

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**APLICAÇÃO DE VARIÁVEIS INDICADORAS NA AVALIAÇÃO DA  
INCERTEZA VOLUMÉTRICA EM UM DEPÓSITO DE ZN-PB**

Letícia Gameiro Leonel

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

Versão Corrigida

São Paulo

2015

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**APLICAÇÃO DE VARIÁVEIS INDICADORAS NA AVALIAÇÃO DA  
INCERTEZA VOLUMÉTRICA EM UM DEPÓSITO DE ZN-PB**

Letícia Gameiro Leonel

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

Versão Corrigida

São Paulo

2015

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

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação  
do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Leonel, Letícia Gameiro

Aplicação de variáveis indicadoras na avaliação  
da incerteza volumétrica em um depósito de Zn-Pb /  
Letícia Gameiro Leonel. - São Paulo, 2015

97 p. + anexos

Dissertação (Mestrado) : IGc/USP

Orient.: Rocha, Marcelo Monteiro da

1. Geoestatística aplicada 2. Krigagem de  
indicadoras 3. Simulação sequencial de indicadoras  
4. Incerteza volumétrica I. Título

# Sumário

Sumário . . . . .	4
Lista de ilustrações . . . . .	6
Lista de tabelas . . . . .	9
1 Introdução . . . . .	19
2 Objetivos . . . . .	23
3 Materiais e métodos . . . . .	25
4 Revisão bibliográfica . . . . .	27
4.1 Geologia Regional do depósito Santa Maria . . . . .	27
4.2 Geologia Local do depósito Santa Maria . . . . .	30
4.3 Geoestatística . . . . .	32
4.3.1 As Variáveis Regionalizadas . . . . .	33
4.3.2 A Função Variograma . . . . .	33
4.3.3 Krigagem Ordinária . . . . .	37
4.3.3.1 Krigagem de variáveis Indicadoras . . . . .	39
4.3.4 Simulação Estocástica . . . . .	41
4.3.4.1 Simulação Sequencial . . . . .	41
4.3.4.2 Simulação Sequencial de Indicadoras . . . . .	42
4.3.5 A incerteza na geologia . . . . .	43
5 Análise e discussão dos dados . . . . .	45
5.1 Validação da base de dados . . . . .	45
5.2 Análise exploratória dos dados . . . . .	46
5.2.1 Análise estatística global . . . . .	46
5.2.2 Separação dos tipos de mineralização . . . . .	48
5.2.3 Separação dos tipos de mineralização por cortes de teor . . . . .	50
5.2.4 Análise estatística por tipo mineralizado . . . . .	53
5.2.5 Regularização das amostras . . . . .	53
5.2.6 Análise de contato . . . . .	55
5.3 Modelagem geológica . . . . .	55
5.3.1 Modelagem dos litotipos do depósito . . . . .	55
5.3.2 Modelagem dos corpos mineralizados . . . . .	59
5.4 Definição da variável de estudo . . . . .	61
5.4.1 Análise de desagrupamento . . . . .	62
5.5 Geoestatística das variáveis indicadoras . . . . .	63
5.5.1 Transformação da variável indicadora . . . . .	63
5.5.2 Variografia . . . . .	64
5.5.3 Krigagem de indicadoras . . . . .	68
5.5.4 Simulação Sequencial de Indicadoras . . . . .	73

5.6	Discussão dos resultados . . . . .	75
5.6.1	Análise local dos resultados . . . . .	75
5.6.1.1	A Região A de incerteza . . . . .	78
5.6.1.2	A Região B de incerteza . . . . .	81
5.6.1.3	A Região C de incerteza . . . . .	84
5.6.1.4	Considerações finais sobre a análise local . . . . .	85
5.6.2	Análise global dos resultados . . . . .	87
6	Conclusões . . . . .	89
	Referências . . . . .	91
	ANEXO A Estatísticas das realizações da Simulação Sequencial de Indicadoras . .	95

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Mapa de localização das minas do Camaquã . . . . .	19
Figura 2 – Mapa geológico regional da Bacia do Camaquã, com localização das minas Uruguay, São Luiz e do depósito Santa Maria. Destacados na área do depósito, os alvos da exploração mineral da Votorantim Metais, áreas 1, 2 e 3. Retirado de Rios (2013) . . . . .	21
Figura 3 – Fluxograma mostrando a sequência do trabalho desenvolvido. Em cinza os procedimentos realizados para tratamento dos dados, em azul os métodos utilizados para confecção dos modelos, em verde os tipos de modelos criados, em amarelo os dados utilizados para comparação e em rosa os processos de manipulação dos resultados . . . . .	26
Figura 4 – Mapa geológico regional do Supergrupo Camaquã e da Província Polimetálica Camaquã. Fonte: CPRM . . . . .	27
Figura 5 – Variograma típico e suas propriedades. Retirado de Yamamoto (2001) . . . . .	35
Figura 6 – Exemplos de ajuste matemático do variograma experimental. Retirado de Isaaks e Srivastava (1989) . . . . .	35
Figura 7 – Gráfico dos principais tipos de comportamentos na origem de variogramas. Retirado de Valente (1982) . . . . .	37
Figura 8 – Mapa geológico do depósito Santa Maria, com furos de sondagem realizados, litoestratigrafia regional e localização das Áreas de estudo 1, 2 e 3 . . . . .	45
Figura 9 – Histograma dos dados de Zn e Pb . . . . .	47
Figura 10 – Gráfico tipo P-P de distribuição dos dados de Zn e Pb . . . . .	48
Figura 11 – Diagrama de dispersão Pb x Zn das amostras do depósito . . . . .	48
Figura 12 – Histogramas de Zn e Pb com dados separados por textura <i>stringer</i> (vermelha) e disseminada (verde) . . . . .	49
Figura 13 – Diagramas do tipo P-P para Zn e Pb com dados separados por textura <i>stringer</i> (vermelha) e disseminada (verde) . . . . .	50
Figura 14 – Diagramas P-P de Zn (acima) e Pb (abaixo) de todos os dados do depósito. Observa-se inflexão em 0,4% de Pb e 0,58% de Zn . . . . .	51
Figura 15 – Diagramas P-P de Zn (acima) e Pb (abaixo), com aplicação de cut off mínimo de 0,4% de Pb e 0,5% de Zn. Observa-se inflexão em 1,3% de Pb e 1,7% de Zn . . . . .	52
Figura 16 – Histogramas das amostras mineralizadas <i>High Grade</i> regulares (acima) e compositadas em 1m (abaixo) . . . . .	54
Figura 17 – Histogramas das amostras mineralizadas <i>Low Grade</i> regulares (acima) e compositadas em 1m (abaixo) . . . . .	54
Figura 18 – Análise de contato entre as zonas <i>Low Grade</i> e <i>High Grade</i> para os elementos Pb e Zn . . . . .	55

Figura 19 – Modelo geológico elaborado com base nos dados de litoestratigrafia. Os planos em azul são as falhas modeladas. Na camada AR2 (Formação Seival) ocorrem os principais corpos mineralizados depósito . . . . .	57
Figura 20 – Seções verticais evidenciando o modelo geológico. Na imagem superior estão presentes os furos de sondagem utilizados na modelagem e na imagem inferior está localizada a zona de ocorrência da mineralização HG (vermelho) e LG (verde) . . . . .	57
Figura 21 – Mapa geológico do depósito Santa Maria com sobreposição de anomalias obtidas por levantamento geofísico IP. Figura confeccionada pela equipe de geólogos de Exploração da Votorantim Metais - 2012 . . . . .	58
Figura 22 – Seções verticais da mineralização interpretada com base nos furos de sondagem. Em verde os corpos LG e em vermelho os corpos HG . . . . .	59
Figura 23 – Diferentes visadas do modelo de mineralização. Em verde os corpos LG, em vermelho os corpos HG, em azul a galeria utilizada para a realização dos furos em leque, em cinza os furos de sondagem . . . . .	60
Figura 24 – Envoltório criado para seleção de amostras, destacado em lilás . . . . .	61
Figura 25 – Histograma da variável ORE bruta e desagrupada . . . . .	63
Figura 26 – Gráfico da análise de desagrupamento . . . . .	63
Figura 27 – Mapa variográfico da indicadora das mineralizações HG e LG e desenho dos corpos mineralizados, evidenciando a presença de anisotropia . . . . .	64
Figura 28 – Variogramas experimentais e modelos ajustados das variáveis indicadoras de HG e LG . . . . .	66
Figura 29 – Variograma experimental e modelo ajustado à variável indicadora do material estéril . . . . .	67
Figura 30 – Histograma e diagrama P-P do resultado da krigagem de indicadoras para HG, LG e estéril . . . . .	70
Figura 31 – Procedimento de classificação dos blocos estimado por krigagem de indicadoras	71
Figura 32 – Histograma da variável ORE desagrupada e do resultado da krigagem de indicadoras . . . . .	71
Figura 33 – Histograma e diagrama P-P do resultado da krigagem de indicadoras para HG, LG e estéril, de acordo com a classe definida por corte de probabilidade	72
Figura 34 – Validação dos variogramas da variável indicadora do estéril . . . . .	73
Figura 35 – Histograma de doze realizações da Simulação Sequencial de Indicadoras . .	74
Figura 36 – Histograma dos volumes ( em $10^3$ m <sup>3</sup> ) obtidos para as 100 realizações da Simulação Sequencial de Indicadoras . . . . .	75
Figura 37 – Gráfico de médias variáveis de volume para a soma de material <i>High Grade</i> (vermelho) + <i>Low Grade</i> (verde) por caminhamento N-S . . . . .	76
Figura 38 – Gráfico de médias variáveis de volume para a mineralização <i>High Grade</i> (vermelho) e <i>Low Grade</i> (verde) por caminhamento N-S . . . . .	77

Figura 39 – Localização da região A de incerteza nos gráficos de caminhada N-S da mineralização <i>High Grade</i> e <i>Low Grade</i> . . . . .	78
Figura 40 – Modelo de blocos da krigagem de indicadoras e das realizações máxima e mínima obtidas por SIS, para os três tipos de material (HG, LG e Estéril) - seção $y=6,576,585$ . . . . .	80
Figura 41 – Localização da região B de incerteza nos gráficos de caminhada N-S da mineralização <i>High Grade</i> e <i>Low Grade</i> . . . . .	81
Figura 42 – Modelo de blocos da krigagem de indicadoras e das realizações máxima e mínima obtidas por SIS, para os três tipos de material (HG, LG e Estéril) - seção $y=6,576,240$ . . . . .	83
Figura 43 – Localização da região C de incerteza nos gráficos de caminhada N-S da mineralização <i>High Grade</i> e <i>Low Grade</i> . . . . .	84
Figura 44 – Modelo de blocos da krigagem de indicadoras e das realizações máxima e mínima obtidas por SIS, para os três tipos de material (HG, LG e Estéril) - seção $y=6,577,460$ . . . . .	86

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Estatística descritiva dos dados de Zn e Pb . . . . .	47
Tabela 2 – Estatísticas descritivas das amostras <i>High Grade</i> . . . . .	53
Tabela 3 – Estatísticas descritivas das amostras <i>Low Grade</i> . . . . .	53
Tabela 4 – Estatísticas de desagrupamento . . . . .	62
Tabela 5 – Parâmetros do cálculo do variograma experimental . . . . .	65
Tabela 6 – Parâmetros de ajuste do modelo de variograma . . . . .	65
Tabela 7 – Protótipo para construção do modelo de blocos . . . . .	68
Tabela 8 – Parâmetros de busca para estimativa por KI e SIS . . . . .	68
Tabela 9 – Estatística dos volumes obtidos por SIS (em $10^3 \text{ m}^3$ ) . . . . .	75
Tabela 10 – Resultado do cálculo de médias variáveis para a área de incerteza A . . . . .	79
Tabela 11 – Resultado do cálculo de médias variáveis para a área de incerteza B . . . . .	82
Tabela 12 – Resultado do cálculo de médias variáveis para a área de incerteza C . . . . .	85
Tabela 13 – Resultados de volume - Mineralização <i>High Grade</i> . . . . .	87
Tabela 14 – Resultados de volume - Mineralização <i>Low Grade</i> . . . . .	88
Tabela 15 – Resultados de volume - Mineralização <i>High Grade + Low Grade</i> . . . . .	88



# Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao professor Marcelo Monteiro da Rocha, por despertar em mim o interesse pelo universo da geoestatística e também pelos ensinamentos, incentivo e constante disponibilidade ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Ao Hugo Soares Zaggo, um agradecimento especial, por todo o amor, companheirismo, incentivo e ajuda ao longo do caminho.

À empresa Votorantim metais, e aos gerentes Lúcio Molinari e José Antônio Lopes, pelo apoio na realização deste trabalho e pela disponibilização dos dados do depósito de Santa Maria.

Ao amigo Jorge Basílio Fernandes, por todas as discussões geoestatísticas, ensinamentos de softwares, empréstimos de livros e boas risadas no decorrer do mestrado.

Ao Fábio Colombo e Simone Pereira, por me receberem tantas vezes em sua casa, e por todo apoio e amizade nos momentos mais difíceis.

À querida amiga Joyce Teixeira Barrancos e toda a família Barrancos, pelo carinho, e pelas inúmeras vezes em que me acolheram em sua casa para conclusão das etapas do mestrado.

Ao amigo Renan Lopes, companheiro de faculdade e de trabalho, pela troca de experiências e cumplicidade.

À amiga Ana Voltarelli, pela ajuda durante a qualificação.

Ao colega Eduardo Takafuji, pela ajuda, mesmo que à distância, à respeito das normas do programa de pós-graduação.

A todos do LIG e do programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, por propiciarem condições para o desenvolvimento das atividades de pesquisa.

À minha família, pelo amor e apoio incondicional.



*Para meu avô Danton.*



# Resumo

**LEONEL, L. G.**, Aplicação de variáveis indicadoras na avaliação da incerteza volumétrica em um depósito de Zn-Pb. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2015. 97 p. Dissertação de Mestrado em Recursos Minerais.

Santa Maria é um projeto de exploração mineral conduzido pela empresa Votorantim Metais Ltda, com foco nas commodities zinco e chumbo. Localizado no estado do Rio Grande do Sul, próximo das antigas minas de Camaquã e Uruguay, o projeto se encontra em uma região geologicamente fértil para exploração mineral.

O depósito de Santa Maria possui informações suficientes para permitir a avaliação dos recursos minerais e também estudos de viabilidade econômica de projeto, entretanto, sua mineralização ocorre de forma heterogênea e condicionada a feições geológicas estruturais complexas, inserindo dúvidas à respeito da forma e volume dos corpos mineralizados.

O objetivo desta pesquisa é a avaliação da incerteza associada à modelagem dos corpos mineralizados. Essa avaliação foi realizada através da comparação entre o modelo tridimensional confeccionado por interpretação de seções e outros dois modelos probabilísticos: um gerado por krigagem de indicadoras e outro gerado por simulação sequencial de indicadoras, que permitiu a interpretação da incerteza associada.

Com os resultados obtidos foi possível quantificar os valores de volume máximo, mínimo e médio esperado no depósito, além de avaliar regiões de maior e menor confiança. A utilização conjunta dos métodos de krigagem de indicadoras e simulação sequencial de indicadoras se mostrou uma excelente opção para avaliação do modelo interpretado. Através do tratamento dos resultados foi possível obter informações à respeito da variabilidade local e global do depósito e sobre o comportamento espacial da mineralização.

Os resultados e interpretações obtidos podem ser aplicados em trabalhos futuros no depósito, como na classificação do recurso mineral, no refinamento do modelo geológico e no planejamento de futuras malhas de sondagem *infill*.

Palavras-chave: Geoestatística aplicada; Krigagem de Indicadoras; Simulação Sequencial de Indicadoras; Incerteza Volumétrica; Depósito de chumbo e zinco



# Abstract

**LEONEL, L.G.**, Application of Indicator Variables for evaluating the volumetric uncertainty of a Zn-Pb model. São Paulo: Institute of Geosciences, University of São Paulo, 2015. 97 p. Dissertation in Mineral Resources.

Santa Maria is a mineral exploration project conducted by Votorantim Metais Ltda, with focus on zinc and lead extraction. The project is located in the state of Rio grande do Sul, in the vicinities of the old mines of Camaquã and Uruguay, a favorable area for mineral exploration.

There is enough information about Santa Maria's deposit to allow the estimation of mineral resources and the project's economical viability study, however, its mineralization occurs in heterogeneous ways and is conditioned to complex geological structural features, casting doubts about the shape and volume of the ore bodies.

The main goal of this research is evaluating the uncertainty associated with the modeling of the orebodies. This evaluation was performed by comparing a three-dimensional model created by section interpretation and other two probabilistic models: one generated by indicator kriging, and the other generated by sequential indicator simulation, which allowed the interpretation of the associated uncertainty.

Based on the obtained results, it was possible to quantify the maximum, minimum and average expected volume of the deposit, and also to evaluate the regions of most and least reliability. The joint use of indicator kriging and sequential indicator simulation methods proved to be an excellent tool for evaluating the interpreted model. By processing the results it was possible to obtain information about deposit's local and global variability and spatial behavior of mineralization.

The obtained results and interpretations can be applied in deposit's further studies, for instance, to classify the mineral resource, to refine the geological model or to plan future infill drillholes.

**Keywords:** Applied Geostatistics; Indicator Kriging; Sequential Indicator Simulation; Volumetric Uncertainty; Zinc and Lead Deposits



# 1 Introdução

A província polimetálica (Cu+Pb+Zn+Ag+Au) de Camaquã faz parte de um distrito mineiro da região sul do Brasil. Localiza-se na porção centro-sul do estado do Rio Grande do Sul e é formada por três depósitos principais: Mina Uruguay e Mina São Luiz (Figura 1), atualmente exauridas, e o Depósito Santa Maria (Figura 2).

O Depósito Santa Maria está localizado três quilômetros a sul das minas Uruguay e São Luiz, denominadas Minas do Camaquã. Sua descoberta ocorreu no início da década de 1970 e, a partir desta data, o projeto passou por diferentes etapas de pesquisa mineral, tendo atividades de estudo exploratório intercaladas a períodos de paralização total ou parcial.

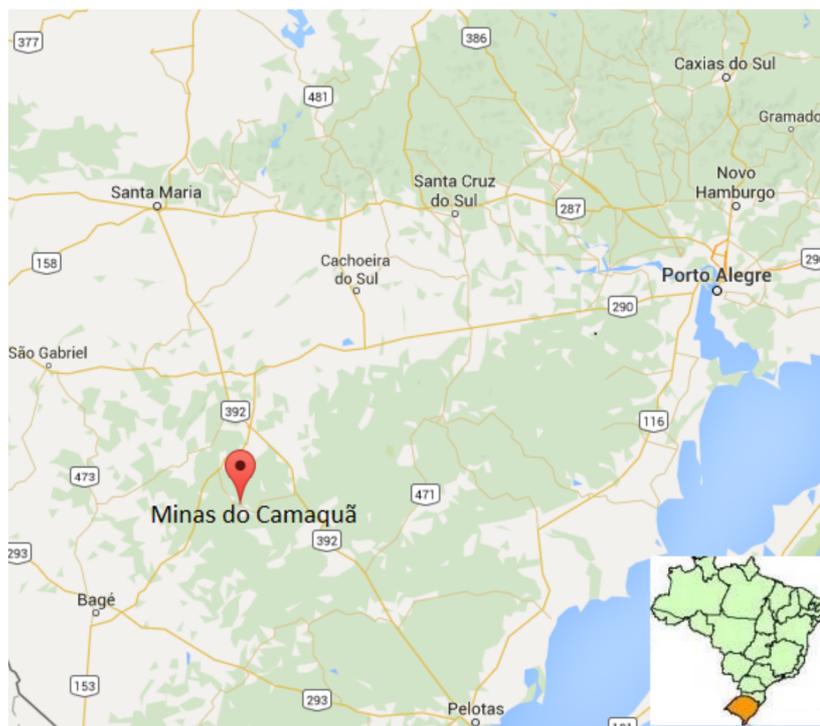


Figura 1 – Mapa de localização das minas do Camaquã

Santa Maria hospeda mineralizações de chumbo e zinco em rochas sedimentares siliciclásticas da Bacia do Camaquã, Grupo Santa Bárbara, em zonas de pervasiva alteração hidrotermal. Os minerais de minério são essencialmente galena e esfalerita, e a mineralização ocorre em duas formas principais, denominadas *High Grade* e *Low Grade*.

Foi criado um modelo geológico do depósito pelo método tradicional de interpretação de seções, baseado nos contatos litológicos dos furos de sondagem e nas informações de dados estruturais. Os dois principais tipos de mineralização foram modelados separadamente, diferenciados a partir do corte do teor de Zn+Pb.

Entretanto, por se tratar de um depósito de gênese complexa, com presença de muitos falhamentos e duplicação de camadas litológicas, a interpretação de algumas regiões com menor densidade amostral ficou condicionada à interpretação geológica em detrimento às informações dos furos de sonda. Acredita-se, desta forma, que existem regiões de grande incerteza de volume no modelo geológico interpretado e que essa incerteza pode impactar diretamente o modelo de recurso do depósito e a viabilidade econômica do projeto.

A incerteza é uma característica inerente aos depósitos minerais e está associada a várias etapas da pesquisa: amostragem, análise química, modelagem geológica, estimativa etc. O modelo numérico do depósito é ferramenta essencial ao planejamento econômico de um projeto de mineração, sendo a base de estudos de viabilidade econômica, planejamento de lavra e projeção de fluxo de caixa. Como estes estudos envolvem grande investimento de capital, o conhecimento da incerteza associada ao modelo é cada vez mais necessário, o que permite maior confiança na tomada de decisão ao longo das fases de desenvolvimento do empreendimento mineiro.

Neste trabalho, o método de simulação sequencial de indicadoras foi utilizado conjuntamente com a krigagem de indicadoras para a criação de modelos numéricos, a fim de verificar-se os possíveis cenários volumétricos do depósito. O estudo conjunto dos três modelos forneceu informações relevantes à respeito da incerteza da interpretação geológica, das áreas mais críticas do modelo e dos valores de volume mais prováveis. Estas informações poderão ser utilizadas em diversos estudos posteriores, para melhorar o entendimento do depósito, garantir o planejamento de novas sondagens em áreas críticas e refinar o modelo atualmente utilizado.

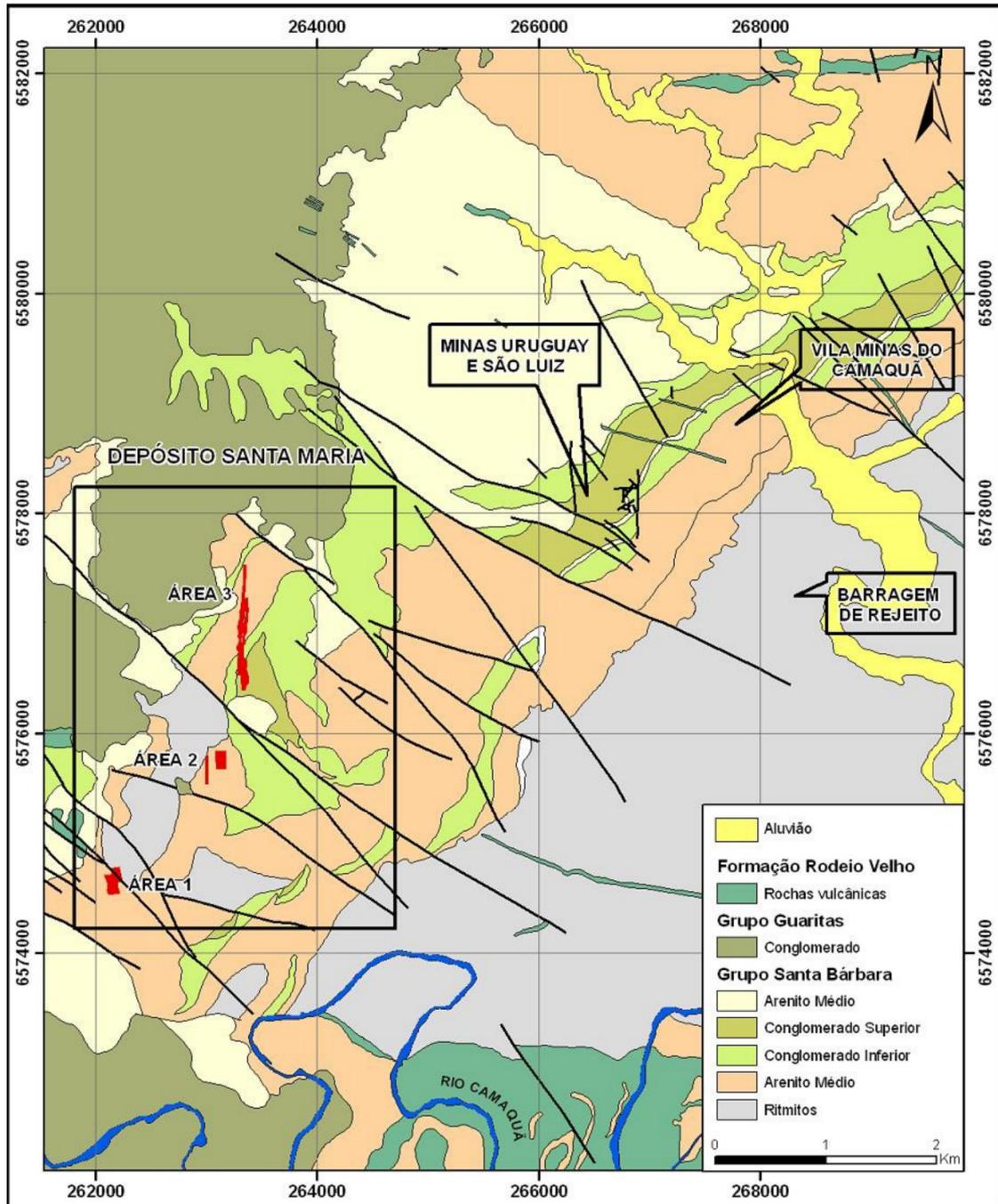


Figura 2 – Mapa geológico regional da Bacia do Camaquã, com localização das minas Uruguaý, São Luiz e do depósito Santa Maria. Destacados na área do depósito, os alvos da exploração mineral da Votorantim Metais, áreas 1, 2 e 3. Retirado de Rios (2013)



## 2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é a avaliação da incerteza volumétrica associada à modelagem geológica do depósito de Santa Maria. Esta avaliação foi realizada através do estudo conjunto de três modelos: um modelo da mineralização criado por interpretação de seções e dois modelos probabilísticos, um estimado por krigagem de indicadoras e outro gerado a partir de simulação sequencial de indicadoras, que permitiu a interpretação do modelo de incerteza.

- Interpretar o modelo geológico tridimensional do depósito, por interpretação de seções;
- Estimar o modelo probabilístico do depósito, por krigagem de indicadoras;
- Estimar o modelo de incertezas do depósito, a partir de cem realizações de simulação sequencial de indicadoras;
- Estudar os modelos obtidos e suas diferenças, reconhecer os melhores e piores cenários, definir áreas críticas do modelo e comparar resultados de volume esperados;
- Discutir a metodologia utilizada, conclusões e aplicações dos resultados para a realidade do projeto.



### 3 Materiais e métodos

O banco de dados utilizado neste trabalho é composto pelas informações da Área 3 do projeto Santa Maria, disponibilizado pela empresa Votorantim Metais. Além do banco de dados, também foram utilizados os resultados geofísicos de campanhas executadas pela mesma empresa.

