansur, pela orientação acadêmica ao longo de toda à graduação, durante minha iniciação científica e pelos exemplares valores geóticos compartilhados, que guiarão meus dias como geólogo. Agradeço também ao professor Porto, por ter aceitado me orientar ao longo deste trabalho final de graduação e todo o suporte prestado para minha formação.

Sou profundamente grato pelo suporte mais fundamental e importante inerente à todas minhas realizações. O apoio de meus pais, Paulo e Carina, por terem me proporcionado a possibilidade de me dedicar e priorizar os estudos, junto aos meus irmãos, Nayara e Alexandre por todo apoio e carinho recebido, e por me presentear com a graça das minhas duas sobrinhas, Helena e Betina.

Um agradecimento especial à companhia e parceria de meus amigos, Rodrigo, Molico, Felipe, Ramon, Matheus, Stefano. E também aos tantos amigos da geologia que me acompanharam em inesquecíveis momentos de campo ao longo da graduação, Bernardo, Gil Pedro, Sartori, PV, Julinha, Luan, Mogli, Locatelli, Bianca, Rapha, Thauan, entre tantos outros. Sou grato pelos momentos colecionados desde o BCMT e todos os aprendizados nas tardes no D.A. Joel Valença.

À Anna Luíza, pela companhia e todo apoio ao longo dos últimos meses. Sou feliz em poder caminhar ao seu lado e podermos contar um com outro mesmo com a distância.

Por fim, e não menos importante, agradeço a Universidade Federal do Rio de Janeiro e todo o departamento de geologia pelo privilégio que foi estudar em uma das universidades mais tradicionais e diversa de todo o país, onde ainda se produz ciência através de pessoas comprometidas na construção de futuro melhor e mais justo, apesar de adversidades impostas por negacionistas.

Estes são meus agradecimentos sinceros

“[...] O caminho é o fim mais que chegar.”

Rodrigo Amarante – Little Joy

RESUMO

Pádua, Paulo Vinícius Tavares. **Modelamento geológico e estimativa de recurso mineral por krigagem ordinária no Bloco E da Mina Morro Agudo, Faixa Vazante-Paracatu, Minas Gerais**. Rio de Janeiro, Ano. 2023, 069 f. Trabalho Final de Curso – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Localizada na Faixa Brasília Meridional e inserida na província mineral Vazante-Paracatu, a Mina subterrânea de Morro Agudo (MMA) é um depósito de zinco e chumbo sulfetados do tipo MVT (*mississippi valley type*), hospedados por rochas carbonáticas metamorfizadas em baixo grau, pertencentes à Formação Morro do Calcário. A evolução tectônica regional associada à Orogênese Brasileira é registrada no depósito na forma de falhas normais de direção predominante N-NW que abatem o principal litotipo prospectivo da MMA, o dolarenito. Esta rocha hospedeira de mineralizações *stratabound* tem atitude aproximada de $290-315^{\circ}/25^{\circ}$, guiando o desenvolvimento de galerias de lavra subterrânea para níveis de maior profundidade à oeste das falhas. Três níveis com lentes mineralizadas, nomeados da base para o topo como “J”, “K” e “L”, concentram teores econômicos no dolarenito da MMA e são identificados na escala do depósito, frequentemente abatidos por falhas normais. Neste contexto, um dos principais desafios em regiões onde sondagens subterrâneas são a única fonte de informação para sequenciamento de lavra está no posicionamento adequado de galerias e um design de lavra assertivo, que considere informações de sondagens subterrâneas e reproduza a complexidade geométrica e estrutural na escala do depósito mineral. A metodologia aplicada no presente trabalho passa pela geração de um modelo geológico e de minério que reproduzam a geometria das mineralizações lenticulares na MMA e possíveis estruturas de falha, através de técnicas de modelamento determinístico orientada pela interpretação de furos de sondagem, em software de modelamento 3D. Os modelos gerados são associados à estudos de geoestatística e, por fim, são usados para estimativa e geração de um modelo de blocos estimado com teores da variável zinco por krigagem ordinária, estabelecendo uma estimativa de recursos validada por métodos empregados na indústria mineral, em aproximadamente 43 mil toneladas de zinco contido. O resultado deste trabalho possibilitou o entendimento da distribuição dos teores da variável zinco, assim como a identificação de zonas de alto teor e zonas de falha para a região do Bloco E da MMA, área onde localiza-se um novo expoente prospectivo testado por sondagens de pesquisa subterrânea recentes e onde foi conduzido o estudo. Os modelos gerados reproduzem a informação da malha de sondagem disponível (~20x20m) e, apesar de incertezas inerentes à escala da informação, são adequados para o sequenciamento de lavra através do método *sub-level stope* empregado na MMA pela equipe de planejamento de lavra, auxiliando no desenvolvimento de galerias subterrâneas para a região.

Palavras-chave: Modelamento Geológico, Geoestatística, Krigagem Ordinária, Estimativa de Recursos, Recursos e Reserva Mineral, Faixa Vazante-Paracatu, Morro Agudo, Geologia Econômica.

Abstract

Pádua, Paulo Vinícius Tavares. **Modelamento geológico e estimativa de recurso mineral por krigagem ordinária no Bloco E da Mina Morro Agudo, Faixa Vazante-Paracatu, Minas Gerais.** [*Geological Modelling and mineral resource estimate by ordinary kriging in Bloco E from Morro Agudo Mine, Vazante-Paracatu Belt, Minas Gerais*]. Rio de Janeiro, Ano. 2023, 069 f. Trabalho Final de Curso – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Located in the Brasilia Meridional Belt and inserted in the Vazante-Paracatu mineral province, the Morro Agudo underground mine (MAM) is a Mississippi Valley Type (MVT) deposit of zinc and lead sulfides, hosted by low grade metamorphosed carbonate rocks, from the Morro do Calcario Formation. The regional tectonic evolution associated with the Brasiliano Orogeny is represented in the deposit in the form of normal faults of predominantly N-NW direction that slide down the MAM main prospective lithology, the dolarenite. This rock hosts stratabound mineralizations with an approximate $290\text{-}315^\circ/25^\circ$ dip, guiding the development of underground mine galleries to deeper levels to west direction of the normal fault planes. Three distinct levels of mineralized lenses, named from bottom to top as “J”, “K” and “L” concentrate economic grades (above *cut-off*) inside the dolarenite unit of MAM and are recognized on the deposit scale, often downcut by normal faults. In this context, the main challenges for regions where drillholes are the only source of information are underground mine development, schedule, and assertive mine design, once there is uncertainty associate with geological structures and geometry of orebodies. Hence, any attempt of mine design should consider drillholes information and try to reproduce orebodies geometry and the structural complexity. The methodology applied in this work involves the generation of geological and grade models that reproduce the complex geometry from MAM lenticular orebodies, associated with interpreted normal faults from geological sections, by deterministic modelling techniques on a 3D geological modelling software. The generated models are then associated with geostatistical analysis and, finally, a mineral resource estimate by ordinary kriging of the zinc grades in a block model, validated by statistical methods applied in mineral resource industry. The result from this work enabled understandind of zinc grade distribution in space, as well as higher grade zones and fault zones in the Bloco E region from MAM, an area with prospective potential and recent near mine exploration drillholes, where the present word was conducted. The models reproduced successfully the available drillhole grid information and, although there are inherent uncertainties on deposit scale level, the method is in acceptance with the Morro Agudo *sub-level stope* mine method, engineers and geologist and is considered adequate for mine planning.

Key-words: Geological Modelling, Geostatistics, Ordinary Kriging, Resource estimate, Mineral resources and reserves, Vazante-Paracatu Belt, Morro Agudo, Economic Geology

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização e rota de acesso às instalações da Nexa Resources S.A., área das operações de lavra de mina subterrânea e beneficiamento do depósito mineral de Morro Agudo (Neves, 2011).....	17
Figura 2 - (A) Visada para norte do levantamento topográfico planialtimétrico por escaneamento de galerias subterrâneas em MMA (marrom), sondagens (em transparência) e área em azul (extensão volumétrica do Bloco E). (B) Visada em planta da topografia da mina, área em azul identifica o Bloco E.....	18
Figura 3 - Visada para NW do desenvolvimento de mina (marrom) e sondagens (azul e amarelo). Sondagens em azul (N430GPS) e amarelo (N350GPS) são os dados disponíveis para a região do bloco E.....	18
Figura 4 - Ilustração de classes de modelagem geológicas e técnicas empregadas. Extraído de Kikuda, 2022.	22
Figura 5 - Wireframes geradas com base em informações de sondagem. Exemplo do Bloco E da MMA. As triangulações de sólidos são limitadas até o plano de falha implementado por modelagem explícita. Ilustração realizada utilizando o software Leapfrog Geo.	23
Figura 6 - Superfícies trianguladas a partir de contatos (pontos em tons de verde) e classificações de furos de sondagem (vermelho e azul). Ilustração realizada no software Leapfrog Geo.....	23
Figura 7 - Distribuição de frequência analisada a partir do número de observações (n) para cada intervalo correspondente (x). Extraído de Borradaile (2003).....	24
Figura 8 - Função variograma. Extraída de Batista, 2015.	25
Figura 9 – Modelo de variograma. Extraído de Vilela (2004).	26
Figura 10 - Exemplo de Swath-Plot plotado no eixo X, comparando resultado de diferentes estimadores por krigagem (Kr) e radial basis function (RBF). O gráfico é plotado com a média de cada painel com tons cinzas no eixo X. Extraído da Seequent.....	27
Figura 11 - Mapa de províncias estruturais do Brasil definido por Almeida et al. (1981). Destaca-se a Província Tocantins, área de estudo ocorre à oeste da Província do São Francisco. Extraído de Hasui et al., 2012.....	28
Figura 12 - (A) Mapa de localização da Faixa Brasília e limite cratônico com o Cráton São Francisco (por Alkmim e Teixeira (2017)); (B) Arcabouço geotectônico da Faixa Brasília	

definido por Dardenne (2000), e compartimentação por Fuck et al. (2005). Área em vermelho destaca ocorrências minerais de zinco e chumbo sulfetados e depósitos da região de Paracatu, Município da área de estudo. Extraído de Sotero et al. (2019).	29
Figura 13 - (A) Mapa geológico simplificado do Brasil Central com a Faixa Brasília (FB) e Cratón São Francisco. (B) Mapa regional da FB e localização de depósitos no Grupo Vazante. (C) Geologia da Faixa Vazante-Paracatu com minas e ocorrências minerais (Extraído de Aldis et al., 2022).....	31
Figura 14 - Coluna estratigráfica do Grupo Vazante contemplando unidades do norte e sul da faixa (Morro do Calcário e Serra do Poço Verde, respectivamente). Extraída de Sotero et al., (2019) e modificada de Dardenne (2000).....	32
Figura 15 - Mapa geológico local, representando unidades aflorantes em superfície e disposição de falhas inferidas da mina de Morro Agudo, que subdivide o depósito em blocos A, B, C, D, E e F (ausente no mapa). Extraído de Neves, 2011.	35
Figura 16 - Bloco diagrama do depósito de Morro Agudo, apresentando litotipos, mineralizações e a subdivisão de blocos pelas estruturas de falha regionais. Extraído de Cordeiro et al., 2018, modificado de Neves, 2011.	36
Figura 17 - (A) Visada de NW para SE do modelo litológico gerado para o Bloco E da MMA com galerias subterrâneas em marrom (com transparência); (B) Visada em planta de sondagens e área modelada na mina.	39
Figura 18 - (A) Seção geológica SW-NE, com unidades modeladas, passando pelas classes do modelo com informações de furos de sondagem e falhas representadas; (B) Visada em planta de sondagens, com linha em vermelho identificando localização da seção geológica e contorno do Bloco E.	40
Figura 19 - (A) Visão em perspectiva de NW para SE dos volumes sólidos separados por falhas no Bloco E; (B) Vista em planta da região do Bloco E com os 7 planos de falha identificados.	40
Figura 20 - Ilustração da evolução das falhas dos modelos do Bloco E. Da esquerda para direita e do topo à base, são identificadas falhas em ordem cronológica. Por fim, a disposição final com identificação numérica de cada volume identificado de 1 à 11.	41
Figura 21 - Visada de NW para SE das unidades inferior e JKL. (A) Dolarenito (amarelo) sendo abatido para oeste do depósito; (B) planos de falha em transparência seccionando o modelo em blocos.....	41

Figura 22 - (A) Visada de NW para SE com sondagens e unidades inferior, JKL (em transparência) e lentes de minério sobrepostas em tons de vermelho abatidas junto à rocha hospedeira; (B) visada em planta.....	42
Figura 23 - Seção geológica orientada de SW para NE seccionando lentes de minério modeladas e com teores das amostras de zinco representados em cilindros com escala de cor à direita em percentagem. Localização identificada na Figura 18	42
Figura 24 - Q-Q plot com quartis dos teores de zinco percentual para lentes J e K.....	43
Figura 25 - Q-Q plot com quartis dos teores de zinco percentual das lentes L e K.	44
Figura 26 - Gráfico de probabilidade cumulativa logarítmica para variável zinco das lentes JKL. Com linha em vermelho representando teor de capping em 14.20%.	45
Figura 27 - Histograma para variável zinco das lentes JKL. Sombreamento engloba valores outliers.	46
Figura 28 - Histogramas de comparação entre amostras compostas e não compostas.....	46
Figura 29 - Plot radial do variograma para o eixo principal de maior continuidade (seta vermelha) e secundário (seta verde). Mapa de cores está relacionado a variância.	47
Figura 30 - Variograma modelado para a direção principal (maior continuidade) da variável zinco.	48
Figura 31 - Variograma para direção semi-principal (perpendicular ao pitch) da variável zinco.	48
Figura 32 - Variograma para direção menor continuidade (ortogonal ao pitch) da variável zinco.	48
Figura 33 - Variograma downhole para variável zinco.	49
Figura 34 - (A) Visada de oeste para leste do Modelo de blocos do Bloco E da MMA com mapa de cores discreto representando teores de zinco estimados por krigagem ordinária. (B) Visada em planta do modelo de blocos do Bloco E da MMA com teores de zinco.....	50
Figura 35 - Seção de validação com modelo de blocos estimado por krigagem ordinária, contorno de domínios de estimativa, e escala de cores com teores da variável zinco representados de acordo com a paleta à direita da imagem.....	50
Figura 36 - Seção de validação com modelo de blocos estimado por krigagem ordinária, contorno de domínios de estimativa, e escala de cores com teores da variável zinco representados de acordo com a paleta à direita da imagem. Ao fundo, modelo litológico em transp	51

Figura 37 - Histograma para variável zinco estimada no modelo de blocos por krigagem ordinária.....	52
Figura 38 - Gráfico swathplot no eixo X, com espaçamento de blocos de 12 metros. Linha em preto teores estimados pelo NN, em verde ID ² e em azul, OKr. Barras em azul representam o volume dos blocos agrupados.....	53
Figura 39 - Gráfico swathplot no eixo Y, com espaçamento de blocos de 12 metros. Linha em preto teores estimados pelo NN, em verde ID ² e em azul, OKr. Barras em azul representam o volume dos blocos agrupados.....	53
Figura 40 - Gráfico swathplot no eixo Z, com espaçamento de blocos de 12 metros. Linha em preto teores estimados pelo NN, em verde ID ² e em azul, OKr. Barras em azul representam o volume dos blocos agrupados.....	54
Figura 41 - (A) Seção geológica ilustrativa representando a escala real do depósito, na qual diferentes cores identificam as lentes J, K e L. (B) Sondagens de galerias subterrâneas em malha regular intersectam a mineralização na seção ilustrada (estrelas). Contornos pontilhados representam possível modelo implícito errático, sem adição de estruturas e edição por parte do geólogo.	56
Figura 42 - Ilustração do efeito da ausência de falhas no modelo de minério para o planejamento de lavra. Contorno rosa em transparência exemplifica um stope planejado no estéril devido à dobra hipotética representada no modelo.	57
Figura 43 - (A) Visada das unidades geológicas modeladas e blocos de alto teor de zinco estimados por krigagem ordinária (cores quentes). Altos teores na área do Bloco E concentram-se próximos das falhas interpretadas. (B) Visada em planta de planos de falha, volume do modelo de minério em transparência (cinza) e localização dos altos teores (amarelo, vermelho e roxo) no modelo de blocos estimado.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva das lentes J, K e L. Da esquerda para direita: número de amostras, comprimento total, média, desvio padrão, coeficiente de variação, variância, mínimo, quantil inferior, mediana, quartil superior e máximo.	43
Tabela 2 - Estatística descritiva da população amostral da variável zinco (%) para as lentes J, K e L.	45
Tabela 3 - Estatística descritiva das amostras compostas e não compostas.	47
Tabela 4 - Estruturas do variograma modelado. Alcances máximos sumarizados no campo major, semi-major e minor.	49
Tabela 5 - Configurações da estimativa por krigagem ordinária e parâmetros de busca.	50
Tabela 6 - Estatística descritiva da variável zinco para as amostras compostas usadas na estimativa.	51
Tabela 7 - estatística descritiva da variável zinco estimada em cada bloco.	51
Tabela 8 - Estatística descritiva dos estimadores Vizinho mais próximo (NN), Inverso da distância ao quadrado (ID ²) e Krigagem ordinária (OKr).	51
Tabela 9 - Teor médio e metal contido para os diferentes estimadores testados separados por domínio (lentes).	54
Tabela 10 – Estatística descritiva das amostras compostas de cada lente.	54
Tabela 11 - Estatística descritiva da população estimada por krigagem ordinária do modelo de blocos das lentes J, K e L na região do Bloco E da mina MMA.	54

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
EPÍGRAFE	VII
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIV
SUMÁRIO	XV
1. INTRODUÇÃO	17
1.1. ACESSO À MINA	17
1.2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	18
1.3. OBJETIVO	19
2. MATERIAIS E METODOLOGIA.....	20
2.1. MATERIAIS	20
2.2. METODOLOGIA	20
2.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.3.1. <i>Estimativa de Recurso Mineral e Estacionaridade</i>	21
2.3.2. <i>Modelamento</i>	22
2.3.3. <i>Análise Exploratória dos Dados (Exploration Data Analysis – EDA)</i>	24
2.3.4. <i>Variografia</i>	25
2.3.5. <i>Krigagem</i>	26
2.3.6. <i>Validações de Estimativa</i>	27
3. CONTEXTO GEOLÓGICO	28
3.1. GEOLOGIA REGIONAL	29
3.1.1. <i>Faixa Brasília</i>	29
3.1.2. <i>Grupo Vazante</i>	30
3.2. ESTRATIGRAFIA	31
3.3. CONTEXTO METALOGENÉTICO.....	33
3.4. GEOLOGIA DO DEPÓSITO.....	34
3.4.1. <i>Litotipos</i>	34
3.4.2. <i>Arcabouço Estrutural</i>	36

3.4.3.	<i>Mineralizações</i>	37
4.	RESULTADOS	39
4.1.	MODELAGEM	39
4.2.	EDA	42
4.3.	VARIOGRAMA	47
4.4.	KRIGAGEM E MODELO DE BLOCOS	49
4.5.	VALIDAÇÕES DA ESTIMATIVA E METAL CONTIDO	50
5.	DISCUSSÕES	55
5.1.	MODELAGEM	55
5.1.1.	<i>Modelos Geológico</i>	55
5.1.2.	<i>Falhas Modeladas</i>	56
5.1.3.	<i>Modelo de Minério</i>	57
5.2.	EDA	58
5.3.	ESTIMATIVA E VALIDAÇÕES	59
6.	CONCLUSÃO	61
7.	REFERÊNCIAS	62

1. Introdução

A Mina subterrânea de Morro Agudo (MMA), área do presente trabalho, encontra-se no Município de Paracatu, localizado no noroeste do estado de Minas Gerais. Trata-se de um depósito mineral de zinco e chumbo (Zn-Pb) sulfetados, associado ao contexto geológico e metalogenético da Faixa Vazante-Paracatu, inserida na Faixa Brasília Meridional, que registra uma evolução tectônica associada à Orogênese Brasileira. Nessa região, a sucessão de rochas carbonáticas da Formação Morro do Calcário encontra-se metamorfizada em baixo grau, e registra falhas normais de direção predominante N-NW que afetam todo depósito e abatem a mineralização *stratabound*. Neste contexto, técnicas de modelamento e estimativa de teores metálicos são essenciais para mapear a distribuição de altos teores e guiar o planejamento de lavra e sua operação.

1.1. Acesso à Mina

O acesso ao complexo Morro Agudo (mina subterrânea, planta de beneficiamento e áreas administrativas) é realizado através da rodovia BR-040 e MG-702, estrada de terra que leva às instalações da Nexa Resources S.A., conforme a Figura 1.

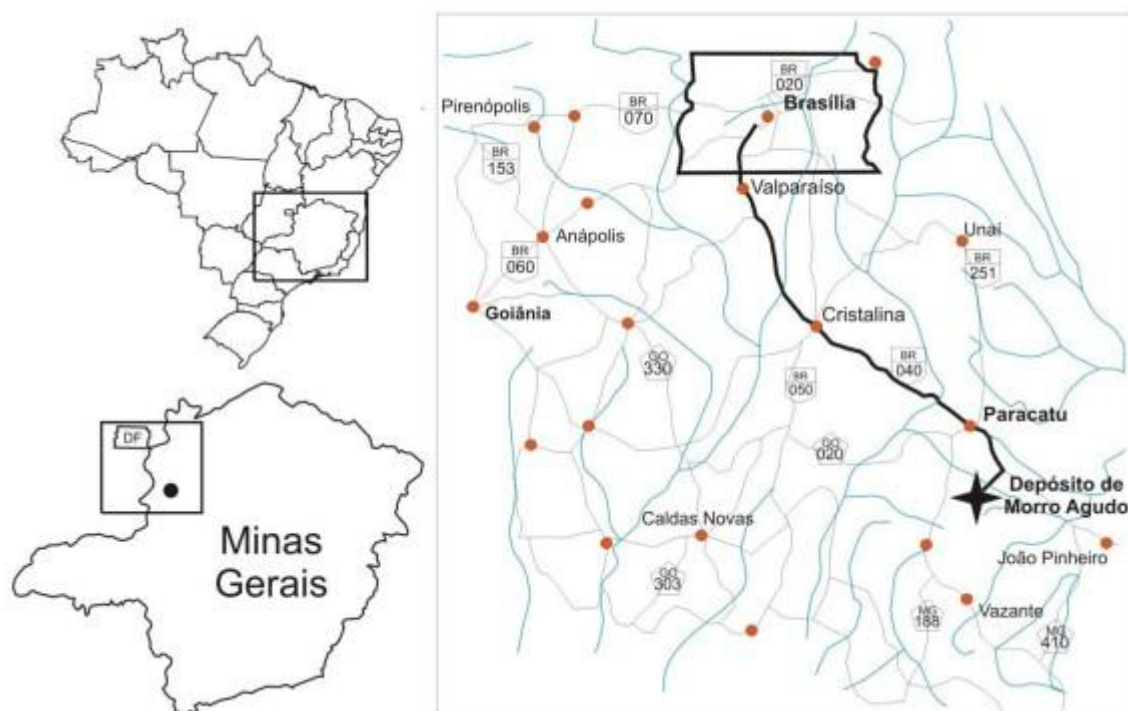


Figura 1 - Mapa de localização e rota de acesso às instalações da Nexa Resources S.A., área das operações de lavra de mina subterrânea e beneficiamento do depósito mineral de Morro Agudo (Neves, 2011).