O banco de dados foi exportado do programa Geoexplor<sup>®</sup> no formato texto com colunas separadas por vírgula (extensão .csv) e é composto por três arquivos:

- *Collar*: Contendo a identificação, coordenadas UTM das bocas dos furos de sondagem e profundidade máxima atingida;
- *Survey*: Contendo informações locais sobre direção e mergulho dos furos;
- *Lito-Assay*: Contendo dados referentes aos resultados de análise química para os elementos Zn, Pb, Au, Ag e Cu, dentre outros, densidade, descrição de litologia, descrição da alteração hidrotermal (em algumas amostras), descrição da textura da mineralização (em algumas amostras), definição de zonas de cisalhamento.

Os dados de geofísica foram recebidos na forma de linhas, exportadas do programa ArcGis<sup>®</sup> e tratadas no programa Leapfrog<sup>®</sup>.

Para a execução deste trabalho foram realizadas as seguintes atividades:

- Revisão bibliográfica da geologia do depósito e sobre os métodos geoestatísticos aplicados no estudo, este para dominar melhor as técnicas e aquele para entender melhor a gênese e os controles da mineralização;
- Análise estatística dos dados de Zn e Pb e definição dos teores de corte para separar cada tipo de mineralização, através da utilização dos programas *Isatis*<sup>®</sup>, *GeoAccess*<sup>®</sup> e *GSLIB*<sup>®</sup>;
- Análise geoestatística, cálculo dos modelos por krigagem de indicadoras e simulação sequencial de indicadoras, utilizando o programa *Isatis*<sup>®</sup>;
- Análise e comparação dos resultados, através da utilização dos programas *Datamine*<sup>®</sup>, *Isatis*<sup>®</sup> e *Excel*<sup>®</sup>.

A sequência de trabalho pode ser observada no fluxograma da Figura 3.

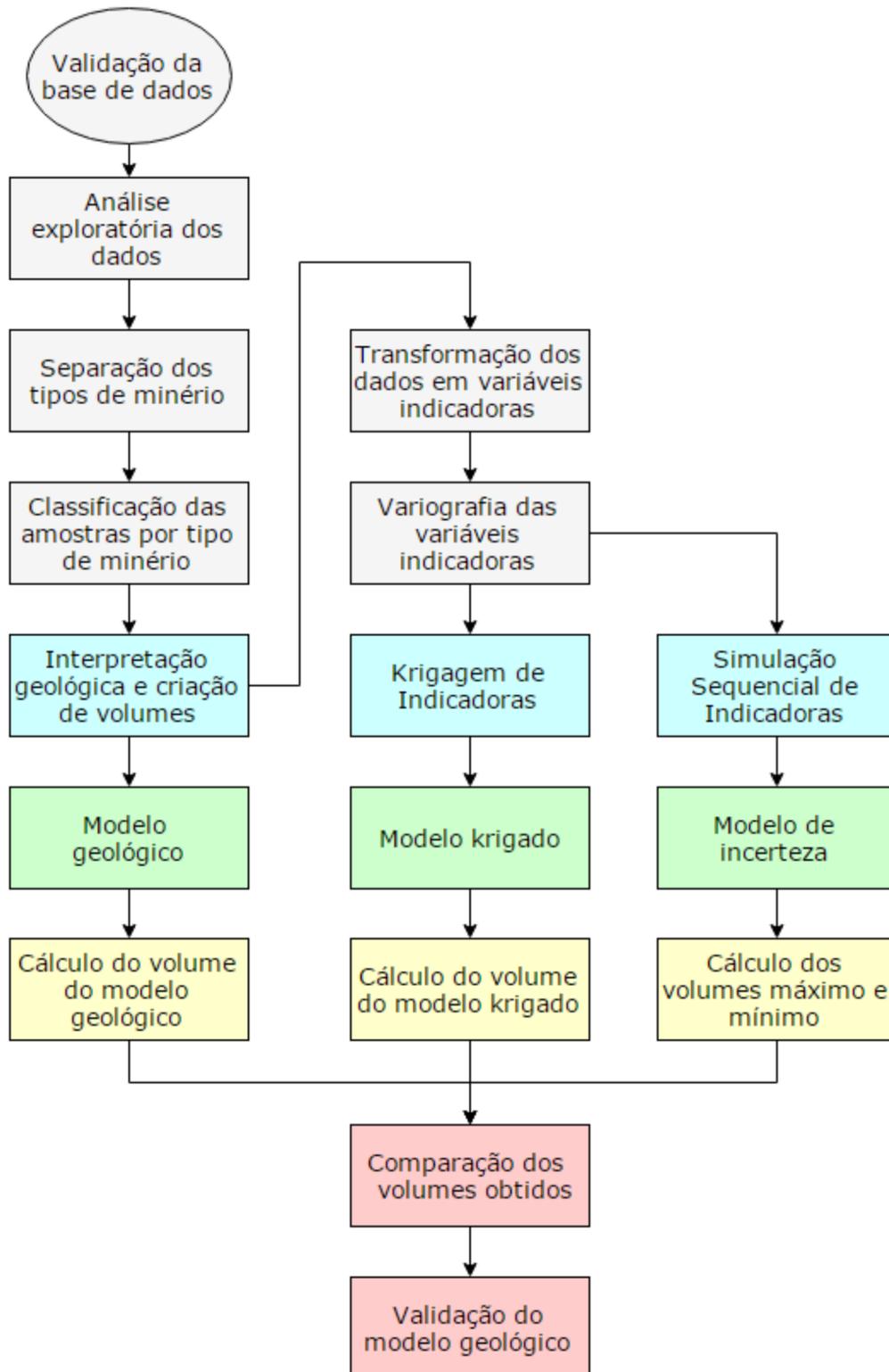


Figura 3 – Fluxograma mostrando a sequência do trabalho desenvolvido. Em cinza os procedimentos realizados para tratamento dos dados, em azul os métodos utilizados para confecção dos modelos, em verde os tipos de modelos criados, em amarelo os dados utilizados para comparação e em rosa os processos de manipulação dos resultados

## 4 Revisão bibliográfica

### 4.1 Geologia Regional do depósito Santa Maria

O depósito polimetálico Pb+Zn+Ag (Cu±Au) de Santa Maria está localizado na porção sul do Escudo Sul-Rio-Grandense, no qual predominam unidades litoestratigráficas separadas por discordâncias (regionais e tectônicas), formadas entre o Neoproterozóico - Eopaleozóico e pertencentes ao Supergrupo Camaquã (Figura 4). O Supergrupo Camaquã é constituído por rochas sedimentares siliciclásticas e vulcanogências, e aflora em três sub-bacias alongadas no sentido NNE-SW, denominadas Sub-Bacia Camaquã Ocidental, Camaquã Central e Camaquã Oriental (Rios (2013)).

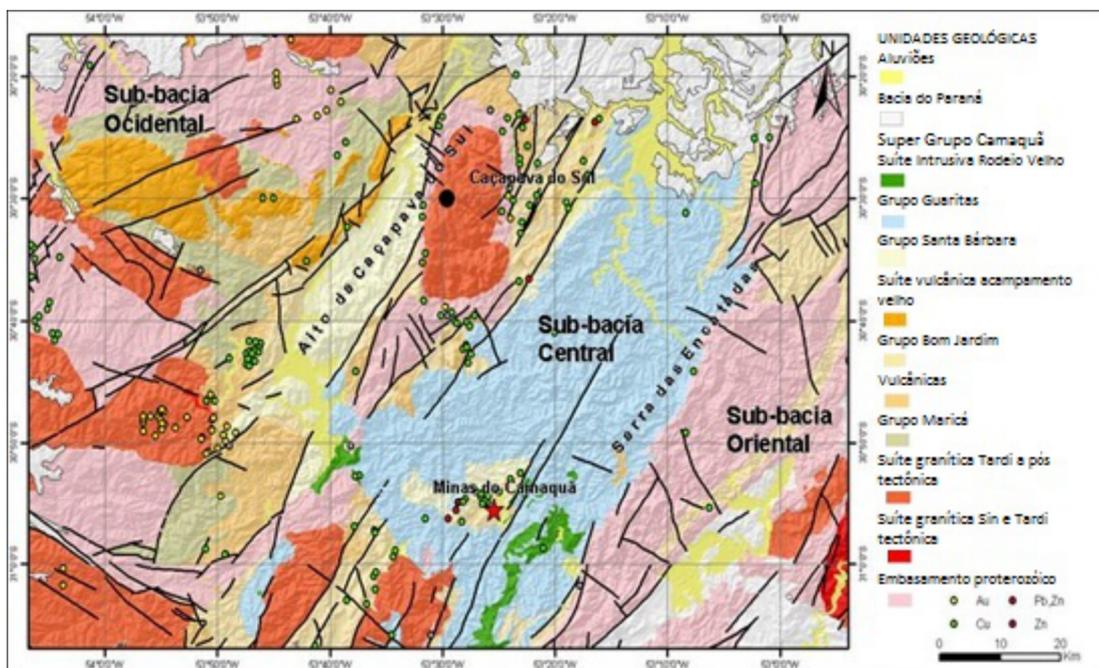


Figura 4 – Mapa geológico regional do Supergrupo Camaquã e da Província Polimetálica Camaquã. Fonte: CPRM

O contexto geotectônico local relaciona-se com a porção sul da província Mantiqueira, designada Escudo Sul-Rio-grandense. A Província Mantiqueira representa um sistema orogênico Neoproterozóico situado no sul e sudeste do Brasil. Ela engloba os orógenos Araçuai, Ribeira, Brasília meridional, Dom Feliciano e São Gabriel, que se distribuem desde o sul do Estado da Bahia até o Estado do Rio Grande do Sul (Almeida *et al* (1981)).

A Bacia do Camaquã foi preenchida por depósitos do Ediacarano e Eocambriano do Supergrupo Camaquã (Fragoso-Cesar *et al* (2003)) e suas correlações geológicas estendem-se a sul até o Uruguai (Formação Barriga Negra), e a norte em Santa Catarina (Vale do Itajaí), onde é correlacionada ao Grupo Itajaí e no Paraná ao Grupo Castro. Está assentada sobre entidades

geológicas com diferentes composições e idades. Seu embasamento é formado por estruturas relacionadas ao Ciclo Brasileiro (cinturões orogênicos tipo Vacacaí e Dom Feliciano) e ao Ciclo Transamazônico (Cráton *Rio de la Plata*) (Almeida *et al* (1981)).

A Bacia do Camaquã é segmentada em sub-bacias (Sub-Bacia Camaquã Ocidental, Camaquã Central e Camaquã Oriental) pelos altos do embasamento de Caçapava do Sul, a oeste, e da Serra das Encantadas, a leste. Tanto a evolução geológica quanto o empilhamento estratigráfico destas sub-bacias ainda são alvos de controvérsia. No entanto, é de aceitação mais consensual que o Supergrupo Camaquã remonta a uma paleogeografia relacionada a ambientes marinhos (ex. Grupo Maricá) passando gradativamente, ao longo do tempo geológico, a ambientes francamente continentais (ex. Grupo Guaritas). O supergrupo Camaquã pode ser subdividido, da base para o topo, pelas seguintes unidades:

a) Grupo Maricá (Leinz & Almeida (1941)): datado em 610-590 Ma, ocorre em discordância erosiva com o embasamento metamórfico e é constituído por arenitos conglomeráticos, ritmitos pelíticos, arenitos finos, passando a conglomerados e arenitos grossos. É distribuído em três unidades litoestratigráficas que registram as variações de ambientes deposicionais (Fragoso-Cesar (2003)): Formação Passo da promessa (arenitos e conglomerados de planícies fluviais), Formação São Rafael (arenitos e ritmitos de plataforma marinha rasa) e Formação Arroio América (novamente arenito e lentes conglomeráticas de planícies fluviais);

b) Grupo Bom Jardim (Ribeiro (1986)): datado em 590-575 Ma, constituído por ritmitos pelíticos e areno-pelíticos que gradam verticalmente para ritmitos arenosos, andesitos e vulcanoclásticas associadas a esparsos corpos arenosos e conglomerados. Ambientes deposicionais continentais lacustre e aluvial. Aflora nas sub-bacias Camaquã central e ocidental (Janikian *et al* (2005));

c) Formação Acampamento Velho (Cordani *et al* (1974)): datado em  $549 \pm 5$  Ma, está em discordância erosiva com o Grupo Bom Jardim. Constituída por rochas vulcânicas e vulcanoclásticas félsicas, aflora somente na sub-bacia Camaquã Ocidental (Janikian *et al* (2005));

d) Grupo Santa Bárbara: datado em 570-540 Ma, é composto por sucessões siliciclásticas de conglomerados, arenitos e ritmitos pelíticos subordinados e caracteriza uma sucessão aluvial a marinha, com deposição de rochas em ambientes deltaicos, costeiros e aluviais. Hospeda as mineralizações de Pb+Zn+Cu( $\pm$ Au) da Província Camaquã. É importante salientar que durante uma parte do período de sua deposição (entre 560 a 540 Ma) ocorreu a intrusão dos maciços graníticos tipo Caçapava do Sul e tipo Lavras. É dividido, a partir da base, nas seguintes formações: Estância Santa Fé, Passo da Capela, Seival, Rincão dos Mouras e João Dias (Fambrini (2003)).

e) Grupo Guaritas: datado em 540-470 Ma, ocorre em discordância erosiva com os demais grupos e é constituído por conglomerados com intercalações de arenitos-siltitos, incluindo

expressivas sucessões eólicas. Em relação às outras unidades, apresenta mergulhos mais suaves e deformação mais rúptil. Este grupo é ainda intrudido por rochas básicas a intermediárias da Suíte Rodeio Velho (470 Ma) (Nóbrega (2011)).

As unidades litoestratigráficas descritas em (a), (b), (c), e (d) encontram-se relativamente deformadas por dobramentos abertos e falhamentos com truncamento entre falhas gravitacionais e direcionais.

A gênese dos depósitos de Camaquã e Santa Maria é controversa, com autores considerando três diferentes hipóteses:

- 1) Hipótese de mineralização singenética (Ribeiro (1986 e 1991); Badi & Gonzáles (1988));
- 2) Hipótese de mineralização diagenética (Veigel & Dardenne (1990));
- 3) Hipótese de mineralização magmática-hidrotermal e/ou epitermal e/ou magmática distal (Leinz & Almeida (1941); Bettencourt (1972); Remus (1999) e Remus *et al* (2000)).

No âmbito deste trabalho entende-se que o modelo de mineralização magmática é o que melhor explica a mineralização das minas de Camaquã, de acordo com as seguintes evidências:

- Presença de intensa atividade magmática/vulcânica na evolução da Bacia do Camaquã;
- Presença de valores anômalos de Cu-Mo/Cu-Au-Mo em rochas no sistema Camaquã (Santa Maria/Uruguay/São Luiz) e ocorrências associadas, sendo que a associação destes elementos geralmente é observada em depósitos associados a intrusões;
- O Trabalho de Remus (1999) indica isótopos de enxofre com valores próximos a zero, sugerindo fonte magmática;
- Alterações hidrotermais com associação Illita+Clorita+Pirita são comuns em depósitos epitermais e magmáticos distais;
- Presença de indicativos de *boiling* como a ocorrência de *Platty Calcite* pode se vista em brechas hidrotermais no sistema Camaquã.

## 4.2 Geologia Local do depósito Santa Maria

Este sub-item foi baseado em Rios (2013) e em dados internos disponibilizados pela empresa Votorantim Metais.

Na área do projeto Santa Maria ocorrem rochas sedimentares siliciclásticas, incluindo arenitos, conglomerados e ritmitos pertencentes aos Grupos Santa Bárbara e Guaritas. Estão presentes também, em menor quantidade, rochas intrusivas rasas a vulcânicas, de composição intermediária, associadas à Suíte Intrusiva Rodeio Velho.

A unidade sedimentar basal no depósito de Santa Maria é constituída de ritmitos de coloração bege ou roxa, compostos por intercalações com milímetros de espessura de areia fina e silte e, subordinadamente, arenitos vermelho arroxeados, muito finos, ambos com caimento variando de 5 a 40 graus para NW. Esta unidade foi correlacionada aos depósitos turbidíticos da Formação Passo da Capela.

Disseminações de sulfetos de Pb, Zn e Cu foram encontradas hospedadas nos ritmitos do depósito de Santa Maria. Nas proximidades da vila de Minas do Camaquã estão presentes também significativas ocorrências de Cu associadas a um sistema de brechas hidrotermais alojadas em estruturas subverticais de direção NW. Tais brechas são compostas por fragmentos de ritmito e vênulas de barita, quartzo e calcita, inclusive calcita com hábito placóide *platty calcite*.

Acima dos ritmitos é encontrado o Arenito Inferior, correlacionado à Formação Seival. Esta unidade é composta por arenitos médios a finos, avermelhados, feldspáticos, estratificados, bem selecionados, com baixo grau de arredondamento, que representam a principal rocha hospedeira das mineralizações do depósito de Santa Maria.

Sobreposta à Formação Seival, encontra-se a Formação Rincão dos Mouras, que hospeda as mineralizações cupríferas das minas São Luiz e Uruguay, no depósito de Camaquã, e cuja base hospeda a mineralização de Pb e Zn do depósito de Santa Maria. Nesta formação é encontrado o Conglomerado Inferior, um pacote basal de conglomerados polimíticos, sustentados por matriz de areia média, feldspática e com clastos subangulosos a arredondados, variando de seixo a calhaus (até 15 cm). O Conglomerado Superior grada para um pacote de arenitos conglomeráticos e arenitos grossos a médios, por vezes finos, bem estratificados, com acamadamentos plano-paralelos e estratificações cruzadas dos tipos tabular e acanalada.

Encerrando a sequência deposicional da Formação Rincão dos Mouras encontra-se o Conglomerado Superior, que é composto por conglomerados polimíticos, sustentados pelo arcabouço, formado de clastos de grânulo a matacão (até 90 cm de diâmetro), angulosos a arredondados, dispostos em camadas de geometria tabular com decímetros, e por vezes metros de espessura, de grande extensão lateral, separados por leitos de arenitos grossos conglomeráticos. A matriz

é composta por arenito médio-grosso a muito grosso com grânulos.

A ocorrência de rochas ígneas tanto no depósito de Santa Maria quanto no depósito das minas de Camaquã, limita-se à intrusão de diques de diabásio associados à Formação Serra Geral e de intrusões rasas ou extrusões de andesitos fortemente vesiculados/amigdaloidais da Suíte Rodeio Velho.

No depósito de Santa Maria as alterações hidrotermais mais importantes são illitização e cloritização, ocorrendo também, de forma secundária, piritização, carbonatação, baritização e hematitização.

O zoneamento da alteração hidrotermal illítica e clorítica é o principal controle da mineralização, ocorrendo calcopirita, bornita e, subordinadamente, galena na zona clorítica, situada na base do depósito, e esfalerita e galena na porção illitizada, na porção superior do depósito. As mineralizações de cobre mais expressivas do depósito de Santa Maria estão associadas às zonas de cloritização. As mineralizações de Pb e Zn do depósito estão associadas a zonas illitizadas.

A illitização afeta as rochas encaixantes de forma pervasiva seletiva, atingindo principalmente os cristais de feldspato, fragmentos líticos e a matriz argilosa. A carbonatação é dada pela presença de diferentes cimentos carbonáticos, ou pela presença de vênulas, com ou sem sulfetos. A barita ocorre em veios e vênulas de pouca expressão, apresentando colorações rosadas ou amareladas. Veios ou vênulas de quartzo são muito pouco comuns.

### 4.3 Geoestatística

A teoria da geoestatística foi formalizada por G. Matheron, sendo definida como a aplicação da teoria das variáveis regionalizadas (V.R.) para a estimativa de depósitos minerais (Matheron (1971)). Ainda segundo Matheron (1971), o método foi desenvolvido após anos de reflexão sobre o caráter ambíguo da interpretação, em termos probabilísticos, de um fenômeno natural único e parcialmente desconhecido.

Deutsch (2002) cita que o desenvolvimento da geoestatística foi impulsionado por dificuldades enfrentadas por geólogos e engenheiros de minas, que buscavam uma técnica numérica para auxiliar na resolução de problemas reais como: estimativa de reservas minerais, previsão da performance de reservatórios e caracterização de mudanças ambientais, ou seja, a geoestatística tem por objetivo principal a predição do valor de variáveis em locais não amostrados.

De acordo com Olea (1991) a geoestatística é uma ferramenta para estudo de um fenômeno que ocorre no espaço e/ou tempo. Sinclair & Blackwell (2004) definem a geoestatística como uma abordagem estatística para estimativa de valores, que utiliza como parâmetro a presença de determinado grau de dependência espacial entre as variáveis de teor de um depósito mineral.

Deutsch & Journel (1998), afirmam também que a geoestatística apresenta uma série de ferramentas determinísticas e estatísticas, que tem por objetivo o entendimento e modelamento da variabilidade espacial de um determinado fenômeno.

Segundo Soares (2014) a metodologia da geoestatística consiste em um conjunto de instrumentos estatísticos que quantificam a continuidade espacial de uma variável em dois tipos de modelos: modelos de estimativa espacial, tendo como base a variabilidade estrutural, e modelos de simulação estocástica, que quantificam a incerteza ligada ao fenômeno espacial.

Armstrong (1998) sintetiza os passos principais da geoestatística como:

- 1) Coleta e validação de dados;
- 2) Estatística básica;
- 3) Cálculo do semivariograma experimental;
- 4) Ajuste do modelo teórico de variograma ao semivariograma experimental;
- 5) Realização de krigagem e/ ou simulação.

De acordo com Goovaerts (1999) até o final da década de 1980 a geoestatística era vista essencialmente como o método para descrição de padrões espaciais, por meio do variograma, e para predição de valores de variáveis em locais não amostrados, por meio da krigagem. Entretanto, novas ferramentas para resolução de problemas dentro do âmbito da geoestatística foram desenvolvidas, tais quais a avaliação de incerteza sobre determinadas concentrações, a simulação estocástica da distribuição espacial de valores de atributos, a modelagem de processos espaço-tempo, *etc.*

### 4.3.1 As Variáveis Regionalizadas

Matheron (1965) afirma que a teoria das variáveis regionalizadas tem por objetivo a representação das propriedades estruturais do fenômeno em estudo, e a resolução de problemas de estimativa a partir de dados amostrados, afirma também que, quando um fenômeno ocorre no espaço e exibe uma estruturação espacial, deve-se denominar tal fenômeno como regionalizado.

A variável regionalizada, do ponto de vista matemático, seria então o valor de uma função  $f(u)$ , característica de determinado fenômeno, em um determinado ponto  $u$ . Matheron (1971) cita dois aspectos característicos da V.R.:

- 1) O aspecto estruturado, que reflete em determinada extensão as características estruturais do fenômeno regionalizado;
- 2) O aspecto aleatório, que consiste em variações altamente irregulares e imprevisíveis entre dois determinados pontos.

As variáveis regionalizadas apresentam diferentes níveis de dependência espacial entre si, os quais se modificam em função das distâncias que separam as amostras. Essa dependência existe até um dado limite de distância, a partir do qual se torna aleatória, uma vez que não existe mais o fenômeno de continuidade espacial.

Segundo Yamamoto (2001), as V.R.s são utilizadas na geoestatística por apresentarem características que não podem ser reconhecidas por métodos estatísticos tradicionais, tais quais: localização geográfica, tamanho da unidade amostral (suporte), continuidade ponto a ponto, reconhecimento de anisotropia (variação do comportamento entre amostras para diferentes direções).

Segundo Sinclair & Blackwell (2004) uma função aleatória é uma descrição probabilística da distribuição espacial de uma variável aleatória. Essa função pode ser definida como a quantificação da aleatoriedade e estruturação de um conjunto de dados utilizando uma função de autocorrelação, tal qual o semivariograma.

De acordo com Valente (1982), denomina-se função aleatória  $Z(u)$  o conjunto de valores de  $Z$  para todos os pontos  $u$  dentro de um domínio. Isso quer dizer que pode-se considerar todos os valores das variáveis regionalizadas como sendo uma única realização da função aleatória, que caracteriza os dados no espaço.

### 4.3.2 A Função Variograma

Leuangthong, Khan & Deutsch (2008) afirmam que o meio mais comum para a medida da estrutura espacial das variáveis aleatórias é a função variograma, denotada por  $2\gamma(h)$  (equivalente a duas vezes a função semivariograma). Tal função, proposta por Matheron (1971), representa a estatística de dois pontos, utilizada para a quantificação da variabilidade entre duas

V.R.s separadas por um vetor de distância  $h$ .

Yamamoto (2001) explica que um conceito básico na teoria das variáveis regionalizadas é a hipótese de quase-estacionaridade (ou hipótese intrínseca), a qual implica que a função variograma descreve o comportamento espacial da variável regionalizada dentro do espaço e que essa função é uma característica da regionalização. Estacionariedade, do ponto de vista geoestatístico, significa então que os valores de média e variância das variáveis de um depósito não dependem de sua localização.

De acordo com Leuangthong, Khan & Deutsch, 2008, a decisão de estacionaridade reflete na necessidade de escolher dados relevantes à área não amostrada, e estabelecer os parâmetros estatísticos que descrevem o conjunto de dados relevantes. A relação espacial entre a variável aleatória em dois locais diferentes é especificada pela covariância espacial ou então pelo modelo de variograma.

A função variograma é descrita pela equação 4.1:

$$2\gamma(h) = E\{[Z(u) - Z(u+h)]^2\} \quad (4.1)$$

A função semivariograma pode também ser representada em termos de covariâncias pela equação 4.2, onde  $C(0)$  é a covariância para o passo zero (equivalente à variância):

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (4.2)$$

De acordo com Sinclair & Blackwell (2004) e Soares (2014), a razão fundamental para a utilização do variograma é a caracterização e quantificação do modelo de comportamento espacial da variável em estudo. Essa caracterização é representada pelo grau de continuidade espacial e pela natureza isotrópica/anisotrópica da distribuição.

A função semivariograma é representada graficamente pelo variograma, a partir do qual pode-se observar determinadas propriedades que descrevem o comportamento das V.R.s.

Yamamoto (2001), cita quatro propriedades principais em um variograma com patamar típico (Figura 5):

- 1) Amplitude: Distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes;
- 2) Patamar: Valor de variância no qual o variograma se estabiliza;
- 3) Efeito pepita: Valor da função variograma próximo à origem ( $h=0$ );
- 4) Variância espacial: Diferença entre o patamar e o efeito pepita.

De acordo com Leuangthong, Khan & Deutsch (2008) a obtenção de um variograma bem estruturado é um importante passo preliminar no estudo geoestatístico. Entretanto, a configuração dispersa de dados reais e a sensibilidade dos variogramas com relação aos parâmetros utilizados para seu cálculo podem gerar dificuldades em sua obtenção.

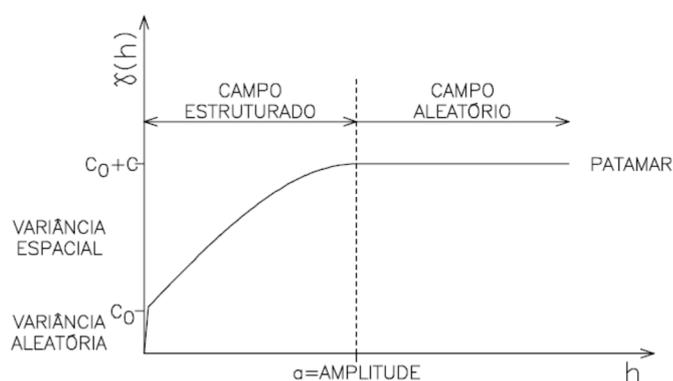


Figura 5 – Variograma típico e suas propriedades. Retirado de Yamamoto (2001)

Segundo Deutsch (2002) o variograma deve ser calculado apenas para as direções principais de continuidade da variável. Essas direções são frequentemente obtidas pelo entendimento geológico do depósito, entretanto, no caso de ambiguidade ou falta de informação geológica, o variograma pode ser inicialmente calculado em várias direções, para aferição das direções principais.

Após o cálculo do variograma experimental nas direções principais de continuidade, um modelo paramétrico é ajustado aos pontos do variograma. De acordo com Deutsch (2002), a razão principal pela qual o variograma precisa ser modelado é a necessidade da interpolação da função variograma para valores onde existem poucos ou nenhum par de dados disponíveis. A função matemática cumpre essa tarefa, descrevendo continuamente a variabilidade existente nos dados.

As funções utilizadas para a modelagem do variograma são definidas positivas e as mais utilizadas são: Esférica (também conhecida como Matheron), Exponencial e Gaussiana (Figura 6). O variograma pode ser construído com uma soma de funções, denominada de estruturas aninhadas, onde cada uma dessas estruturas explica uma fração da variabilidade global do depósito.

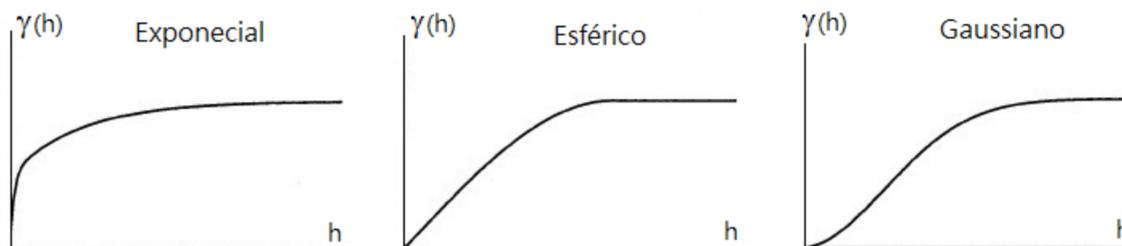


Figura 6 – Exemplos de ajuste matemático do variograma experimental. Retirado de Isaaks e Srivastava (1989)

Os modelos de variograma ajustados matematicamente podem ser descritos pelas seguintes

equações:

Modelo exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp - (h/a)] \quad (4.3)$$

Modelo gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp - (h^2/a^2)] \quad (4.4)$$

Modelo esférico:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C [3/2(h/a) - 1/2(h/a)^3], & \text{para } h > a \\ C_0 + C, & \text{para } h < a \end{cases} \quad (4.5)$$

Onde  $C_0$  é o efeito pepita,  $h$  é a distância entre dois pontos,  $a$  é a amplitude, e  $C$  é a variância espacial.

Yamamoto, 2001, cita que o ajuste do variograma por uma função matemática é conhecido na geoestatística como ajuste de modelo teórico, e é feito a partir dos parâmetros do variograma (modelo, efeito pepita, amplitude e patamar).

Segundo Valente (1982) o variograma pode apresentar quatro comportamentos principais próximo à origem, distintos por ordem decrescente de regularidade:

1) Comportamento parabólico: descreve uma curva parabólica próximo à origem, indicando que a variável regionalizada é altamente contínua;

2) Comportamento linear: apresenta um comportamento linear próximo à origem, representando uma média continuidade das amostras, com grande homogeneidade à pequenas distâncias e menor homogeneidade à medida as distâncias aumentam;

3) Comportamento descontínuo: não tende a zero quando  $h$  tende a zero (descontínuo na origem). Indica uma variável irregular a pequenas distâncias, comum para a maioria dos depósitos de minerais metálicos.

A descontinuidade na origem, presente nos modelos descontínuos, é chamada de efeito pepita e está associada a eventos aleatórios que ocorrem em distâncias muito pequenas, tais quais a presença de pepitas de ouro, erros de amostragem, erros de locação, microvariabilidade, etc;

4) Comportamento efeito pepita puro: puramente aleatório. As variáveis regionalizadas não são correlacionáveis em qualquer valor de  $h$ , mesmo que estejam a distâncias infinitesimalmente pequenas, ocorrendo uma total falta de estrutura.

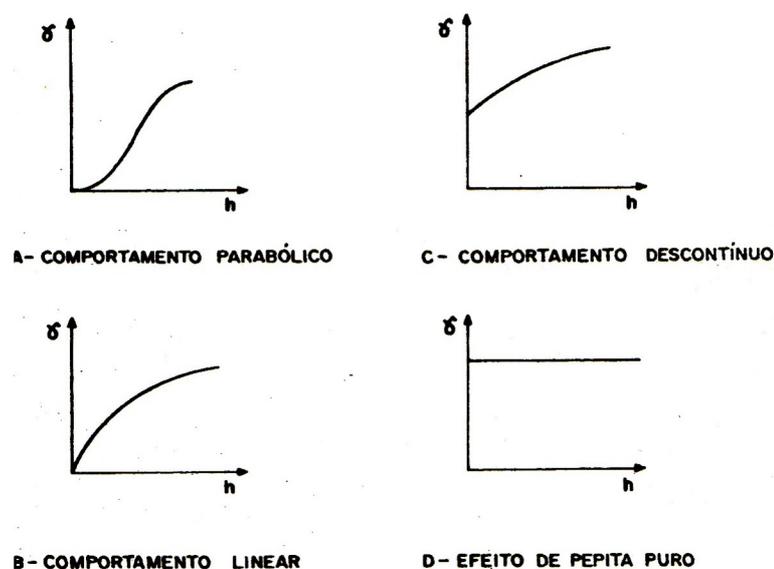


Figura 7 – Gráfico dos principais tipos de comportamentos na origem de variogramas. Retirado de Valente (1982)

Segundo Deutsch (2002), o variograma de uma variável indicadora é um tipo específico de variograma, utilizado no caso de variáveis discretas. Para seu cálculo segue-se o mesmo procedimento do cálculo de variograma tradicional, mas utilizando os valores transformados de uma variável indicadora. Para sua utilização em estimativas por krigagem, cada classe da variável indicadora deve estar representada pelo seu próprio variograma.

#### 4.3.3 Krigagem Ordinária

O estimador geoestatístico denominado krigagem foi empregado pela primeira vez por Matheron (1965). A krigagem é uma família de métodos de regressão linear utilizados para estimar valores em pontos não amostrados.

Segundo Valente (1982), a krigagem pode ser utilizada quando pretendemos conhecer o melhor estimador do valor de uma V.R. num dado espaço, conhecendo apenas os valores das variáveis amostradas em zonas estruturalmente ligadas àquele espaço.

Ainda segundo Valente (ap cit.) o método de krigagem consiste em procurar o melhor estimador possível, através da combinação linear de toda a informação disponível, cujos coeficientes obedeçam à duas condições: de não-enviesamento e de minimização da variância do erro da estimativa. O método atende ainda às características geométricas e estruturais do problema, definidas através do variograma.

Valente (1982) explica que considerando um local  $u$  não estimado e  $n$  amostras localizadas na vizinhança de  $\mathbf{u}_\alpha$ , sendo  $\alpha=1, \dots, n$ , o estimador linear de krigagem do local não amostrado

pode ser descrito pela equação (4.6):

$$Z^*(u) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \cdot Z(u_{\alpha}) \quad (4.6)$$

Onde  $\lambda_{\alpha}$  são os ponderadores, obtidos pela resolução de sistemas lineares (equação 4.9), que afetam as informações experimentais  $Z(u_{\alpha})$ . Os pesos da krigagem são estabelecidos com base no critério de mínima variância do erro de estimativa.

Matematicamente, a condição de restrição da krigagem ordinária que garante o não viés da estimativa pode ser descrita pela equação 4.7:

$$E[Z^*(u)] = E[Z(u)] \quad (4.7)$$

As equações de krigagem podem ser obtidas pela expansão da equação da variância de krigagem e a aplicação das técnicas dos multiplicadores de Lagrange:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\beta} \lambda_{\beta} \gamma(u_{\alpha} - u_{\beta}) + \mu = \lambda(u_0 - u_{\alpha}) \text{ para } \alpha = 1, n \\ \sum_{\beta} \lambda_{\beta} = 1 \end{array} \right. \quad (4.8)$$

Estas equações podem ser representadas por termos matriciais:

$$\begin{bmatrix} \gamma(u_{\alpha} - u_{\alpha}) & \gamma(u_{\alpha} - u_{\beta}) & \dots & \gamma(u_{\alpha} - u_n) & 1 \\ \gamma(u_{\beta} - u_{\alpha}) & \gamma(u_{\beta} - u_{\beta}) & \dots & \gamma(u_{\beta} - u_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \\ \gamma(u_n - u_{\alpha}) & \gamma(u_n - u_{\beta}) & \dots & \gamma(u_n - u_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{\alpha} \\ \lambda_{\beta} \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(u_0 - u_{\alpha}) \\ \gamma(u_0 - u_{\beta}) \\ \vdots \\ \gamma(u_0 - u_n) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Sendo  $\gamma(u_n - u_n)$  a variância espacial entre as amostras,  $\gamma(u_0 - u_n)$  a variância espacial entre a amostra e o ponto estimado e  $\mu$  o multiplicador de lagrange.

O detalhamento do desenvolvimento matemático pode ser encontrado em Valente (1982) e Yamamoto (2001).

De acordo com Soares (2014), os ponderadores do estimador de krigagem resumem dois fatores fundamentais:

1) O fator estrutural entre amostras e o ponto a estimar: do segundo membro do sistema de equações de krigagem deduz-se que, quanto mais próximo as amostras estiverem do ponto a estimar, maior será seu peso no estimador.

2) O fator de desagrupamento: do primeiro membro do sistema de equações de krigagem (relativo à matriz de covariância entre as amostras) deduz-se que, quanto mais correlacionadas estiverem as amostras, maior o efeito de agrupamento, e menor será seu peso individual na construção do estimador.

Segundo Deutsch (2002), a krigagem é um estimador exato, o que significa que a estimativa por krigagem em um local já amostrado terá o valor da própria amostra.

Os métodos de krigagem podem ser divididos em dois grupos: krigagem linear (por exemplo a krigagem ordinária) e a krigagem não linear (por exemplo a krigagem lognormal e krigagem de indicadoras). O primeiro grupo se refere a métodos de estimativa de variáveis contínuas, nos quais utilizam-se os valores originais das amostras. O segundo grupo se refere a métodos utilizados para variáveis contínuas e categóricas, no qual é utilizada a transformação prévia dos dados originais em variáveis indicadoras.

Segundo Rivoirard (1994), a geoestatística linear lida somente com combinações lineares da variável de estudo  $Z(u)$ , sendo possível a estimativa do valor da variável em um dado ponto  $u$  do domínio. Entretanto, em algumas ocasiões, torna-se necessário a estimativa de uma ou mais funções  $f(Z(u))$  ao invés da variável propriamente dita. Neste caso é recomendada a abordagem indicadora, na qual qualquer função pode ser expressa em termos da indicadora de  $Z(u)$ .

No caso de dados gaussianos, geralmente provenientes de variáveis contínuas, sua distribuição condicional apresenta forma gaussiana, e é obtida por sistema de krigagem simples. Já para o caso de dados não gaussianos, por exemplo variáveis categóricas, a distribuição condicional não pode ser expressa de forma analítica, o que gera um problema no algoritmo. Segundo Alabert (1987) uma maneira de resolver este problema consiste na estimativa desta distribuição condicional por um método não paramétrico, como por exemplo a krigagem de indicadores.

#### 4.3.3.1 Krigagem de variáveis Indicadoras

A variável indicadora resulta de uma transformação binária não linear de uma variável aleatória, na qual os valores transformados são restritos a 0 e 1. A abordagem indicadora pode ser utilizada tanto para uma variável categórica, na forma de ocorrência ou ausência de determinado dado, quanto para uma variável contínua, na forma de limites da distribuição de frequência.

Segundo Deutsch (2002) o objetivo do formalismo de indicadoras para uma variável categoria é a estimativa direta da distribuição de incerteza de determinada classe da variável.

A indicadora de uma variável aleatória categórica pode ser obtida pela sua transformação em  $K$  variáveis indicadoras, sendo  $K$  o número de valores possíveis com que se pode descrever a variável de estudo.

Segundo Deutsch (2002), a transformação matemática de uma variável aleatória para variáveis indicadoras é a codificação dos dados em um formato único. A abordagem indicadora leva diretamente a uma distribuição (histograma) que é o modelo de incerteza em cada local não amostrado estimado.

De acordo com Soares (2014), o formalismo da indicadora fornece, através do histograma local estimado, a incerteza ligada à grandeza em estudo, num dado ponto  $u_i$ .

A krigagem de indicadoras foi primeiramente descrita por Journel (1983). Segundo Deutsch (2002), a krigagem de indicadoras é simplesmente a utilização do método de krigagem (simples ou ordinária) para estimar uma variável que foi transformada em indicadora.

De acordo com a explicação de Rivoirad (1994), suponha que uma função aleatória  $Z(u)$  possa apresentar um número finito de valores, como, por exemplo 0, 1, 2 e 3, num determinado ponto  $u$ , sendo a ocorrência de um valor evento único e exclusivo. Podemos descrever essa relação como:

$$Z(u) = 0 \text{ ou } 1 \text{ ou } 2 \text{ ou } 3 \quad (4.10)$$

As diferentes possibilidades de valor para o ponto  $u$  podem ser codificadas em termos de funções indicadoras: no caso de  $Z(u)=i$  a indicadora  $I(Z(u)=i)$  é igual a 1, do contrário, igual a 0. Como na função somente uma das indicadoras poderá ter valor 1 no ponto  $u$ , essa codificação indicadora é denominada disjuntiva.

$$\sum_i I_{Z(u)=i} = I_{Z(u)=0} + I_{Z(u)=1} + I_{Z(u)=2} + I_{Z(u)=3} = 1 \quad (4.11)$$

Com a codificação de indicadoras é possível expressar qualquer função relativa a  $Z(u)$ . Como exemplo tem-se uma função  $f(Z(u))$  que apresenta os valores  $f_0$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  quando  $Z(u)$  apresenta os valores 0, 1, 2 e 3. Essa função pode ser escrita como:

$$\sum f_i I_{Z(u)=i} = f_0 I_{Z(u)=0} + f_1 I_{Z(u)=1} + f_2 I_{Z(u)=2} + f_3 I_{Z(u)=3} \quad (4.12)$$

No caso de  $Z(u)$  tomar um valor, como  $Z(u) = 0$ , têm-se que  $I(Z(u) = 0) = 1$ , e todas as outras indicadoras apresentam valor zero. Essa relação pode ser descrita como:

$$\sum f_i I_{Z(u)=i} = f_0 * 1 + f_1 * 0 + f_2 * 0 + f_3 * 0 = f_0 \quad (4.13)$$

Segundo Deutsch (2002) as probabilidades estimadas das  $k$  variáveis indicadoras devem cumprir as exigências de uma função de probabilidade, ou seja, serem positivas e somarem um. Como essas relações não são garantidas pela krigagem de indicadoras, uma correção posterior pode ser aplicada, na qual as probabilidades quando negativas são regularizadas para zero, garantindo a soma igual a 1.

#### 4.3.4 Simulação Estocástica

Simulações estocásticas são ferramentas que podem ser utilizadas para o entendimento da incerteza associada a modelagem geológica.

Soares (2014) afirma que os modelos de simulação estocástica pretendem, fundamentalmente, reproduzir a variabilidade de um conjunto de amostras, a lei de distribuição da variável em estudo (histograma) e sua continuidade espacial (variograma), condições que não são cumpridas pelos modelos de estimativa.

Deutsch (2002) explica que a simulação estocástica é um processo de obtenção de realizações múltiplas e equiprováveis da função aleatória, que reproduz o modelo de distribuição de probabilidade acumulada da variável aleatória e sua estrutura de correlação espacial, fornecendo uma medida conjunta da incerteza da variável.

Diferentemente da krigagem, que é um estimador baseado na minimização da variância, e por isso gera suavização da variabilidade original dos dados, a simulação representa bem a variância do depósito, pois o desvio padrão dos valores estimados se aproxima do comportamento originalmente amostrado. Dentre as diferenças entre krigagem e simulação pode-se ressaltar:

- 1) A estimativa por krigagem apresenta precisão local enquanto a simulação apresenta precisão global;
- 2) Na krigagem obtêm-se valores de sua incerteza através da variância de krigagem, na simulação pode-se calcular os valores de incerteza associados;
- 3) A simulação gera múltiplos cenários equiprováveis enquanto a krigagem gera apenas um cenário de menor variância associada.

Segundo Goovaerts (1997), cada realização simulada é representada pelo seu modelo de incerteza espacial, dado pela função de distribuição de probabilidade acumulada condicionada a  $n$  dados observados. Desta maneira cada simulação descreve o comportamento de uma variável aleatória e é denotada por:

$$F(u; z|(n)) = Prob\{Z(u) \leq z|(n)\} \quad (4.14)$$

##### 4.3.4.1 Simulação Sequencial

Segundo Emery (2004), o algoritmo de simulação sequencial é sem dúvida um dos mais difundidos para aplicação na geoestatística, devido a sua simplicidade conceitual e facilidade de execução.

Soares (20014), cita que a família de modelos mais recentes de simulação de cenários equiprováveis tem por base uma abordagem de simulação sequencial.

No algoritmo sequencial, desenvolvido por Journel (1989), os valores de cada nó são simulados por etapas, condicionados à distribuição dos dados de entrada e também aos valores previamente simulados em outros nós.

Deutsch & Journel (1998), descrevem os passos da simulação sequencial:

- 1) Definir o caminhamento aleatório para escolha dos nós da malha;
- 2) Escolher os vizinhos mais próximos de cada nó, incluindo os valores de dados originais e os simulados;
- 3) Estimar  $Z^*(u)$  por krigagem simples e calcular o desvio padrão de krigagem  $\sigma_{SK}$  para obtenção do termo do erro;
- 4) Adicionar o valor simulado  $Z^{*(l)}(u)$  ao banco de dados e repetir o processo até todos os nós serem estimados;

De acordo com Deutsch (2002), a rota aleatória é considerada a fim de evitar qualquer artifato que possa resultar em uma combinação regular de busca ou em uma busca restrita. Os dados originais e os valores previamente simulados são ambos utilizados na simulação para que a realização apresente uma estrutura espacial correta entre os valores originais, entre o valor original e o simulado, e entre os pares de valores simulados.

#### 4.3.4.2 Simulação Sequencial de Indicadoras

Segundo Deutsch (2002), o objetivo do formalismo indicador para a simulação de variáveis categóricas é a simulação da distribuição da variável. O procedimento da simulação sequencial de indicadoras (SIS) ocorre conforme uma simulação sequencial padrão, entretanto a distribuição de cada etapa consiste na probabilidade estimada para cada categoria  $p^*(k)$ ,  $k = 1, \dots, k$ , onde  $k$  é o número de categorias.

Deutsch (2002) cita também que o método é vastamente utilizado em modelos faciológicos por que os resultados, mesmo apresentando alta variabilidade, ainda sim são corretos para a anisotropia e variogramas das variáveis.

Ainda segundo Deutsch (ap cit.), a simulação sequencial de indicadora apresenta os seguintes passos:

- 1) Transformação da variável em  $k$  variáveis indicadoras;
- 2) Definição do caminho aleatório para cada nó da malha em cada ponto  $u$ ;
- 3) Determinação da probabilidade condicional da ocorrência da classe  $z$ , utilizando krigagem ordinária;
- 4) Simulação do valor  $Z^{*(l)}(u)$  à partir da distribuição acumulada inferida anteriormente;

5) O novo valor simulado é adicionado ao conjunto de dados condicionantes.

Para o próximo nó a ser simulado, os passos descritos são repetidos. O procedimento é repetido com um número diferente de semente, para a geração de múltiplas realizações. O conjunto de realizações pode ser usado na determinação de parâmetros estatísticos da função de distribuição acumulada (fdac) local da variável aleatória ou da função global. Considerando-se a fdac, torna-se possível definir vários intervalos de probabilidade que podem ser usados para medidas associadas a incertezas.

#### 4.3.5 A incerteza na geologia

De acordo com Bardossy & Fodor (2001), a incerteza é o reconhecimento de que o resultado de nossas medidas e observações pode desviar mais ou menos da realidade natural, referindo-se ao conhecimento imperfeito e inexato do mundo. Já o termo erro expressa a incerteza quantificada, podendo ser definido como a diferença entre um valor real e um valor estimado.

Segundo Wellmann *et al* (2010), praticamente todos os tipos de dados e modelos geológicos estão sujeitos a diversas formas de incertezas. Estas incluem imprecisões de medidas, apontamento, manuseio, limitações da amostragem, números insuficiente de amostras, modelos conceituais incorretos, necessidade de simplificação, heterogeneidade, aleatoriedade inerente ao depósito, entre outras.

Bardossy & Fodor (2001) explicam que em investigações geológicas puramente científicas, a negligência de incertezas e erros não apresenta sérias consequências, uma vez que é esperado que o desenvolvimento do conhecimento geológico e o aumento da quantidade de informações tenham efeito na eliminação gradual do erro. Na geologia aplicada, entretanto, erros resultantes dessa negligência podem ter grandes impactos em curto e longo prazo, principalmente em erros relacionados ao cálculo de reservas de minério, petróleo e de depósitos de resíduos radioativos.

O entendimento da incerteza e o cálculo de erros previamente à aplicação destes modelos é de extrema importância nestes campos de investigação. Segundo Mann (1993), nestes casos é importante reconhecer em termos quantitativos qual incerteza está associada com cada quantidade estudada, tanto de forma determinística quanto probabilística.

Bardossy & Fodor (2001) citam que em estudos tradicionais de geologia tais quais mapas, seções, modelos tectônicos e avaliações de reserva, geralmente não é fornecida nenhuma indicação das incertezas subjacentes à interpretação.

Um dos poucos trabalhos a respeito do tema de incerteza na geologia foi escrito por Mann (1993), onde são classificadas os tipos principais de incerteza:

1) Variabilidade natural inerente ao objeto de estudo, existente independentemente das investigações geológicas;

2) Erro de amostragem, causado por limitações da amostragem dos objetos geológicos no espaço e tempo;

3) Erro de observação de estruturas geológicas em campo, onde essas são realizadas de modo incompleto ou superficial. Geralmente ocorrem devido a questões climáticas, como mau tempo, ou ambientais, como presença de cobertura por vegetação densa. Além disso, as observações podem ser influenciadas por determinado interesse pessoal ou curiosidade, levando a um viés;

4) Erro de medição, dependendo da imperfeição dos métodos de medida. Pode ter três fontes: imperfeição do instrumento, imperfeição do método aplicado e falta de habilidade ou de atenção da pessoa encarregada da medição;

5) Erro da avaliação matemática do dado geológico, condicionado, geralmente, pelo número insuficiente de amostras coletadas. Outra fonte deste tipo de erro pode ser a negligência de regras matemáticas, tal qual o cálculo que necessita de uma distribuição normal, mas é realizado em dados com distribuição assimétrica;

6) Propagação de erros. Ocorre na situação de diversas variáveis, onde os erros de medidas individuais se propagam diferentemente, de acordo com a interdependência das variáveis. A propagação de erros na abordagem matemática também é muito frequente;

7) Incerteza conceitual e do modelo genético utilizado. A identificação e classificação de modelos geológicos são feitas a partir da aplicação de conceitos geológicos pré-existentes. Simplificações, generalizações, e a utilização de modelos análogos, que não levam em consideração estruturas locais, são fontes de incerteza.

O primeiro tipo de incerteza, inerente à variabilidade natural, é uma propriedade da natureza, independente do tratamento humano. Todos os outros tipos de incerteza são partes da investigação geológica, que é a parte relacionada à atividade humana.

## 5 Análise e discussão dos dados

### 5.1 Validação da base de dados

A base de dados, disponibilizada pela empresa Votorantim Metais, contempla informações referentes a três alvos principais (Áreas 1, 2 e 3), sendo composta por 321 furos que totalizam 43.866 amostras e 72.775 metros de sondagem diamantada (Figura 8). Para esta dissertação foram utilizados apenas os dados da Área 3 do depósito, que apresentam maior densidade de furos e melhor controle de qualidade das amostras.

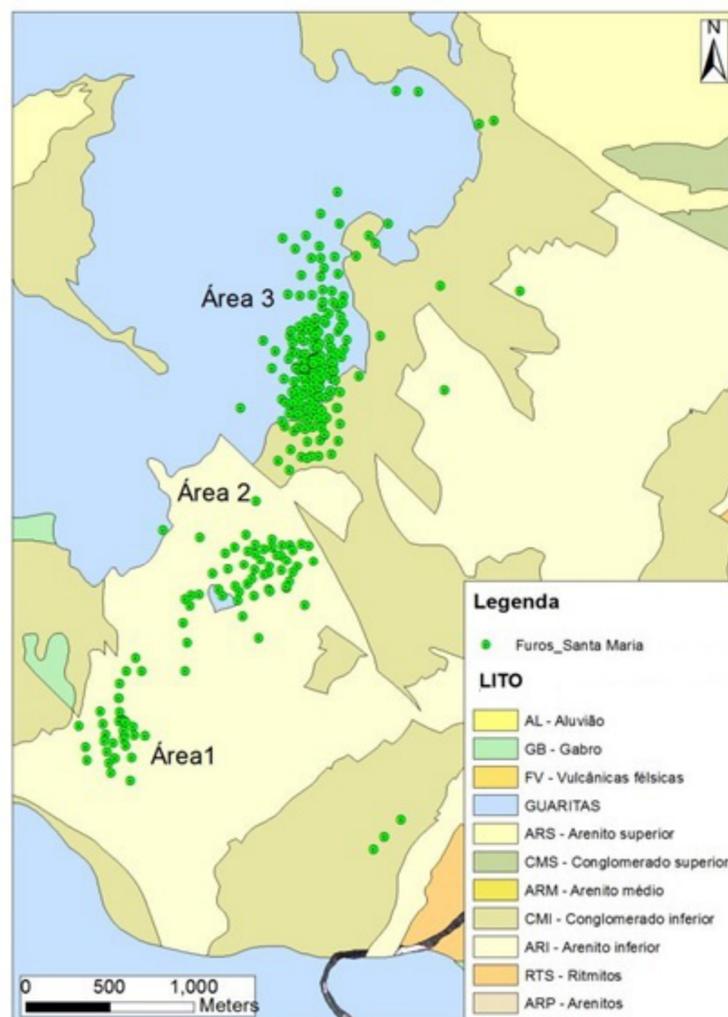


Figura 8 – Mapa geológico do depósito Santa Maria, com furos de sondagem realizados, litoes-tratigrafia regional e localização das Áreas de estudo 1, 2 e 3

O banco de dados da Área 3 contém 208 furos e mais de 46 mil metros de sondagem com informações de colares, *survey* e *lito-assay*. A malha de sondagem é irregular e foi gerada ao longo de diversas companhas, realizadas por três diferentes empresas: CBC, Iamgold e

Votorantim Metais. A malha é composta por furos verticais e inclinados, que variam entre 47 e 750 metros de comprimento. A maioria dos furos teve seu início em superfície, mas existem também aqueles em formato de leques, executados através de uma galeria existente na parte central do depósito.

Por se tratar de um banco composto por informações de diferentes campanhas de sondagem, e analisado por vários métodos analíticos, foi necessária a padronização dos valores dos elementos. Foi também realizada a validação da base de dados, com o objetivo de garantir a integridade das informações e prevenir a propagação de erros como de descrição, amostragem e análise química.