1.2. Localização da Área de Estudo

A área da mina, no contexto subterrâneo onde foram conduzidos os estudos localiza-se em profundidade, na região denominada pela equipe de mina como “Bloco E”, local da mina definido por informações das Galerias Subterrâneas para Sondagem (GPS) oriundas dos níveis (N) N430GPS e N350GPS, ilustrados na Figura 2 e Figura 3. Em sua extensão, esta área é representada por 4,738,800.00 m² e 624,790,000.00 m³, em volume. A malha de sondagem aproximada para conversão de recurso é de, aproximadamente, 20 m x 20 m.

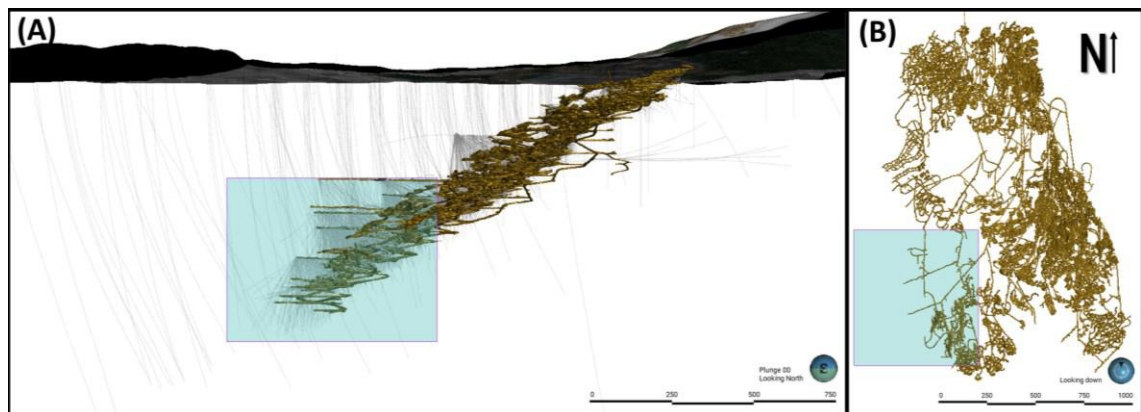


Figura 2 - (A) Visada para norte do levantamento topográfico planaltimétrico por escaneamento de galerias subterrâneas em MMA (marrom), sondagens (em transparência) e área em azul (extensão volumétrica do Bloco E). (B) Visada em planta da topografia da mina, área em azul identifica o Bloco E.

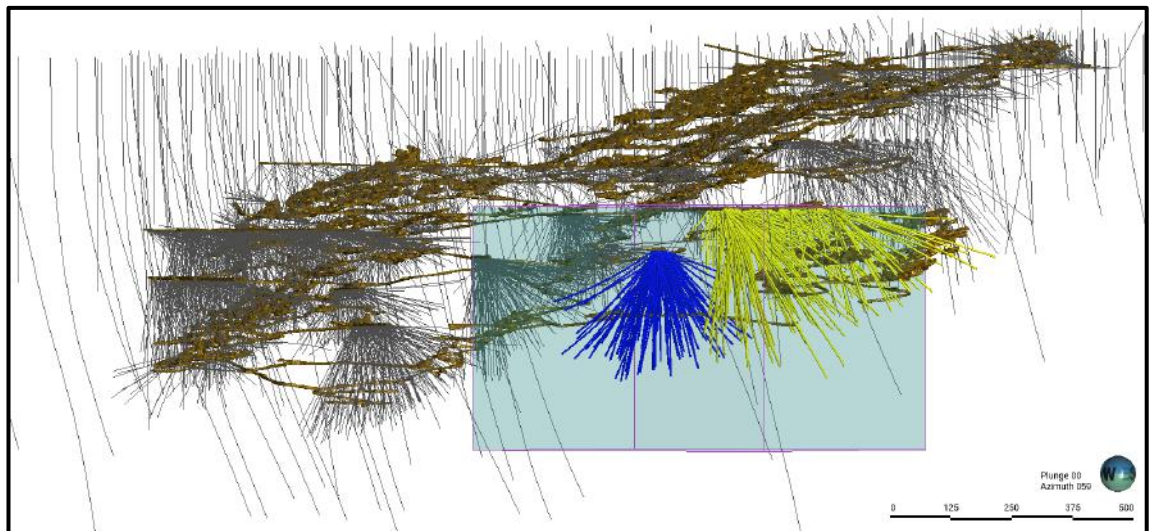


Figura 3 - Visada para NW do desenvolvimento de mina (marrom) e sondagens (azul e amarelo). Sondagens em azul (N430GPS) e amarelo (N350GPS) são os dados disponíveis para a região do bloco E.

Poucas galerias em desenvolvimento produtivo interceptam as áreas com informações destas sondagens exploratórias na região, principalmente a área das sondagens do N430GPS, principal alvo prospectivo para o Bloco E.

A ausência de galerias subterrâneas na região dificulta visualização da geologia em campo, mapeamentos geológicos de galerias e direcionamento de lavra. Fato que confere

relevância às informações de sondagem e modelos geológicos para posicionamento e desenvolvimento de galerias para o método de lavra local.

1.3. Objetivo

O presente trabalho tem como finalidade a produção de um modelo litológico, de minério e um modelo de blocos com estimativa de teores metálicos da variável zinco (Zn%) por krigagem ordinária para a área do Bloco E, na Mina de Morro Agudo (MMA).

A metodologia aplicada visa melhor aderência no posicionamento e desenvolvimento de galerias de lavra subterrânea, proporcionando maior assertividade, eficiência e produtividade ao sequenciamento de lavra através do método de *sublevel stoping*, praticado na MMA atualmente, além da identificação de novos alvos exploratórios em áreas proximais.

A partir destes resultados, objetiva-se uma melhor compreensão da geometria dos corpos de minério *stratabound*, a fim de produzir um modelo mais representativo e uma estimativa robusta, que caracteriza a distribuição dos teores metálicos espacialmente no Bloco E e identifica zonas de alto teor.

2. Materiais e Metodologia

Os dados presentes neste trabalho são de propriedade da mineradora Nexa Resources S.A., que concedeu acesso ao banco de dados histórico de sondagem e análises químicas da Mina de Morro Agudo.

O trabalho executado é cíclico no contexto de geologia de mina e resumido em duas etapas distintas, sendo **(i)** integração de dados em softwares de modelamento e **(ii)** estimativa de teores e avaliação de recursos minerais. Esta rotina é repetida conforme adição de novas sondagens e informações de galerias em desenvolvimento, que geram novas interpretações ao modelo conforme o adensamento da malha amostral.

2.1. Materiais

A base de dados inclui 4360 sondagens e 81633 intervalos de amostras com análise química multi-elementar, levantamentos topográficos planialtimétricos 3D de galerias subterrâneas por escaneamento à laser, descrições e fotos de testemunhos de sondagens.

A base de dados incluída no trabalho foi previamente testada por técnicas de controle e garantia de qualidade (QAQC) através de geólogos que cuidam do banco de dados da Nexa Resources S.A. Os dados aqui exibidos foram aprovados e encontram-se hospedados da base de dados geológica hospedada no software *Fusion* da *Datamine*.

Para este trabalho os dados de densidade originais da mina foram mantidos em sigilo para não divulgar os números exatos de recurso na área de estudo com direitos minerários pertencentes à Nexa Resources. Desta forma, foi adotado um valor constante de 2.9 g/cm^3 que correspondem a densidade média da rocha hospedeira.

2.2. Metodologia

Os métodos aplicados para o presente trabalho passam por integração de informações da base de dados da MMA em software de modelamento, análise de dados e estimativa.

As técnicas aplicadas geram, por etapas, um modelo litológico, um modelo de minério (domínio de estimativa) e, por fim, um modelo de blocos no qual é realizada a estimativa de metal contido através de krigagem ordinária, representando a distribuição espacial dos teores da variável zinco, em percentagem.

O próximo capítulo (2.3), abordará uma revisão bibliográfica acerca dos métodos aplicados, com descrição das técnicas executadas no presente trabalho em acordo com procedimentos utilizados na indústria mineral para estimativa de recursos e reservas minerais. Em ordem, os métodos descritos são (I) Modelamento (II) Análise exploratória de dados (III) Variografia (IV) Krigagem ordinária e (V) Validação de estimativa.

A licença acadêmica do software *LeapFrog Geo + Edge* foi concedida pela Seequent para realização do modelamento geológico e de recurso mineral, análise exploratória de dados, estudo de *capping*, modelamento de variograma experimental, geração da estimativa de teores metálicos de zinco através de krigagem ordinária e, por fim, um modelo de blocos estimado, totalizando todas as etapas.

2.3. Revisão Bibliográfica

2.3.1. Estimativa de Recurso Mineral e Estacionaridade

A estimativa de recurso mineral pode ser compreendida como definição de teor e tonelagem da mineralização em um depósito mineral, através da combinação de informação geológicas qualitativas (*e.g.*, descrições litológicas) com dados quantitativos espaçados (*e.g.*, análises químicas de sondagens) (Abzalov, 2016).

Prática comum da indústria mineral, o processo de estimativa de recursos é executado em duas etapas (i) a decisão de estacionaridade, que reflete na definição de domínios para estimativa que representam volumes de rocha com controle similar de mineralização e características estatísticas consistentes (Carvalho, 2018; Rossi & Deutsch, 2014; Isaaks & Srivastava, 1989); (ii) estimativa e/ou simulação de teores dentro do domínio estacionário interpretado (Caixeta, 2020).

Na geoestatística, a estacionaridade é um conceito fundamental para aplicação dos métodos de estimativa. O conjunto de variáveis regionalizadas é estacionário quando a distribuição de probabilidade conjunta das variáveis aleatórias é invariante com a translação, ou seja, um conjunto com média, variância e relações multivariadas iguais por todo o domínio (Caixeta, 2020).

De forma menos rigorosa, a *quasi* estacionaridade é admitida para casos onde as variáveis regionalizadas apresentam média constante entre uma vizinhança de pontos e a variância depende da distância entre eles, podendo ser descrita por uma única função de autocorrelação

para todo o domínio, assumindo que as relações das variáveis aleatórias (*i.e.* covariância) são caracterizadas em função da distância entre elas, através do semi-variograma (Caixeta, 2020).

2.3.2. Modelamento

Fenômenos espaciais geológicos são complexos e quase sempre não-estacionários. Portanto, é essencial para geoestatística realizar a delimitação de domínios para que sejam analisados separadamente, à fim de obter um conjunto de dados onde a hipótese de alguma forma de estacionaridade possa ser admitida. Assim, é possível modelar o semi-variograma que descreve o fenômeno espacial (Rossi & Deutsch, 2014; Caixeta, 2020).

O método usado para geração de domínios trata-se do modelamento. A modelagem geológica classifica-se como determinística ou probabilística, dependendo do método de aproximação adotado (Kikuda, 2022). O modelamento determinístico é subdividido em explícito, implícito ou misto. Estas técnicas são frequentemente aplicadas na indústria mineral (Rossi & Deutsch, 2014). A Figura 4 apresenta um desenho esquemático com os tipos de modelagem empregados.

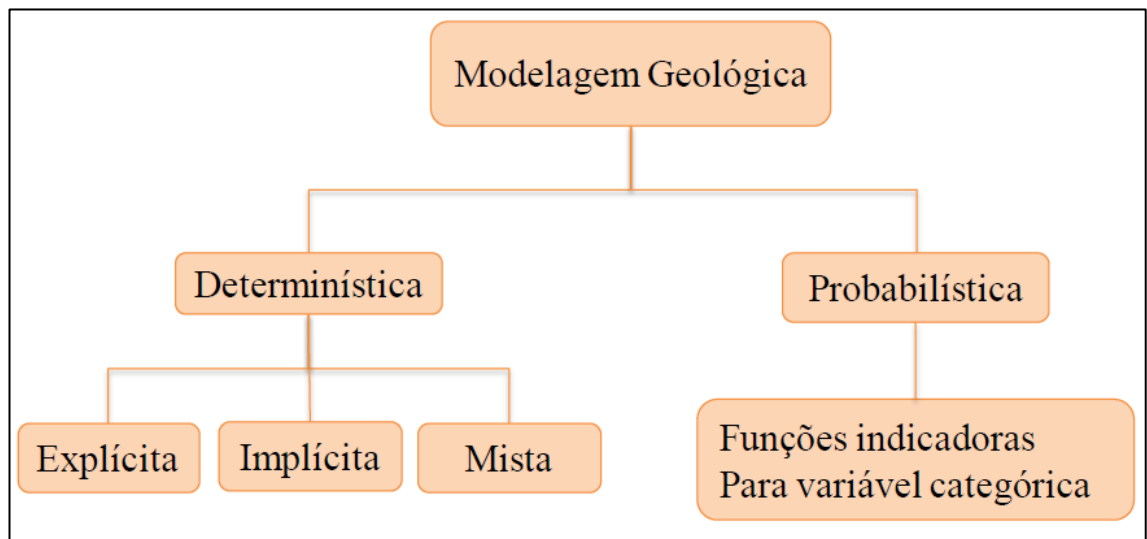


Figura 4 - Ilustração de classes de modelagem geológicas e técnicas empregadas. Extraído de Kikuda, 2022.

O modelamento implícito é um método determinístico em que a geração dos volumes triangulados (*wireframes*) é obtida através de dados categóricos, como contatos litológicos, medidas de foliação e acamamento, dados estruturais, etc. A partir destes contatos, segue-se a interpolação de superfícies, na forma de triangulações, através da *radial basis function* (RBF) (Cowan *et al.* 2003, Martin & Boisvert, 2017).

Na prática, as interseções de sondagens não são realizadas em quantidade exaustiva, a ponto de caracterizar perfeitamente o corpo de minério. Portanto, torna-se necessária a

implementação de edições complementares, com base na interpretação de geólogos. Através da visualização de seções e análise da continuidade espacial, é possível editar modelos com uso de linhas, pontos, medidas estruturais, superfícies (*e.g.* planos de falha), entre outros (Kikuda, 2022; Cowan *et al.*, 2003).

As interpretações, associadas à desenhos e digitalizações de linhas em seções são definidas como modelagem explícita e, quando complementada pelo método implícito, são denominadas modelagem determinística mista, técnica aplicada no presente trabalho.

Na Figura 5 há exemplos de *wireframes* que compõem uma região do bloco E. Nota-se a limitação destas à direita da figura, onde um plano de falha implementado através da modelagem explícita limitou a interpolação da *wireframe* para além deste plano. Contatos de sondagens geram pontos de contato através de classificações que possibilitam triangulações de *wireframes* através da *RBF*, conforme ilustra a Figura 6.

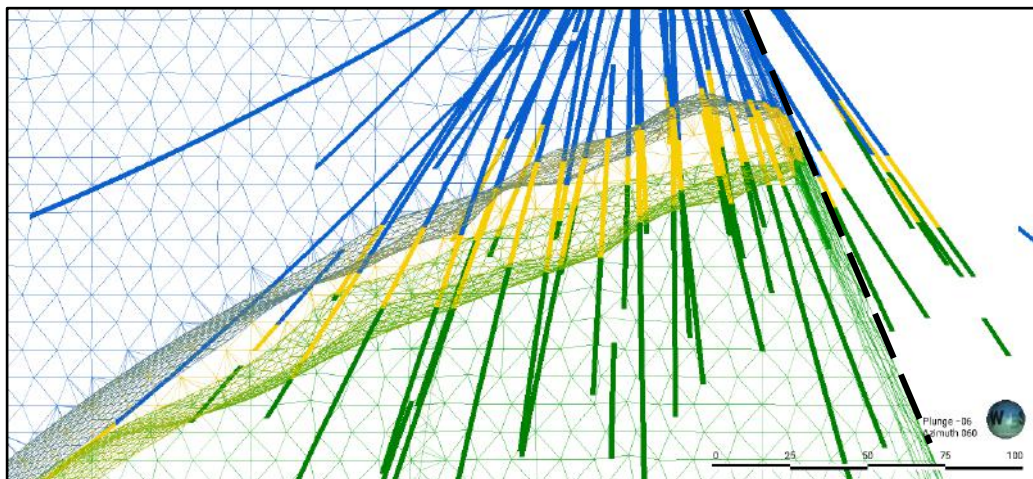


Figura 5 - Wireframes geradas com base em informações de sondagem. Exemplo do Bloco E da MMA. As triangulações de sólidos são limitadas até o plano de falha implementado por modelagem explícita. Ilustração realizada utilizando o software Leapfrog Geo.

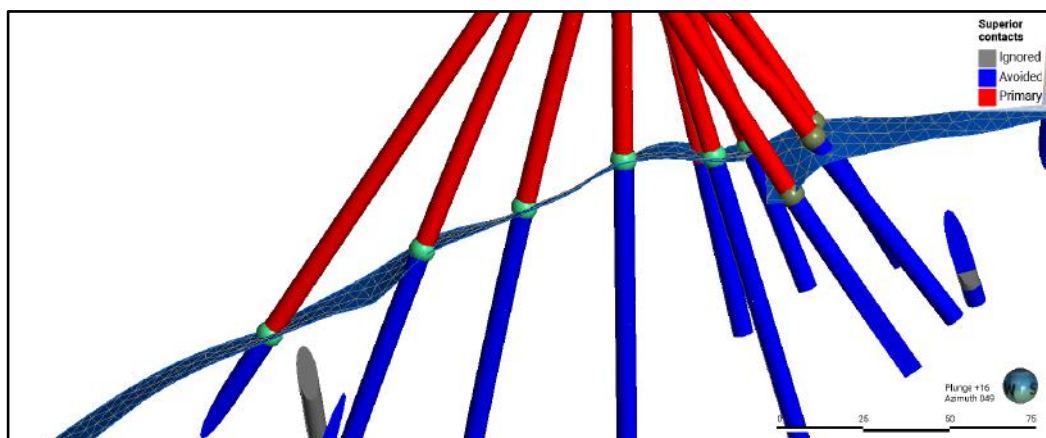


Figura 6 - Superfícies trianguladas a partir de contatos (pontos em tons de verde) e classificações de furos de sondagem (vermelho e azul). Ilustração realizada no software Leapfrog Geo.

2.3.3. Análise Exploratória dos Dados (*Exploration Data Analysis – EDA*)

A análise exploratória de dados (EDA) inclui análise comparativa de informações numéricas ou categóricas que podem ser relacionadas a campanhas exploratórias, características geológicas, domínios, entre outros. Esta técnica analítica viabiliza testes relacionados à qualidade dos dados, além da descrição estatística do conjunto de informações analisadas (Abzalov, 2016).

A estatística descritiva de dados é rotineiramente realizada por geólogos de mina e incluem desde análises regulares de controle de teor das frentes de lavra até controle de qualidade, reconciliação de reservas com a produção de mina e estatísticas de recursos minerais (Rossi & Deutsch, 2014; Abzalov, 2016).

À fim de caracterizar e descrever estatisticamente as distribuições de dados, bem como entender o comportamento de variáveis de interesse no depósito mineral, a distribuição de frequência de teores é a etapa inicial da análise estatística (Yamamoto, 2001). A Figura 7 apresenta um exemplo de histograma ilustrando a distribuição de frequência de teores, no qual o eixo vertical associa-se ao número de observações correspondentes ao intervalo horizontal X .

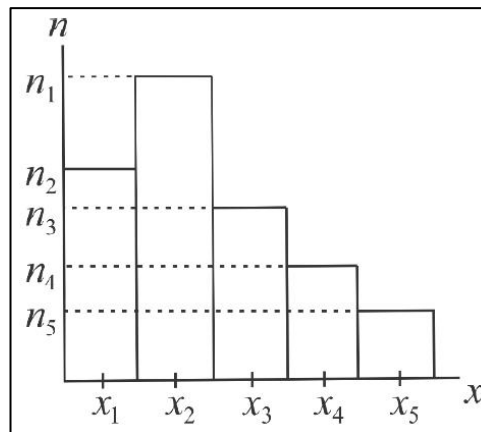


Figura 7 - Distribuição de frequência analisada a partir do número de observações (n) para cada intervalo correspondente (x). Extraído de Borradaile (2003).

Outra etapa inicial concomitante à distribuição de frequências é a estatística descritiva, fundamental na análise do conjunto de dados, obtida a partir de técnicas usadas para descrever e resumir dados em: (i) média, tendência central dos dados; (ii) variância, dispersão de valores em torno da média; (iii) desvio padrão, raiz quadrada da variância e (iv) coeficiente de variação, medida portátil e adimensional que compara a variabilidade natural de depósitos através da razão entre desvio padrão e média (Rossi & Deutsch, 2014; Koch & Link (1971); Andrade, 2018).

Para estudos de geoestatística e estimativa de recursos, serão apresentadas neste trabalho análises de histogramas, estatística descritiva, estatísticas univariada e bivariadas, funções de

distribuição de probabilidade, medidas de tendência, de espalhamento, de forma e coeficiente de variação, além de q-q *plots*, *scatter-plots* e medidas desagrupadas, todas relevantes para realização de estimativas (Abzalov, 2016).

Para as estatísticas descritivas, abreviações universais são frequentes para desvio padrão (Std. Dv./SD), coeficiente de variação (CV), variância (Var), mínimo (Min), quartil inferior (L. Qtl/Q1), mediana (Q2), quartil superior (U. Qtl/Q3), e máximo (Max).

2.3.4. Variografia

As técnicas de geoestatística possibilitam avaliação quantitativa da continuidade de variáveis regionalizadas. O variograma é a ferramenta da geoestatística aplicada para modelar a continuidade espacial das variáveis estudadas (Rossi & Deutsch, 2014).

Na geologia, a continuidade de uma mineralização pode ser uma concepção intuitiva quando se considera o strike de um corpo mineralizado, considerando uma maior continuidade ao longo de seu strike, que em outras direções.

Geólogos com experiência em determinados depósitos são capazes de identificar estruturas geológicas semelhantes, e diferenças para uma mesma litologia ou corpo de minério observada em diferentes locais, evidenciando o quanto a intensidade de uma mineralização pode mudar para dadas direções (Abzalov, 2016).

Utiliza-se de variogramas experimentais, ferramenta mais fundamental da geoestatística, para caracterizar o comportamento espacial da variável regionalizada (*e.g.* teor) em termos de zona de influência da amostra, direções de anisotropia e grau de continuidade dos dados em relação a distância (Gringarten & Deutsch, 2001).

A função do variograma ou semi-variograma ($\gamma(h)$), representada na Figura 8, calcula a variância dos pares de dados separados pela distância h , na qual (h) é a distância entre dados que formam um par, $Z(x)$ o valor da variável na posição x , $Z(x+h)$ o valor da variável separada pelo vetor h , e N o número de pares encontrados para cada distância h (Yamamoto & Landim, 2013). Conforme a equação a seguir:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^n (Z(x) - Z(x+h))^2$$

Figura 8 - Função variograma. Extraída de Batista, 2015.

Através da fórmula, é possível calcular o gráfico do modelo de variograma experimental para uma determinada atitude e direção (*pitch*), obtendo o ajuste mais adequado com base nos pontos plotados (Figura 9).