Para a validação foram realizados procedimentos de verificação de valores de máximos e mínimos, soma de porcentagens e cruzamentos de informações. Essa verificação visou a identificação e correção de incoerências, duplicidades e sobreposições. Foi feita, também, a análise visual dos colares dos furos em mapa, para reconhecimento de possíveis erros por troca de coordenadas.

## 5.2 Análise exploratória dos dados

A análise exploratória dos dados teve como objetivo caracterizar e descrever estatisticamente as distribuições dos dados de Zn e Pb, para melhor entendimento do comportamento das variáveis de interesse dentro do depósito.

Foram calculadas medidas de tendência central, média, mediana e moda. Assim como medidas de dispersão em torno da média, variância, desvio padrão e coeficiente de variação.

Inicialmente foi realizado um estudo estatístico univariado e bivariado, para os dados globais de Zn e Pb. Posteriormente foram estudadas formas estatísticas para separação dos dois tipos de mineralização que ocorrem no depósito. Após a separação dos domínios mineralizados em *Low Grade* e *High Grade* suas estatísticas foram calculadas (a nomenclatura em inglês foi utilizada por se tratar do termo empregado atualmente no projeto Santa Maria, e por ser bastante utilizado na indústria mineral). Por fim foi realizada a regularização das amostras por comprimento.

### 5.2.1 Análise estatística global

O banco de dados apresenta média global de 0,37% de Zn e 0,57% de Pb, com desvios padrão de 1,24 % e 1,79%, respectivamente. As estatísticas descritivas podem ser vistas na Tabela 1. Os dados apresentam distribuição assimétrica positiva, característica de depósitos metálicos. Os histogramas das amostras podem ser observados na Figura 9.

Foram gerados gráficos de probabilidade do tipo P-P para as amostras de Zn e Pb. Esse tipo de gráfico associa o valor da variável à sua frequência acumulada correspondente. Sua distribuição é semelhante à do histograma acumulado, mas o eixo vertical do gráfico tem uma

Tabela 1 – Estatística descritiva dos dados de Zn e Pb

Variável	N amostras	Mín	Máx	Média	Desvio P.	Variância	Coef. Var.
Zn (%)	33973	0	28,00	0,37	1,24	1,45	3,27
Pb (%)	33973	0	56,20	0,57	1,79	2,87	2,98

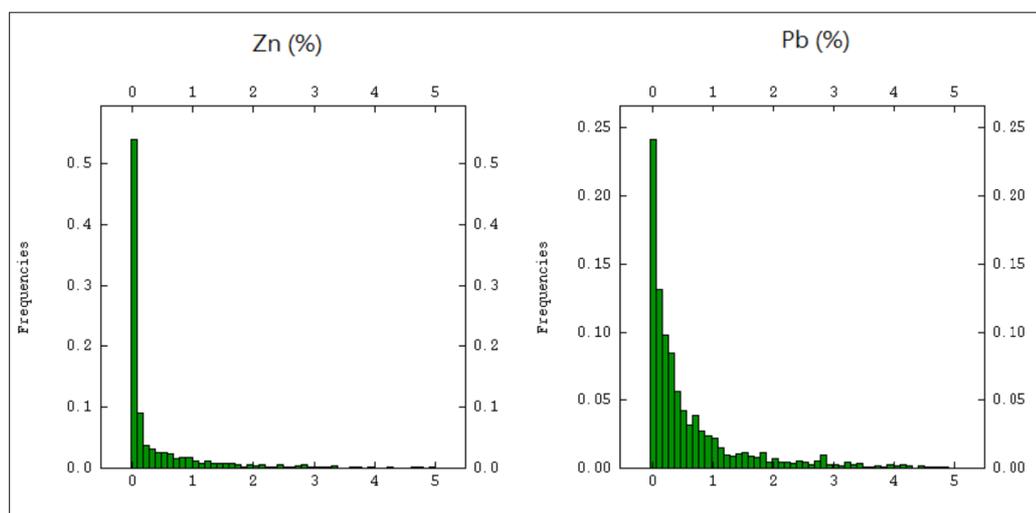


Figura 9 – Histograma dos dados de Zn e Pb

graduação específica, com base nos valores de quantil de distribuição normal. Quando os dados ficam alinhados, entende-se que a variável apresenta distribuição normal. Neste tipo de gráfico é mais fácil perceber inflexões referentes a misturas populacionais.

Visualizando os gráficos da Figura 10 observa-se a existência de três inflexões nas curvas de distribuição dos dados de Zn e Pb, nos teores de 0,005, 0,01 e 0,02%. Essas quebras são referentes aos limites mínimos de detecção dos variados métodos analíticos utilizados no estudo do depósito ao longo do tempo. Desde o começo da pesquisa da Votorantim Metais, em 2008, os limites de detecção das análises de Zn e Pb são de 0,001%, indicando que todos os dados com teores menores que 0,005% se referem a amostras realizadas pela Votorantim.

Foi criado também um diagrama de dispersão de Zn x Pb (Figura 11). As variáveis apresentam baixo coeficiente de correlação ( $r = 0,34$ ), indicativo de comportamentos distintos dos minerais de minério de Zn e Pb ao longo do depósito.

Geologicamente entende-se que a mineralização ocorreu com o enriquecimento conjunto de Zn e Pb nas regiões de falha do depósito, entretanto é conhecido que grande parte do Pb do depósito ocorre na forma secundária, gerado por remobilização do chumbo primário e posterior deposição em conjunto com a mineralização de prata em zonas superficiais. Essa remobilização gera dois cenários de baixa correlação entre Zn e Pb: zonas com altos teores de Zn primário e baixos ou nenhum teor de Pb primário, e zonas com altos teores de Ag+Pb secundário, e ausência de Zn primário.

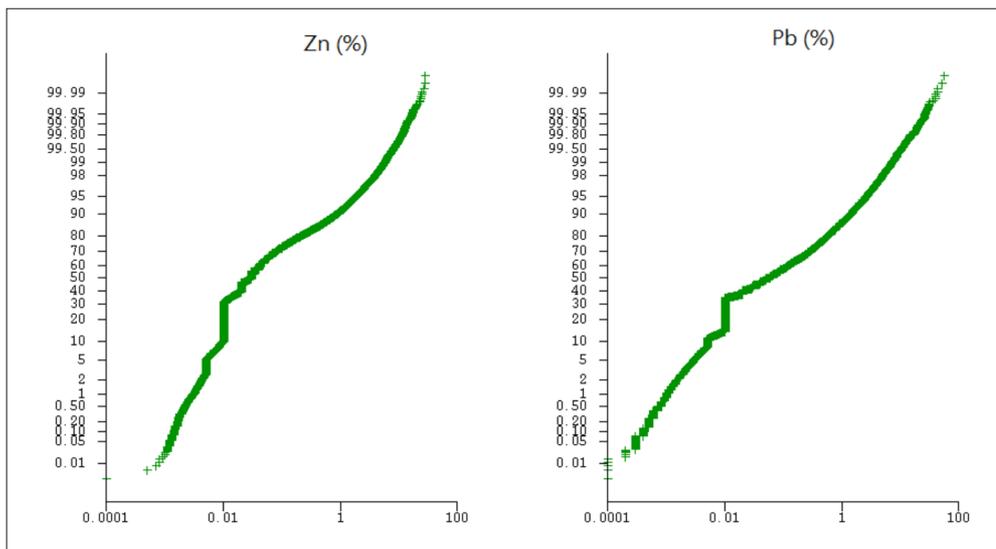


Figura 10 – Gráfico tipo P-P de distribuição dos dados de Zn e Pb

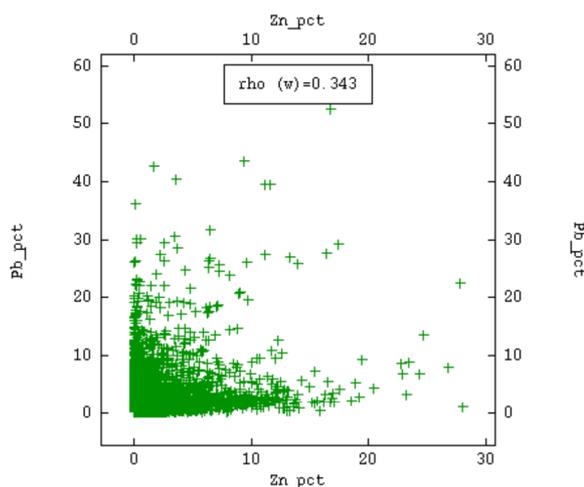


Figura 11 – Diagrama de dispersão Pb x Zn das amostras do depósito

### 5.2.2 Separação dos tipos de mineralização

Por análise visual dos testemunhos de Santa Maria, sabe-se que ocorrem dois tipos principais de mineralização no depósito, descritas texturalmente como *stringer* (geralmente amostras de alto teor) e *disseminada* (geralmente amostras de baixo teor).

A separação dessas duas populações amostrais se faz necessária para que não haja problemas referentes a subestimativas e superestimativas de recurso. Idealmente, a melhor maneira para separar os tipos de mineralização seria pela descrição textural dos testemunhos. Entretanto, o banco de dados não contém essa informação para todas as amostras, impossibilitando a classificação categórica da mineralização somente por descrição textural.

Optou-se pelo estudo estatístico dos dados de teores de Zn e Pb de amostras com informação

de descrição textural, para melhor entendimento do comportamento dessas variáveis quando separadas por tipo mineralizado. Foram utilizadas informações de histogramas, diagramas P-P e das estatísticas descritivas para análise dos dois tipos mineralizados.

Os histogramas de Zn e Pb das amostras separadas por textura podem observados na Figura 12, e não indicaram a existência de quebra clara de populações. As distribuições das amostras disseminadas e stringers apresentam assimetria positiva, com comportamento similares. Os valores de média de Zn e Pb, entretanto, são diferentes, com a população *stringer* apresentando médias 40% mais elevada que a população disseminada.

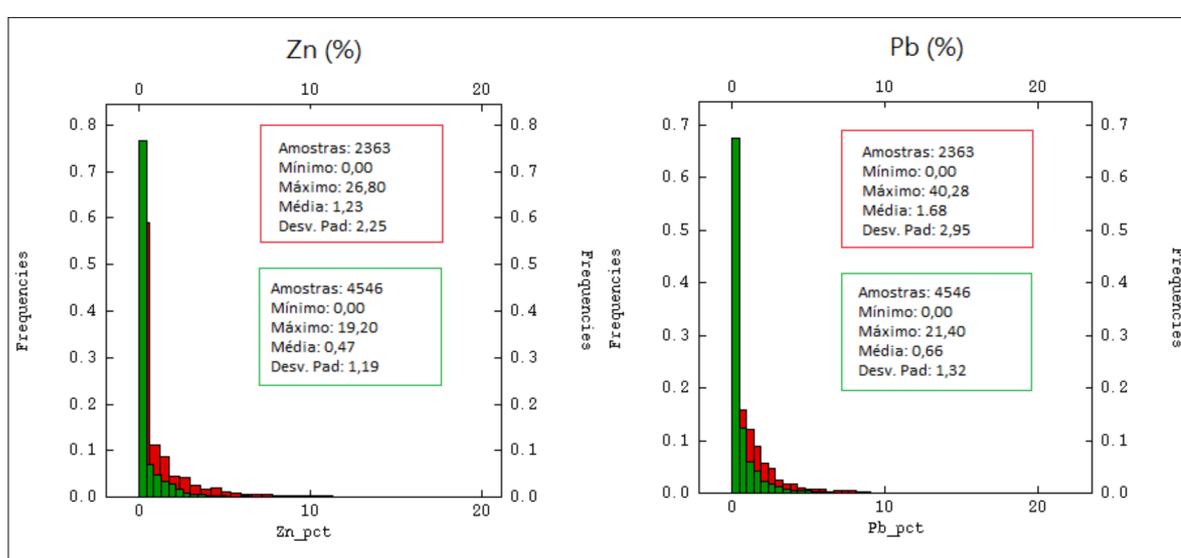


Figura 12 – Histogramas de Zn e Pb com dados separados por textura *stringer* (vermelha) e disseminada (verde)

A curva de distribuição P-P comparativa dos percentis das variáveis com os percentis da gaussiana  $N(0,1)$  evidenciou a separação das duas populações de mineralização, ficando clara a ocorrência de amostras de textura *stringer* com teores mais elevados que as amostras de textura disseminada (Figura 13). As curvas referentes a distribuição de Pb indicam maiores diferenças de comportamento entre as duas classes de mineralização.

Como a existência de mistura populacional é evidente pela interpretação dos gráficos P-P, optou-se pela tentativa de separação dos tipos de mineralização por limites de teores, de maneira a representar as diferenças observadas pela separação textural.

Para não haver confusão entre a separação por descrição textural e a separação por corte químico, foi utilizada uma nova nomenclatura para os dois tipos de mineralização: *High Grade* e *Low Grade*.

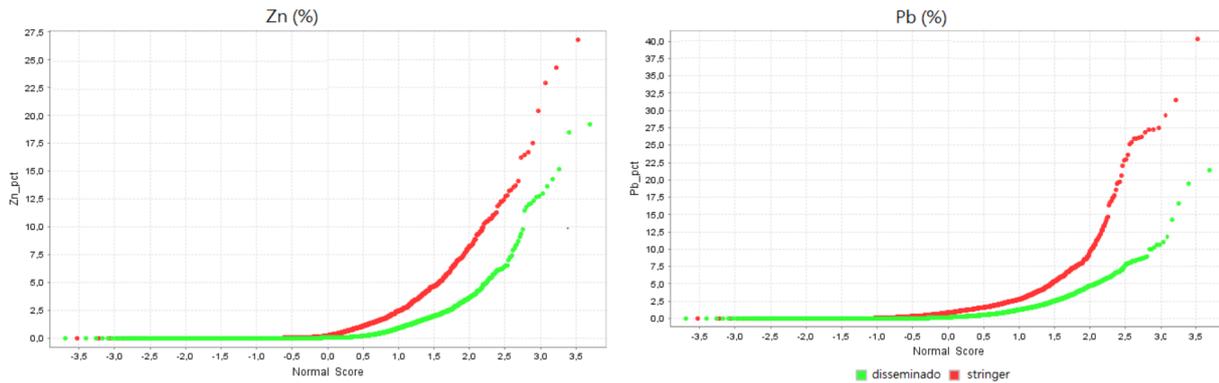


Figura 13 – Diagramas do tipo P-P para Zn e Pb com dados separados por textura *stringer* (vermelha) e disseminada (verde)

### 5.2.3 Separação dos tipos de mineralização por cortes de teor

Foram utilizados gráficos tipo P-P dos dados completos de Zn e Pb na tentativa de obter-se valores guia que ajudassem na separação do material estéril, da mineralização *Low Grade* (LG) e da mineralização *High Grade* (HG).

Os gráficos criados para Zn e Pb são apresentados na Figura 14. A presença de inflexões nos dois gráficos sugere misturas populacionais, ocorrendo com valores próximos de 0,4% de Pb e 0,55% de Zn. Como a mineralização de Zn e Pb do depósito será tratada de maneira conjunta, optou-se pela utilização do valor mínimo de 1% de Zn+Pb para classificar uma amostra como pertencente à mineralização LG. Desta maneira, amostras com teores menores que 1% de Zn+Pb serão consideradas estéreis.

Para determinação do valor de quebra entre as zonas de mineralização HG e LG foram selecionadas as amostras sem classificação, que apresentavam, portanto, valores acima de 0,4% de Pb e 0,55% de Zn. Novos gráficos foram criados, conforme a Figura 15, nos quais foi possível observar inflexões para os valores de 1,3% Pb e 1,7% Zn. Optou-se então pela utilização do valor mínimo de 3% de Zn+Pb para classificar uma amostra como material HG.

Desta forma, a classificação dos tipos de material do depósito ficou baseada em teores de corte, e pode ser definida como:

- Material Estéril:  $< 1\% \text{ Zn} + \text{Pb}$
- Mineralização *Low Grade*:  $1\% < \text{Zn} + \text{Pb} < 3\%$
- Mineralização *High Grade*:  $\text{Zn} + \text{Pb} > 3\%$

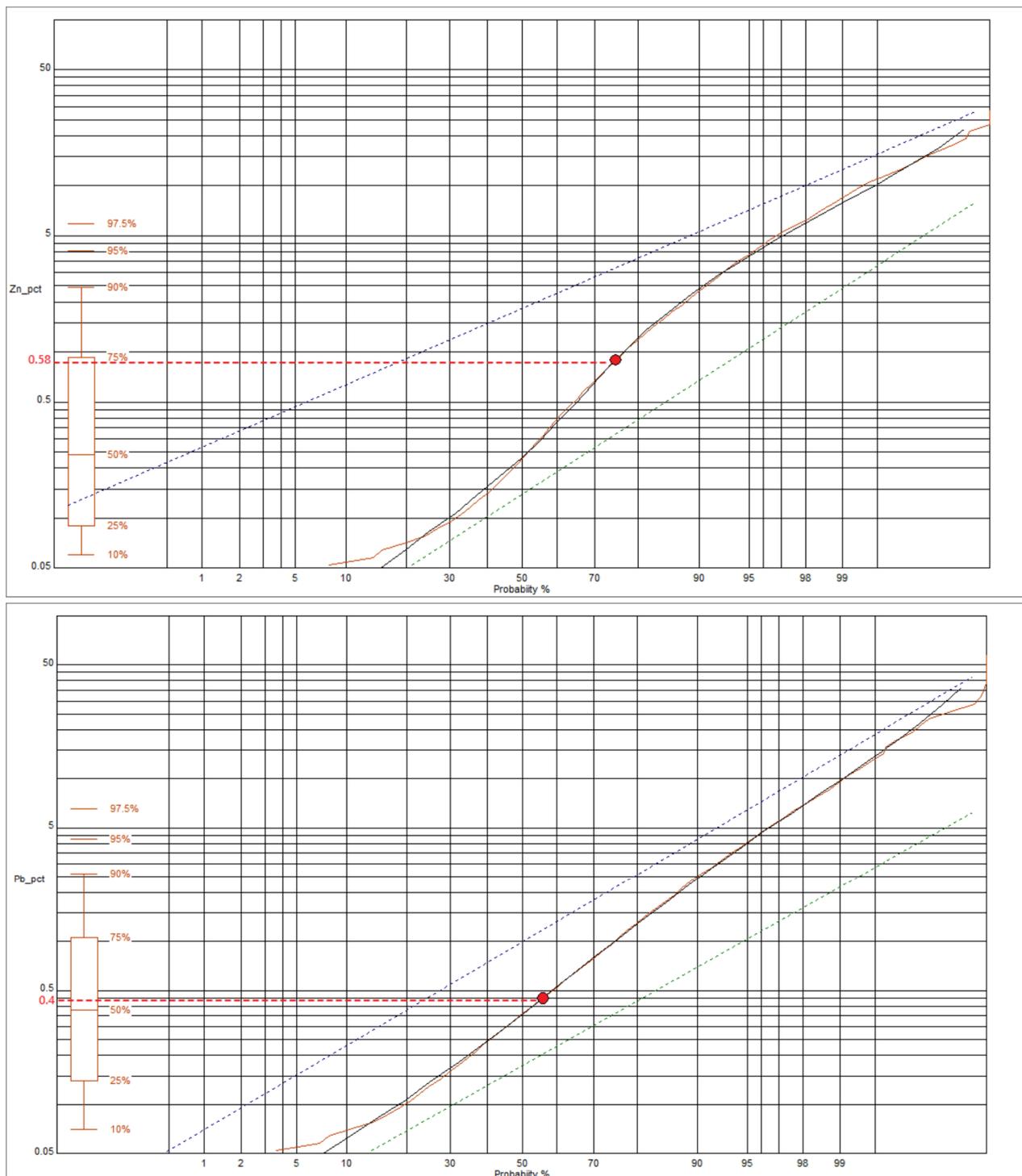


Figura 14 – Diagramas P-P de Zn (acima) e Pb (abaixo) de todos os dados do depósito. Observa-se inflexão em 0,4% de Pb e 0,58% de Zn

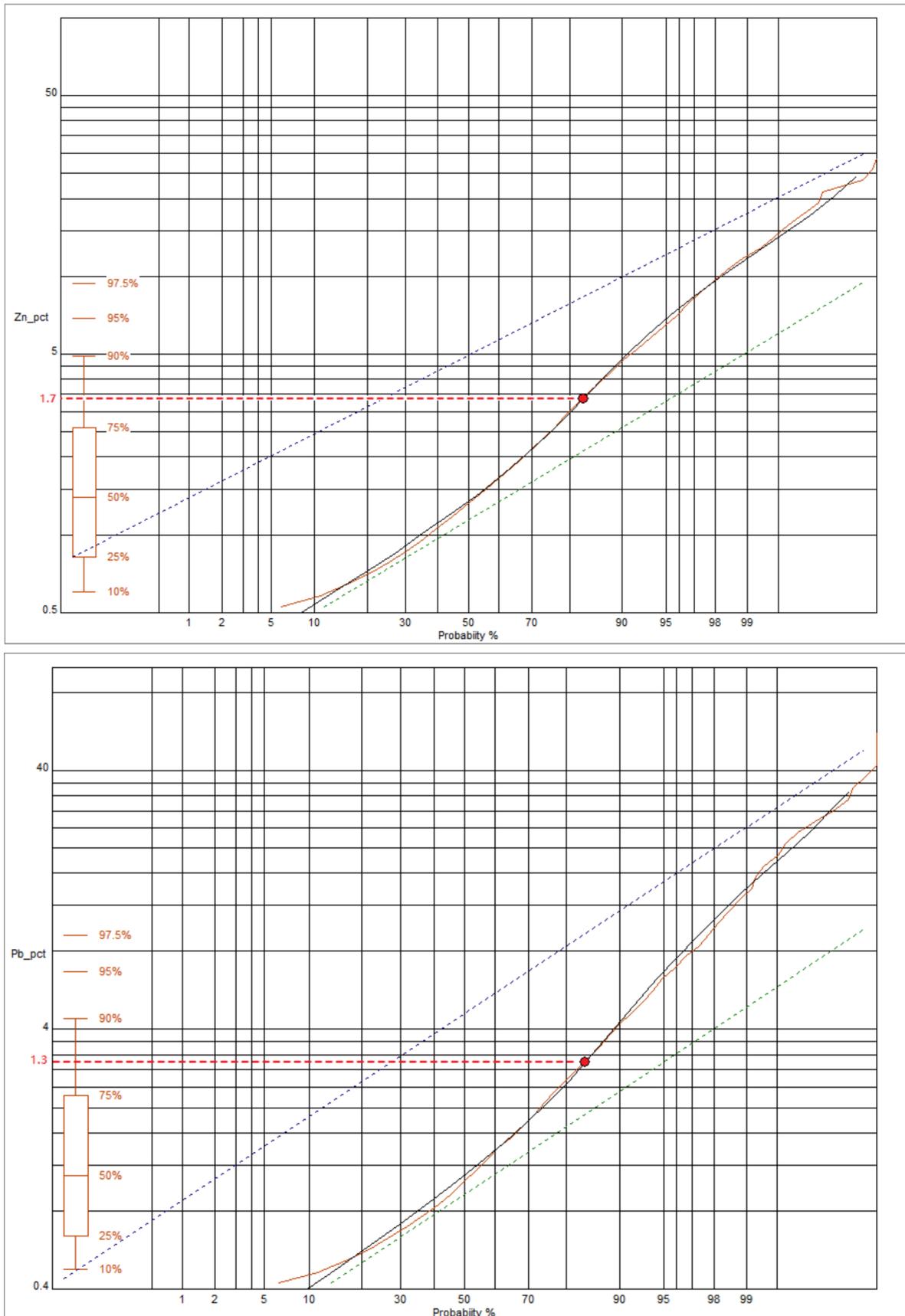


Figura 15 – Diagramas P-P de Zn (acima) e Pb (abaixo), com aplicação de cut off mínimo de 0,4‰ de Pb e 0,5‰ de Zn. Observa-se inflexão em 1,3‰ de Pb e 1,7‰ de Zn

### 5.2.4 Análise estatística por tipo mineralizado

As amostras da mineralização HG apresentam média de 1,87% de Zn e 2,90% de Pb, somando 4,77% de Zn+Pb. Já as amostras da mineralização *Low Grade* apresentam teor significativamente mais baixo, de 0,70% de Zn e 1,12% de Pb, somando 1,82% Zn+Pb. Os histogramas dessas variáveis podem ser vistos nas Figuras 16 e 17, e as estatísticas descritivas nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Estatísticas descritivas das amostras *High Grade*

Variável	N amostras	Mín	Máx	Média	Desvio P.
<i>Amostras High Grade</i>					
Zn (%)	3948	0	28,00	1,87	2,79
Pb (%)	3948	0	56,20	2,90	3,88
<i>Amostras High Grade compositadas</i>					
Zn (%)	5024	0	27,80	1,95	2,54
Pb (%)	5024	0	56,20	3,47	5,29

Tabela 3 – Estatísticas descritivas das amostras *Low Grade*

Variável	N amostras	Mín	Máx	Média	Desvio P.
<i>Amostras Low Grade</i>					
Zn (%)	4374	0	27,80	0,70	1,39
Pb (%)	4374	0	30,38	1,12	1,69
<i>Amostras Low Grade compositadas</i>					
Zn (%)	7102	0	17,45	0,72	0,95
Pb (%)	7102	0	30,38	1,06	1,28

### 5.2.5 Regularização das amostras

Para garantir o mesmo suporte amostral das amostras que seriam utilizadas nos métodos geoestatísticos, foi realizada a regularização das amostras para comprimento de 1 metro, correspondente ao tamanho de maior ocorrência das amostras no banco de dados. A regularização por comprimento é um método bastante difundido na geoestatística para gerar *composites* de mesmo tamanho a partir de qualquer amostragem de suporte irregular, sendo o *composite* a média ponderada do teor pelo comprimento das amostras.

As médias para a população HG variaram de 1,87% para 1,95% para Zn e de 2,90% para 3,41% para Pb, conforme observa-se histogramas da Figura 16 e Tabela 2. O aumento de quase 15% do teor médio do Pb é reflexo das campanhas de sondagem mais antigas, que interceptaram zonas anômalas de altos teores de Pb, e cujas amostras tinham geralmente mais que 1 metro de comprimento. Já para a população LG, as variações foram suaves, de 0,7% para 0,72% de Zn e 1,12% para 1,06% de Pb, conforme a Figura 17 e a Tabela 3.

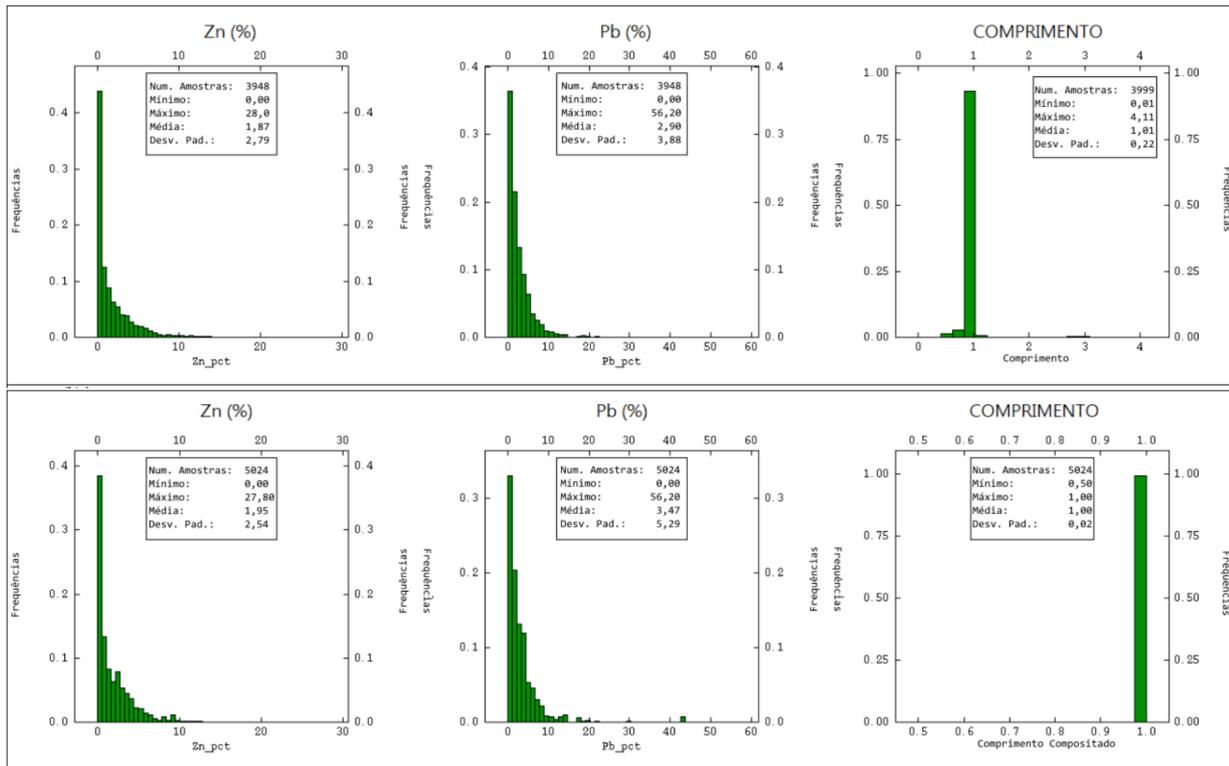


Figura 16 – Histogramas das amostras mineralizadas *High Grade* regulares (acima) e compostadas em 1m (abaixo)

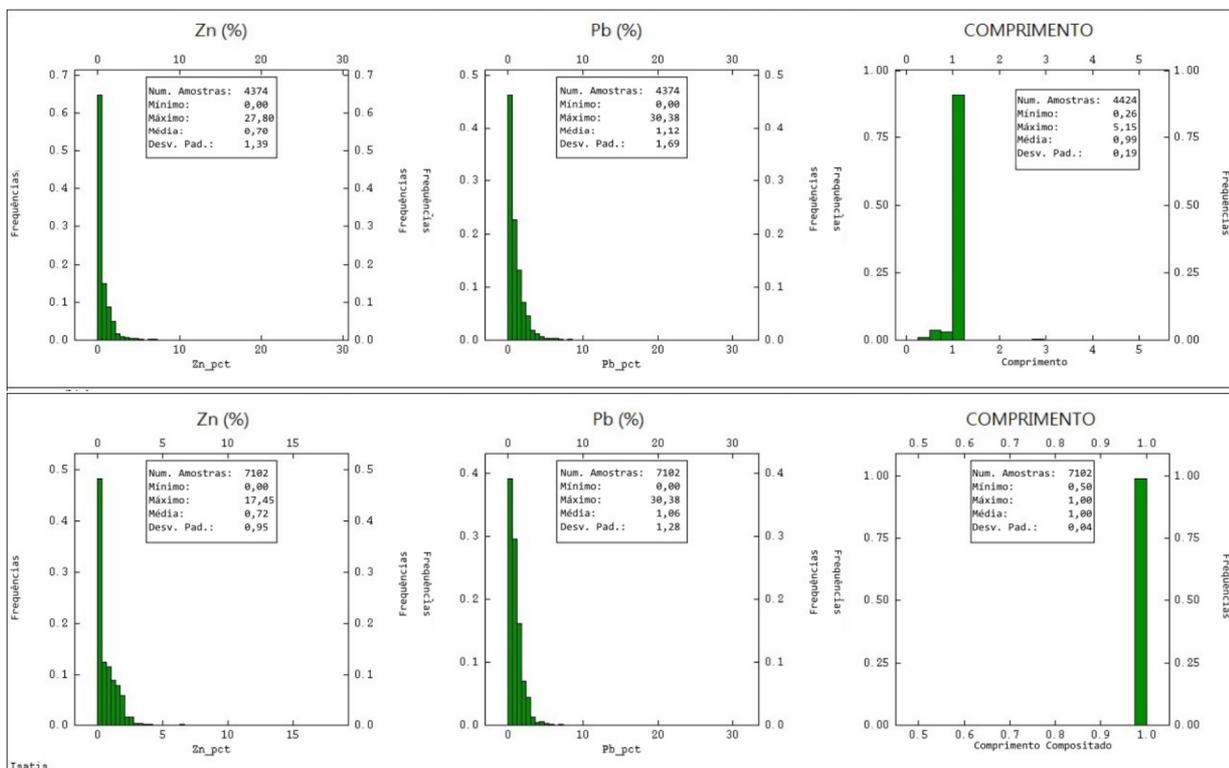


Figura 17 – Histogramas das amostras mineralizadas *Low Grade* regulares (acima) e compostadas em 1m (abaixo)

### 5.2.6 Análise de contato

A análise de contato calcula o valor médio de uma variável em um domínio, em função da distância em uma direção de referência com relação ao contato e o valor médio da variável do outro domínio. Os valores médios são calculados ao longo dos furos por classe de distância.

Foram geradas análises de contato entre os domínios HG e LG, para os elementos Zn e Pb, conforme a Figura 18. As estatísticas foram calculadas na direção de referência na forma de contato direto (do colar em direção ao final do furo).

Apesar de ocorrer diferença significativa de médias entre os domínios, o contato ocorre de forma gradacional. Este tipo de contato faz sentido geológico pois os dois tipos de mineralização estão geneticamente correlacionados, sendo o minério *Low Grade* uma gradação do minério *High Grade* através da porosidade da rocha.

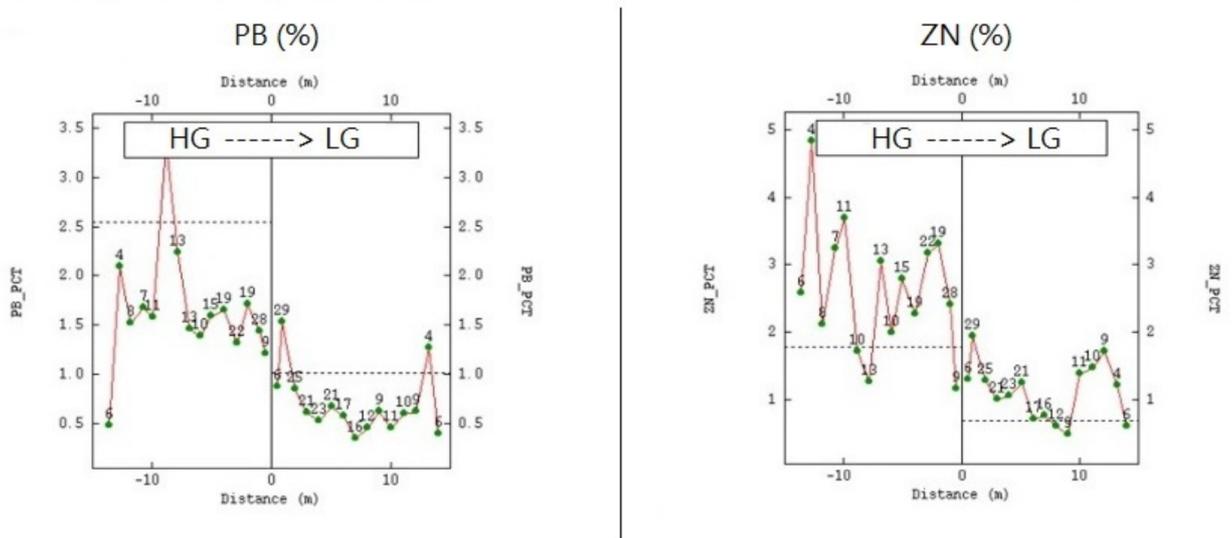


Figura 18 – Análise de contato entre as zonas *Low Grade* e *High Grade* para os elementos Pb e Zn

## 5.3 Modelagem geológica

### 5.3.1 Modelagem dos litotipos do depósito

Para a modelagem geológica foi utilizado o campo *unidade* da base de dados, gerado por uma simplificação do campo *lito*, que apresenta as principais litologias do depósito. A modelagem geológica foi realizada anteriormente à modelagem dos corpos mineralizados pois a ocorrência do minério está condicionada à existência da camada de arenito, e o modelo geológico serviu de parâmetro para ajudar na modelagem da mineralização.

Quatro camadas principais foram modeladas: Arenito AR1, Conglomerado CM1, Arenito AR2, e Ritmito RT. As características geológicas das camadas estão descritas a seguir:

1) AR1 – Arenito médio a grosso, cor marrom, composto por níveis milimétricos conglomeráticos, presença de estratificação cruzada e plano paralela, com mergulho médio de 10 graus e espessura média de 10m;

2) CM1 – Conglomerado polimítico, cor branca a bege, composto por seixos centimétricos bem selecionados e níveis métricos de siltito, presença de mineralização disseminada (galena + esfalerita) na matriz, contato de base delimitado por nível conglomerático, mergulho médio de 10 graus, espessura média de 40m;

3) AR2 – Arenito médio a fino, cor avermelhada, com contribuição subordinada de arenitos grossos e intercalações centimétricas de siltitos, presença de mineralização disseminada e maciça ao longo de toda a camada, mergulho médio de 10 graus, espessura média de 40m;

4) RT – Intercalações métricas a centimétricas de arenito médio com siltito, cor marrom arroxado, ocorrência de fraturas preenchidas por hematita, presença de mineralização sulfetada (calcosita + covelita) disseminada em níveis areníticos, espessura média 100m.

A modelagem geológica foi realizada no programa *Leapfrog*, na forma de camadas estratigráficas, baseada nos contatos litológicos dos furos de sondagem. Primeiramente as amostras foram classificadas conforme sua ocorrência dentro da litoestratigrafia local e posteriormente as superfícies das amostras foram conectadas por uma malha de triângulos denominada *wireframe*.

O controle da mineralização, da alteração hidrotermal e da permo-porosidade primária da sequência sedimentar do depósito é estrutural, e por isso foram modeladas também as principais falhas do depósito, que podem ser visualizadas nas Figuras 19 e 20. Os dados utilizados para identificação de tais estruturas foram imagens de satélites e informações de levantamentos geofísicos de superfície e de profundidade, conforme mapa da Figura 21.

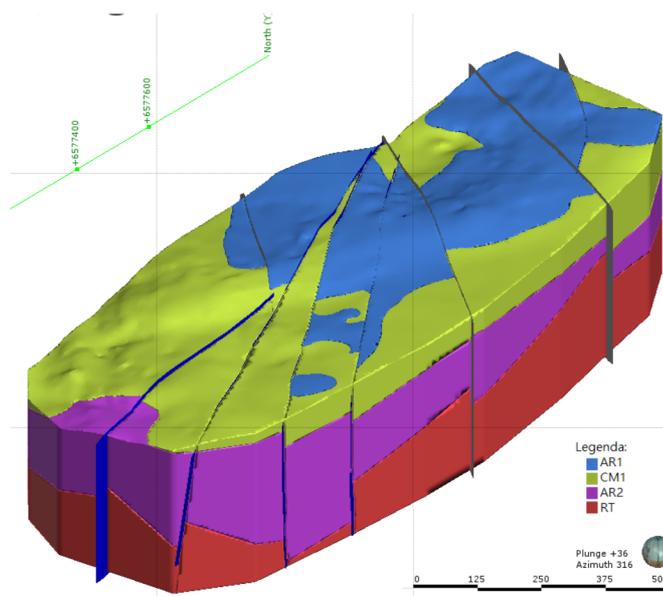


Figura 19 – Modelo geológico elaborado com base nos dados de litoestratigrafia. Os planos em azul são as falhas modeladas. Na camada AR2 (Formação Seival) ocorrem os principais corpos mineralizados depósito

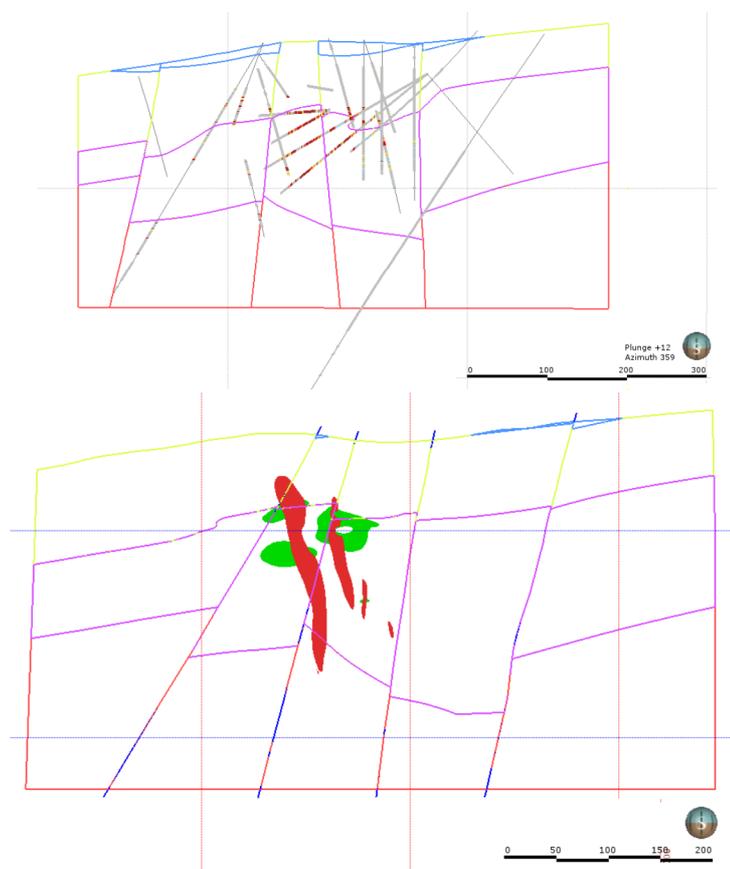


Figura 20 – Seções verticais evidenciando o modelo geológico. Na imagem superior estão presentes os furos de sondagem utilizados na modelagem e na imagem inferior está localizada a zona de ocorrência mineralização HG (vermelho) e LG (verde)

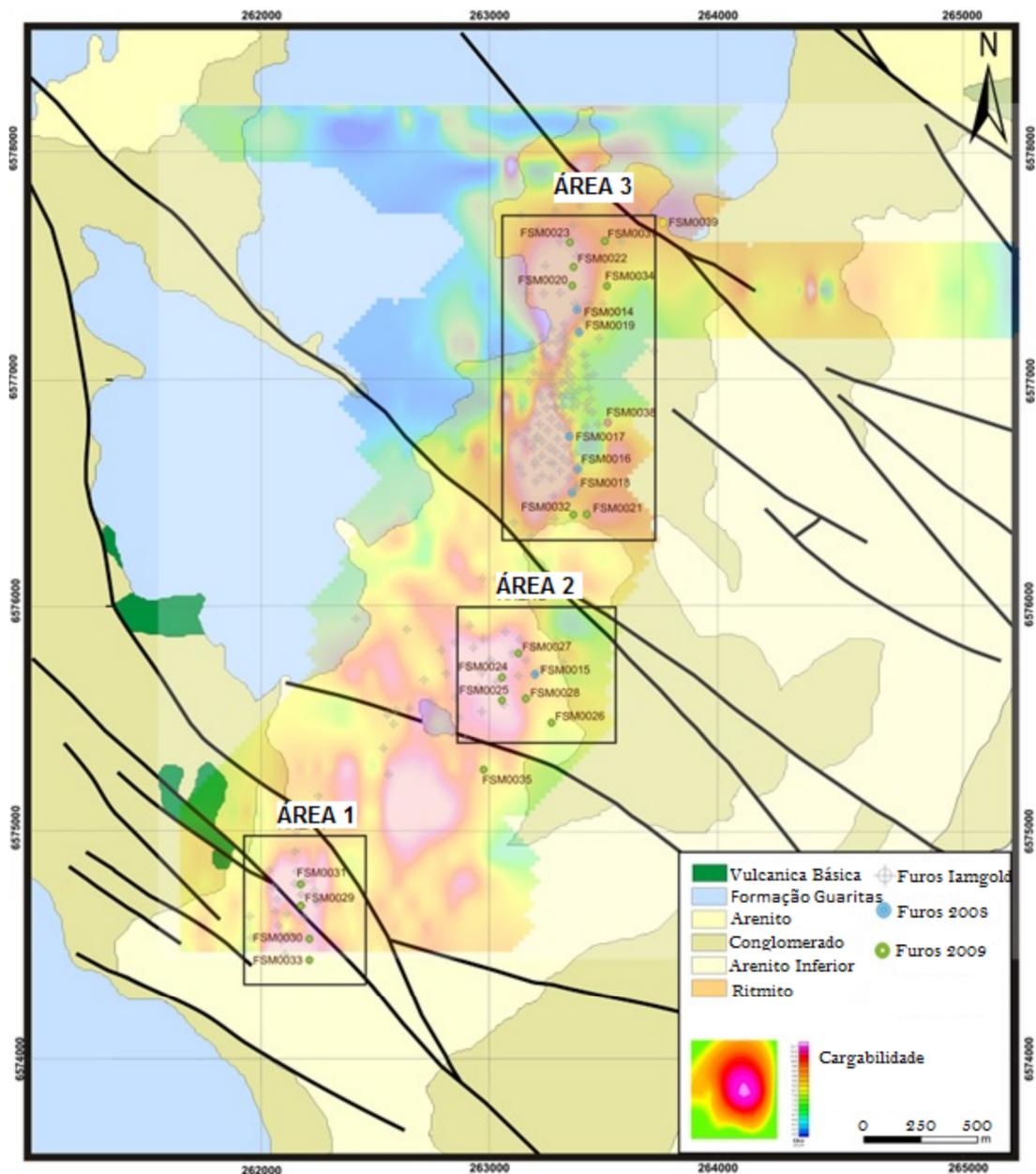


Figura 21 – Mapa geológico do depósito Santa Maria com sobreposição de anomalias obtidas por levantamento geofísico IP. Figura confeccionada pela equipe de geólogos de Exploração da Votorantim Metais - 2012

### 5.3.2 Modelagem dos corpos mineralizados

Conforme discutido nas seções anteriores, os corpos mineralizados foram definidos por critérios quantitativos (faixa de teores de corte). A mineralização *Low Grade*, usualmente de textura disseminada, ocorre associada à mineralização primária das rochas nos arenitos da unidade AR2, mas também pode ser observada nos conglomerados em contato superior ao arenito da unidade CM1 e ritmitos da unidade RT. Essa mineralização geralmente aparece englobando a mineralização *High Grade* em formas horizontalizadas arredondadas.

A mineralização *High Grade*, usualmente de textura *stringer*, ocorre discordantemente com as camadas sedimentares e possui mergulho sub-vertical. Corta todas as unidades litoestratigráficas, sendo condicionada principalmente às zonas com maior densidade de falhas e fraturas (mineralização condicionada pela porosidade secundária da rocha), apresentando eixo principal verticalizado de grande alcance e pouca espessura horizontal.

A modelagem dos corpos mineralizados foi realizada no programa *Datamine e Leapfrog*, honrando os intervalos de teores presentes nos furos e a continuidade dos corpos, analisada por meio de seções verticais, como ilustrado na Figura 22. Primeiramente foram modelados os corpos *High Grade* por entender-se que esta mineralização ocorreu anteriormente e gerou a mineralização posterior *Low Grade* por disseminação. O modelo final da mineralização *High Grade e Low Grade* pode ser visualizado na Figura 23.

Foi tomada a precaução de não conectar lateralmente os corpos mineralizados *High Grade*, principalmente em regiões com pouca informação. Isso porque geologicamente entende-se que as mineralizações HG são essencialmente verticais, por acompanharem os falhamentos. A conexão lateral dos corpos feita de forma indiscriminada poderia aumentar o valor do recurso de forma artificial. Assim, os corpos de mineralização *High Grade* só foram ligados lateralmente em zonas de furos em leque, onde é possível verificar a extensão da mineralização.

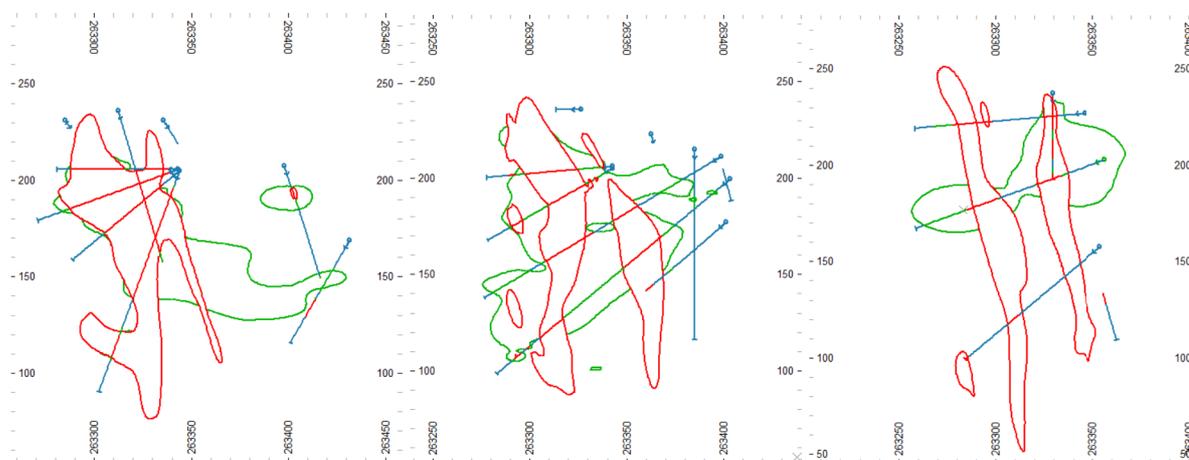


Figura 22 – Seções verticais da mineralização interpretada com base nos furos de sondagem. Em verde os corpos LG e em vermelho os corpos HG

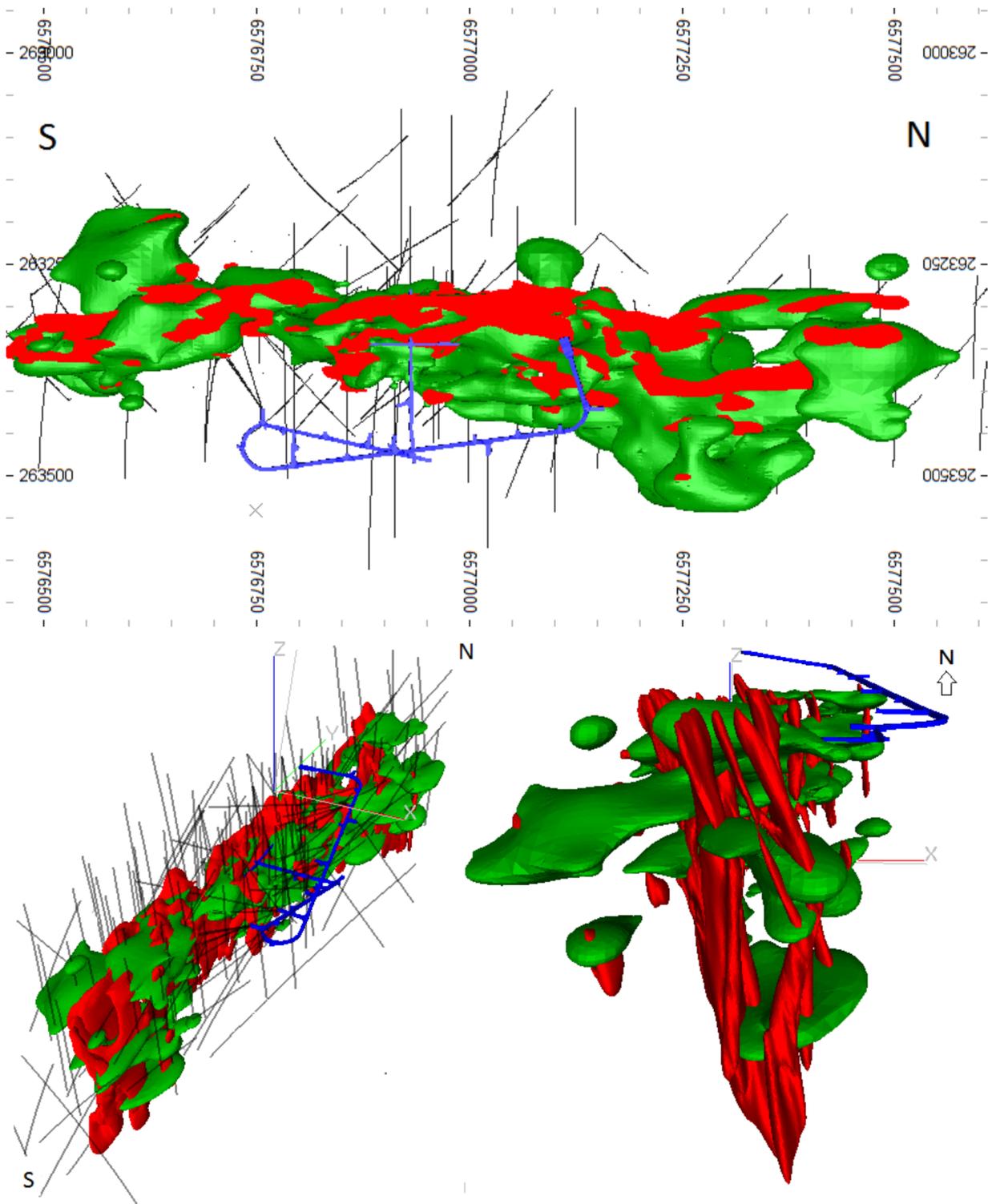


Figura 23 – Diferentes visadas do modelo de mineralização. Em verde os corpos LG, em vermelho os corpos HG, em azul a galeria utilizada para a realização dos furos em leque, em cinza os furos de sondagem

Como a maioria das amostras do banco de dados refere-se a material estéril, devido principalmente à grande profundidade em que a mineralização ocorre, optou-se pela criação de um sólido que limitasse a zona mineralizada. Este sólido, que pode ser visto na Figura 24, foi utilizado para a seleção das amostras que iriam ser utilizadas no tratamento geoestatístico, diminuindo assim o número geral de amostras e melhorando as proporções entre estéril e minério.