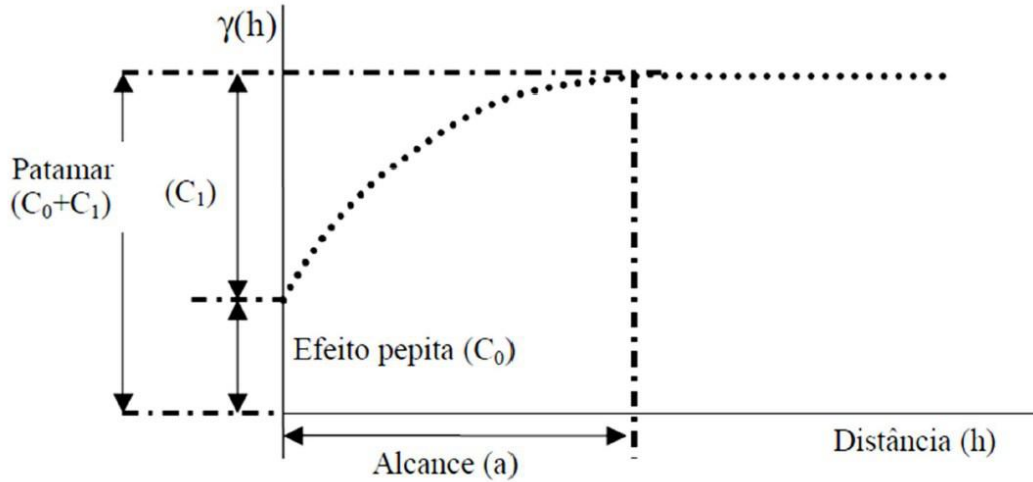


Figura 9 – Modelo de variograma. Extraído de Vilela (2004).

Um variograma com patamar é aquele na qual a função variograma atinge o nível de soleira, determinada como a variância à priori dos dados. Este fenômeno ocorre na distância (a), chamada alcance. O patamar é, por definição, o somatório do efeito pepita (C_0), fenômeno causado pela variância aleatória (*i.e.*, descontinuidade na origem) e C , denominado variância espacial (Yamamoto & Landim, 2013).

2.3.5. Krigagem

Após a geração da geometria do corpo de minério e do modelo de variograma, propriedades como teor metálico e densidade, são estimadas em um modelo de blocos para estimativa da tonelagem e previsão quanto a distribuição espacial de teores (Carvalho, 2018).

O método geoestatístico de interpolação amplamente mais difundido é a Krigagem, associada ao acrônimo *B.L.U.E*, que significa melhor estimador linear não enviesado (“*best linear unbiased estimator*”), significado matematicamente comprovado (Isaaks & Srivastava, 1989). É considerado linear, pois estima a combinação linear de pesos para os dados amostrais mais próximos disponíveis; não enviesado, pois tenta aproximar a média da estimativa à média verdadeira (*i.e.*, média desagrupada); e é o melhor, pois minimiza a variância do erro (Carvalho, 2018).

Os tipos mais comuns de krigagem são a krigagem simples, ordinária, a multigaussiana e a indicadora. As equações de krigagem consideram a redundância dos dados, sua proximidade e a variância entre eles (Pyrcz & Deutsch, 2014).

Outros métodos de estimativa de recursos não-geoestatísticos, como método dos polígonos, dos painéis e inverso da distância ao quadrado já foram difundidos no passado antes do advento da geoestatística e Krigagem Ordinária, mas não são capazes de reproduzir com eficiência anisotropia espacial (Abzalov, 2016).

2.3.6. Validações de Estimativa

Os procedimentos de validação de estimativa servem para avaliar as estimativas globais e locais, grau de suavização no modelo e impacto na recuperação dos recursos quantificados. Técnicas comuns incluem comparações entre histogramas dos blocos estimados e dos dados usados para estimativa, afim de avaliar vieses nos procedimentos de estimativa (Abzalov, 2016).

Um dos métodos padrões de validação comumente empregado é o *Swath-plot* (e.g. Figura 10). Baseado em amplos painéis que confinam os blocos estimados em espaçamento maior que o grid definido, correspondendo-os com seus dados (amostras), ou outros estimadores. Estes dados são plotados no gráfico e permitem comparação da média local dos dados com a média estimada dos blocos confinados nestes painéis de tamanho configurável, a depender da distribuição dos dados e malha amostral (Rossi & Deutsch, 2014; Abzalov 2016).

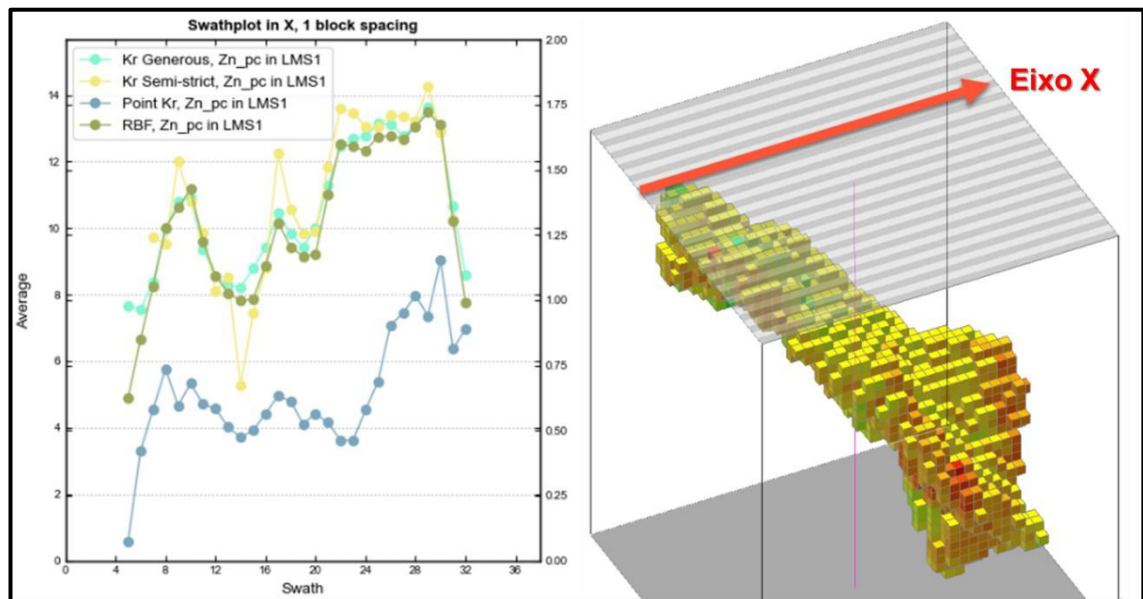


Figura 10 - Exemplo de Swath-Plot plotado no eixo X, comparando resultado de diferentes estimadores por krigagem (Kr) e radial basis function (RBF). O gráfico é plotado com a média de cada painel com tons cinzas no eixo X. Extraído da Seequent.

3. Contexto Geológico

Localizada na Plataforma Sul-Americana, a estruturação geológica do Brasil Central é produto da Orogênese Brasileira (0.7– 0.45 Ga), representada por faixas de dobramento que registram eventos colisionais entre os Crátons São Francisco, Paranapanema e Amazônico, que resultaram na amalgamação do supercontinente Gondwana (Almeida *et al.*, 1981; Brito Neves *et al.*, 1990; Silva *et al.*, 2003). A colisão entre esses blocos gerou os cinturões de dobras e empurrões que compartimentam o sistema orogênico do Ciclo Brasileiro definido por Almeida *et al.* (1981) como Província Tocantins (Figura 11).

Localizada na porção central do Brasil, a Província Tocantins compreende em três faixas orogênicas: as Faixas Paraguai e Araguaia, nas margens a leste do Cráton Amazônico, e a Faixa Brasília, localizada na margem oeste do Cráton São Francisco, onde está inserida a área de estudo (Dardenne, 2000) (Figura 12).

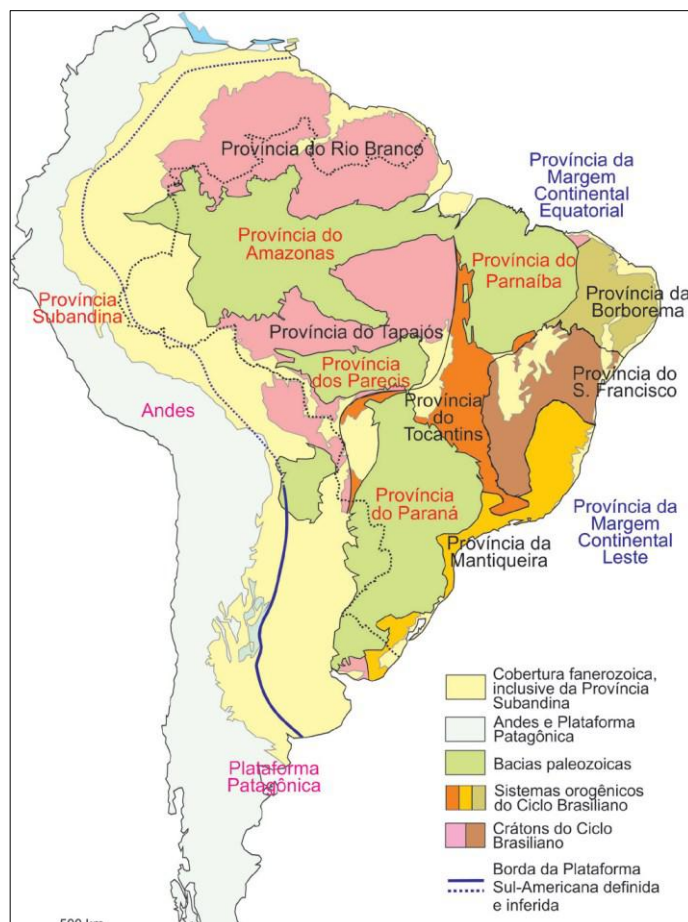


Figura 11 - Mapa de províncias estruturais do Brasil definido por Almeida *et al.* (1981). Destaca-se a Província Tocantins, área de estudo ocorre à oeste da Província do São Francisco. Extraído de Hasui *et al.*, 2012.

3.1. Geologia Regional

3.1.1. Faixa Brasília

A Faixa Brasília é um conjunto de terrenos e escamas de empurrão de escala crustal que convergiram para leste, em direção ao Cráton São Francisco, com extensão superior a 1000 Km ao longo do *trend* N-S (Baia, 2013; Dardenne 2000) (Figura 12).

Com base na deformação e grau metamórfico, Fuck *et al.* (2005), subdividiram o arcabouço geotectônico da faixa em: (I) cinturões de dobras e empurrões; (II) Núcleo Metamórfico; (III) Maciço de Goiás; e (IV) Arco magmático de Goiás (Figura 12.B).

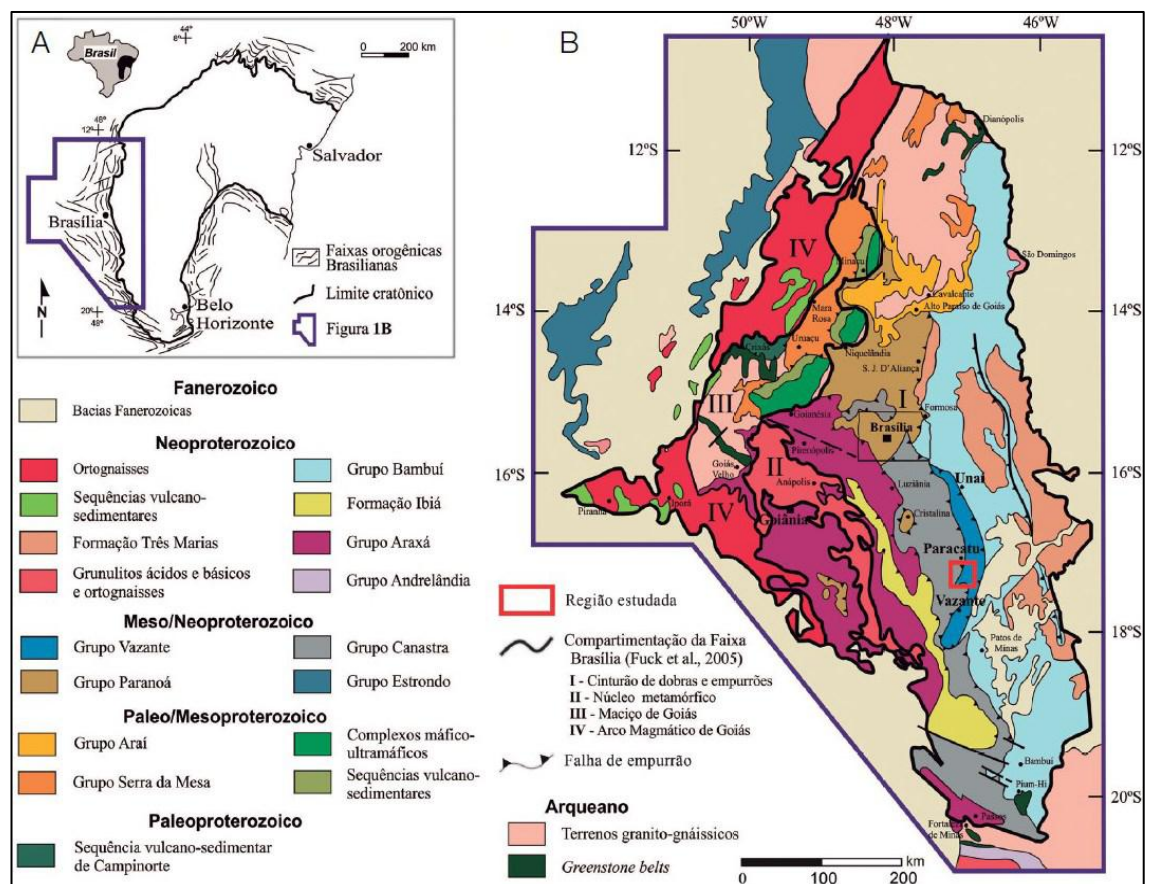


Figura 12 - (A) Mapa de localização da Faixa Brasília e limite cratônico com o Cráton São Francisco (por Alkmim e Teixeira (2017)); (B) Arcabouço geotectônico da Faixa Brasília definido por Dardenne (2000), e compartimentação por Fuck *et al.* (2005). Área em vermelho destaca ocorrências minerais de zinco e chumbo sulfetados e depósitos da região de Paracatu, Município da área de estudo. Extraído de Sotero *et al.* (2019).

Define-se Faixa Brasília Sententrional (FBS) rochas de orientação NE, que registram interação entre o Cráton São Francisco e Amazônico, formadas pelo Grupo Araí e seu embasamento, e o Grupos Paranoá (Meso-Neoproterozóico), Maciço de Goiás e Arco Magmático de Goiás. A Faixa Brasília Meridional (FMB) apresenta unidades geológicas de orientação NW dispostas em um complexo sistema imbricado de *nappes* e falhas, que indicam

transporte tectônico de centenas de quilômetros e é formada pelos Grupos Canastra e Vazante (Meso-Neoproterozóico), Ibiá e Araxá (Neoproterozóico) e Andrelândia (Marini *et al.*, 1981; Valeriano *et al.*, 2004a; Dardenne, 2000; Baia, 2013).

A Megaflexura dos Pirineus limita esses distintos domínios da Faixa Brasília com orientações, metamorfismo e deformação contrastantes. A FBS e a FBM se encontram na altura do paralelo de Brasília, formando essa Megaflexura onde os trends estruturais são bruscamente infletidos para direção E-W (Costa & Angeiras, 1971; Marini *et al.*, 1981; Valeriano *et al.*, 2004b).

3.1.2. Grupo Vazante

Pertencentes à Faixa Brasília Meridional, as rochas do Grupo Vazante são hospedeiras de diferentes estilos de mineralização de Zn e Pb que ocorrem na Faixa Vazante-Paracatu (Figura 13.B), amplo seguimento de ocorrências minerais e maior distrito produtor plumbocincífero do Brasil (Dardenne, 2000). Com extensão de aproximadamente 250 Km em direção predominantemente N-S e 25 Km de largura, as rochas do grupo consistem em uma sequência metassedimentar carbonática e siliciclástica de idade proterozóica, afetadas por tectônica de *thin-skinned* e metamorfizadas em baixo grau, com ocorrência de afloramentos entre as cidades de Unaí (limite norte) e Coromandel (limite sul) (Baia, 2013).

O ambiente de sedimentação em margem passiva do grupo Vazante é corroborado pela presença de carbonatos plataformais de águas rasas com estromatólitos e ausência de rochas vulcânicas (Dardenne, 2000; Pimentel *et al.*, 2001; Azmy *et al.*, 2008). Este estudo é corroborado por Sotero *et al.* (2019) que sugere, a partir da análise de fácies e ambientes deposicionais na região de Paracatu, processos de sedimentação em margem passiva de baixa declividade, com atuação de falhas sin-sedimentares e forte influência da inflexão do Rio Escuro durante a deposição, como um paleoalto geográfico (Figura 13.C).

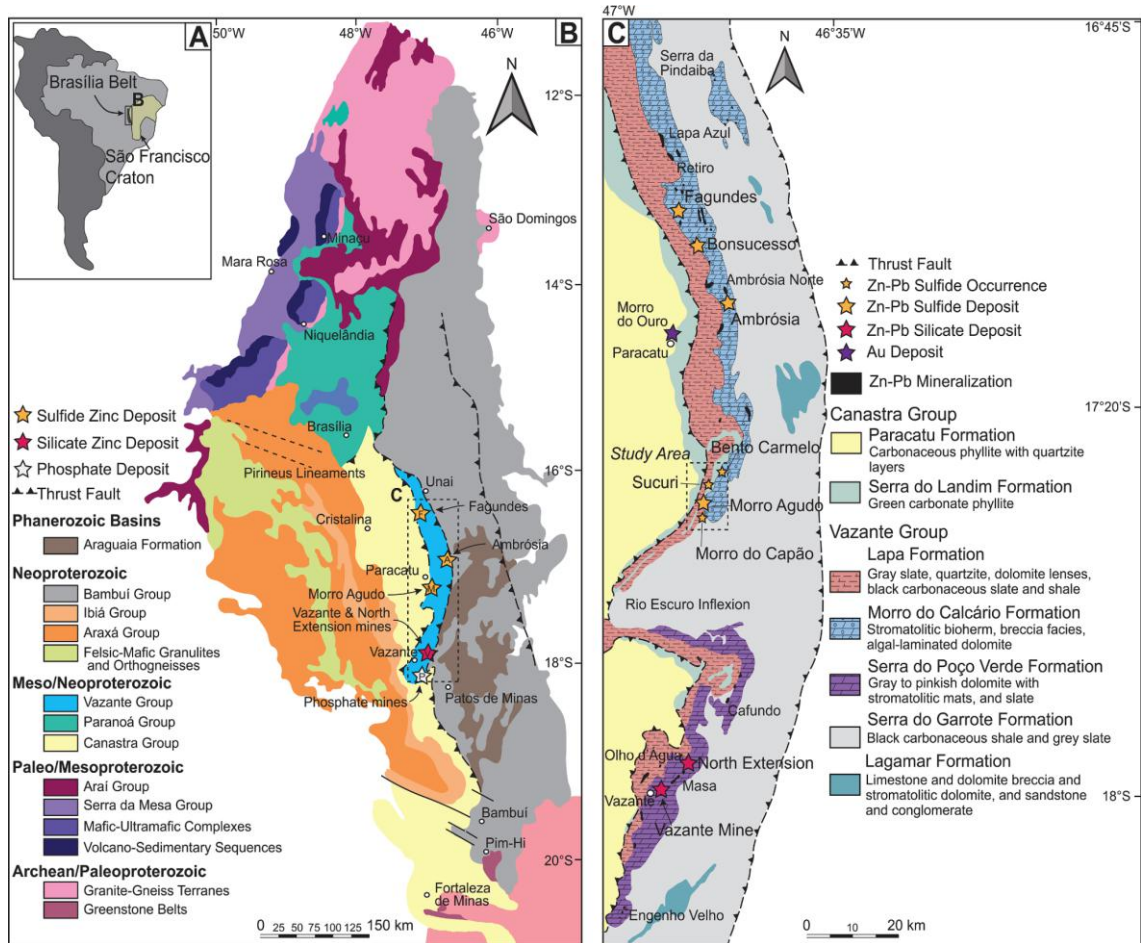


Figura 13 - (A) Mapa geológico simplificado do Brasil Central com a Faixa Brasília (FB) e Cratón São Francisco. (B) Mapa regional da FB e localização de depósitos no Grupo Vazante. (C) Geologia da Faixa Vazante-Paracatu com minas e ocorrências minerais (Extraído de Aldis *et al.*, 2022)

3.2. Estratigrafia

A classificação estratigráfica das rochas do Grupo Vazante passou por diversas modificações ao longo dos anos, conforme a evolução do conhecimento na região. Entre os trabalhos mais relevantes, destaca-se o de Dardenne (2000), que redefiniu para Grupo Vazante a unidade que até então era entendida como Formação. Trabalhos recentes, como o de Sotero *et al.* (2019), atualizaram o modelo estratigráfico para a região de Paracatu, elaborando a proposta mais atual com base em estudos faciológicos e identificação de ambientes deposicionais na região da Mina de Morro Agudo (Paracatu).

A subdivisão deste grupo proposta por Sotero *et al.* (2019) segue, da base para o topo: Fm. Lagamar, Fm. Serra do Garrote, Fm. Serra do Poço Verde, Fm. Morro do Calcário e Fm. Serra da Lapa, conforme evidenciado na coluna estratigráfica da Figura 12.

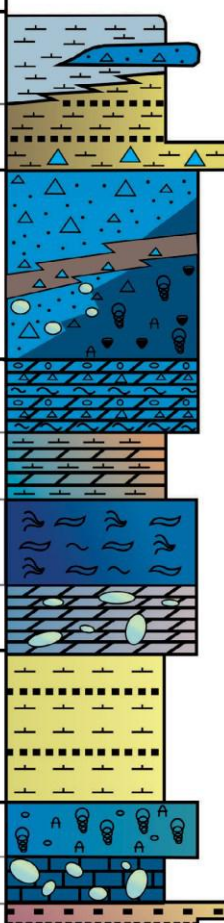
Grupo	Formação	Membro	Descrição litológica	
Vazante	Serra da Lapa	Serra da Lapa	Ardósias carbonatadas cinzas e lentes de dolomitos	
		Serra do Velosinho	Ardósias carbonatadas pretas, ritmitos e diamictito	
	Morro do Calcário		Bioherma estromatolítica, fácies de brechas e dolarenitos, pelitos carbonáticos carbonosos com fácies de diamictito (mocambo)	
	Serra do Poço Verde	Pamplona Intermediário	Dolomitos rosados com esteiras estromatolíticas, nódulos de barita e gretas de ressecamento	
		Pamplona Inferior	Ardósias cinza a verde com intercalações de dolomitos rosados	
		Morro do Pinheiro Superior	Dolomitos cinza-escuros com esteiras estromatolíticas e <i>birds eyes</i>	
		Morro do Pinheiro Superior	Dolomitos cinza-claros a rosados com intercalações de brechas e dolarenitos	
	Serra do Garrote		Ardósias cinzas com lentes de quartzitos esporádicas	
	Lagamar	Sumidouro	Bioherma estromatolítica	
			Calcários cinza-escuros e brechas dolomíticas	
	Arrependido	Conglomerados		

Figura 14 - Coluna estratigráfica do Grupo Vazante contemplando unidades do norte e sul da faixa (Morro do Calcário e Serra do Poço Verde, respectivamente). Extraída de Sotero et al., (2019) e modificada de Dardenne (2000).

A Formação Lagamar apresenta um pacote carbonático depositado acima dos metapelitos da Formação Rocinha, do Grupo Bambuí. Composta, em sua base, por metaconglomerados com matriz suportada por seixos de quartzitos, ardósias e metassiltitos do Membro Arrependido. O Membro Sumidouro compreende em brechas intraformacionais de composição dolomítica, calcários acinzentados, estratificados e com intercalações de brechas lamelares. O topo da formação é representado por dolomitos de bioherma estromatolítica (Dardenne, 2000). A Formação Serra do Garrote trata-se de uma sequência de ardósia verde-escura a cinza com níveis carbonosos, intensamente deformada, laminada e com lentes de metassiltitos, quartzitos e metadolomitos (Dardenne, 1978; Madalosso, 1979). A Formação Serra do Poço Verde é restrita ao sul da Faixa Vazante (ver Figura 13) e compreende em metadolomitos laminados, ardósia, filito, esteiras algais, metadolomito cinza escuro com bird eyes, marga, filito carbonoso com ocorrência de pirita e brecha dolomítica hospedeira da mineralização de zinco silicatado da Mina de Vazante (Dardenne, 2000; Monteiro et al., 2007).

A Formação Morro do Calcário é a única unidade aflorante na área da Mina Morro Agudo. Este pacote metassedimentar representado por rochas dolomíticas cinza a rósea, apresenta espessura de até 1.6Km na porção central do Grupo Vazante (Dardenne & Freitas-Silva, 1999; Dardenne, 2000; Monteiro *et al.*, 2006; Rodrigues *et al.*, 2012). Com espessura variável ao longo da faixa, a formação afina-se para sul e alonga-se na direção NNW-SSE, estruturada em sinformes suaves a abertos e em falhas normais (Sotero, 2019).

Os carbonatos desta formação são atribuídos por Oliveira (2013) às fácies recifais e talús recifais, depositados em ambiente *subtidal* e *intertidal*. Compreendem em dolomitos de construção estromatolítica de ambiente recifal, dolarenitos oolíticos e oncolíticos e doloruditos (Dardenne, 2000), além de margas carbonosas de cor preta, ricas em matéria orgânica, pirita e barita, referidas na literatura como Membro Mocambo (Oliveira, 1998; Aldis *et al.*, 2022).

No topo do Grupo Vazante, a Formação Serra da Lapa representa pacotes de pelitos carbonáticos com matéria orgânica apresentando lentes de dolomitos laminados, além de diamictitos e dolarenitos (Dardenne, 2000).

3.3. Contexto Metalogenético

Os diferentes depósitos e ocorrências plumbo-zincíferas conhecidos na Faixa Vazante são caracterizados por forte controle estrutural e estratigráfico que possuem controles distintos na gênese e estilo de mineralização (Monteiro, 1997; Monteiro, 2002; Dardenne, 2000; Neves, 2011; Baia, 2013). Na porção norte da Faixa Vazante-Paracatu, predominam mineralizações sulfetadas hospedadas pela Fm. Morro do Calcário. Os depósitos conhecidos são as minas de Morro Agudo e Ambrósia (desativada), além dos depósitos de Fagundes e Bonsucesso (Rocha de Oliveira, 2022) (ver Figura 13).

A Formação Serra do Garrote é considerada fonte metalífera para todos os depósitos hospedados no Grupo Vazante, apesar destes serem distintos em termos de rocha hospedeira, estilo de mineralização, e tenham se formado em momentos diferentes durante a evolução da bacia (Fernandes *et al.*, 2019a; Rocha de Oliveira, 2022). Assinaturas geoquímicas de enriquecimento de metais e elementos farejadores no estágio pré-orogênico na Fm. Serra do Garrote associada a posterior depleção destes elementos durante a orogênese brasileira corroboram para hipótese desta sequência pelítica como fonte de metais (Cevik *et al.*, 2021).

A mina de Morro Agudo é definida como um depósito do tipo *Mississippi Valley Type* (MVT) de sub-tipo *Irish* (Paradis *et al.*, 2007; Cordeiro *et al.*, 2018). O depósito apresenta mineralização epigenética controlada estratigraficamente em dolarenitos pelíticos, brechas dolareníticas, brechas dolomíticas e em dolomitos argilosos laminados impuros (Aldis *et al.*,

2022). A mineralização também é controlada por falhas de rejeito normal subverticais (N15-20W/75SW) que abatem corpos *stratabound*, posicionando-os em maiores profundidades para oeste do depósito (Neves, 2011).

3.4. Geologia do Depósito

3.4.1. Litotipos

Na MMA ocorrem cinco litotipos pertencentes à Fm. Morro do Calcário, reconhecidos e classificados por Romagna e Costa (1988) como nomenclatura oficial usada pela geologia de mina da Nexa Resources S.A., são estes: (i) Membro Mocambo; (ii) Brecha Dolomítica; (iii) Brecha Dolarenítica; (iv) Dolarenito; (v) Sequência Argilo Dolomítica. São descritos a seguir, da base para o topo:

(i) Membro Mocambo (MOC)

Filito carbonoso cinza escuro ou pelito preto, laminados, ricos em matéria orgânica, pirita e barita (Aldis *et al.*, 2022; Sotero, 2019). Neste intervalo notam-se frequentes veios e vênulas dolomíticas brancas próximas às zonas de alteração hidrotermal, com pacote sedimentar apresentando até 15 metros de espessura na base das zonas mineralizadas.

(ii) Brecha Dolomítica (BDOL)

Unidade composta por brechas intraformacionais com litoclastos angulosos de até 2 metros de largura e composição variada (dolomito maciço, dolarenito, dolomito estromatolítico e dolomito laminado). Sua matriz dolomítica apresenta granulometria fina. Há registros de furos de sonda com até 160m de espessura para este intervalo e encontram-se bolsões mineralizados próximo ao contato de topo com o dolarenito (Cezar, 2022; Neves, 2011).

(iii) Brecha Dolarenítica (BDAR)

Brecha sedimentar cinza clara com matriz dolarenítica, apresenta intraclastos angulosos e localmente arredondados. Este intervalo apresenta espessura variável e pouca continuidade lateral, constitui uma transição entre a brecha dolomítica para o dolarenito. Frequentemente ocorre mineralizado próximo ao contato com o dolarenito, apresentando altos teores (Neves, 2011; Cordeiro *et al.*, 2018).

(iv) Dolarenito (DAR)

Dolarenito cinza de granulação fina à grossa, com intraclastos, oólitos e oncólitos, clastos subarredondados, cimentados por dolomita, quartzo ou esfalerita (Neves, 2011). Sua boa porosidade faz desta camada a principal rocha hospedeira da mineralização *stratabound* de Morro Agudo, correspondendo a ~80% das mineralizações (Cordeiro *et al.*, 2018). Sua espessura é variável, podendo chegar a 30m em algumas regiões do depósito. Localmente,

observam-se alternâncias de bandas centimétricas a decimétricas de chert negro nodular, conforme o estrato.

(v) Sequência Argilo-Dolomítica (SAD)

Sequência predominantemente estéril, relacionada a intercalações milimétricas rítmicas de argilito e margas dolomíticas que compõem o ritmo desta unidade de topo, com composição modal de 80% de dolomita presente na forma de ankerita, cerussita, barita, quartzo e calcita. Há ocorrência de pirita em níveis mais carbonosos próximo ao contato de base desta unidade com o DAR (Neves, 2011).

Os litotipos dolomíticos da MMA apresentam granulodecrescência ascendente (Dardenne *et al.*, 1998) observada em todos os furos de sonda posicionados em subsuperfície à oeste da falha principal conforme a Figura 15.



Figura 15 - Mapa geológico local, representando unidades aflorantes em superfície e disposição de falhas inferidas da mina de Morro Agudo, que subdivide o depósito em blocos A, B, C, D, E e F (ausente no mapa). Extraído de Neves, 2011.

3.4.2. Arcabouço Estrutural

A Formação Morro do Calcário é alongada na direção NNE-SSW e estruturada por sinformes suaves e falhas normais (Sotero *et al.*, 2019). Nos arredores da Mina Morro Agudo há uma zona de cisalhamento transpressional dextral de direção NE-SW caracterizada por lineamentos de mergulho aproximado de 40° W (Matos, 2016; Sotero, 2019).

Na MMA, há uma expressiva estrutura chamada “Falha Principal”, de rejeito normal e atitude aproximada de 340/75° em superfície, que muda em profundidade para 300/60°. Esta falha faz um contato tectônico entre um bloco de doloruditos estéril à leste, e um bloco com os litotipos de Morro Agudo à oeste da estrutura, associados corpos de minério, conforme ilustra o bloco diagrama da Figura 16. Outras falhas normais de atitude similar ocorrem, dividindo regiões da mina em blocos que atualmente, vão de A à F, incluindo o Bloco E, área do presente estudo (Neves, 2011; Cordeiro *et al.*, 2018).

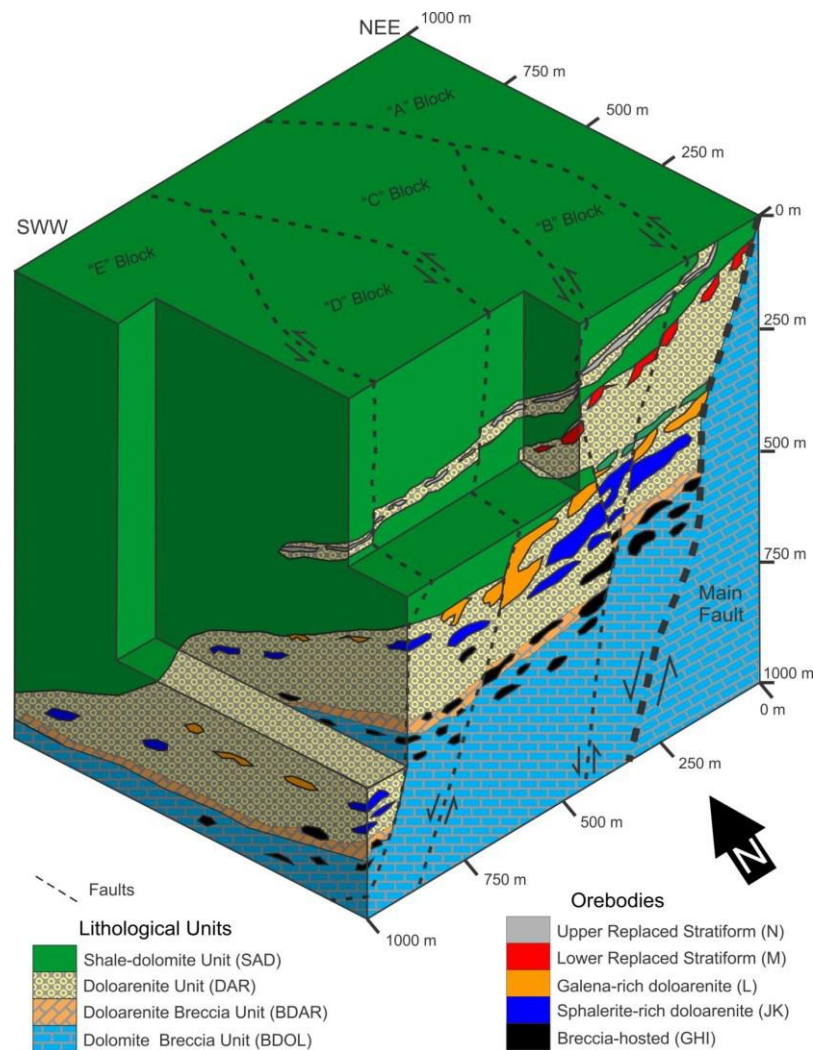


Figura 16 - Bloco diagrama do depósito de Morro Agudo, apresentando litotipos, mineralizações e a subdivisão de blocos pelas estruturas de falha regionais. Extraído de Cordeiro *et al.*, 2018, modificado de Neves, 2011.

Além das falhas regionais de atitude geral NNW, fraturas e diversas falhas subordinadas de menor rejeito abatem a mineralização localmente e são relevantes para o planejamento de lavra. Falhas secundárias de direção SE-NW também são reconhecidas pela equipe de geologia de mina e fazem parte do modelo geológico do depósito.

3.4.3. Mineralizações

Diferentes estilos de mineralização são encontrados em Morro Agudo, associadas aos litotipos descritos. No geral, esfalerita e galena, minerais minério do depósito, ocorrem com pirita subordinada, caracterizada como mineral ganga junto a barita, dolomita, calcita e quartzo (Cunha *et al.*, 2000). Os corpos de minério são descritos em testemunho de acordo com a classificação estabelecida por Romagna e Costa (1988), que nomeia os corpos da base para o topo, de G a N, conforme descritos a seguir.

Minério Hospedado por Brecha (GHI/ “Basal”)

Descontínuas lentes e bolsões de sulfetos ou disseminação esparsa em granulometria fina, associados à brecha dolomítica (BDOL). Pirita maciça (FeS_2), esfalerita fina (ZnS) e galena média à grossa (PbS) preenchem fraturas, cavidades e falhas, além de substituir localmente a cimentação carbonática da matriz dos dolorruditos. Esta mineralização possui geometria descontínua e apresenta maior concentração de minério nas proximidades do contato com a unidade superior (BDAR ou DAR) (Neves, 2011; Cordeiro, 2018).

Minério Hospedado por Dolarenito (JKL)

Caracterizada por lentes *stratabound* sulfetadas e com continuidade lateral. Localmente, são reconhecidas três lentes em campo com maior concentração de minerais sulfetados separadas por intervalos de dolarenito com teores sub-econômicos (estéril). São identificadas da base para o topo como lentes “J”, “K” e “L”.

As mineralizações no dolarenito ocorrem com alta concentração de esfalerita amarela-caramelo e galena cinza, em granulometria média e textura de cimentação. É possível observar a esfalerita substituindo clastos, oóides e oncóides, além do cimento dolomítico (Neves, 2011). Uma fase posterior de mineralização também pode ser observada, relacionada ao preenchimento de falhas e fraturas em fase tardia, associados com dolomita branca e mineralização em textura mais grossa ou maciça (Cordeiro, 2018). Localmente, as lentes JKL podem apresentar bandamento entre minério, chert preto e pirita, principalmente na base da mineralização.

Minério Estratiforme e Bandado (N)

Esse corpo de minério está contido em lentes de dolarenito impuro inseridas no pacote sedimentar da sequência argilo-dolomítica (SAD). A mineralização ocorre com bandamento caracterizado pela intercalação de lâminas milimétricas a centimétricas de esfalerita fina, galena fina, pirita maciça e chert fumê, ocorrendo subordinadamente, dolomita branca, chert verde e vermelho. Esta mineralização *stratabound* apresenta ampla continuidade lateral e alto teor em pirita (Neves, 2011; Cordeiro, 2018).

4. Resultados

4.1. Modelagem

O modelo litológico gerado para o Bloco E da mina Morro Agudo simplificou as descrições geológicas em quatro unidades distintas, da base para o topo (I) Pacote inferior, (II) JKL, (III) Pacote Superior e (IV) Corpo N (lentes inseridas no pacote superior).

As unidades II e IV relacionam-se às duas camadas com mineralização *stratabound* em dolarenitos reconhecidas no depósito e mineralizadas em momentos distintos. A unidade “JKL” é a principal litologia prospectiva de Morro Agudo e foco das mineralizações modeladas no presente trabalho.

Em relação aos litotipos de Morro Agudo, a pacote inferior do modelo é representada pelo MOC e BDOL. A unidade JKL é a representação de ocorrências de BDAR e DAR. E a unidade superior é representada pela SAD. Inserido nesta unidade, há o nível com lentes de dolarenito impuro que hospeda a mineralização bandada denominada como Corpo N.

O bloco diagrama 3D demonstrado na Figura 17 ilustra o modelo litológico gerado para o Bloco E, com a unidade Inferior em verde, a JKL em amarelo, o corpo N em azul celeste e a unidade Superior em tom azul marinho.

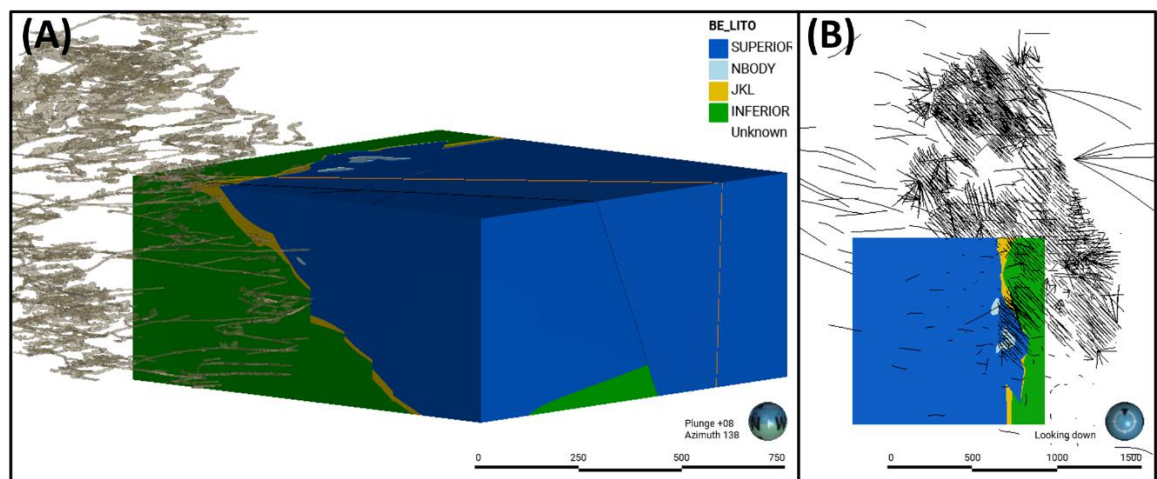


Figura 17 - (A) Visada de NW para SE do modelo litológico gerado para o Bloco E da MMA com galerias subterrâneas em marrom (com transparência); (B) Visada em planta de sondagens e área modelada na mina.

Intervalos descritos em sondagens conforme as 4 unidades modeladas, definiram os contatos e superfícies de contatos, que interpoladas, geraram o volume 3D que compõe o modelo, conforme ilustra a seção geológica da Figura 18.

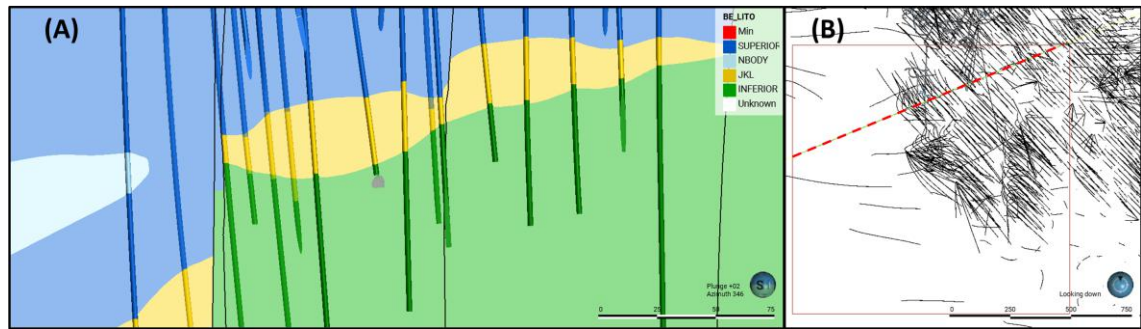


Figura 18 - (A) Seção geológica SW-NE, com unidades modeladas, passando pelas classes do modelo com informações de furos de sondagem e falhas representadas; (B) Visada em planta de sondagens, com linha em vermelho identificando localização da seção geológica e contorno do Bloco E.

Planos de falhas são representados no modelo. Ao todo, 7 planos de falha fazem parte do modelo gerado e a interação destes subdivide o modelo em 11 volumes diferentes, devido suas relações temporais, conforme ilustra a Figura 19.

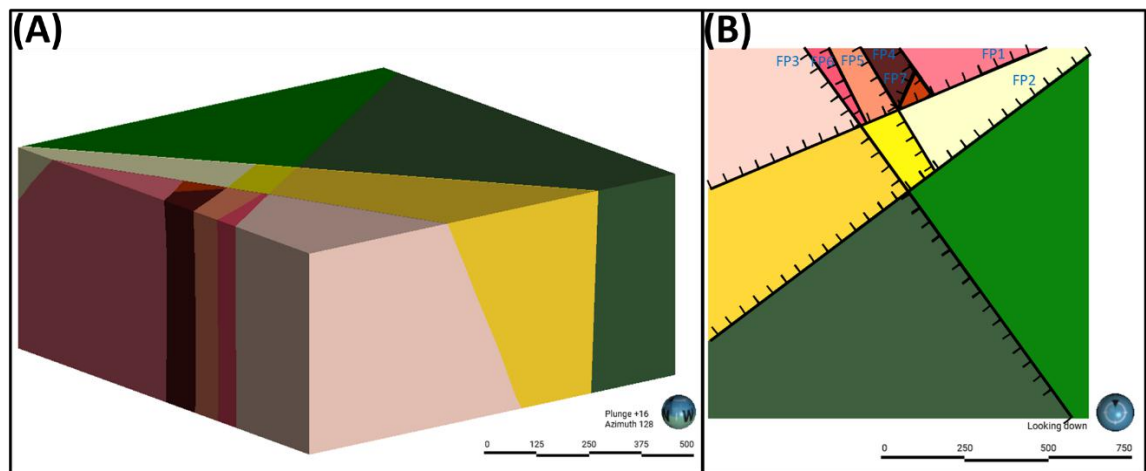


Figura 19 - (A) Visão em perspectiva de NW para SE dos volumes sólidos separados por falhas no Bloco E; (B) Vista em planta da região do Bloco E com os 7 planos de falha identificados.

As falhas normais abatem a rocha hospedeira e demais litologias. A cronologia dos planos de falha (FP) (Figura 20) implementados inicia-se com falhas de escala regional, FP1 e FP2, que segmentam a área do Bloco E em uma porção Norte, Central e Sul. Posteriormente, o FP3 abate rochas à sudeste deste plano. As falhas seguintes são identificadas localmente no depósito e relacionam-se às porções Norte e Central, localizadas à nordeste da FP3, conforme ilustra a Figura 20.

Na porção Norte do Bloco E, zona de malha de sondagens mais adensada (maior informação) 4 falhas são representadas, FP4, FP5, FP6 e a FP7. O rejeito da FP5 também é identificado na porção Central. A Figura 20 ilustra a concepção da evolução cronológica das estruturas implementadas no modelo do Bloco E sem interpretar possíveis transcorrências, identificando a organização final e disposição dos 11 volumes sólidos segmentados pelas falhas.

A Figura 21 apresenta uma visualização do Bloco E sem as unidades Superior e Corpo N, do modelo. Desta forma é possível notar o abatimento do dolarenito por falhas normais em direção à NW.

Entre os 11 volumes sólidos gerados conforme a Figura 20, os volumes de número 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 são os blocos nos quais as sondagens interceptam teores econômicos e onde está localizada a mineralização stratabound modelada.