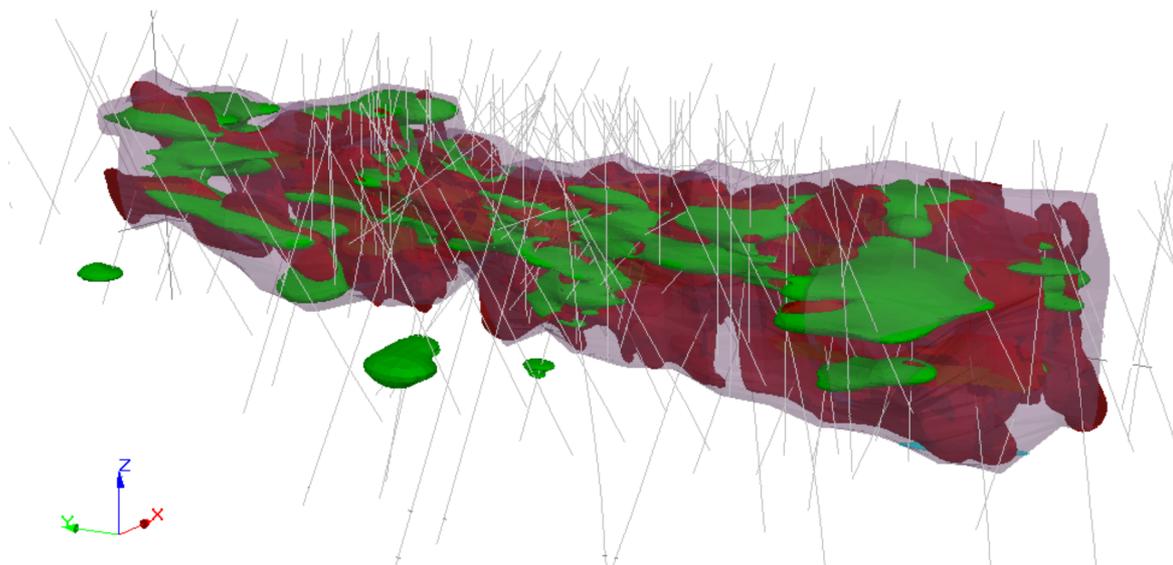


Figura 24 – Envoltório criado para seleção de amostras, destacado em lilás

## 5.4 Definição da variável de estudo

Após a modelagem dos corpos mineralizados, foi gerado o campo ORE no banco de dados, referente ao tipo de mineralização de cada amostra. Utilizando os sólidos confeccionados foi possível selecionar as amostras internas aos corpos HG e LG, e atribuir-lhes códigos correspondente ao material em questão. As amostras localizadas externamente à zona mineralizada foram classificadas como estéril. Os valores atribuídos ao campo ORE foram definidos como:

- ORE=1 para mineralização *High Grade*
- ORE=2 para mineralização *Low Grade*
- ORE=3 para material estéril

O histograma da Figura 25 mostra as proporções entre ORE=1, ORE=2 e ORE=3 das amostras: 27%, 18% e 55%, respectivamente. Como o depósito tem maior densidade amostral na zona de mineralização HG (ORE=1), incluindo furos em leque feitos a partir da galeria, estas proporções não representam a realidade das amostras.

Realizou-se a análise de desagrupamento, para reconhecimento das porcentagens globais do campo ORE no depósito, sem o enviesamento gerado pela amostragem preferencial. Essa proporção foi posteriormente utilizada como dado de entrada tanto na krigagem de indicadores quanto na simulação de indicadores.

#### 5.4.1 Análise de desagrupamento

O método de desagrupamento por células é realizado pela divisão da área total em regiões retangulares, denominadas células. Cada amostra recebe um peso inversamente proporcional ao número de amostras internas à célula, sendo que as amostras agrupadas recebem pesos mais baixos, uma vez que as células nas quais elas estão localizadas conterão mais amostras.

No caso do depósito Santa Maria, o padrão de amostragem não sugere um tamanho natural de célula, e por isso vários tamanhos foram testados, variando entre 10x10x1 metros até 600x200x200 metros, que corresponde aproximadamente à metade do tamanho do depósito. Foi selecionada a célula com maior média para a variável ORE, indicativa de maior proporção da variável estéril (ORE=3). O tamanho da célula de desagrupamento foi de 141 x 52 x 45 metros e o resultado da análise pode ser vista na Tabela 4 e na Figura 26.

O valor de proporções da variável ORE obtido após a aplicação do método de desagrupamento foi: 18,5% de ORE=1, 16,8% de ORE=2, e 64,7% de ORE=3.

Tabela 4 – Estatísticas de desagrupamento

Passo	Dx	Dy	Dz	Média
1	10	10	1	2,29
2	76	31	23	2,44
3	141	52	45	2,45
4	207	73	67	2,45
5	272	94	89	2,43
6	338	116	112	2,42
7	403	137	134	2,38
8	469	158	156	2,37
9	534	179	178	2,37
10	600	200	200	2,29

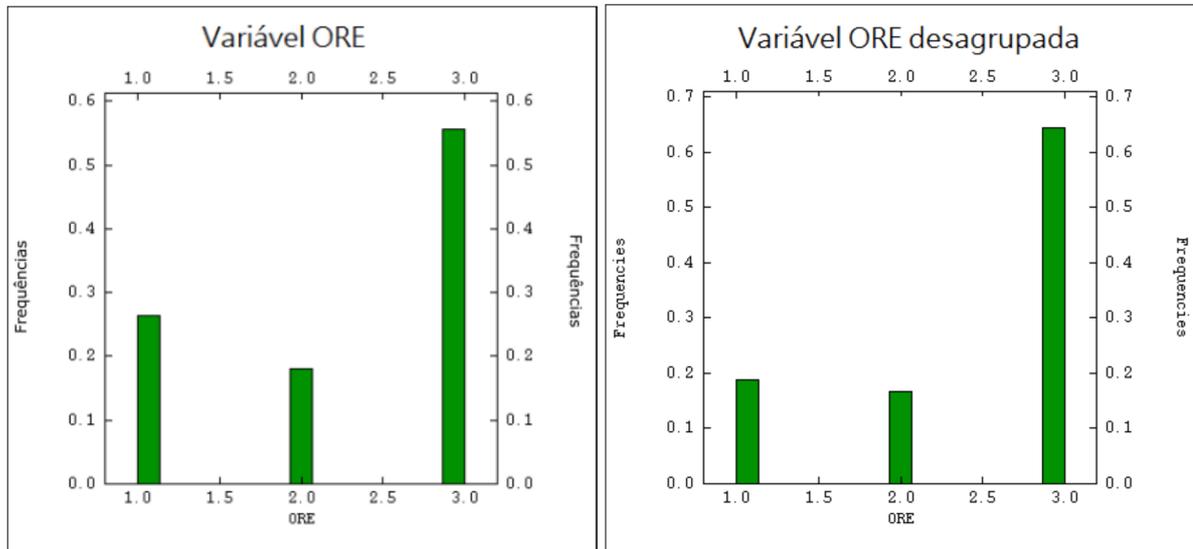


Figura 25 – Histograma da variável ORE bruta e desagrupada

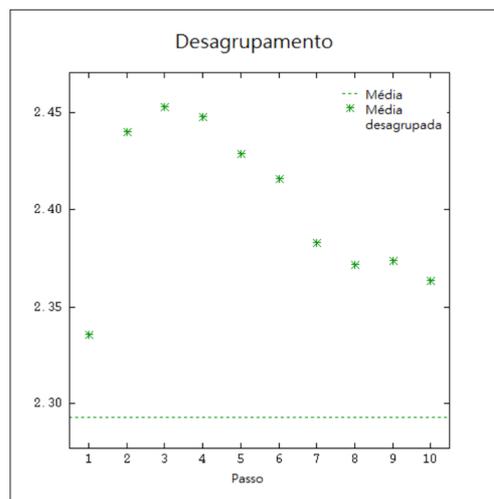


Figura 26 – Gráfico da análise de desagrupamento

## 5.5 Geoestatística das variáveis indicadoras

### 5.5.1 Transformação da variável indicadora

O tratamento geoestatístico deste trabalho foi realizado na forma de variáveis indicadoras. Para tal foi necessária a transformação da variável ORE em três variáveis indicadoras, de acordo com o tipo de mineralização a ser analisada: *High Grade*, *Low Grade* e estéril. A ocorrência de cada tipo de mineralização é um fenômeno mutuamente exclusivo.

As variáveis indicadoras foram obtidas conforme as funções de transformação:

Para o material *High grade*:

$$Se \begin{cases} ORE = 1, \text{ indicadora} = 1 \\ ORE \neq 1, \text{ indicadora} = 0 \end{cases}$$

Para o material *Low grade*:

$$Se \begin{cases} ORE = 2, \text{ indicadora} = 1 \\ ORE \neq 2, \text{ indicadora} = 0 \end{cases}$$

Para o material estéril:

$$Se \begin{cases} ORE = 3, \text{ indicadora} = 1 \\ ORE \neq 3, \text{ indicadora} = 0 \end{cases}$$

### 5.5.2 Variografia

A análise estrutural, para definição das direções de anisotropia, foi calculada para as variáveis indicadoras transformadas de HG e LG. Foram calculados dois mapas variográficos a partir de 18 direções utilizadas, totalizando 360 graus. Conforme os gráficos da Figura 27, foram definidas as direções N5 e N95 como de maior e menor continuidade, respectivamente. Essas direções são correspondentes às estruturas principais da mineralização, indicando que a anisotropia é, de fato, bem caracterizada no depósito.

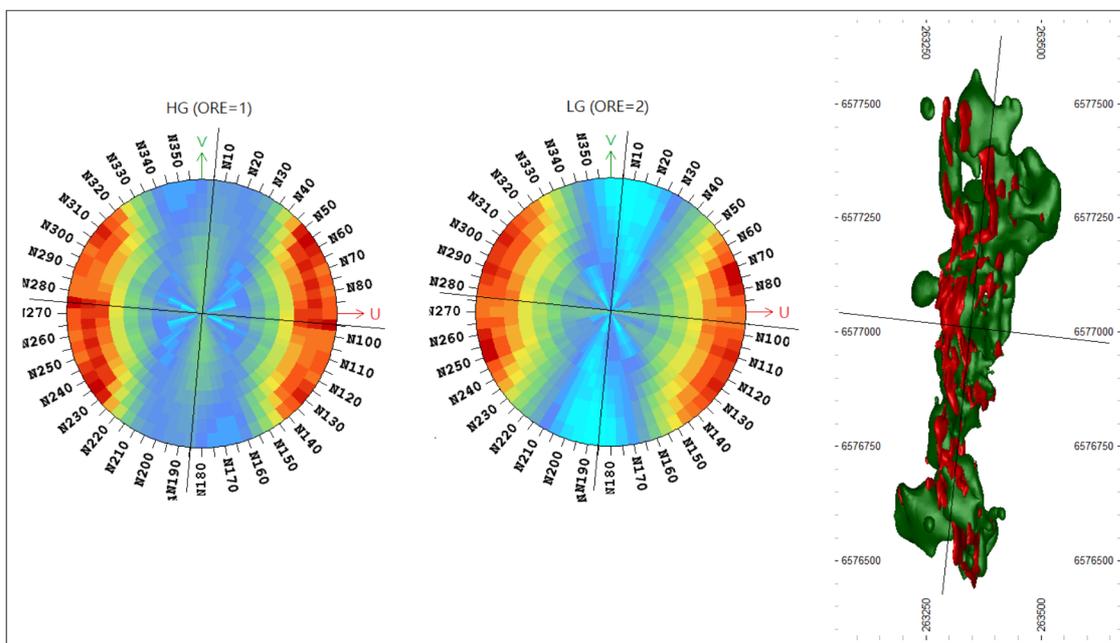


Figura 27 – Mapa variográfico da indicadora das mineralizações HG e LG e desenho dos corpos mineralizados, evidenciando a presença de anisotropia

Após a definição das direções principais, foram calculados os três variogramas das variáveis indicadoras, conforme parâmetros apresentados na Tabela 5. O tamanho do passo horizontal

de 35 metros foi utilizado por ser o espaçamento médio entre as amostras do depósito. Para a direção vertical optou-se por 2 metros como tamanho do passo, pois a maioria dos furos do depósito são inclinados. O número de passos foi ajustado para alcançar até a metade do campo geométrico do depósito (350 metros na direção X, 245 metros na direção Y e 150 metros na direção Z).

Foram ajustados modelos teóricos aos variogramas experimentais, conforme Tabela 6. Na Figura 28 apresentam-se os variogramas modelados para a indicadora do material HG e LG, respectivamente. Na Figura 29 apresenta-se o variograma modelado para a indicadora do material estéril. Os efeitos pepitas foram calculados pela direção vertical do variograma.

Tabela 5 – Parâmetros do cálculo do variograma experimental

Direção	Passo (m)	Número de passos	Tolerância angular	Tolerância na distância
N5	35	10	45	0,5
N95	35	7	45	0,5
D90 (vertical)	2	75	45	0,5

Tabela 6 – Parâmetros de ajuste do modelo de variograma

Estruturas	X (m)	Y (m)	Z (m)	Patamar
High Grade - Modelo esférico				
Efeito Pepita	-	-	-	0,015
1a Estrutura	15	5	10	0,08
2a Estrutura	60	15	40	0,05
3a Estrutura	70	55	60	0,065
4a Estrutura	-	70	-	0,015
Low Grade - Modelo esférico				
Efeito Pepita	-	-	-	0,03
1a Estrutura	20	8	10	0,07
2a Estrutura	45	60	20	0,55
Estéril - Modelo Esférico				
Efeito Pepita	-	-	-	0,2
1a Estrutura	10	15	10	0,11
2a Estrutura	75	70	30	0,073
3a Estrutura	180	85	100	0,045
4a Estrutura	180	70	-	0,05
5a Estrutura	-	100	-	0,012

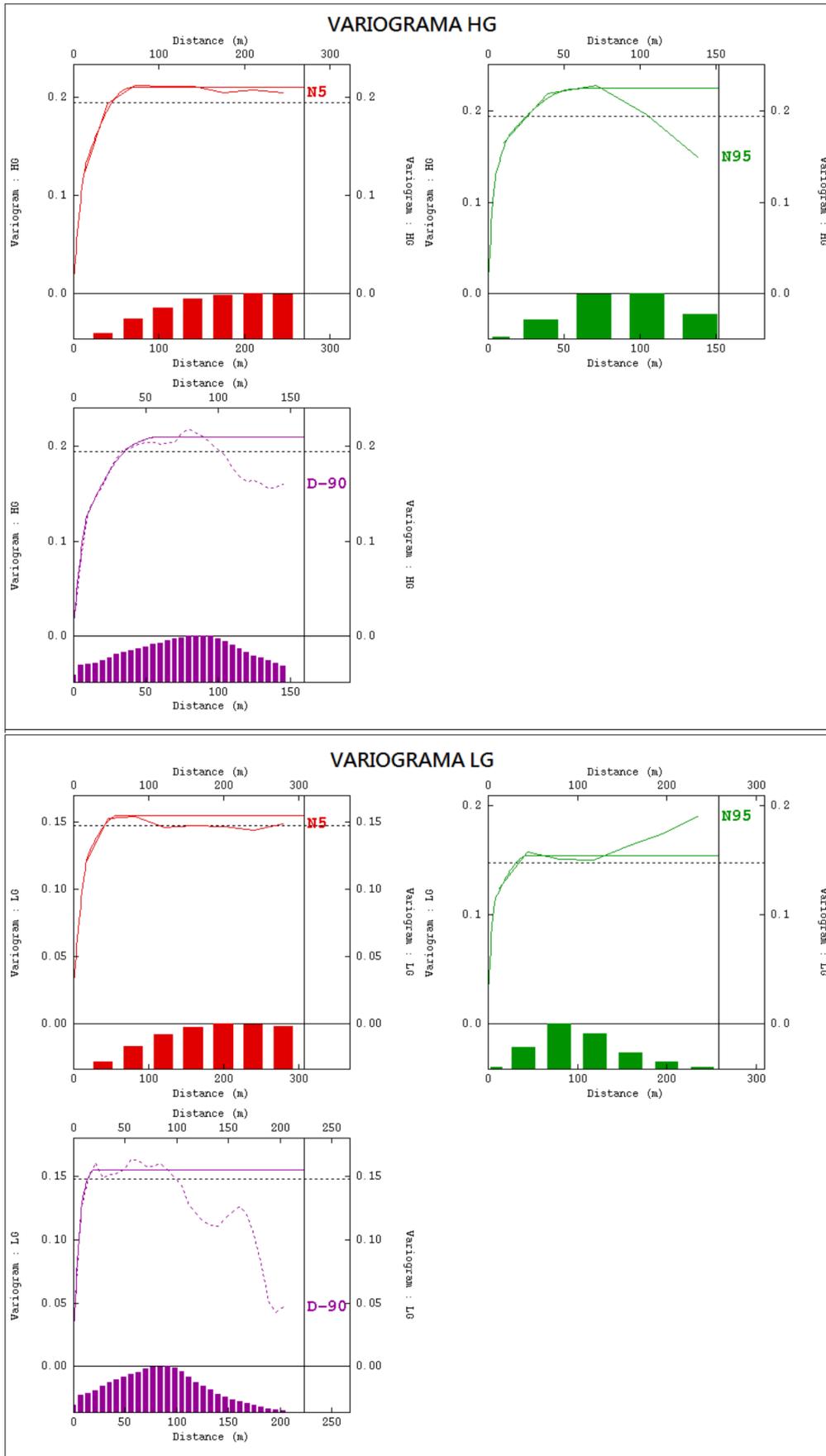


Figura 28 – Variogramas experimentais e modelos ajustados das variáveis indicadoras de HG e LG

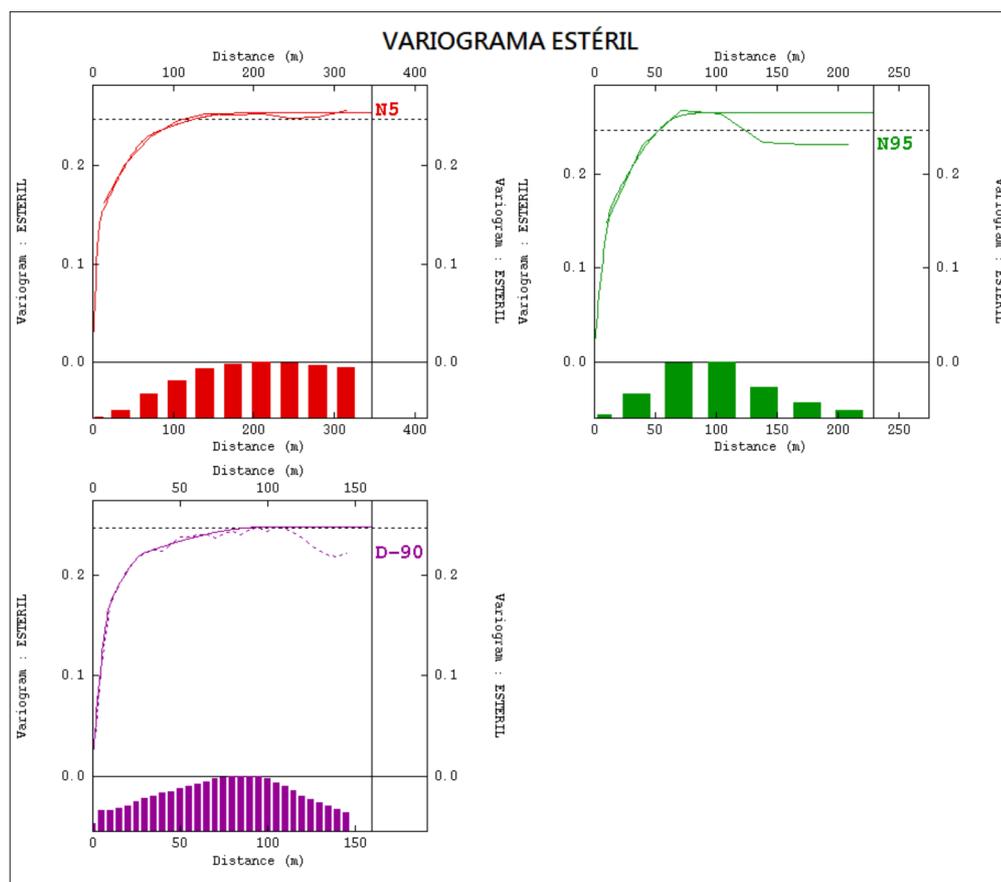


Figura 29 – Variograma experimental e modelo ajustado à variável indicadora do material estéril

### 5.5.3 Krigagem de indicadoras

Para a construção do modelo de blocos foram utilizados os parâmetros da Tabela 7. O tamanho de bloco adotado de 10 x 10 x 5 metros foi definido horizontalmente com base na malha de sondagem do depósito (média de 35 x 35 ) e verticalmente por parâmetros de engenharia e SMU (*Selective mining unit*).

Tabela 7 – Protótipo para construção do modelo de blocos

X	
Origem	262995
Tamanho do bloco (m)	10
Número de blocos	66
Y	
Origem	6576195
Tamanho do bloco (m)	10
Número de blocos	160
Z	
Origem	-385
Tamanho do bloco (m)	5
Número de blocos	160

Para facilitar a comparação entre os resultados da krigagem de indicadoras e da simulação sequencial de indicadoras foram utilizados os mesmos parâmetros de busca por amostras. Na simulação foi utilizado o variograma da indicadora do material estéril, por ser o mais próximo da mediana do depósito, contendo informações referentes a 55% do total das amostras. Para a krigagem de indicadoras (KI) foram utilizados os três variogramas das indicadoras.

Os raios de busca da vizinhança correspondem aos alcances obtidos pelo variograma do material estéril, sendo 180 x 100 x 100 metros, em X, Y e Z, respectivamente. Os parâmetros de vizinhança utilizados nas estimativas podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de busca para estimativa por KI e SIS

Parâmetros de busca	
Busca em X (m)	180
Busca em Y (m)	100
Busca em Z (m)	100
Número mínimo de amostras	4
Número de setores horizontais	4
Número óptimo de amostras por setor	2
Número máximo de amostras por furo	2
Discretização	5 x 5 x 1

Após a krigagem de indicadores, a análise estatística dos resultados foi realizada para validação da estimativa. Os resultados, obtidos na forma de distribuição de probabilidade acumulada, podem ser observados na Figura 30. Em alguns blocos, os valores de probabilidade das três categorias não somaram 1, ou passaram levemente deste valor. Para estes casos foi realizada uma normalização dos valores através de uma regra de três simples, condicionando as três categorias à obtenção da soma=1 e mantendo as proporções estimadas.

Como os resultados da KI são a probabilidade de ocorrência da indicadora, foi necessário realizar a transformação dos dados para a forma categórica, e assim, poder utilizá-los comparativamente com os dados da simulação. O método aplicado para retorno da variável categórica à partir de um valor de probabilidade e teve como parâmetro a manutenção das proporções da variável ORE original. O procedimento utilizado foi detalhado no fluxograma da Figura 31.

Pelo método, são ajustados valores de corte, que garantem a manutenção das proporções determinadas no começo do procedimento. O primeiro corte definido foi o do material estéril, por se tratar da categoria com maior quantidade de amostras, e maior facilidade de classificação dentre as variáveis. Para a manutenção da proporção em 64,7% dos blocos, conforme variável ORE desagrupada, foi utilizado o corte de 55% de probabilidade de ocorrência. Todos os blocos com mais de 0,55 de valor na categoria estéril obtiveram então a classificação estéril. As amostras que não foram classificadas como estéril continuaram sendo utilizadas no processo. Foi então definido um novo valor de corte, agora para a categoria HG, de maneira a preservar sua proporção de 18,5% dos blocos estimados. O valor calculado para o HG foi de 0,35, sendo que todas as amostras com valores maiores que 0,35 de HG obtiveram a classificação de *High Grade*. O restante das amostras não classificadas receberam definição de *Low Grade*.

O valor de 0,35 de probabilidade para classificação do material HG reflete o problema que deu início a este trabalho: a dificuldade de separação do material HG do material LG. Ao retirar todas as amostras com mais de 55% de chance de serem estéril, a grande parte restante do material apresentou probabilidades similares, valores próximos à 0,30 e 0,40, podendo ser tanto HG quanto LG. Por isso o método de manutenção de proporção global se mostrou uma boa escolha para categorizar os tipos de mineralização.

Os gráficos dos resultados da krigagem de indicadores, separados por tipo de mineralização, podem ser observados na Figura 33. Os histogramas de HG e estéril aparecem truncados, devido ao corte utilizado para suas classificações. Como não foi aplicado nenhum corte ao LG, classificado por último, este apresenta distribuição contínua.

Analisando os histogramas da Figura 32 observa-se que as proporções de valores da variável ORE se mantiveram idênticas aos valores de entrada: 18,5% HG, 16,8% LG e 64,7% Estéril. A comparação visual do modelo krigado com o modelo geológico interpretado se mostrou muito coerente, e será detalhada no estudo comparativo de resultados.