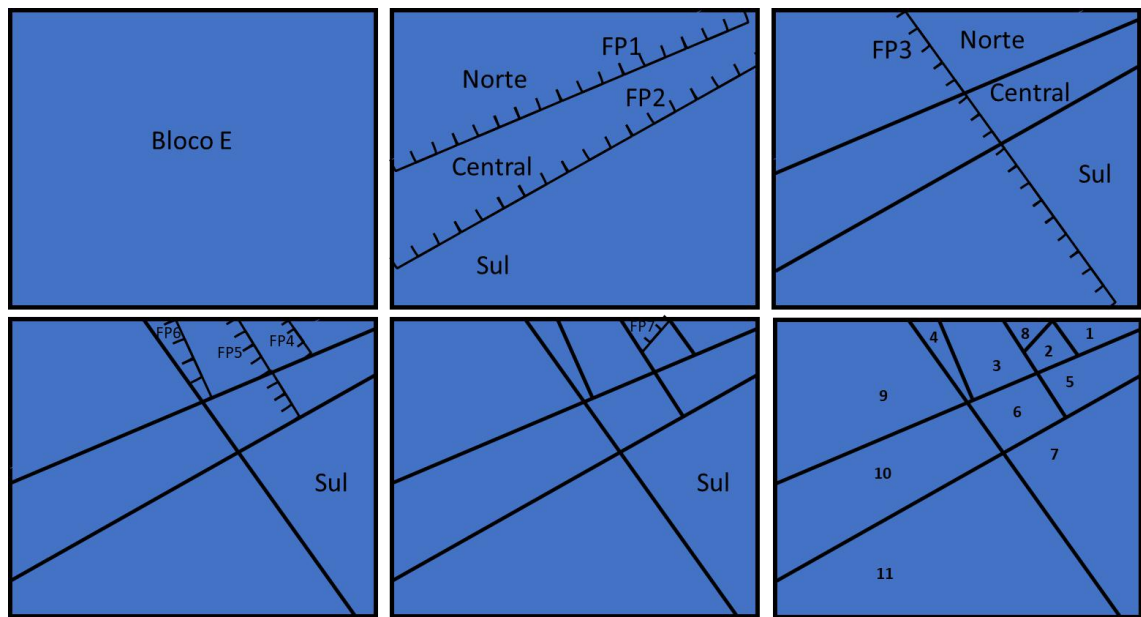


Figura 20 - Ilustração da evolução das falhas dos modelos do Bloco E. Da esquerda para direita e do topo à base, são identificadas falhas em ordem cronológica. Por fim, a disposição final com identificação numérica de cada volume identificado de 1 à 11.

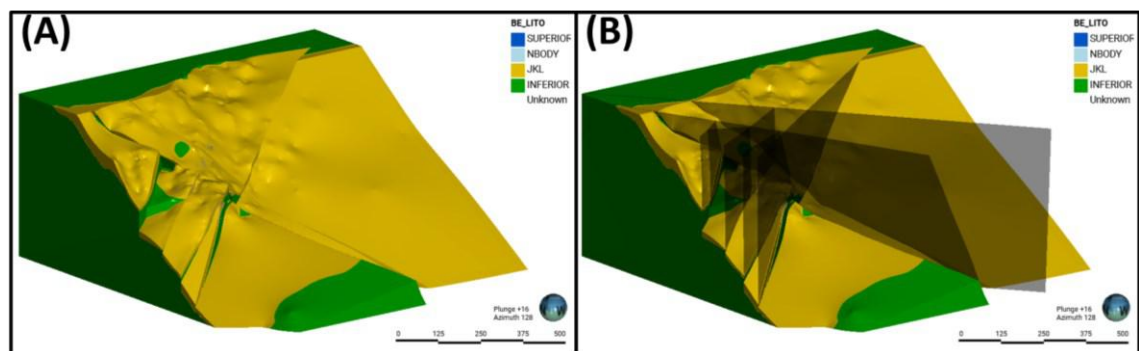


Figura 21 - Visada de NW para SE das unidades inferior e JKL. (A) Dolarenito (amarelo) sendo abatido para oeste do depósito; (B) planos de falha em transparência seccionando o modelo em blocos.

O modelo de minério gerado como domínios para estimativa de recursos minerais é representado pelas lentes J, K e L modeladas em conformidade com o dolarenito do modelo litológico, sólido referência para orientação da geometria do minério (Figura 22).

O volume que representa o modelo de minério engloba amostras de análises químicas de sondagem acima do teor de *cut-off* de 1.6% de zinco e chumbo combinados, correspondentes a litologia do dolarenito. A seção geológica da Figura 23 ilustra os corpos de minério *stratabound* modelados em geometrias lenticulares que englobam estes teores.

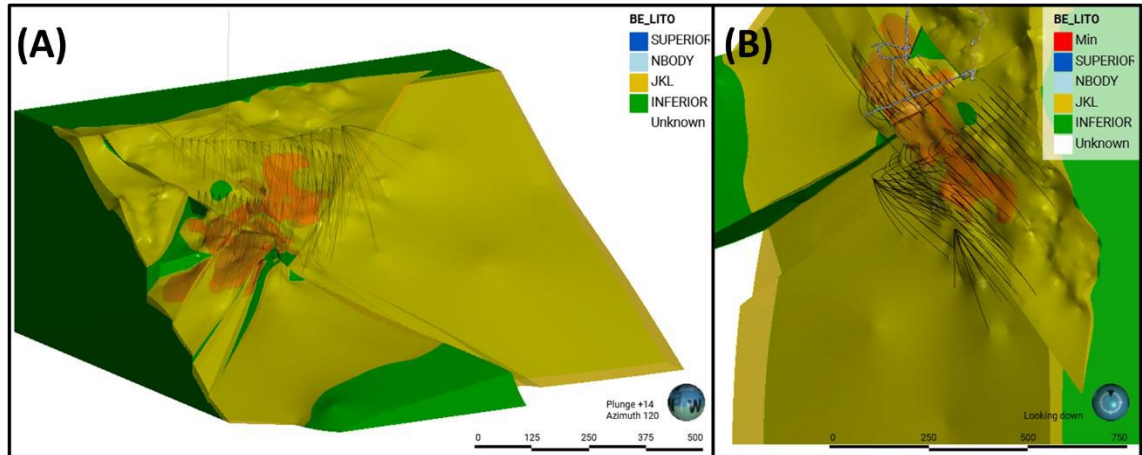


Figura 22 - (A) Visada de NW para SE com sondagens e unidades inferior, JKL (em transparência) e lentes de minério sobrepostas em tons de vermelho abatidas junto à rocha hospedeira; (B) visada em planta.

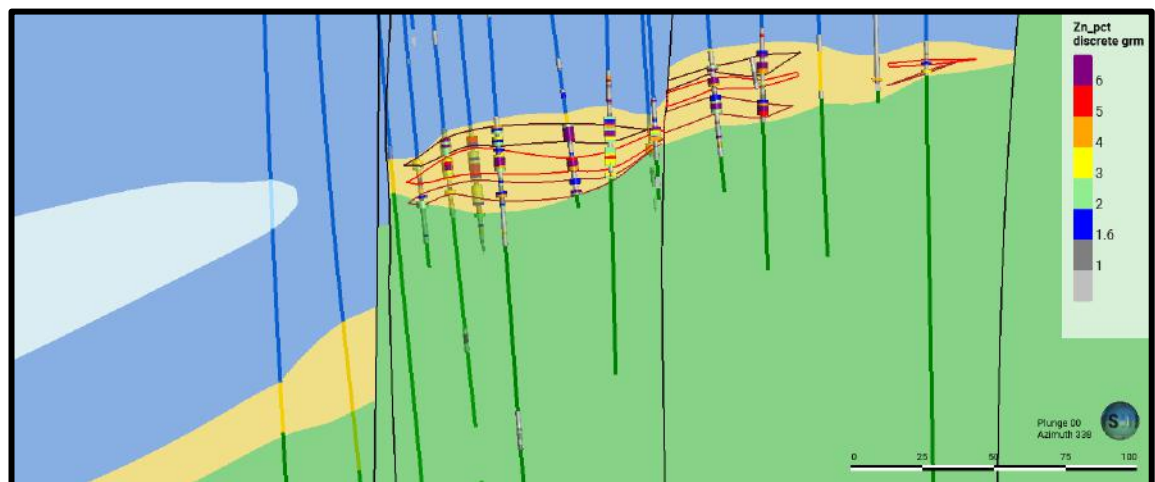


Figura 23 - Seção geológica orientada de SW para NE seccionando lentes de minério modeladas e com teores das amostras de zinco representados em cilindros com escala de cor à direita em porcentagem. Localização identificada na Figura 18

4.2. EDA

A Tabela 1 sumariza estatísticas descritivas de cada uma das lentes de minério modeladas.

Tabela 1 - Estatística descritiva das lentes J, K e L. Da esquerda para direita: número de amostras, comprimento total, média, desvio padrão, coeficiente de variação, variância, mínimo, quantil inferior, mediana, quantil superior e máximo.

Statistics weighting: Length-weighted											
ID	Count	Length	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation	Variance	Minimum	Lower quartile	Median	Upper quartile	Maximum
BL_E_L											
Pb_pct	274	263.228	0.90	2.05	2.29	4.22	0.00	0.03	0.14	0.80	19.50
Zn_pct	274	263.228	3.78	3.40	0.90	11.54	0.02	1.67	2.65	4.91	19.15
BL_E_K											
Pb_pct	383	313.86	0.96	2.71	2.83	7.37	0.00	0.02	0.15	0.72	34.08
Zn_pct	383	313.86	4.88	5.31	1.09	28.23	0.00	1.83	3.02	5.72	39.41
BL_E_J											
Pb_pct	374	308.241	0.94	2.43	2.60	5.91	0.00	0.02	0.18	0.69	25.47
Zn_pct	374	308.241	3.49	3.71	1.06	13.79	0.01	1.55	2.27	4.09	27.50

Para análise de similitude da população amostral de cada uma das lentes foram gerados *q-q plots* (gráficos de quantil por quantil). Foram plotados QQ plots da lente K contra a J e da lente K contra L, conforme a Figura 24 e Figura 25.

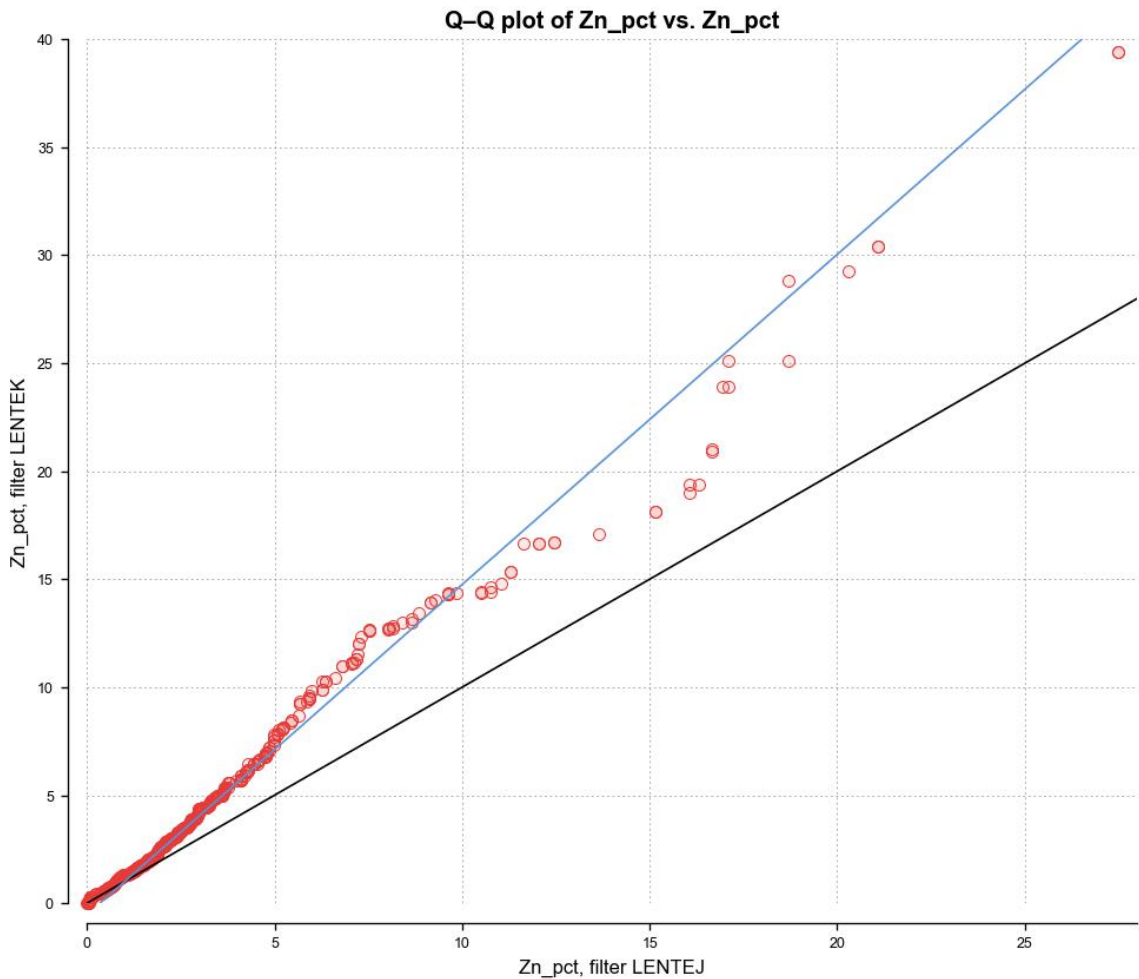


Figura 24 - Q-Q plot com quartis dos teores de zinco percentual para lentes J e K.

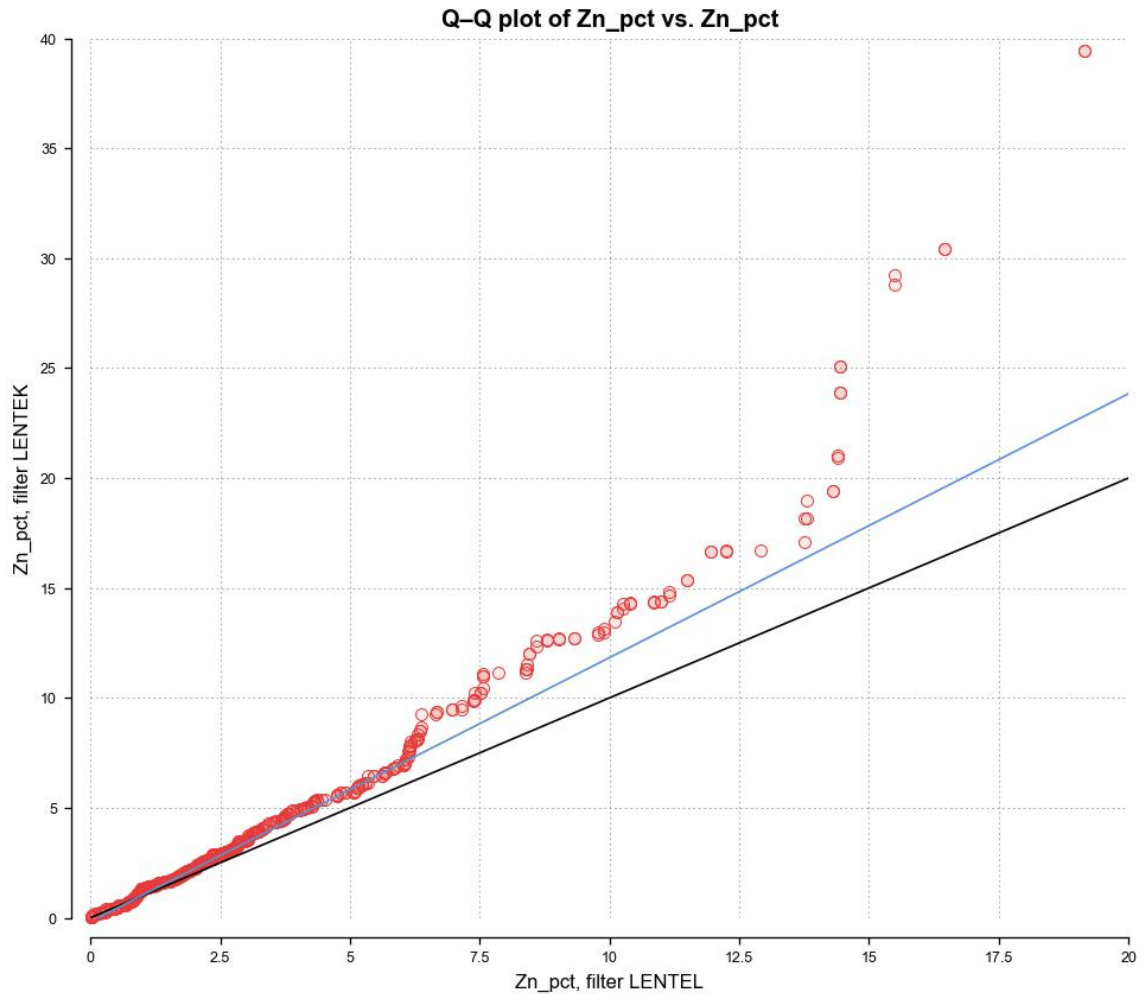


Figura 25 - Q-Q plot com quartis dos teores de zinco percentual das lentes L e K.

A estatística descritiva da população amostral de todas as três lentes (J, K e L), em conjunto, é resumida na Tabela 2. O gráfico de probabilidade cumulativa em escala logarítmica (“*log probability plot*”), plotado com a população amostral das três lentes foi gerado, conforme ilustra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e analisado para escolha do valor de *capping* para estimativa, em 14.20%.

A aplicação do *capping* é justificada como um método para assegurar que não haja sobre estimativa no modelo de blocos que será estimado, uma vez que a krigagem ordinária tende a se aproximar da média dos dados.

Uma média com a presença de outliers, como na população amostral ilustrada no histograma da figura X, torna-se mais elevada devido aos *outliers*. Através da limitação destes valores, igualando-os em um valor máximo de 14.20% (*capping*) este efeito é reduzido, assegurando uma estimativa mais próxima da média desagrupada.

Tabela 2 - Estatística descritiva da população amostral da variável zinco (%) para as lentes J, K e L.

Weighted Value	
Count	1031
Length	885.33
Mean	4.07
SD	4.31
CV	1.06
Variance	18.58
Minimum	0.00
Q1	1.66
Q2	2.64
Q3	4.82
Maximum	39.41

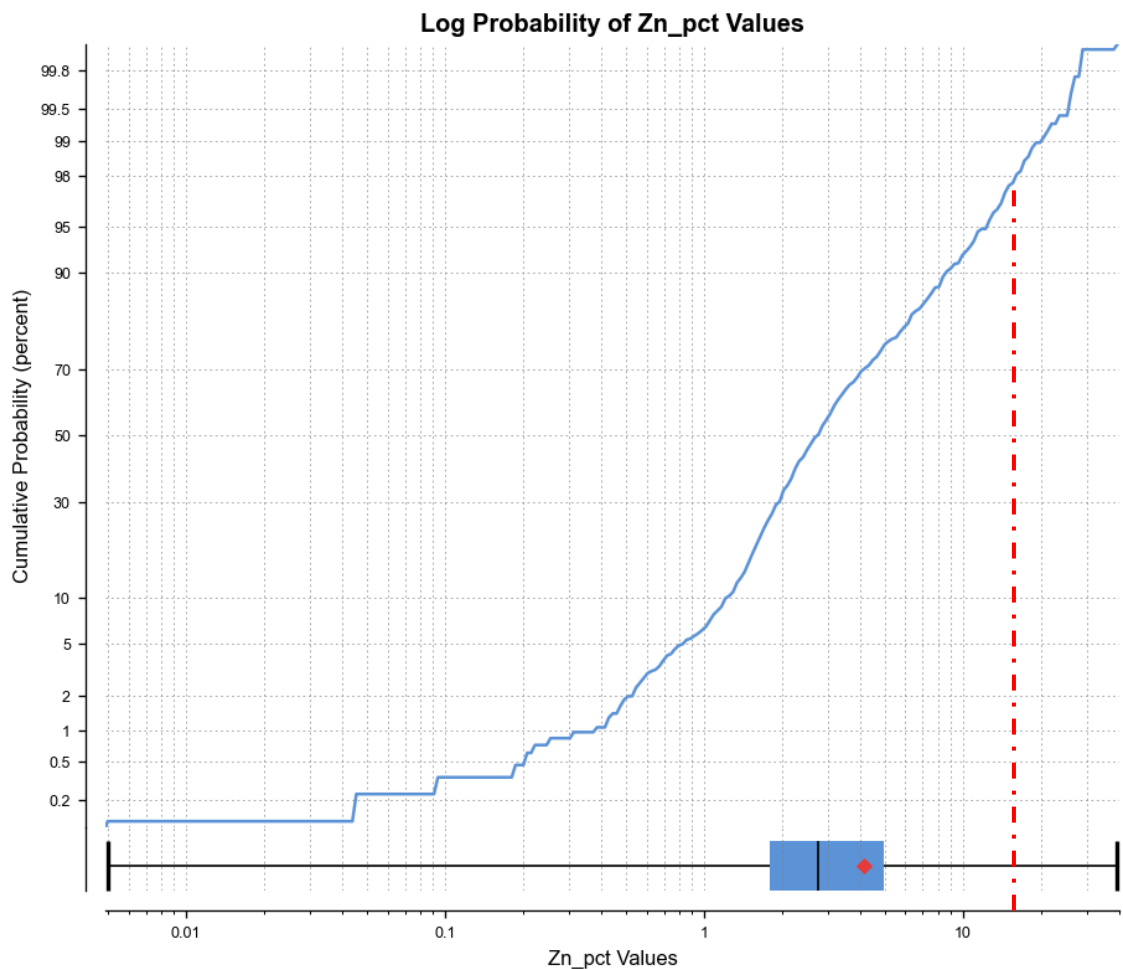


Figura 26 - Gráfico de probabilidade cumulativa logarítmica para variável zinco das lentes JKL. Com linha em vermelho representando teor de capping em 14.20%.

Além deste, também foi gerado o histograma da população amostral contida no volume sólido das três lentes (domínio de estimativa), conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde destacam-se valores anômalos da população amostral representando 3.35% da população.

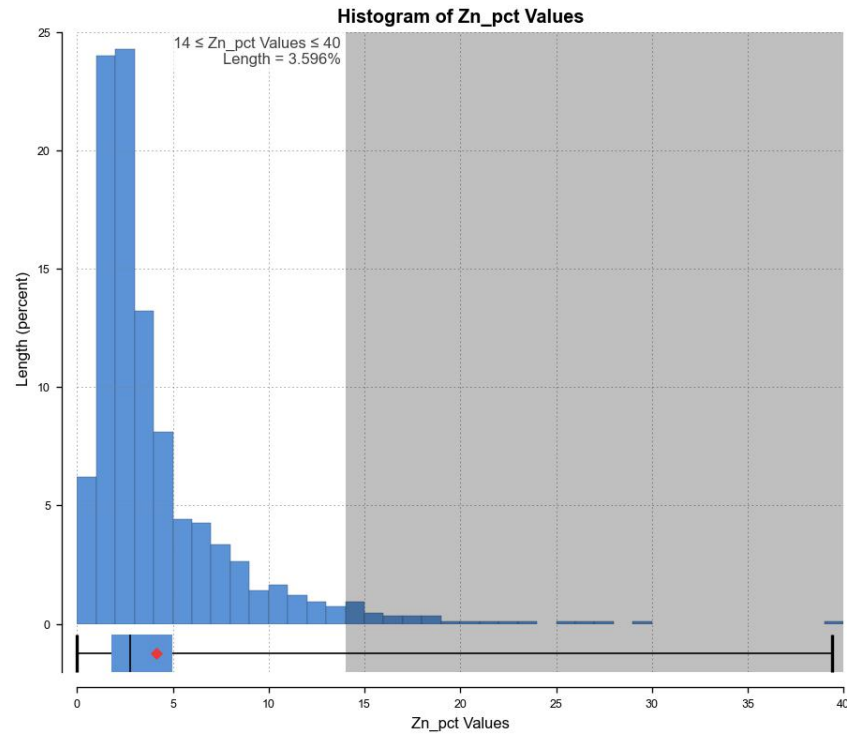


Figura 27 - Histograma para variável zinco das lentes JKL. Sombreamento engloba valores outliers.

Um gráfico comparando a população amostral do modelo de minério contra os a população amostral composta dentro volume sólido das lentes também foi gerado, conforme a Figura 28, e suas estatísticas descritivas são evidenciadas na Tabela 3.

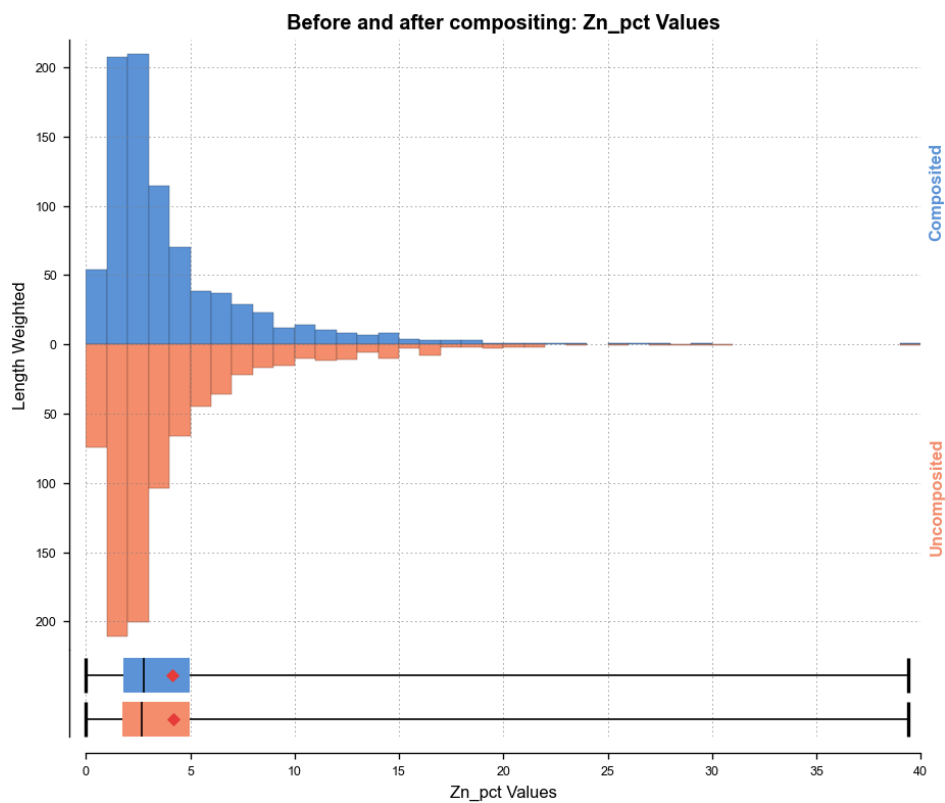


Figura 28 - Histogramas de comparação entre amostras compostas e não compostas.

Tabela 3 - Estatística descritiva das amostras compostas e não compostas.

	Composited	Uncomposited
Count	866	869
Length	864.2	869.6
Mean	4.15092	4.20417
SD	4.06178	4.31247
CV	0.978524	1.02576
Variance	16.498	18.5974
Minimum	0.0049796	0.0046
Q1	1.79084	1.765
Q2	2.76945	2.7
Q3	4.96705	4.99
Maximum	39.41	39.41

4.3. Variograma

O variograma experimental foi obtido através de testes empíricos, com melhor resultado em direção definida para o elipsóide de busca em $295/24^\circ$ (*dip/dip*), com *pitch* de 155.66° . O modelo variográfico é representado por um *lag* de 20 m com 4 metros de tolerância, tolerância angular de 22.5° e largura de banda de 20 metros. Um plot radial da variância é observado na Figura 29 para a direção principal e a direção perpendicular à principal (semi-principal).

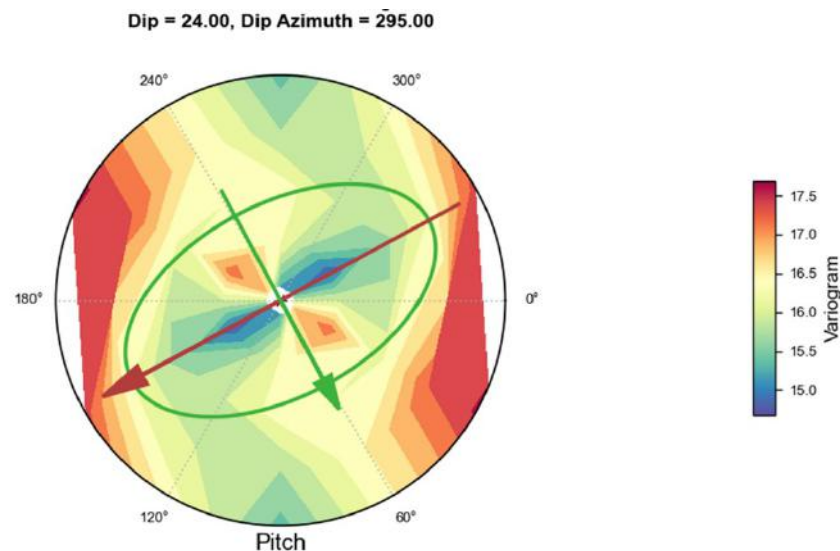


Figura 29 - Plot radial do variograma para o eixo principal de maior continuidade (seta vermelha) e secundário (seta verde). Mapa de cores está relacionado a variância.

As configurações usadas para o eixo de maior continuidade definido pelo *pitch* resultaram no modelo variográfico plotado conforme a Figura 30. O eixo semi-principal e de menor continuidade (ortogonal ao principal) são observados na Figura 31 e Figura 32, consecutivamente. O efeito pepita foi definido em 4.16 de acordo com o variograma *downhole*

(Figura 33). O resultado das estruturas implementadas nos variogramas são sumarizados na Tabela 4.

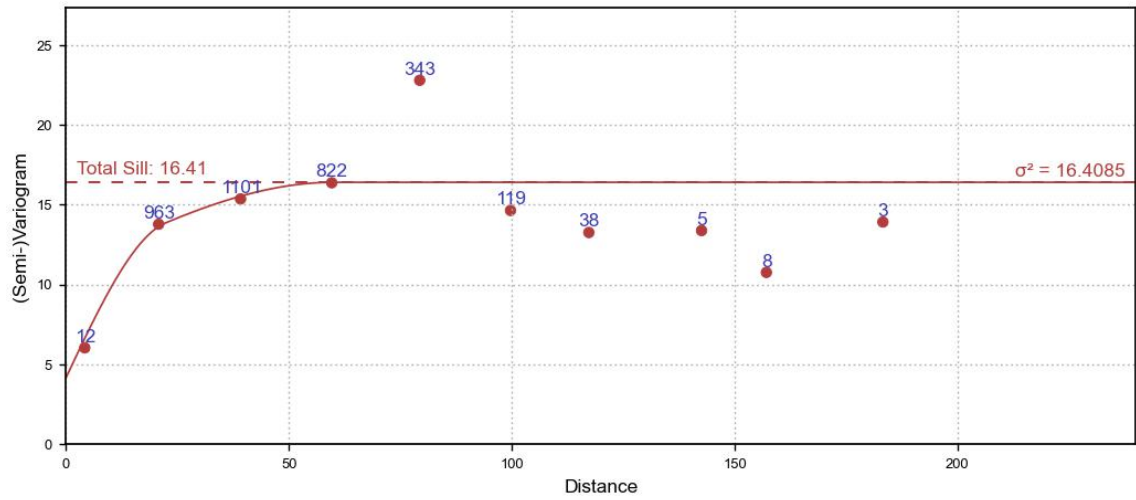


Figura 30 - Variograma modelado para a direção principal (maior continuidade) da variável zinco.

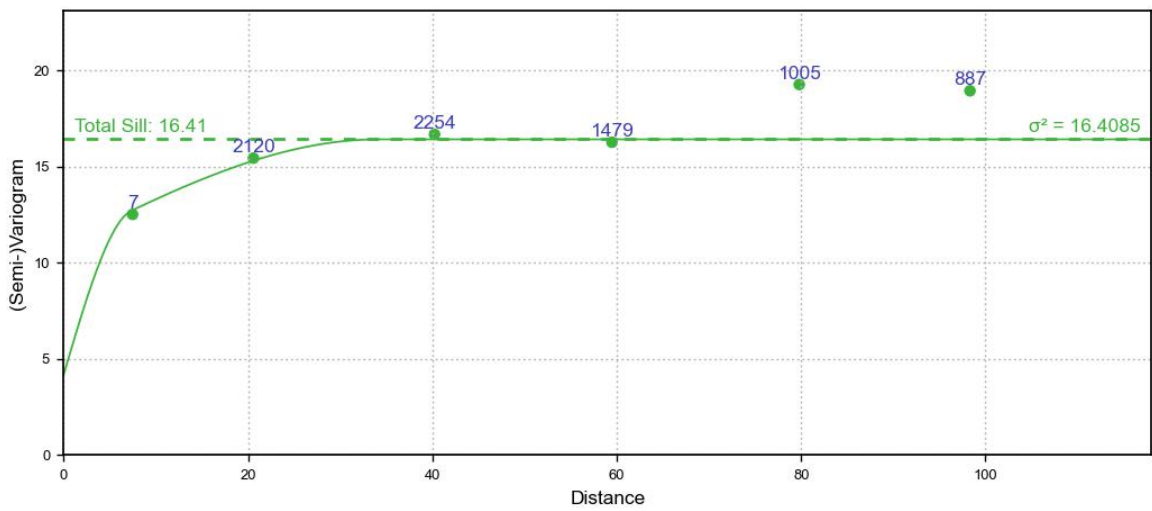


Figura 31 - Variograma para direção semi-principal (perpendicular ao pitch) da variável zinco.

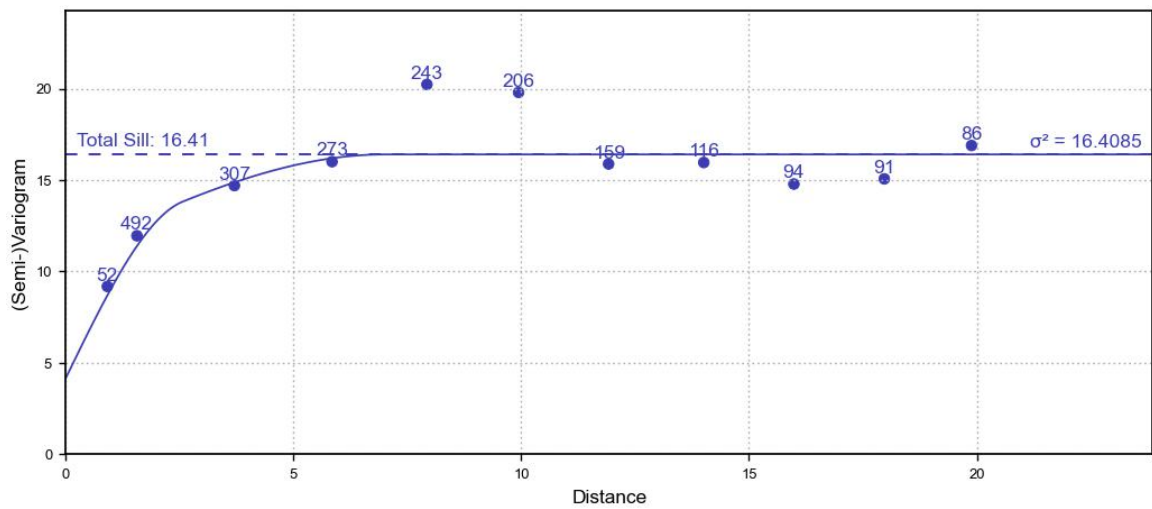


Figura 32 - Variograma para direção menor continuidade (ortogonal ao pitch) da variável zinco.

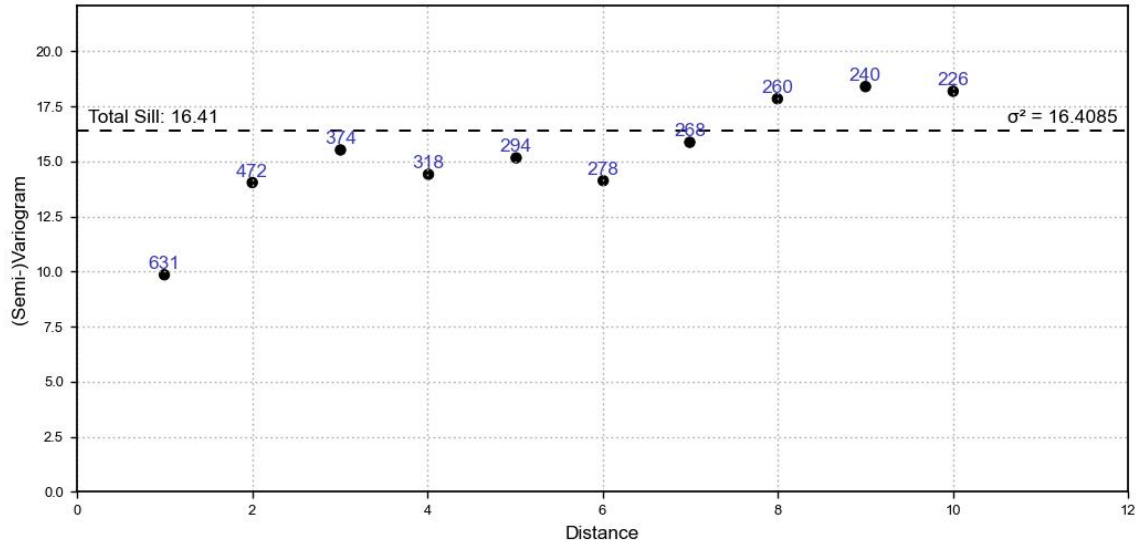


Figura 33 - Variograma downhole para variável zinco.

Tabela 4 - Estruturas do variograma modelado. Alcances máximos sumarizados no campo major, semi-major e minor.

	Sill	Normalised Sill	Type	Alpha	Major	Semi-major	Minor
Nugget:	4.1595	0.2535					
Structure 1:	6.8013	0.4145	Spherical	-	22.4	7.351	2.57
Structure 2:	5.4476	0.332	Spherical	-	60.0	34.08	7.0
Total sill:	16.4084	1.0					
Variance:	16.408465						

4.4. Krigagem e Modelo de Blocos

O tamanho dos blocos utilizados para estimativa em Morro Agudo é de 2.5x2.5x2.5 metros, padrão pré-definido pela geologia de mina de Morro Agudo. Sub-blocos que dividem o tamanho em até 4 vezes (até 0.625m) para adequar-se às bordas do modelo de minério, receberam o valor do bloco parental.

Para estimar todos os blocos foram necessárias 3 passadas. As passadas utilizadas na estimativa são sumarizadas na Tabela 5 de acordo com suas configurações de discretização, alcance do elipsóide de busca e parâmetros de busca aplicados. A anisotropia do elipsóide de busca é caracterizada pelo valor de 8.60 vezes (alcance maior/menor). A primeira passada representa 50% do alcance obtido no variograma aos eixos do elipsóide de busca, para as direções de máxima continuidade, intermediária e mínima (ver Tabela 4). A segunda passada, representa 100% e, a terceira, 200%. Estimando assim, todos os blocos.

Tabela 5 - Configurações da estimativa por krigagem ordinária e parâmetros de busca.

Passada	Discretização	Alcance do Elipsóide de Busca (m)			Parâmetros de Busca		
		Máximo	Intermediária	Mínima	Mín. de Amostras	Máx. Amostras	Máx. por Sondagem
1ª	4x4x4	30	17.04	3.5	4	12	3
2ª	4x4x4	60	34.08	7			
3ª	4x4x4	120	68.16	14			

O modelo de blocos com teores de zinco estimados por krigagem ordinária obtido para a região do Bloco E da Mina Morro Agudo através do presente trabalho é representado na Figura 34.

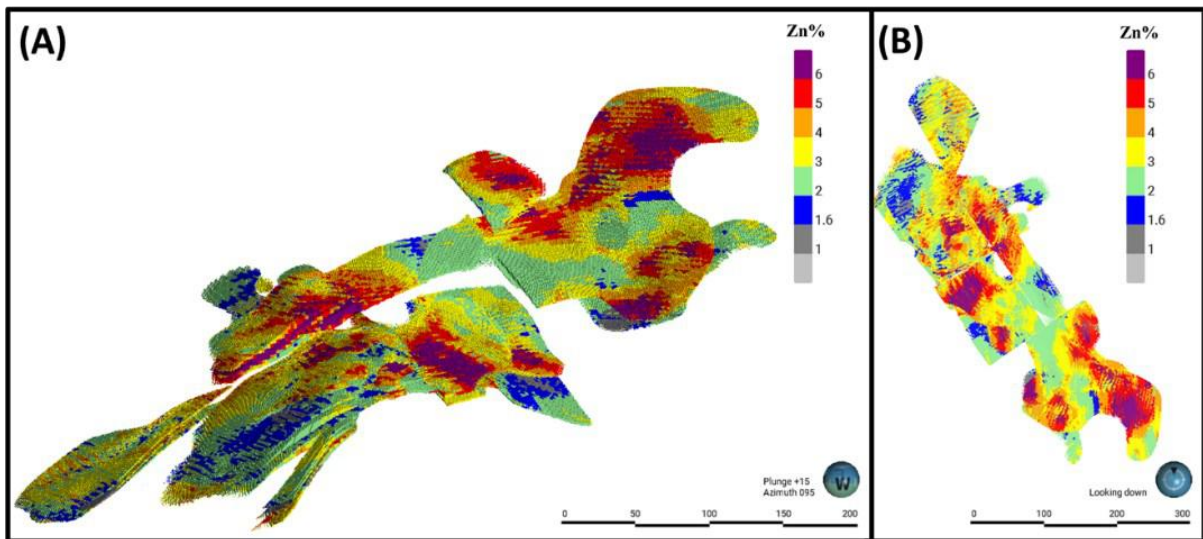


Figura 34 - (A) Visada de oeste para leste do Modelo de blocos do Bloco E da MMA com mapa de cores discreto representando teores de zinco estimados por krigagem ordinária. (B) Visada em planta do modelo de blocos do Bloco E da MMA com teores de zinco.

4.5. Validações da Estimativa e Metal Contido

Seções de validação do modelo de blocos evidenciam a comparação das estimativas com amostras compostas utilizadas na krigagem ordinária, conforme as Figura 35 e Figura 36.

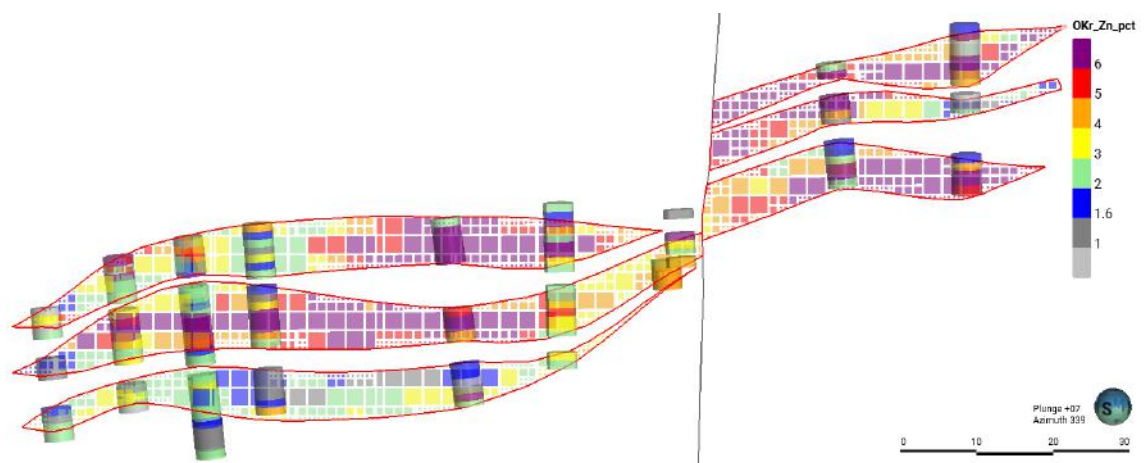


Figura 35 - Seção de validação com modelo de blocos estimado por krigagem ordinária, contorno de domínios de estimativa, e escala de cores com teores da variável zinco representados de acordo com a paleta à direita da imagem.

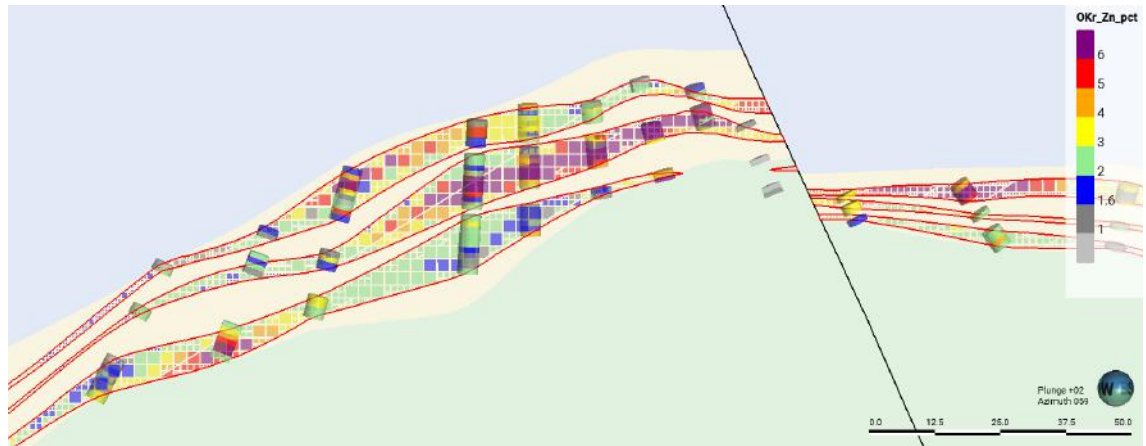


Figura 36 - Seção de validação com modelo de blocos estimado por krigagem ordinária, contorno de domínios de estimativa, e escala de cores com teores da variável zinco representados de acordo com a paleta à direita da imagem. Ao fundo, modelo litológico em transp

A estatística descritiva dos dados amostrais compositados e dados estimados por krigagem ordinária para os blocos são sumarizadas, consecutivamente na Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6 - Estatística descritiva da variável zinco para as amostras compostas usadas na estimativa

ID	Count	Length	Mean	Std. Dv.	CV	Variance	Min	L. Qtl	Median	U. Qtl	Max
Zn_pct (composited samples)	866	864.23	4.15	4.06	0.98	16.50	0.00	1.79	2.77	4.97	39.41

Tabela 7 - estatística descritiva da variável zinco estimada em cada bloco.

Block Count	Volume	Mean	SD	CV	Variance	Minimum	L. Qtl	Median	U. Qtl	Maximum
711958	385432.86	3.93	1.81	0.46	3.26	0.63	2.60	3.50	4.84	12.78

A estatística descritiva da krigagem ordinária e outros métodos de estimativa, como o inverso da distância ao quadrado (ID^2) e vizinho mais próximo (NN) é sumarizada na Tabela 8.

Tabela 8 - Estatística descritiva dos estimadores Vizinho mais próximo (NN), Inverso da distância ao quadrado (ID^2) e Krigagem ordinária (OKr).

ID	Block Count	Volume	Mean	Std. Dv.	CV	Variance	Min	L. Qtl	Median	U. Qtl	Max
NN, Zn_pct	711958	385432.86	3.91	3.29	0.84	10.83	0.00	1.76	2.69	4.92	14.20
ID^2 Zn_pct	711958	385432.86	4.00	2.00	0.50	4.01	0.29	2.56	3.45	4.94	13.92
OKr Zn_pct	711958	385432.86	3.93	1.81	0.46	3.26	0.63	2.60	3.50	4.84	12.78

A Figura 37 apresenta um histograma da população de valores estimados da variável zinco para cada bloco com a estatística descritiva sumarizada ao lado. Este pode ser comparado com o histograma presente na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Através do *Swath Plot* foi analisada a performance da estimativa de zinco para os diferentes estimadores utilizados para os três eixos dimensionais, X, Y e Z, com espaçamento de 12 vezes o tamanho do bloco (30 metros), apresentados respectivamente na Figura 38, Figura 39 e Figura 40.