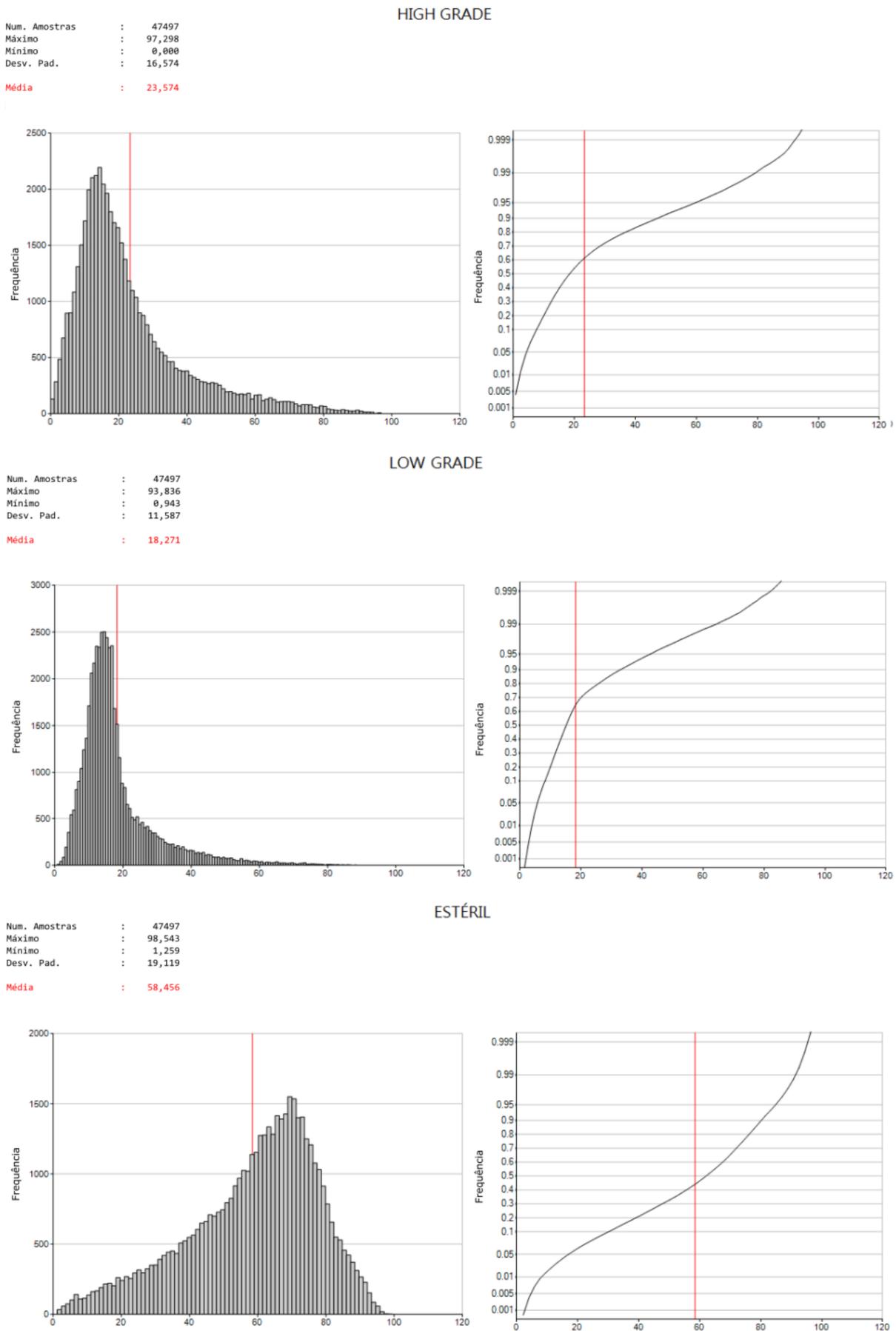


Figura 30 – Histograma e diagrama P-P do resultado da krigagem de indicadoras para HG, LG e estéril

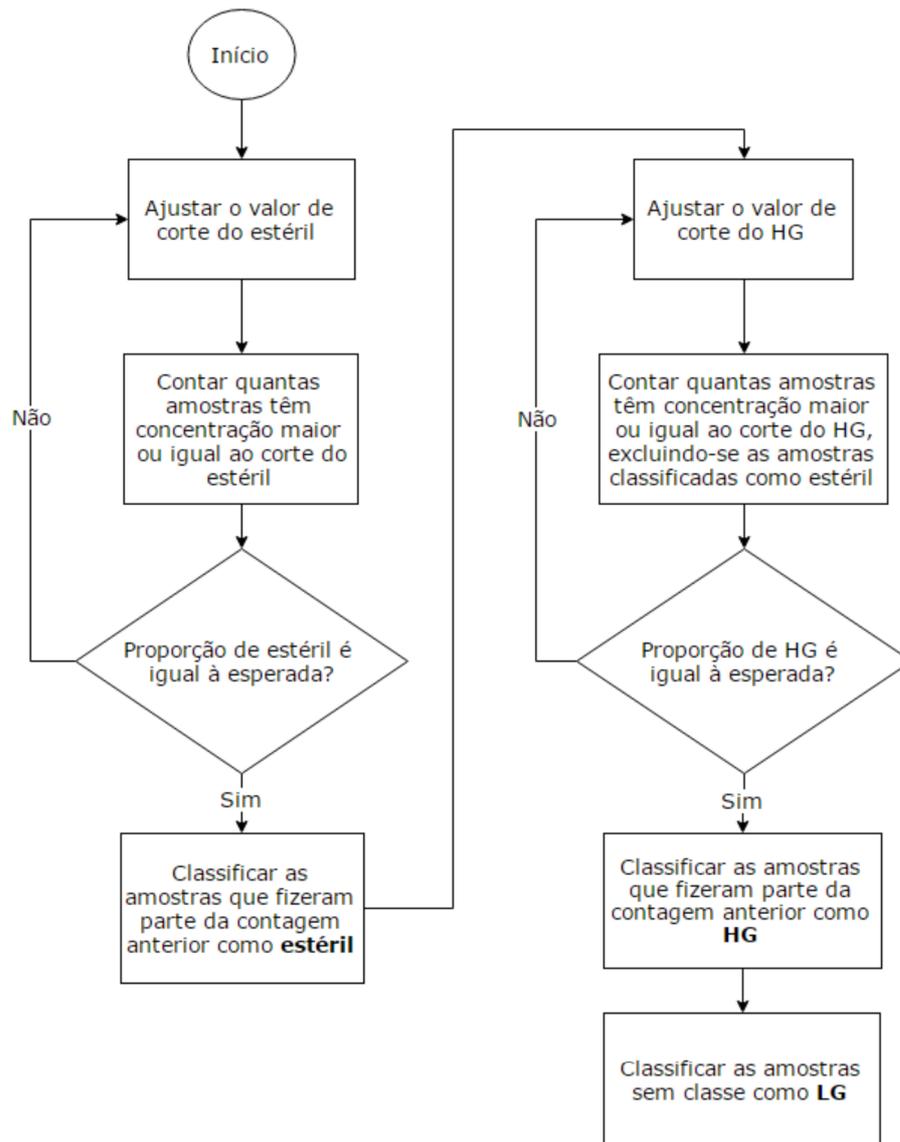


Figura 31 – Procedimento de classificação dos blocos estimado por krigagem de indicadores

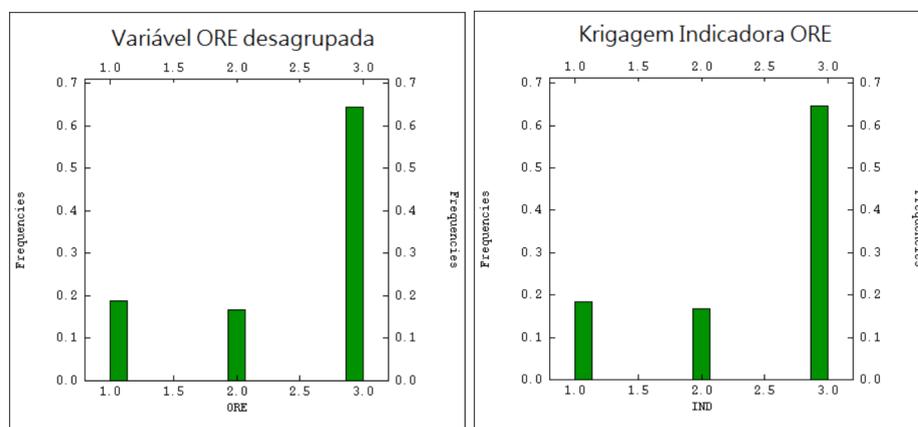


Figura 32 – Histograma da variável ORE desagrupada e do resultado da krigagem de indicadores

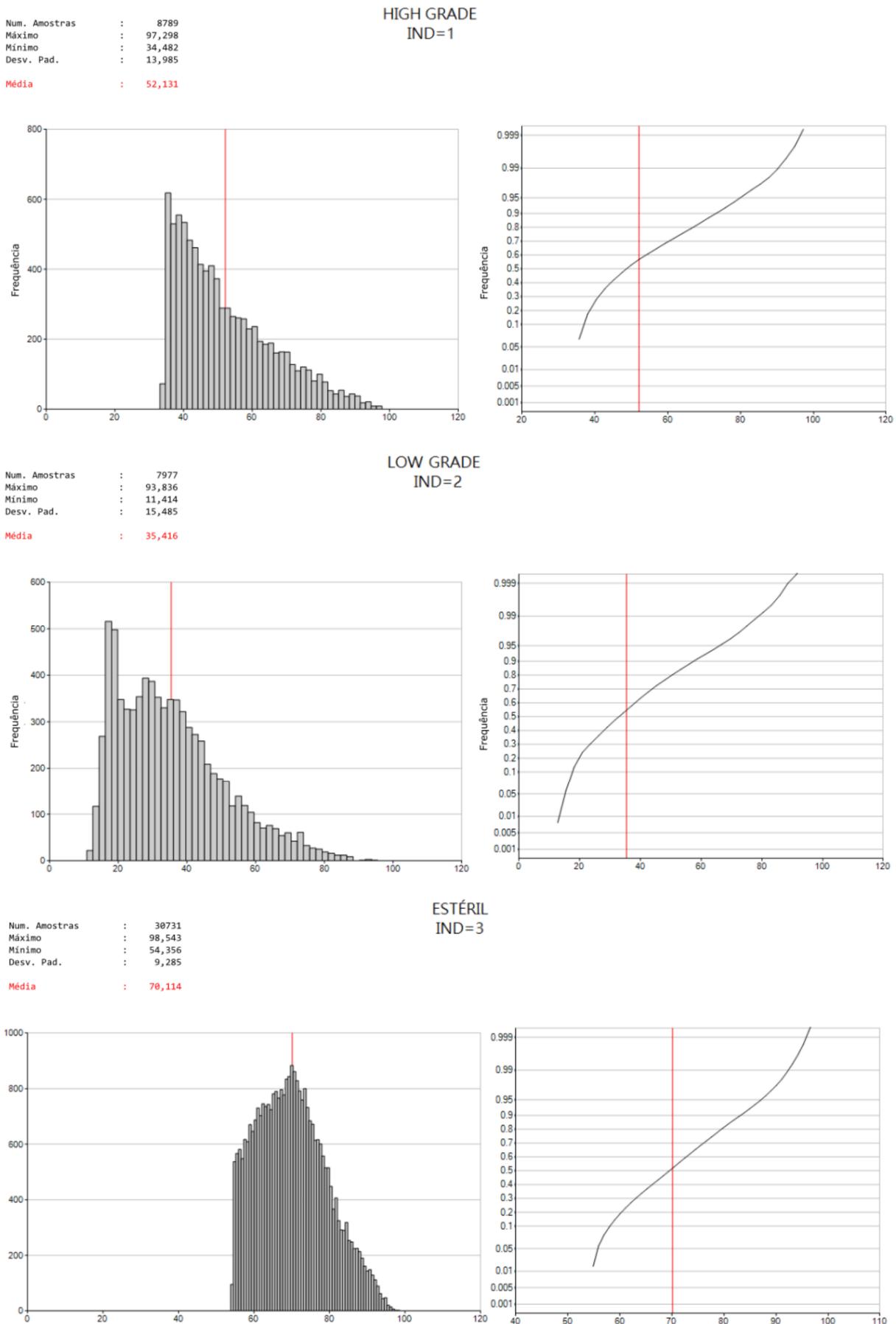


Figura 33 – Histograma e diagrama P-P do resultado da krigagem de indicadores para HG, LG e estéril, de acordo com a classe definida por corte de probabilidade

#### 5.5.4 Simulação Sequencial de Indicadoras

Para a simulação sequencial de indicadoras foram calculadas 100 realizações. Os parâmetros de busca utilizados foram os mesmos da KI e o variograma foi o calculado para o estéril. A validação dos resultados foi feita por comparação dos histogramas e variogramas das realizações com os dos dados de entrada.

Ao contrário da Krigagem de indicadoras, a simulação sequencial de indicadoras, realizada no programa *Isatis*<sup>®</sup>, já retornou o valor categórico das variáveis. Sendo assim, não foi necessária a aplicação de nenhum valor de corte de probabilidades.

Pela análise dos histogramas de doze realizações, apresentados na Figura 35, observa-se que a simulação manteve a proporção das variáveis indicadoras de entrada, assim como os valores de mínimo, máximo, média e desvio padrão. No Anexo 1 encontra-se a tabela de estatística descritiva de todas as realizações.

A comparação entre os variogramas da variável ORE e os gerados pelos resultados da simulação, representados na Figura 34, retornou bons resultados com aderência das curvas e manutenção dos patamares e amplitudes originais.

Através da soma da quantidade de blocos definidos como HG e LG nas simulações, foram selecionadas as realizações máxima e mínima para os dois tipos de mineralização. Essas realizações representam os piores e melhores cenários de volume simulados para o depósito e, por isso, foram utilizadas como parâmetro de comparações com os outros métodos aplicados. Os resultados de volumes obtidos em todas as realizações da simulação são apresentados na Figura 36 e Tabela 9.

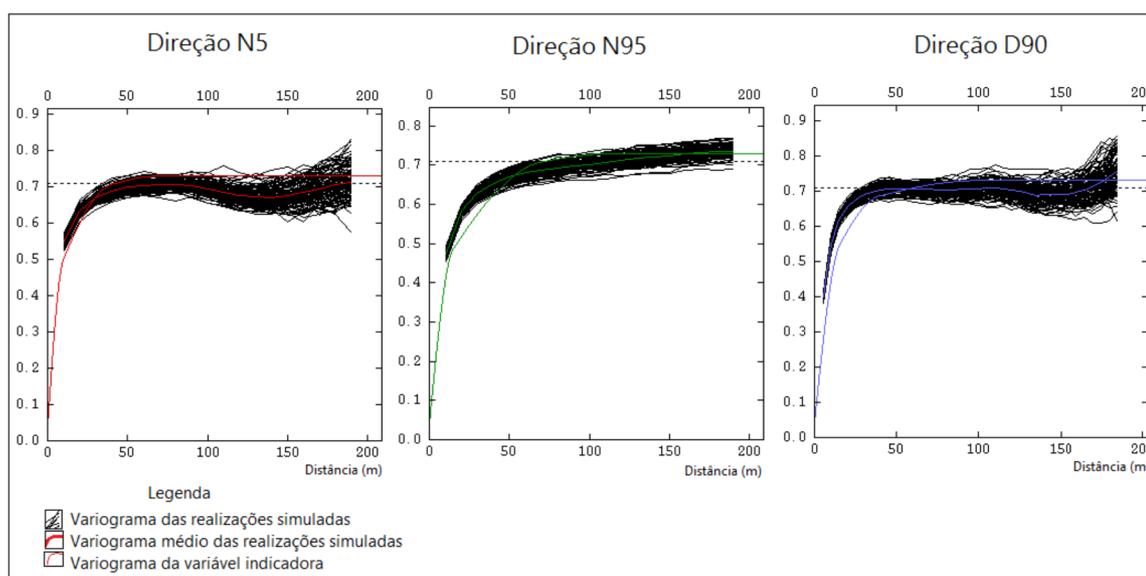


Figura 34 – Validação dos variogramas da variável indicadora do estéril

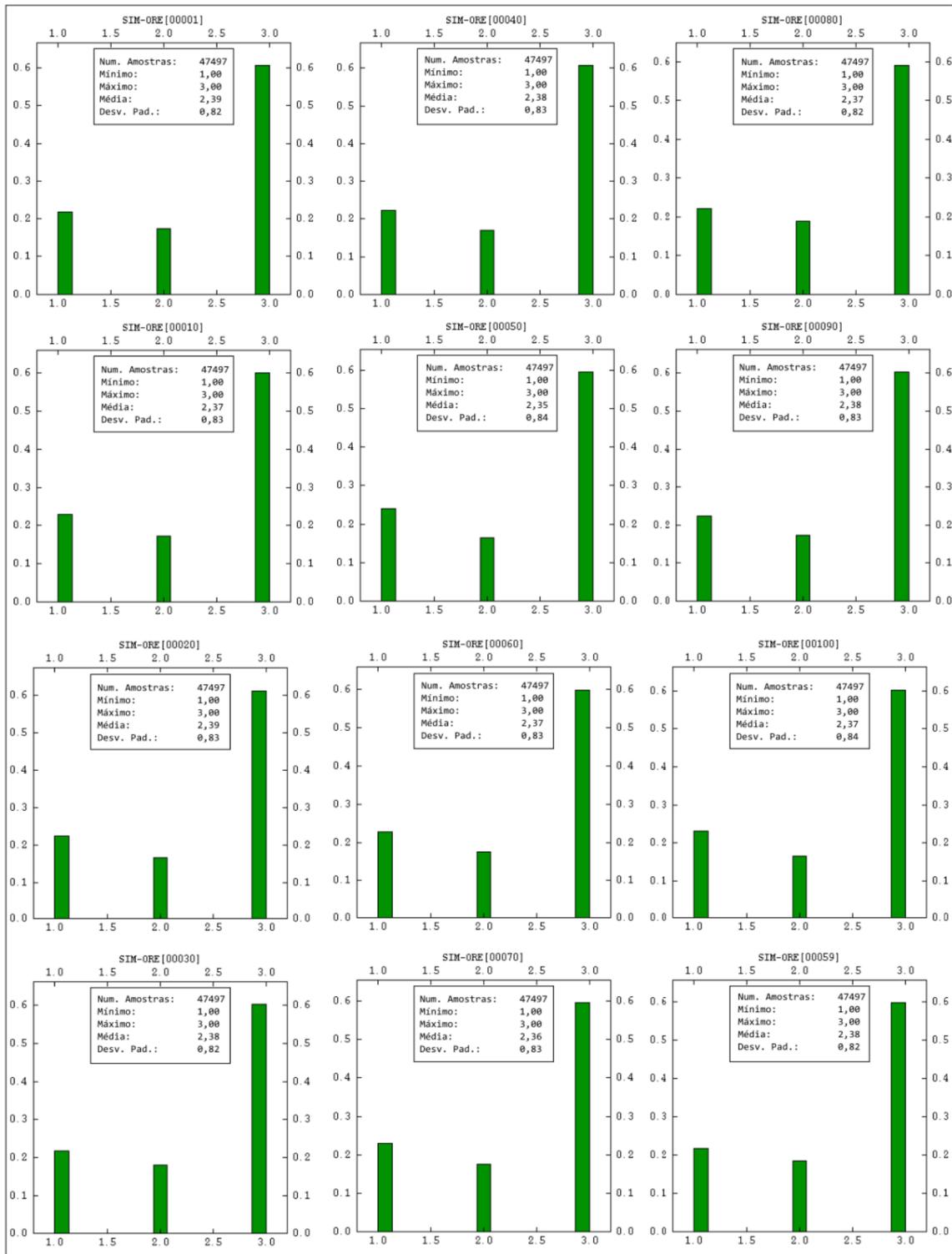
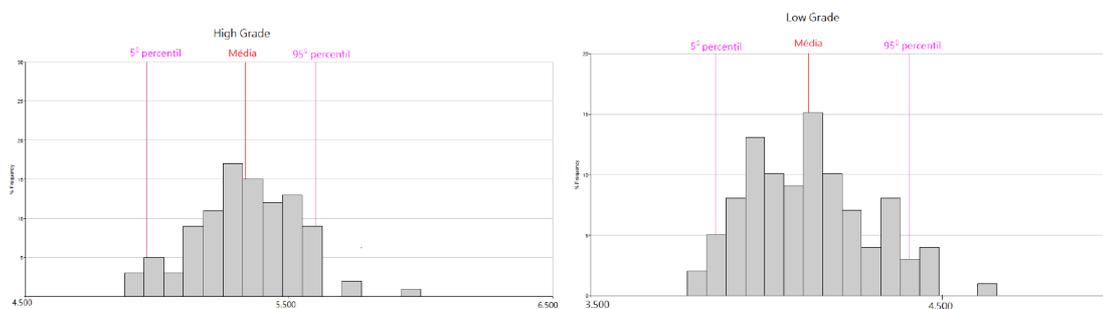


Figura 35 – Histograma de doze realizações da Simulação Sequêncial de Indicadoras

Tabela 9 – Estatística dos volumes obtidos por SIS (em  $10^3 \text{ m}^3$ )

	Amostras	Máximo	Mínimo	Desv, Pad	Média	5º percentil	95º percentil
HG	100	5,947	4,909	191	5,334	4,959	5,602
LG	100	4,651	3,813	173	4,12	3,856	4,408

Figura 36 – Histograma dos volumes (em  $10^3 \text{ m}^3$ ) obtidos para as 100 realizações da Simulação Sequencial de Indicadoras

## 5.6 Discussão dos resultados

Para comparar os resultados de volume obtidos pelos três diferentes métodos foram calculadas as estatísticas locais e globais e criados gráficos de médias variáveis. O gráfico de média variável representa as médias do objeto de estudo, calculada em faixas contínuas de dimensão preestabelecida em determinada direção. Na avaliação dos resultados volumétricos do depósito foi utilizado o tamanho da faixa de 40 metros, ao longo da direção N-S, por se tratar do eixo de maior continuidade e extensão da mineralização.

Nos gráficos foram representados para os dois tipos de mineralização os volumes do modelo geológico, do modelo krigado, e das realizações máxima e mínima globais da simulação. As realizações foram escolhidas de acordo com a contagem total dos blocos simulados, sendo que em alguns casos elas podem não representar localmente os cenários máximos e mínimos ao longo do depósito. Para a mineralização HG foram utilizadas respectivamente as realizações máxima e mínima 012 e 072, e para a mineralização LG foram utilizadas as realizações 007 e 063.

### 5.6.1 Análise local dos resultados

A análise local foi realizada para o melhor entendimento das flutuações regionais. Para tal análise foram utilizados primeiramente os gráficos de médias variáveis das Figuras 37 e 38, através dos quais foram definidas três regiões de maior variação volumétrica, denominadas A, B e C. Posteriormente foram calculados os volumes de cada região, conforme apresentado nas

Tabelas 10, 11 e 12. Por fim essas regiões foram estudadas visualmente por meio de seções verticais, conforme Figuras 40, 42 e 44.

A primeira observação à respeito das zonas de incerteza A, B e C é que as mesmas estão localizadas nas bordas do depósito. Por se tratar de regiões posicionadas nos extremos da mineralização, em áreas marginais e menos sondadas, era esperado que estas zonas apresentassem maior incerteza associada. A variação volumétrica entre os diferentes tipos de modelo ultrapassou 200% em algumas dessas regiões.

Já na região central do gráfico, caracterizada pela presença de sondagens em leque (principalmente entre as coordenadas Y= 6,576,850 e 6,576,980), a variação de volume não ultrapassou 10% entre os diferentes modelos. Essa região foi densamente sondada, o que refletiu em ótima caracterização dos corpos modelados (vide Figura 22). Dessa forma, pode-se concluir que a incerteza associada à modelagem geológica do depósito de Santa Maria está diretamente condicionada à densidade da malha de sondagem.

À seguir serão discutidos os resultados por área de incerteza, comparando-se visualmente e estatisticamente os volumes dos corpos modelados com os volumes dos modelos de blocos obtidos por krigagem de indicadoras e simulação sequencial de indicadoras.

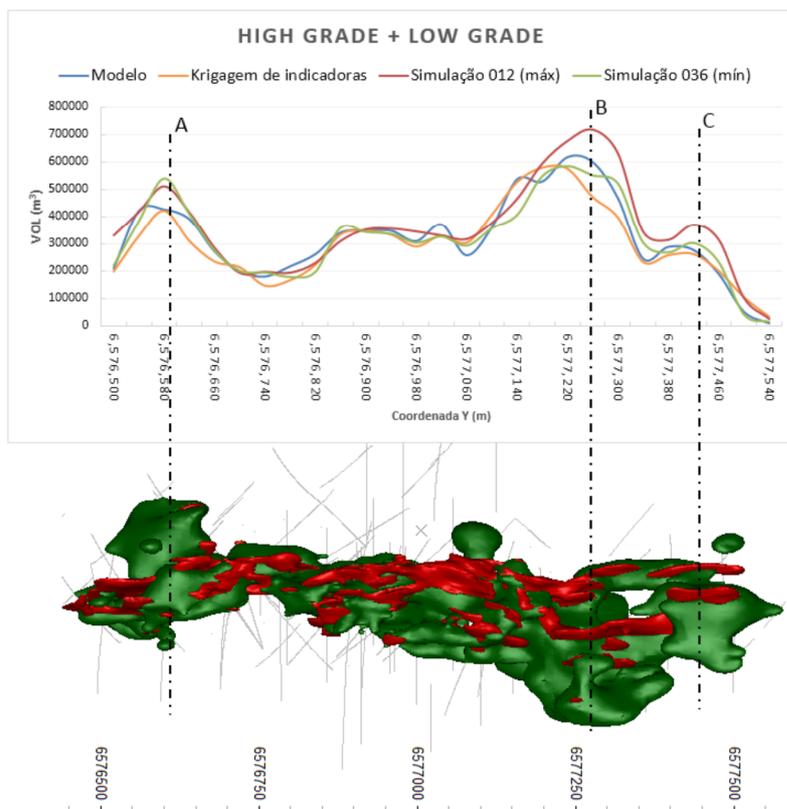


Figura 37 – Gráfico de médias variáveis de volume para a soma de material *High Grade* (vermelho) + *Low Grade* (verde) por caminamento N-S

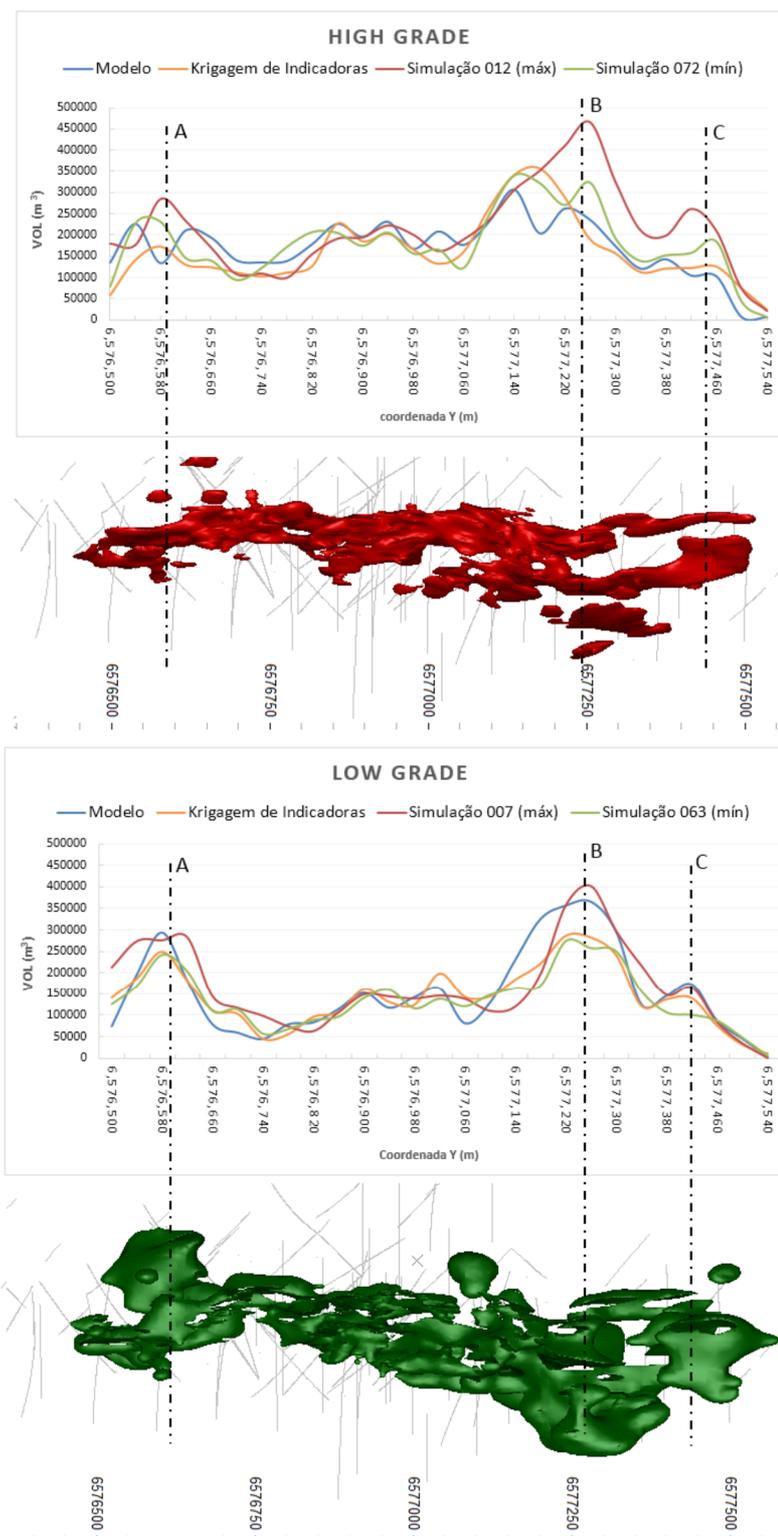


Figura 38 – Gráfico de médias variáveis de volume para a mineralização *High Grade* (vermelho) e *Low Grade* (verde) por caminhamento N-S

## 5.6.1.1 A Região A de incerteza

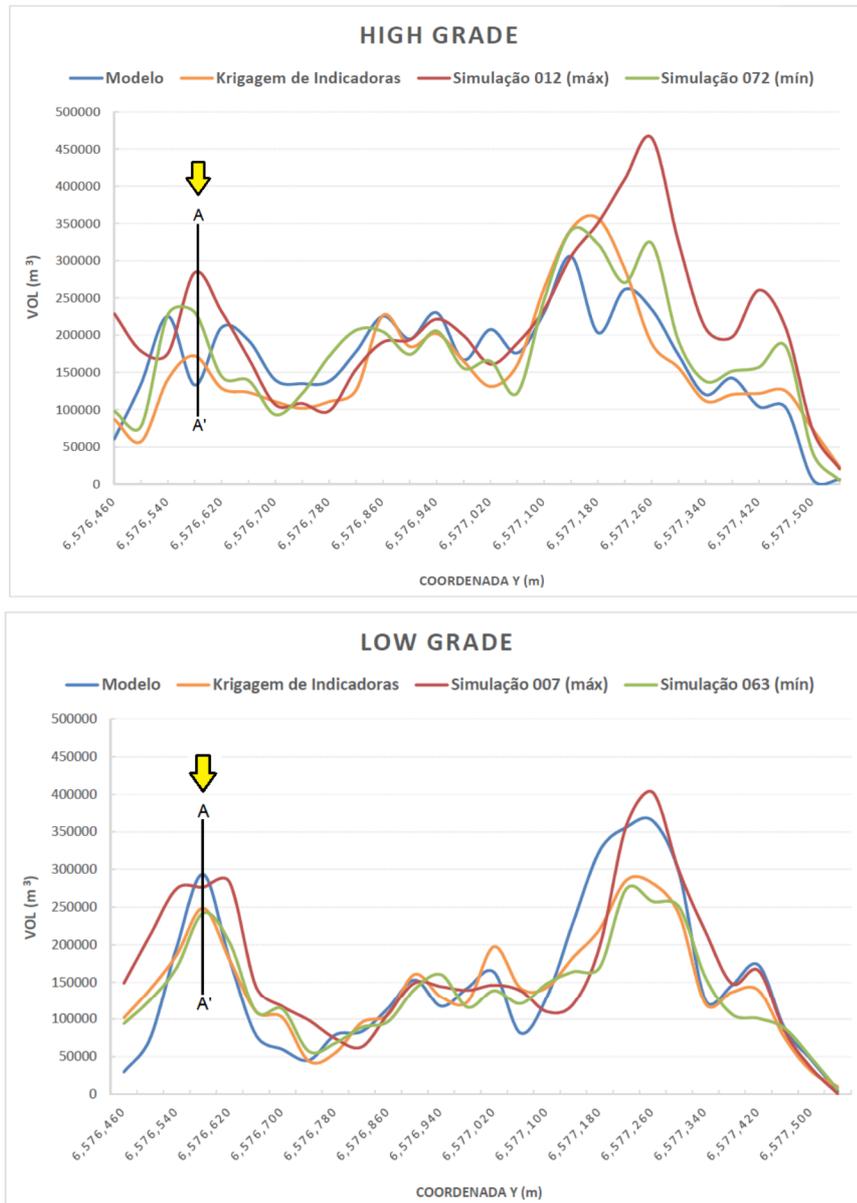


Figura 39 – Localização da região A de incerteza nos gráficos de caminhamento N-S da mineralização *High Grade* e *Low Grade*

A região A está representada graficamente pela seção de coordenada  $y=6,576,585$ , onde ocorre o pico da variação entre os modelos na parte sul do depósito (Figura 39). Na Tabela 10 encontram-se os valores da razão entre os modelos estimados e o modelo interpretado.