As estimativas de metal contido para cada lente modelada são sumarizadas na Tabela 9. Através desta, é possível comparar a estimativa realizada através dos estimadores do inverso da distância ao quadrado e vizinho mais próximo com a krigagem ordinária.

A tonelagem total de minério estimada para o as lentes J, K e L do Bloco E da mina de Morro Agudo foi de 1.11M Ton, com 43.9K Ton de zinco contido através da krigagem ordinária. A Tabela 9 também sumariza o metal contido estimado para cada uma das lentes através dos outros estimadores.

A estatística descritiva das amostras compostas na Tabela 10 pode ser comparada para cada uma das lentes modeladas com seus teores e estatística sumarizados na Tabela 11, com os dados da krigagem ordinária.

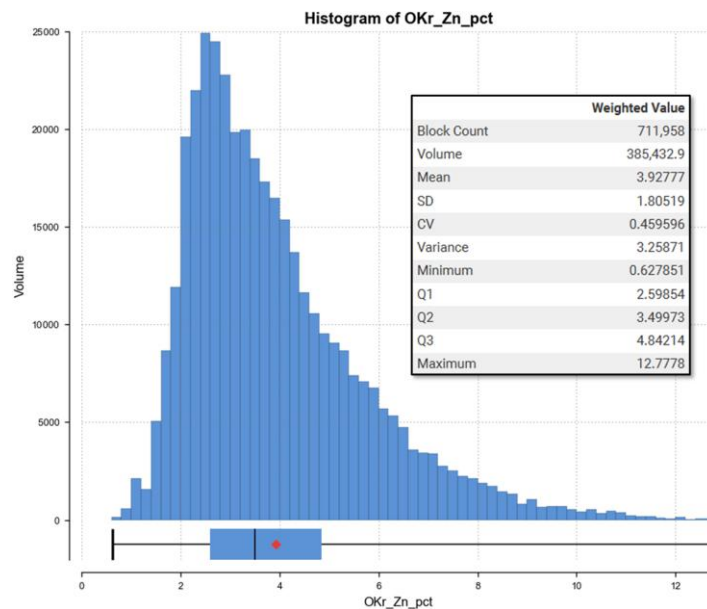


Figura 37 - Histograma para variável zinco estimada no modelo de blocos por krigagem ordinária.

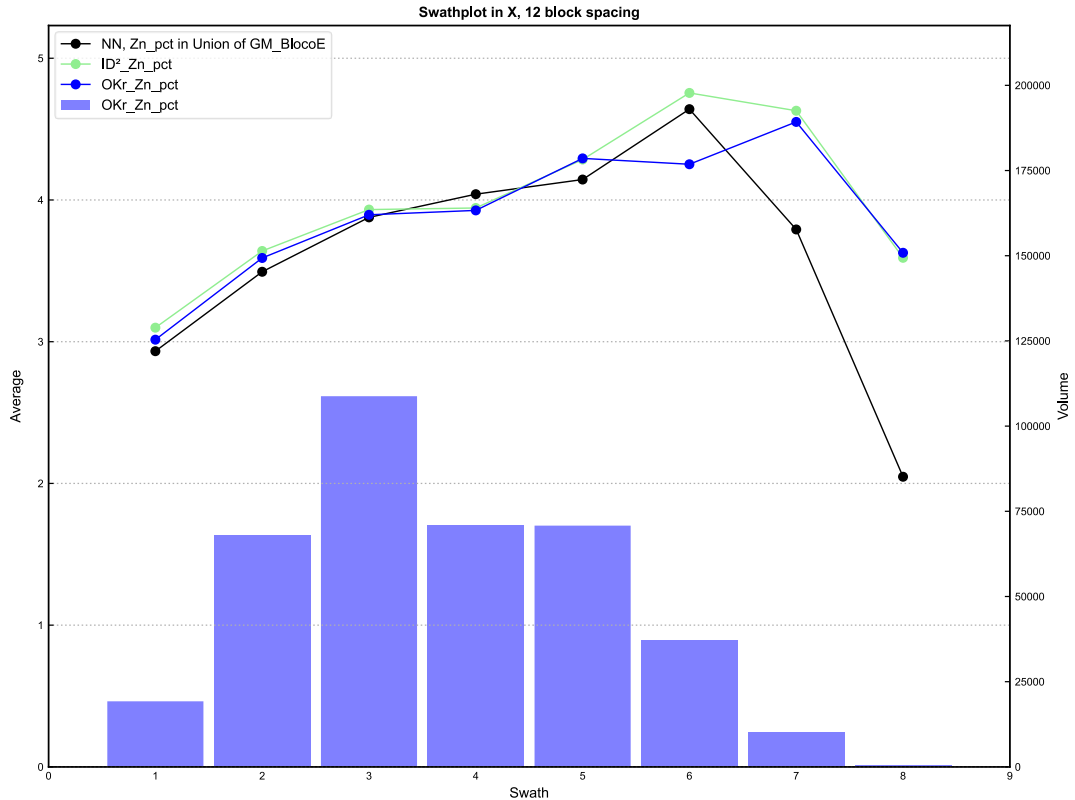


Figura 38 - Gráfico swathplot no eixo X, com espaçamento de blocos de 12 metros. Linha em preto teores estimados pelo NN, em verde ID² e em azul, OKr. Barras em azul representam o volume dos blocos agrupados.

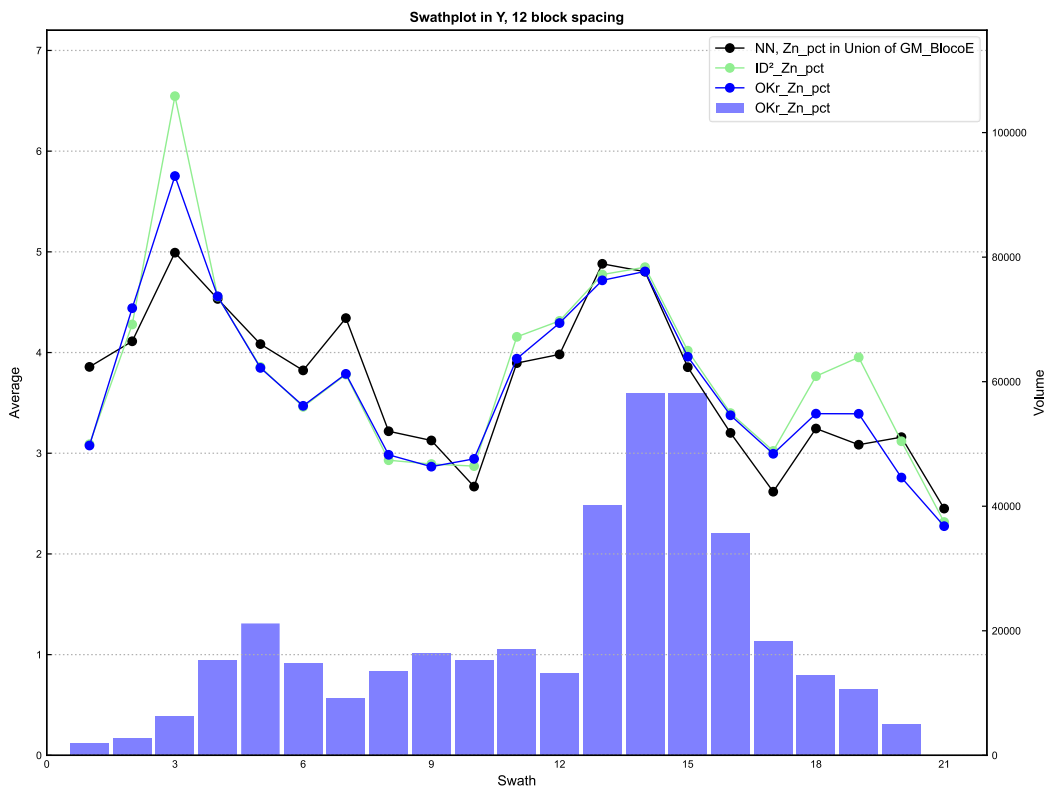


Figura 39 - Gráfico swathplot no eixo Y, com espaçamento de blocos de 12 metros. Linha em preto teores estimados pelo NN, em verde ID² e em azul, OKr. Barras em azul representam o volume dos blocos agrupados.

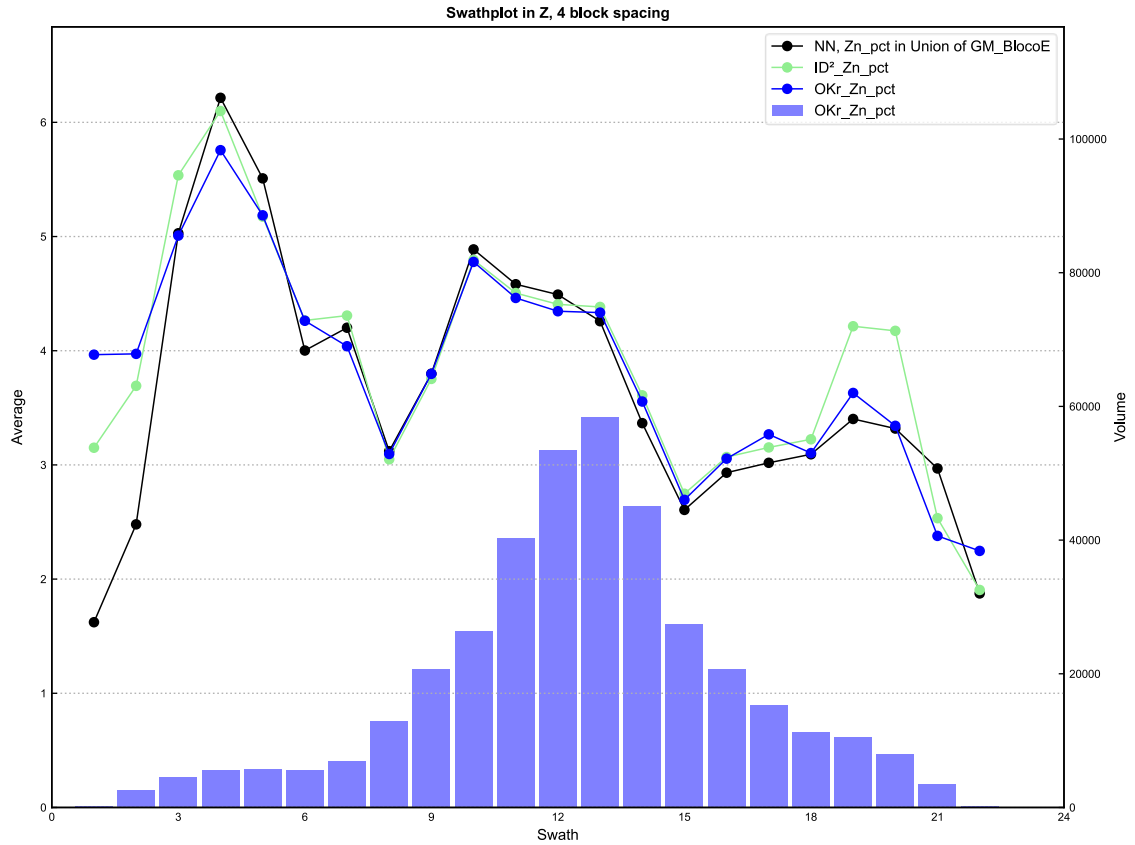


Figura 40 - Gráfico swathplot no eixo Z, com espaçamento de blocos de 12 metros. Linha em preto teores estimados pelo NN, em verde ID² e em azul, OKr. Barras em azul representam o volume dos blocos agrupados.

Tabela 9 - Teor médio e metal contido para os diferentes estimadores testados separados por domínio (lentes).

GM_BlocoE	Mass t	Average Value			Material Content		
		ID ² Zn %	NN, Zn_pct %	OKr_Zn_pct %	ID ² Zn t	NN, Zn_pct t	OKr_Zn_pct t
BL_E_L	295,480.69	4.07	3.86	4.01	12,039.56	11,403.98	11,855.71
BL_E_K	411,227.22	4.56	4.34	4.45	18,770.39	17,866.07	18,290.12
BL_E_J	411,043.85	3.39	3.51	3.35	13,936.85	14,440.10	13,756.91
Total:	1,117,751.76	4.00	3.91	3.93	44,746.80	43,710.15	43,902.74

Tabela 10 – Estatística descritiva das amostras compostas de cada lente.

ID	Count	Length	Mean	Std. Dv.	CV	Variance	Min	L. Qtl	Median	U. Qtl	Max
BL E L											
Zn composite:	331	256.32	4.02	3.23	0.80	10.43	0.09	1.76	2.94	5.63	19.15
BL E K											
Zn composite:	548	307.06	4.81	4.68	0.97	21.94	0.00	2.03	3.11	5.92	39.41
BL E J											
Zn composite:	543	300.85	3.37	3.14	0.93	9.88	0.05	1.63	2.34	3.93	27.50

Tabela 11 - Estatística descritiva da população estimada por krigagem ordinária do modelo de blocos das lentes J, K e L na região do Bloco E da mina MMA.

ID	Block Count	Volume	Mean	Std. Dv.	CV	Variance	Min	L. Qtl	Median	U. Qtl	Max
BL_E_L_OKr_Zn_pct	168750	101889.89	4.01	1.53	0.38	2.34	0.98	2.88	3.75	4.90	11.53
BL_E_K_OKr_Zn_pct	267293	141802.49	4.45	1.95	0.44	3.81	0.67	2.84	4.09	5.71	12.74
BL_E_J_OKr_Zn_pct	275910	141739.26	3.35	1.66	0.50	2.76	0.63	2.32	2.93	3.89	12.78

5. Discussões

5.1. Modelagem

5.1.1. Modelos Geológico

O modelo produzido está em concordância com as descrições litológicas de testemunhos produzidas pela equipe de geologia de mina da Nexa Resources S.A. em Morro Agudo, e com modelos de trabalhos mais recentes que revisam a estratigrafia e metalogênese do depósito (Neves, 2011; Cordeiro *et al.* 2018; Cezar, 2022).

Apesar de boa aderência do modelo com os contatos obtidos através dos furos de sondagem, incertezas inerentes à escala do depósito são esperadas, tanto por conta do contato gradacional entre a litologia BDOL e DAR (Neves, 2011), quanto por falhas de escala local (Ferreira, 2000), assim como pela malha de sondagem existente.

A Figura 41 apresenta ilustrações de cenários prováveis baseados no contexto de Morro Agudo, onde é considerada a incerteza inerente a escala do depósito.

A Figura 41.A representa uma seção geológica ilustrativa, com estruturas comumente observadas no depósito de Morro Agudo. Enquanto o cenário demonstrado na Figura 41.B, ilustra o desenvolvimento de galerias subterrâneas para sondagem, associado à campanha de sondagem com uma malha regularmente espaçada.

A interseção de intervalos mineralizados no contexto *underground*, como na Figura 41.B pode ocasionar erros de interpretação devido a espessuras aparentes, e principalmente, estruturas geológicas. Na ilustração da Figura 41.B é possível notar a geração de um modelo gerado de forma implícita, sem interpretação geológicas e edição por modelamento explícito. Nota-se que o modelo interpolado em B não reproduz a realidade da escala do depósito, além de poder ocasionar em estruturas de dobra, não observadas no dolarenito de MMA. Por esta razão, o modelamento determinístico misto é mais adequado.

Apesar das falhas se projetarem na 430GPS na ilustração da Figura 41.B, nem sempre é possível observá-las em campo, uma vez que muitas falhas são de extensão local. Além disso, a SAD é um litotipo de reologia dúctil, sendo a única rocha do depósito que preserva estruturas deformacionais, com dobras de escala métrica observáveis (Ferreira, 2000). Questões relacionadas à segurança geomecânica, impedem mapeamento na unidade, que é completamente atelada e atirantada por conta do risco de deslocamento associado à sua foliação.

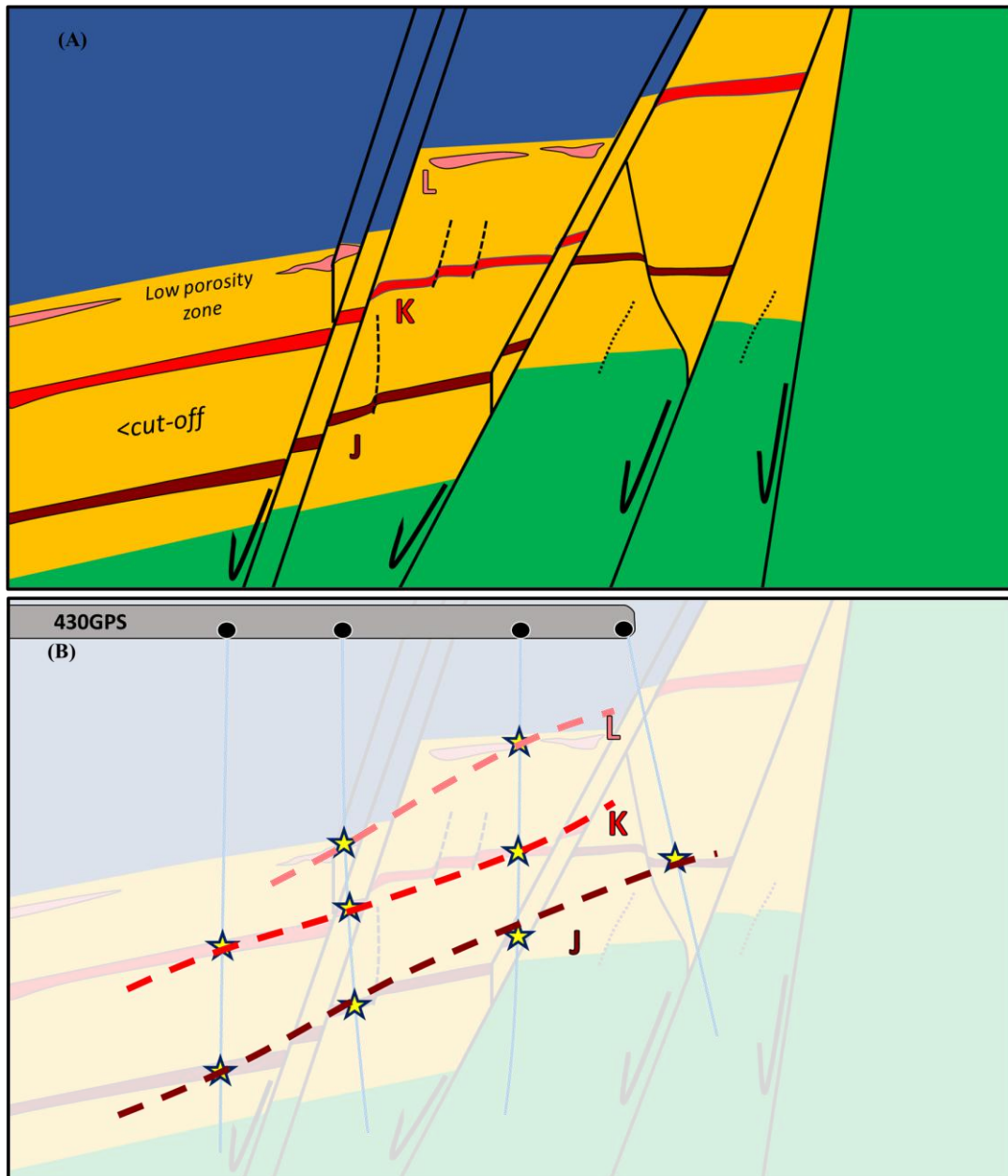


Figura 41 - (A) Seção geológica ilustrativa representando a escala real do depósito, na qual diferentes cores identificam as lentes J, K e L. (B) Sondagens de galerias subterrâneas em malha regular intersectam a mineralização na seção ilustrada (estrelas). Contornos pontilhados representam possível modelo implícito errático, sem adição de estruturas e edição por parte do geólogo.

5.1.2. Falhas Modeladas

Diversas estruturas rúpteis de Morro Agudo são de difícil representação no modelo. Em escala local, estruturas observadas em galerias subterrâneas são relacionadas a zonas de falhas e apresentam falhas secundárias e fraturas subordinadas (Ferreira, 2000).

Como nem toda galeria subterrânea intersecta essas estruturas, a maioria das falhas não são mapeáveis até que se iniciem as operações de lavra que sigam a mineralização.

A implementação de planos de falha através da análise de seções geológicas com informações de sondagens foi uma alternativa para reprodução de planos hipotéticos que tentam emular estas famílias de falhas. Havendo, portanto, uma incerteza associada.

A adição das falhas interpretadas é relevante para impedir erros no planejamento de lavra. A ilustração elaborada na Figura 42 demonstra o efeito causado por interseções de minério (estrelas) no contexto estratigráfico do depósito. O uso do modelo de minério interpolado automaticamente (linha pontilhada vermelha), sem edição manual de superfícies e implementação de falhas, ocasiona em dobras não registradas no depósito de Morro Agudo para a rocha hospedeira.

O modelo automático representado em vermelho na Figura 42 ocasionaria em erro no planejamento de lavra pelo método de *sublevel stope* utilizado em Morro Agudo (representado pelo volume roxo em contorno amarelo), aumentando o risco de desmonte de estéril e seu processamento na planta de beneficiamento.

A interpretação destas estruturas no modelo, portanto, auxiliam a diminuir incertezas e riscos para operação de lavra da mina, mesmo em cenários onde não haja galerias subterrâneas que intersecte esses planos.

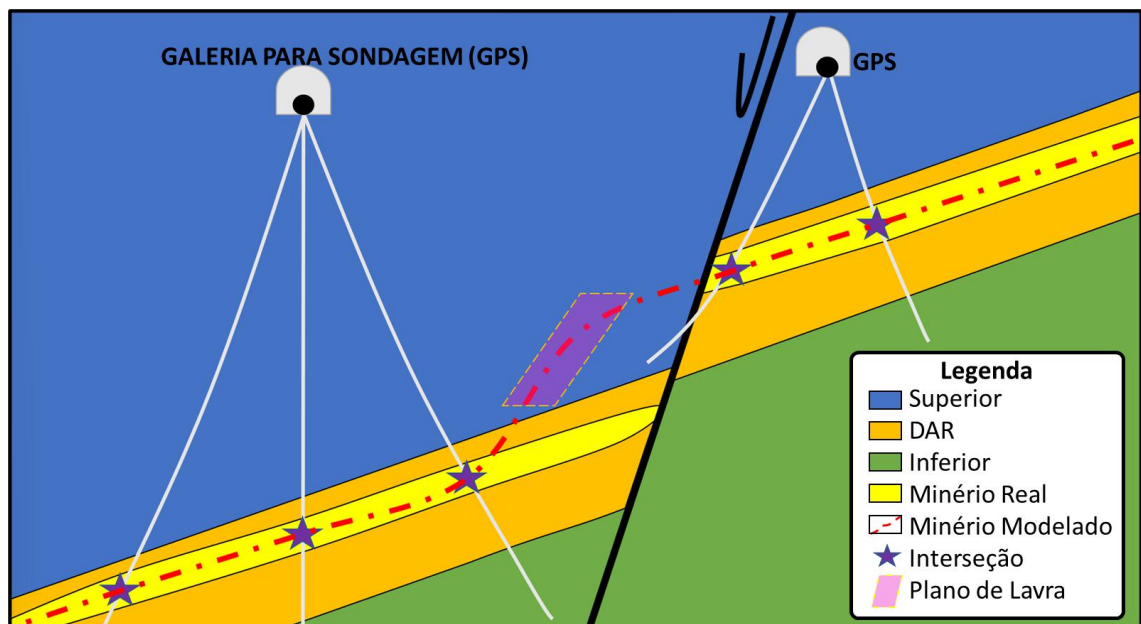


Figura 42 - Ilustração do efeito da ausência de falhas no modelo de minério para o planejamento de lavra. Contorno rosa em transparência exemplifica um *stope* planejado no estéril devido à dobra hipotética representada no modelo.

5.1.3. Modelo de Minério

O modelo de minério gerado no presente trabalho tenta reproduzir a concentração dos altos teores inseridos na camada de dolarenito.

A geometria gerada na forma de lentes não condiz com o fenômeno de precipitação do fluido hidrotermal, que é controlado pela porosidade primária da rocha hospedeira (Neves, 2011). Mas delimita zonas de concentração de teores econômicos nesta litologia. Sendo, portanto, uma reprodução econômica do fenômeno geológico com continuidade espacial bem definida.

5.2. EDA

Nota-se na análise descritiva dos dados (Tabela 1) uma quantidade maior de amostras e maior média para o domínio Lente K em relação às lentes J e L.

A Tabela 1 evidenciou valores similares para o coeficiente de variação (CV) da variável zinco, considerando a população amostral das lentes de minério J, K e L. Com CV igual a 1.06 para lente J, 1.09 para lente K e 0.90 para lente L.

Este parâmetro evidencia variabilidade semelhante para os dados dos três domínios modelados, o que sugere pertencimento destas amostras a um único domínio de mesma população amostral, o dolarenito (rocha hospedeira).

Essa hipótese também é corroborada pelo processo metalogenético associado a formação do depósito. Uma vez que o mesmo processo hidrotermal gerou simultaneamente a mineralização da rocha hospedeira nos três domínios de estimativa (lentes) modelados (Cordeiro *et al.*, 2018).

Como teste para similitude das populações amostrais das lentes de minério, os Q-Q plots confirmaram uma relação próxima a linearidade ao analisar os quartis da lente J contra os quartis da lente K (Figura 24), e os quartis da lente K com os quartis da lente L (Figura 25).

Na Figura 22, nota-se uma relação aproximadamente linear entre os quartis até ~15% do teor zinco na lente K.

Os teores de zinco são maiores na população de K (Tabela 1), além de haverem mais amostras nesta lente. Fato que explica a perda desta linearidade à medida que os teores aumentam, uma vez os quartis superiores tendem a apresentar mais valores anômalos da variável zinco.

Na Figura 23, um comportamento semelhante é observado entre os quartis da variável zinco para as lentes K e L. A perda da linearidade entre as populações das duas lentes também pode ser atribuída à maior quantidade amostral da lente K e aos valores anômalos das amostras de zinco.

A etapa de análise exploratória dos dados indica que a análise variográfica para processo de estimativa por krigagem ordinária não precisa ser realizada separadamente, para cada uma

das lentes. Mas em conjunto, uma vez que o CV, o Q-Q *plot* e, mais importante, a geologia, sugerem que as amostras pertencem a mesma população.

Ao gerar o gráfico de *probability plot* com amostras pertencentes aos três domínios de estimativa (JKL), conforme a Figura 24 foi possível notar quebras na distribuição para a população anômala, representada no histograma da Figura 25. Através desta análise obteve-se o *capping*, no valor de 14.20%.

Por fim, as amostras compostas não apresentaram variação significativa em relação aos dados originais, como nota-se através das estatísticas descritivas observadas na Tabela 3.

5.3. Estimativa e Validações

A revisão visual dos teores estimados assegura que não há resultados inesperados ou erráticos, em termos da distribuição espacial de teores associados às amostras, conforme observado na Figura 35 e Figura 36.

A estatística descritiva dos dados amostrais (Tabela 6) quando comparadas aos dados estimados por krigagem ordinária (Tabela 7) apresentaram valores próximos e dentro do esperado, sem variações de grande magnitude nos parâmetros estatísticos.

As mudanças em termos da mediana, quartil inferior e quartil superior podem ser atribuídas ao efeito esperado da krigagem, de suavizar a população amostral estimada em torno da média (Abzalov, 2016). Valores mínimos da estimativa tendem a ser sobrestimados, uma vez que a maioria das amostras do domínio de estimativa são de teores acima do *cut-off*.

O valor máximo da estimativa por krigagem ordinária é menor, conforme esperado, uma vez que o *capping* foi aplicado para evitar que os teores anômalos influenciassem a média e sobrestimassem a mineralização modelada.

A comparação entre estatísticas descritivas para os diferentes estimadores conforme a Tabela 8, evidencia boa aderência destes em relação à média.

Ao comparar o histograma produzido pela estimativa através da krigagem ordinária (Figura 37) com o histograma das amostras usadas na estimativa (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), nota-se uma boa reprodução dos dados no modelo estimado, sem distorções nas estatísticas ou geração de novas populações.

Apesar dos estimadores do ID² e NN, analisados à fim de comparação, produzirem média próxima da krigagem ordinária. Estes estimadores também produzem artefatos, efeitos puramente matemáticos (ruídos) produzidos na estimativa. Gerados por conta da fórmula matemática associada aos estimadores ID² e NN, estes artefatos resultam em ondulações irreais que não representam o fenômeno geológico, diferente da krigagem ordinária.

Os *swathplots* apresentam um comportamento aproximado dos estimadores ao longo dos eixos plotados. A krigagem apresentou-se como estimador menos influenciado por teores anômalos e de baixo teor, apresentando melhor reprodução das médias locais e globais, portanto, mais adequado para planejamento de lavra. Também se evidencia a proximidade dos teores estimados para as zonas de maior volume do modelo de blocos, que são as áreas com sondagem mais adensada.

Os diferentes estimadores reproduziram quantidades aproximadas em termos de metal contido. Nota-se, através da Tabela 10 e da Tabela 11 a proximidade teor médio das amostras compostas pertencentes a cada uma das lentes com o teor médio estimado através da krigagem ordinária de blocos. Evidencia-se assim a importância do uso da krigagem ordinária devido a melhor reprodução da anisotropia.

Por fim, através da observação de um filtro no modelo de blocos gerado para observação de high grades, conforme a Figura 43, é possível notar a tendência de concentração dos maiores teores próximos às zonas de falha modeladas.

Esta propriedade está em concordância com o modelo metalogenético de Morro Agudo, no qual falhas funcionam como conduto para o fluido hidrotermal que se concentra no dolarenito, devido à alta porosidade da rocha no tempo de formação do depósito (Cordeiro *et al.*, 2018).

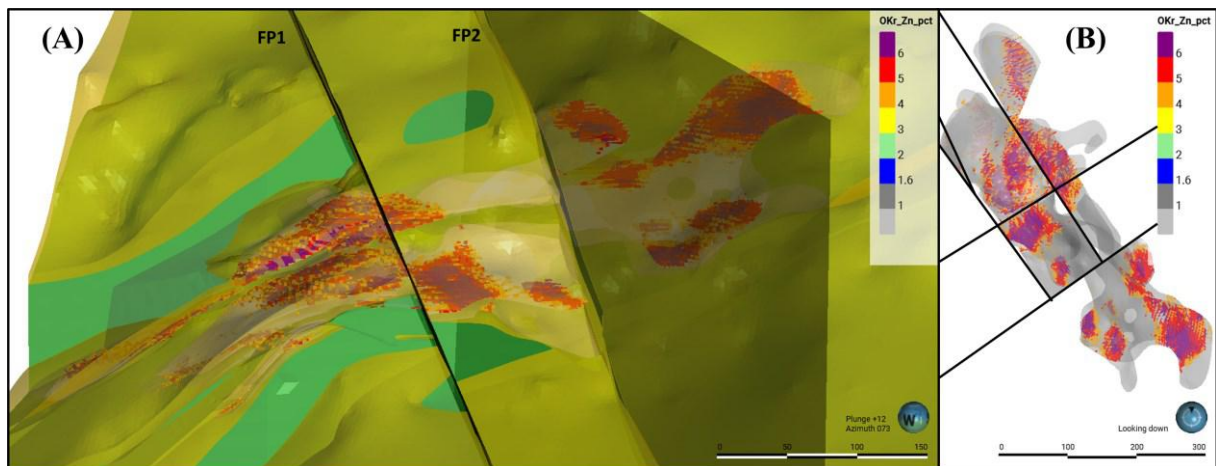


Figura 43 - (A) Visada das unidades geológicas modeladas e blocos de alto teor de zinco estimados por krigagem ordinária (cores quentes). Altos teores na área do Bloco E concentram-se próximos das falhas interpretadas. (B) Visada em planta de planos de falha, volume do modelo de minério em transparência (cinza) e localização dos altos teores (amarelo, vermelho e roxo) no modelo de blocos estimado.

6. Conclusão

O processo integrado de modelamento e estimativa de recursos na região do Bloco E da mina Morro Agudo apresentou bons resultados em termos de validação.

O processo de modelamento com implementação de estruturas geológicas aumenta a previsibilidade dos resultados de novas campanhas de sondagens para adição de recurso e entendimento de áreas de potencial exploratório, além de evitar fatores de risco, como erros de geometria da rocha hospedeira e modelo de minério, que ocasionavam em diluição no teor planejado e impactos na planta de beneficiamento.

O modelo geológico e de minério gerados com estruturas de falha reduz incertezas para o planejamento de lavra no contexto da malha de sondagem disponível, atendendo ao objetivo definido.

Apesar de uma malha de sondagem mais adensada ser recomendada para detalhamento de estruturas e maior aderência à geologia local, a escala de detalhamento atual atende o método de lavra utilizado.

O processo de estimativa através do modelo de minério gerado pelas três lentes que concentram teores de zinco econômicos, reconhecidos pela equipe de geologia de mina de Morro Agudo, dá suporte ao reconhecimento de zonas de concentração de sulfetos na principal rocha hospedeira do depósito e foi capaz de demonstrar a variabilidade dos teores no espaço e zonas de maior espessura, em acordo com a malha amostral disponibilizada e a variabilidade à priori dos dados.

O modelo estimado dará suporte, através da técnica aplicada, no posicionamento de *stopes* para o sequenciamento de lavra da mina, priorizando a operação de lavra em zonas de maior teor e detalhando a espessura e tonelagem esperada para os corpos de minério com base nas informações geológicas disponíveis.

Além do objetivo inicial, novas áreas com potencial exploratório para sondagem também podem ser identificadas, evidenciando oportunidades de extensão do corpo de minério em região com poucas sondagens.

7. REFERÊNCIAS

- Abzalov, M. Applied Mining Geology. 2016. [S. 1.]: Springer International Publishing. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-39264-6>.
- Aldis, C., Olivo, G. R., Morfin, S. 2022. LA-ICP-MS Trace Element Composition of Sphalerite and Galena of the Proterozoic Carbonate-Hosted Morro Agudo Zn-Pb Sulfide District, Brazil: Insights into Ore Genesis. Minerals. [S.1.], MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/min12081028>.
- Alkmim, F. F., & Teixeira, W. 2017. The Paleoproterozoic mineiro belt and the Quadrilátero Ferrífero. In São Francisco Craton, eastern Brazil: tectonic genealogy of a miniature continent. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg
- Almeida, F. F. M. de, Hasui, Yf., Brito-Neves, B. B de, Fuck, R. A. (1981). Brazilian Structural Provinces: an introduction. Earth-Sci. Rev., 17: 1-29.
- Andrade, M. M. P. 24 dez 2022. Classificação de recursos minerais por meio de simulação condicional e intervalo de confiança da média aplicada ao sulfeto disseminado do corpo de minério Sequeirinho, depósito Sossego, Província Mineral de Carajás. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44137/tde-10102019-142319/>.
- Azmy, K., Kendall, B., Creaser, R. A. 2008. Global correlation of the Vazante Group, São Francisco Basin, Brazil: Re–Os and U–Pb radiometric age constraints. Precambrian Research. [S.1.], Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2008.05.001>
- Baia, F.H., 2013. Brechas hidrotermais da mina do Cercado e das ocorrências Olho D'Água, Mata II, e Pamplona: Implicações metalogenéticas e prospectivas para zinco na região de Vazante, MG. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, 230p.
- Batista, J.D., 2015. Análise comparativa entre métodos de modelamento geológico. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Mineração) - Universidade Federal do Pampa.
- Borradaile, G. Statistics of Earth Science Data. [S.1.], Springer Berlin Heidelberg, 2003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-05223-5>.
- Brito Neves, B. B., Teixeira, W., Tassinari, C. C. G., Kawashita, K. 1990. A contribution to the subdivision of Precambrian on South America. Revista Brasileira de Geociências, 20: 267-276.

- Caixeta, R. M. 2020. Contribuições Para O Uso De Anisotropias Locais Na Geoestatística. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Carvalho, D. "Probabilistic Resource Modeling of Vein Deposits", University of Alberta Libraries, 2018. DOI: 10.7939/R3MW28W7H. Disponível em: <https://era.library.ualberta.ca/items/d0caf577-86f4-46b2-8bbe-5a12e502add7>.
- Cevik, I.S., Olivo, G.R., Ortiz, J.M. 2021. A combined multivariate approach analyzing geochemical data for knowledge discovery: The Vazante-Paracatu Zinc District, Minas Gerais, Brazil. *J. Geochem. Expl.*, v. 221, 106696.
- Cézar, T. M., 2022. Mapeamento geológico do bloco F da Mina Underground Zn-Pb de Morro Agudo, Grupo Vazante – MG. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.
- Cordeiro, P.F.O., Oliveira, C.G., Paniago, L.N., Romagna, G., Santos, R.V. 2018. The carbonate-hosted MVT Morro Agudo Zn-Pb deposit, central Brazil. *Ore Geol. Rev.*, v. 101, p. 437-452.
- Costa, L.A.M. & Angeiras, A.G. 1971. Geosynclinal Evolution in the Epi-Baikalian Platform of Central Brazil. *Geol. Rund.* 60(2): 1024-1050.
- Cowan, Mark W., Richard K. Beatson, Heather J. Ross, W. Richard Fright, T. J. McLennan, Tim R. Evans, Jonathan C. Carr, Richard G. Lane, Damien Bright, Adrianna Gillman, Peter Oshust and Martin Titley. "Practical Implicit Geological Modelling." (2003).
- Cunha, I. de A.; Coelho, C. E. S.; Misi, A. 2000. Fluid inclusion study of the Morro Agudo Pb-Zn deposit, Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 2, p. 318 – 321.
- Dardenne, M. A. 1978. Geologia da região de Morro Agudo (Minas Gerais). SBG, Centro-Oeste, *Bol. Inform.*, 7:68-84.
- Dardenne, M. A., Freitas-Silva F.H., Souza, J.C.F., Campos, J.E.G. 1998. Evolução tectono-sedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília. XXXX Congresso Brasileiro de Geologia. Resumos, p. 26. Belo Horizonte: SBG.
- Dardenne, M. A., Freitas-Silva, F.H. 1999. Pb-Zn ore deposits of the Bambuí and Vazante Groups. In: São Francisco and Brasília Fold Belt, in da Glória da Silva, M., and Misi, A., eds., *Base Metal Deposits of Brazil* Salvador: Belo Horizonte, MME/CPRM/DNPM, p. 75-83

- Dardenne M. A. 2000. The Brasilia fold belt. In: U.G. Cordani, E. G. Milani, A. Thomaz Filho e D.A. Campos (eds.), Tectonic evolution of South America, p. 231-263.
- Fernandes, N. A., Olivo, G. R., Layton-Matthews, D. 2019a. Siliciclastic-hosted zinc mineralization in the Proterozoic Vazante-Paracatu District, Brazil: Implications for metallogeny and sources of metals in sediment-hosted base metal systems. *Ore Geol. Rev.*, v. 114, p. 103139.
- Fernandes, N. A., Olivo, G. R., Layton-Matthews, D., Voinot, A., Chipley, D., Diniz-Oliveira, G., 2019b. Geochemistry and provenance of siliciclastic rocks from the Mesoproterozoic Upper Vazante Sequence, Brazil: Insights on the evolution of the southwestern margin of the São Francisco Craton and the Columbia Supercontinent. *Precambrian Res.*, v. 335, 105483.
- Ferreira, M. dos S. F., 2000. Deformação e mineralização de zn-pb da mina Morro Agudo, Paracatu, MG. Trabalho de conclusão de curso. Instituto de Geociências, UFRJ.
- Fuck, R. A.; Pimentel, M. M.; Soares, J. E. P.; Dantas, E. L. 2005. Compartimentação da faixa Brasília. IX Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, 26-27. Goiânia: SBG.
- Gringarten, E., Deutsch, C. V. *Teacher's Aide Variogram Interpretation and Modeling – Mathematical Geology*. [S.l.], Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1011093014141>, 2001
- Hasui, Y., Carneiro, C. D. R., de Almeida, F. F. M., & Bartorelli, A. (Eds.). (2012). *Geologia do Brasil*. Beca.
- Isaaks, E.H. and Srivastava, R.M. (1989) *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, 413.
- Kikuda, A. T. 2022. Uso da função distância na modelagem geométrica de corpos de minério e proposta da distância estratigráfica aplicada ao cálculo de variogramas experimentais. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. doi:10.11606/T.44.2022.tde-18112022-095005. Acesso em: 2022-12-26.
- Koch, G. S., Link, R. F. *The coefficient of variation; a guide to the sampling of ore deposits*. *Economic Geology*. [S.l.], Society of Economic Geologists. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.66.2.293>. , 1 abr. 1971
- Marini, O. J.; Fuck, R. A.; Danni, J. C.; Dardenne M. A. 1981. A evolução geotectônica da Faixa Brasília e de seu embasamento. In: CPM/SBG, Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais, Salvador, Anais, 100-115.

- MARTIN, Ryan; BOISVERT, Jeff. Towards justifying unsupervised stationary decisions for geostatistical modeling: Ensemble spatial and multivariate clustering with geomodeling specific clustering metrics. *Computers & Geosciences*. [S. l.]: Elsevier BV, nov. 2018. DOI 10.1016/j.cageo.2018.08.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2018.08.005>.
- Matos, D. R. 2016. Regime termal e tectônica tipo thin-skin na zona externa da Faixa Brasília. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 109p.
- Madalosso, A., Valle, C. R. (1978). Considerações sobre a Estratigrafia e Sedimentologia do Grupo Bambuí na Região de Paracatu – Morro Agudo (MG). XXX Congresso Brasileiro de Geologia. Anais, 2, 622-634. Recife: SBG.
- Monteiro, L. V. S. 1997. Contribuição à gênese das mineralizações de zinco da Mina de Vazante, MG. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo. 159p.
- Monteiro, L. V. S. 2002. Modelamento metalogenético dos depósitos de zinco de Vazante, Fagundes e Ambrósia, associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 317 p.
- Monteiro, L. V. S.; Bettencourt, J. S.; Juliani, C.; Oliveira, T. F. 2006. Geology, petrography, and mineral chemistry of the Vazante non-sulfide and Ambrósia and Fagundes sulfide-rich carbonate-hosted Zn-(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 28:201-234.
- Monteiro, L. V. S.; Bettencourt, J. S.; Juliani, C.; Oliveira, T. F. 2007. Nonsulfide and sulfide-rich zinc mineralizations in the Vazante, Ambrósia and Fagundes deposits, MG, Brazil: mass balance and stable isotope constraints on the hydrothermal alterations. *Gondwana Research*, 1:362-381.
- Neves, L.P. 2011. Características descritivas e genéticas do depósito de Zn-Pb de Morro Agudo, Grupo Vazante. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, DF, 89p.
- Oliveira, T. F. 1998. As Minas de Vazante e de Morro Agudo. Workshop dos Depósitos minerais brasileiros de metais base, p. 48-57. UFBA/ADIMB.
- Oliveira, G. D. 2013. Reconstrução paleoambiental e quimioestratigrafia dos carbonatos hospedeiros do depósito de zinco silicatado de Vazante, MG. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 86p.
- Paradis, S., Hannigan, P., Dewing, K., 2007. Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Deposits. In: Goodfellow, W.D. (Ed.), *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-*

- Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods. Mineral Deposits Division, pp. 185–203.
- Pimentel, M. M., Dardenne, M. A., Fuck, R. A., Et Al. Nd isotopes and the provenance of detrital sediments of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. [S.l.], Elsevier BV. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00041-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00041-4) , nov. 2001
- Jona Lasinio, Giovanna. Michael J. Pyrcz, Clayton V. Deutsch: Geostatistical reservoir modeling. METRON. [S. l.]: Springer Science and Business Media LLC, 8 jan. 2015. DOI 10.1007/s40300-014-0058-8. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s40300-014-0058-8>.
- Rocha de Oliveira, A. L., 2022. Aspectos Petrográficos E Litogeoquímicos Do Depósito Pb-Zn De Bonsucesso, Paracatu, Minas Gerais, Brasil. Trabalho Geológico de Graduação. Instituto de Geociências – UFMG.
- Rodrigues, J. B.; Pimentel, M. M.; Buhn, B.; Matteini, M.; Dardenne, M. A.; Alvarenga, C. J. S.; Armstrong, R. A. 2012. Provenance of the Vazante Group: New U–Pb, Sm–Nd. Lu–Hf isotopic data and implications for the tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt. *Gondwana Research*, v. 21, p. 439-450.
- Romagna, G., Costa, R. R. 1988. Jazida de zinco e chumbo de Morro Agudo, Paracatu, Minas Gerais. In: C. Schobbenhaus, C. E. S. Coelho (Eds.). *Principais Depósitos Minerais do Brasil (III, 83-90)*. Brasília: DNPM.
- ROSSI, Mario E.; DEUTSCH, Clayton V. Mineral Resource Estimation. [S. l.]: Springer Netherlands, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-5717-5>.
- Silva, C.H. 2003. Evolução geológica da Faixa Brasília na região de Tapira, sudoeste de Minas Gerais. Tese de Doutorado, IGCE-UNESP, 102p.
- Sotero, M. P.; Caxito, F. A.; Dias, P. H. A.; Sotero, B. A. 2019. Análise de fácies e ambientes deposicionais do Grupo Vazante na região da Mina de Morro Agudo, Paracatu, noroeste do estado de Minas Gerais. *Geol. USP, Sér. Cient., São Paulo*, v.19, n.2, p. 195-214.
- Sotero, M. P. 2019. Sedimentologia e estratigrafia isotópica de carbono e oxigênio do Grupo Vazante na região de Morro Agudo, Paracatu/MG. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 92p.
- Valeriano C. M.; Machado N.; Simonetti A.; Valladares C. S.; Seer H. J.; Simões L. S. A. 2004a. U-Pb geochronology of the southern Brasília belt (SE-Brazil): sedimentary

provenance, Neoproterozoic orogeny and assembly of West-Gondwana. *Precambrian Research*, 130: (1-4): 27-55.

Valeriano C. M.; Dardenne M. A.; Fonseca M. A.; Simões L. S. A.; Seer, H. J. 2004b. A Evolução Tectônica da Faixa Brasília. In: V. Mantesso Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito Neves (eds). *Geologia do Continente Sul-Americano – Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, São Paulo, p. 575-592.

Vilela, L. C. Comparação entre as redes neurais artificiais e o método de interpolação krigagem aplicados à pesquisa agrônômica. 2004. xi, 124 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2004. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/101793>>.

Yamamoto, J. K.; Landim, P. M. B. 2013. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos, 215 p.

Yamamoto, J. K. 2001. *Avaliação e classificação de reservas minerais*. São Paulo: EDUSP; FAPESP.