Para a mineralização HG existem grandes diferenças nesta região, sendo que todos os resultados obtidos por métodos probabilísticos retornaram volumes maiores que o modelo interpretado. Já para a mineralização LG ocorre o fenômeno contrário, com os modelos matemáticos retornando volumes consistentemente menores. A soma dos volumes de HG + LG destes modelos, entretanto, ficou praticamente igual à soma dos modelos interpretados (razão

entre 0.9 e 1), indicando a possibilidade de má interpretação destes dois tipos de mineralização, mas correta definição do material estéril. Devido à dificuldade de caracterização do tipo de material desta área, seria interessante verificar se ela não faz parte de uma zona de misturas de mineralizações, uma vez que esse tipo de ocorrência já foi verificada em outras regiões do depósito.

A maior discrepância nessa região ocorre com relação à realização máxima da simulação e o modelo de HG, com variação de 110% a mais de volume. A simulação mínima e a krigagem de indicadores do HG também apresentaram valores 70% e 30% acima do volume do modelo geológico, respectivamente, indicando que a interpretação deste tipo de mineralização pode ter sido muito conservadora nessa região.

Observando a seção dos blocos estimados dos modelos de HG e LG, juntamente com o desenho dos corpos interpretados ( Figura 40), percebe-se que dentre os modelos matemáticos o da krigagem de indicadores apresentou visualmente a melhor estruturação, com boa continuidade lateral, definição geométrica e separação dos tipos de mineralização. Os blocos das realizações da simulação, tanto máximas quanto mínimas, ocorrem bastante dispersos, heterogêneos e com pouca similaridade com o modelo geológico.

Tabela 10 – Resultado do cálculo de médias variáveis para a área de incerteza A

	Volume (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	Razão com modelo geológico
Tipo de modelo	High Grade	
	REGIÃO A	
Geológico Interpretado	133	1
Krigagem de Indicadoras	172	1,3
Simulação - mínima	231	1,7
Simulação - máxima	284	2,1
Média da Simulação	148	1,1
Tipo de modelo	Low Grade	
	REGIÃO A	
Geológico Interpretado	294	1
Krigagem de Indicadoras	249	0,8
Simulação - mínima	242	0,8
Simulação - máxima	277	0,9
Média da Simulação	235	0,8
Tipo de modelo	High Grade + Low Grade	
	REGIÃO A	
Geológico Interpretado	426	1
Krigagem de Indicadoras	421	1
Simulação - mínima	538	1,3
Simulação - máxima	510	1,2
Média da Simulação	382	0,9

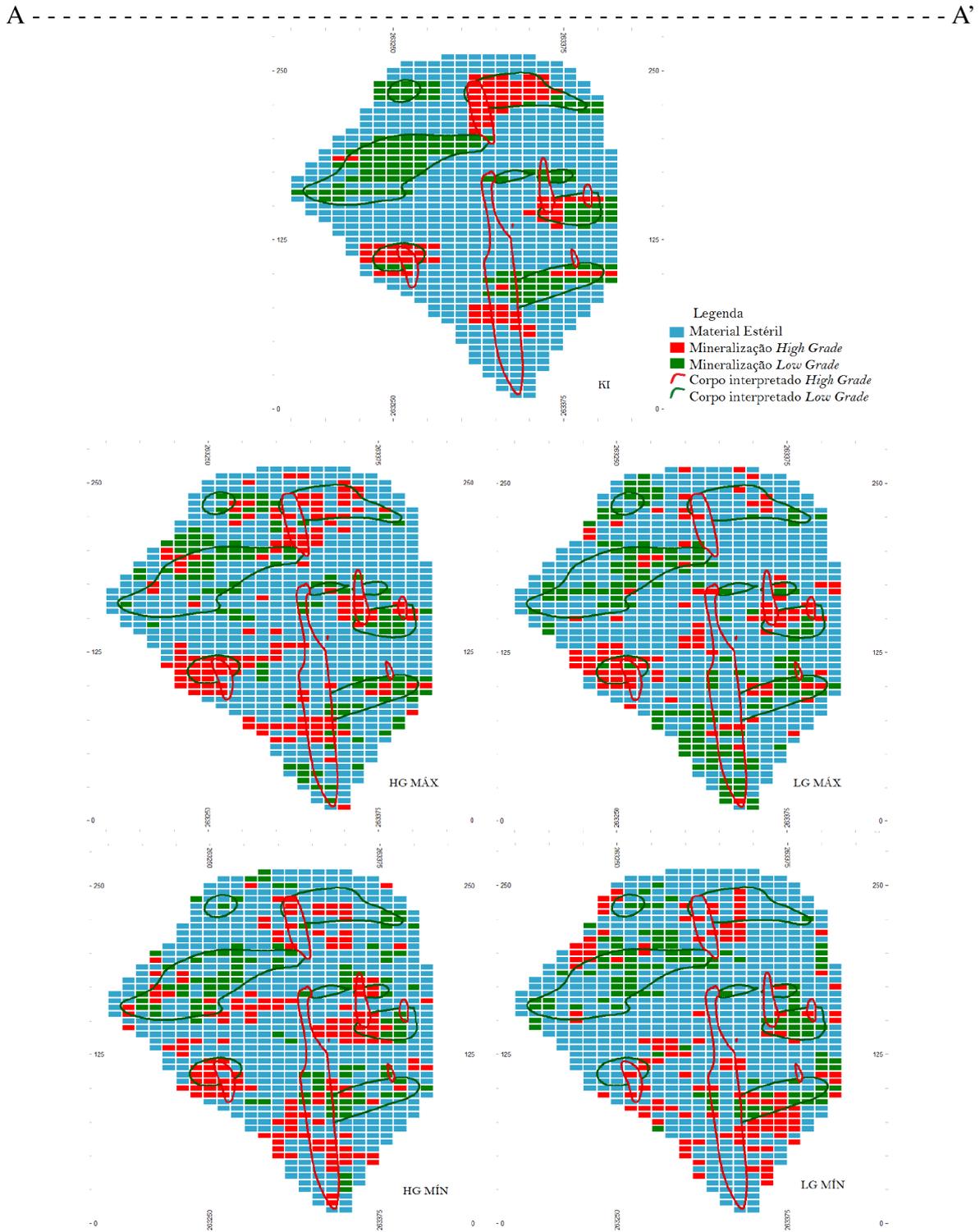


Figura 40 – Modelo de blocos da krigagem de indicadores e das realizações máxima e mínima obtidas por SIS, para os três tipos de material (HG, LG e Estéril) - seção  $y=6,576,585$

## 5.6.1.2 A Região B de incerteza

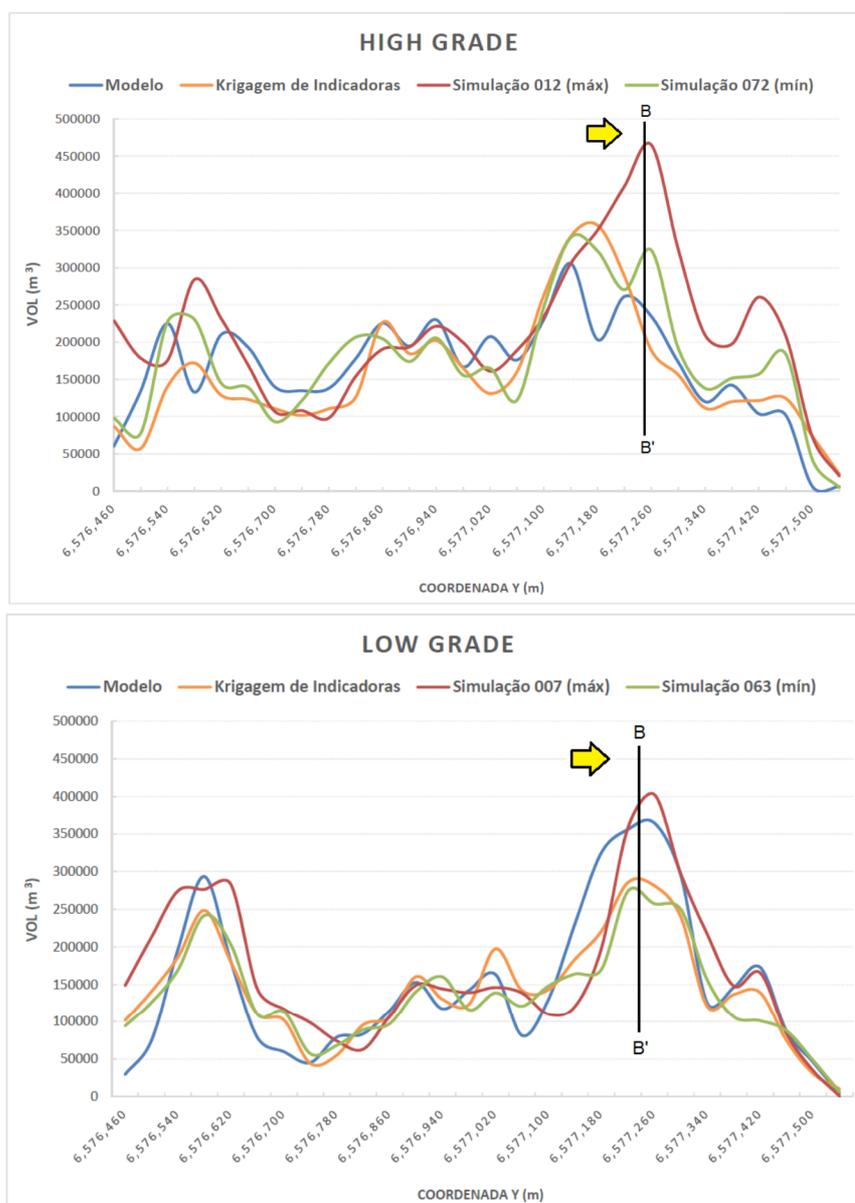


Figura 41 – Localização da região B de incerteza nos gráficos de caminhamento N-S da mineração *High Grade* e *Low Grade*

A região B está representada graficamente pela Figura 41 e seção de coordenada  $y=6,577,260$ , onde ocorre o pico da variação global do depósito, tanto para o material HG quanto para o LG. Nesta área estão presentes as maiores diferenças entre os modelos probabilísticos e a interpretação do HG, sendo que os resultados variam muito entre si.

Com relação ao modelo interpretado de HG o resultado da KI foi 20% menor e a média das realizações 30% menor. Já as simulações máxima e mínima apresentaram valores consistentemente maiores, de 100% e 40% a mais de volume, respectivamente.

Para o material LG, os valores estimados foram mais similares ao modelo interpretado, sendo

que a krigagem de indicadores e a média da simulação apresentaram volumes 20% menores que o modelo geológico. Os resultados de simulação para a mineralização LG variaram entre 20% a menos a 10% a mais de volume, para as realizações mínima e máxima, respectivamente.

Ao analisarmos os resultados da soma da mineralização HG + LG (Tabela 11), nota-se que nenhum modelo variou mais que 20% em relação ao modelo interpretado, um bom resultado para uma zona crítica do modelo.

Pela observação das seções da Figura 42 percebe-se que todos os métodos caracterizaram bem as zonas mineralizadas, sendo que a krigagem, novamente, apresentou melhor geometria e homogeneidade dos corpos mineralizados.

Na zona B existe uma tendência dos métodos probabilísticos gerarem corpos mineralizados HG com maior continuidade lateral e menor alcance vertical, diferentemente do modelo interpretado com base na gênese do depósito, indicando que alguns prolongamentos dos corpos em profundidade não são justificados do ponto de vista matemático.

Tabela 11 – Resultado do cálculo de médias variáveis para a área de incerteza B

Tipo de modelo	Volume ( $10^3 \text{ m}^3$ )	Razão com modelo geológico
	High Grade	
REGIÃO B		
Geológico Interpretado	235	1
Krigagem de Indicadoras	189	0,8
Simulação - mínima	324	1,4
Simulação - máxima	465	2
Média da Simulação	172	0,7
Tipo de modelo	Low Grade	
	REGIÃO B	
Geológico Interpretado	365	1
Krigagem de Indicadoras	282	0,8
Simulação - mínima	258	0,7
Simulação - máxima	403	1,1
Média da Simulação	307	0,8
Tipo de modelo	High Grade + Low Grade	
	REGIÃO B	
Geológico Interpretado	599	1
Krigagem de Indicadoras	471	0,8
Simulação - mínima	550	0,9
Simulação - máxima	717	1,2
Média da Simulação	479	0,8



Figura 42 – Modelo de blocos da krigagem de indicadores e das realizações máxima e mínima obtidas por SIS, para os três tipos de material (HG, LG e Estéril) - seção  $y=6,576,240$

### 5.6.1.3 A Região C de incerteza

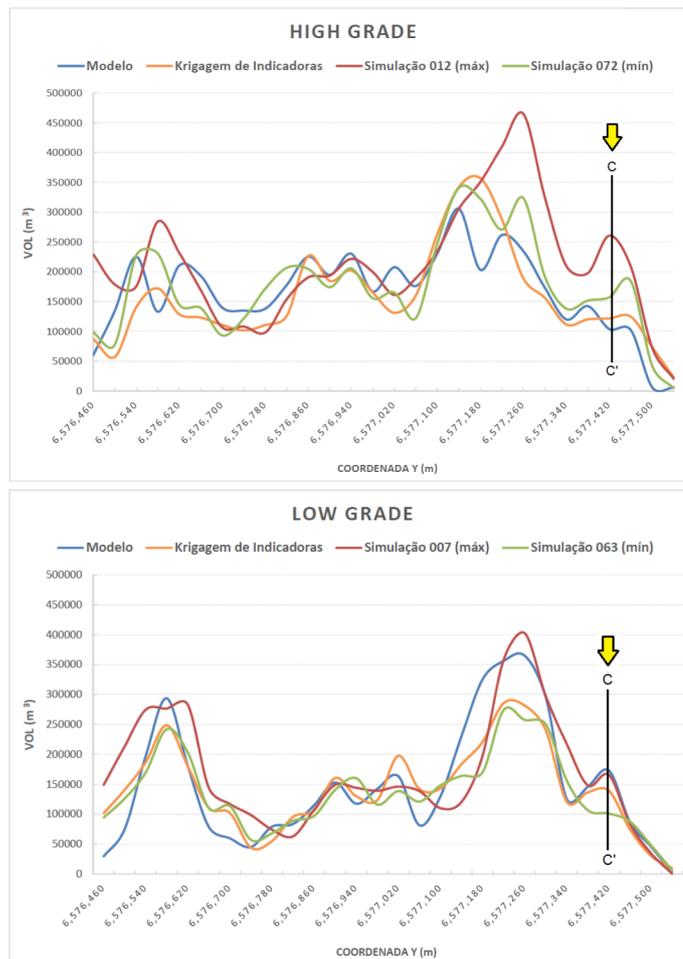


Figura 43 – Localização da região C de incerteza nos gráficos de caminhamento N-S da mineralização *High Grade* e *Low Grade*

A região C está representada graficamente pela Figura 43 e seção de coordenada  $y=6,577,460$ , onde ocorre o terceiro pico de variação dos resultados volumétricos entre os modelos de HG e LG.

Nesta área as maiores diferenças são relativas à realização máxima da simulação, tendo esta valor 40% maior que o modelo interpretado. A média da simulação e a krigagem de indicadoras, resultaram em volumes 30% e 20% menores que o modelo geológico, respectivamente, indicando uma interpretação otimista para o material HG nessa região.

Para a mineralização LG todos os resultados apresentaram valores muito próximos do volume do modelo interpretado, indicando que a incerteza desta zona ocorre essencialmente na mineralização HG.

Dentre as regiões de incerteza, a zona C foi a melhor caracterizada por todos os métodos de estimativa, com boa definição visual das zonas mineralizadas e tendência a maior horizontalidade dos corpos de mineralização HG.

Tabela 12 – Resultado do cálculo de médias variáveis para a área de incerteza C

	Volume (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	Razão com modelo geológico
Tipo de modelo	High Grade	
	REGIÃO C	
Geológico Interpretado	142	1
Krigagem de Indicadoras	120	0,8
Simulação - mínima	152	1,1
Simulação - máxima	198	1,4
Média da Simulação	104	0,7
Tipo de modelo	Low Grade	
	REGIÃO C	
Geológico Interpretado	146	1
Krigagem de Indicadoras	137	0,9
Simulação - mínima	107	0,7
Simulação - máxima	148	1
Média da Simulação	149	1
Tipo de modelo	High Grade + Low Grade	
	REGIÃO C	
Geológico Interpretado	288	1
Krigagem de Indicadoras	257	0,9
Simulação - mínima	267	0,9
Simulação - máxima	312	1,1
Média da Simulação	253	0,9

#### 5.6.1.4 Considerações finais sobre a análise local

A análise local permitiu o melhor entendimento das zonas de incerteza do modelo. Visualmente, a krigagem foi a melhor técnica para caracterizar a mineralização, apresentando resultados com melhor homogeneidade e forma dos corpos, que em geral foram bastante próximas do obtido por interpretação geológica.

Na análise gráfica da mineralização LG + HG é possível observar que os resultados de volume da krigagem de indicadoras ficaram muito semelhantes, sendo muitas vezes iguais aos do modelo geológico. Desta maneira, o método pode ser utilizado como uma ferramenta de validação local da modelagem dos corpos mineralizados.

O gráfico da soma de volumes de HG + LG (Figura 37) dos diferentes tipos de modelo apresentou variações muito baixas entre si, indicando que o volume da zona mineralizada está condizente com a realidade, sendo necessária, entretanto, uma melhor caracterização dos tipos mineralizados HG e LG, a fim de evitar uma mistura de classes.

Pelos gráficos pôde-se verificar que a presença da malha da sondagem em leque permitiu uma melhor caracterização do material HG, diminuindo a incerteza à respeito da interpretação das zonas mineralizadas. A partir dessas informações é possível planejar um novo programa de sondagem *infill* com o intuito de sanar as dúvidas referentes ao modelo de interpretação.

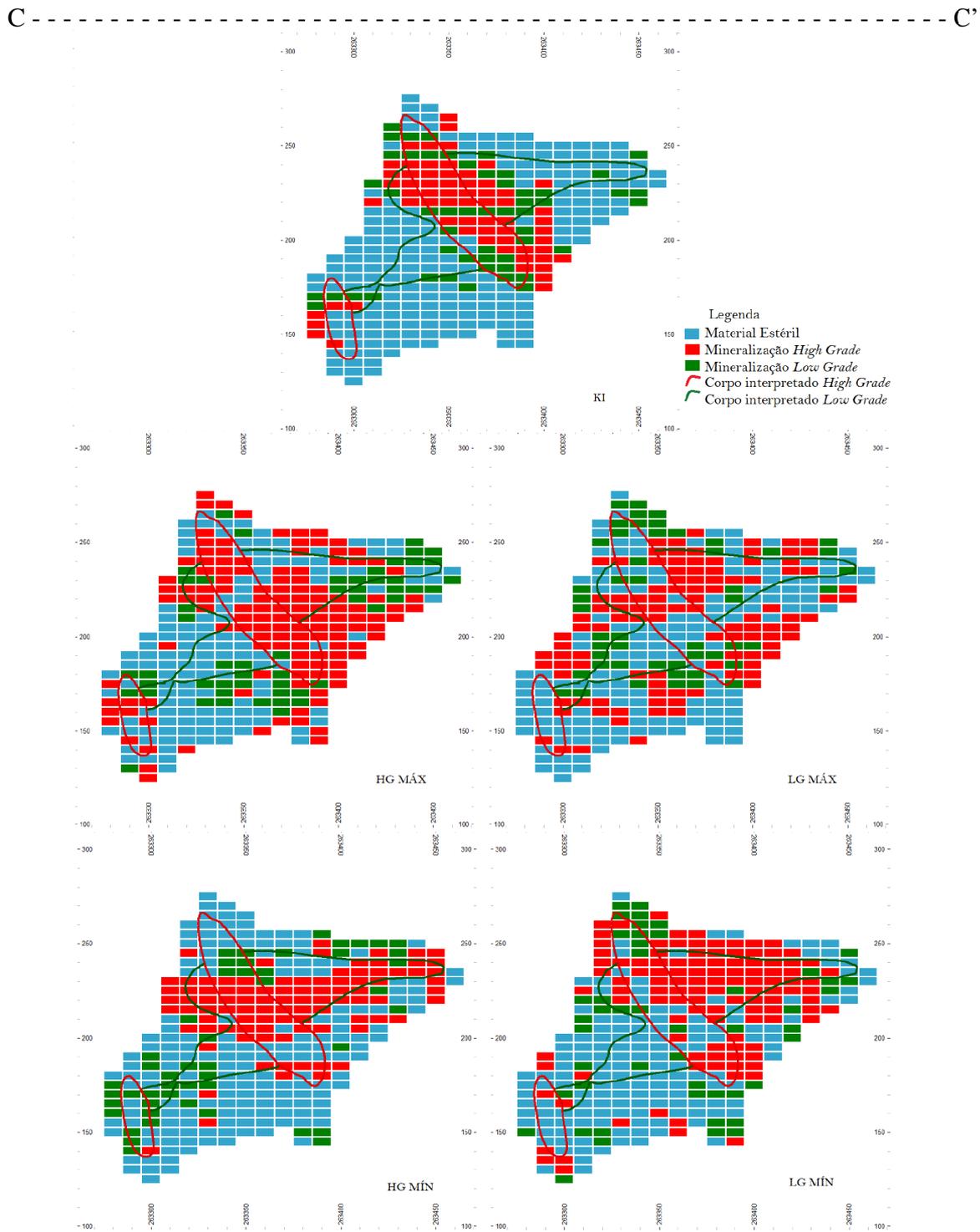


Figura 44 – Modelo de blocos da krigagem de indicadores e das realizações máxima e mínima obtidas por SIS, para os três tipos de material (HG, LG e Estéril) - seção  $y=6,577,460$

### 5.6.2 Análise global dos resultados

As Tabelas 13, 14 e 15 apresentam os resultados globais dos volumes obtidos para cada tipo de modelo, e as razões entre os modelos estimados e o modelo interpretado.

Assim como verificado localmente, as maiores divergências obtidas se referem às realizações da simulação máxima para os materiais HG e LG, com porcentagens 28% e 11% maiores, respectivamente. Já os menores valores obtidos são provenientes da estimativa por krigagem de indicadoras para o material HG e a realização de simulação mínima para o material LG, com valores respectivamente 5% e 9% menores que o modelo interpretado.

A mineralização LG apresentou variações sistematicamente menores que a HG, o que já era esperado visto este tipo de mineralização, no depósito Santa Maria, ocorre de forma muito mais heterogênea e descontínua.

Em geral, os valores obtidos foram muito satisfatórios e coerentes com a fase de pesquisa de viabilidade econômica na qual o depósito se encontra. À partir destes resultados é possível entender a variação que pode ser esperada para o volume mineralizado no depósito, e tomar decisões com base nessa informação.

Tabela 13 – Resultados de volume - Mineralização *High Grade*

<b>Tipo de modelo</b>	<b>Volume (k m3)</b>	<b>Razão com modelo geológico Interpretado</b>
<b>Geológico Interpretado</b>	4.631	1
<b>Krigagem de Indicadoras</b>	4.394	0.95
<b>Simulação - Realização Mínima</b>	4.909	1.06
<b>Simulação - Média por bloco simulado</b>	5.334	1.15
<b>Simulação - Realização Máxima</b>	5.947	1.28

Tabela 14 – Resultados de volume - Mineralização *Low Grade*

<b>Tipo de modelo</b>	<b>Volume (k m3)</b>	<b>Razão com modelo geológico Interpretado</b>
<b>Geológico Interpretado</b>	4.175	1
<b>Krigagem de Indicadoras</b>	3.989	0.96
<b>Simulação - Realização Mínima</b>	3.813	0.91
<b>Simulação - Média por bloco simulado</b>	4.120	0.99
<b>Simulação - Realização Máxima</b>	4.651	1.11

Tabela 15 – Resultados de volume - Mineralização *High Grade + Low Grade*

<b>Tipo de modelo</b>	<b>Volume (k m3)</b>	<b>Razão com modelo geológico Interpretado</b>
<b>Geológico Interpretado</b>	8.806	1
<b>Krigagem de Indicadoras</b>	8.383	0.95
<b>Simulação - Realização Mínima</b>	8.722	0.99
<b>Simulação - Média por bloco simulado</b>	9.454	1.07
<b>Simulação - Realização Máxima</b>	10.598	1.2

## 6 Conclusões

Com os resultados obtidos, pode-se concluir que a aplicação conjunta dos métodos de krigagem de indicadoras e simulação sequencial de indicadoras se mostrou uma ótima ferramenta para a análise da incerteza volumétrica do depósito de Santa Maria. Através da utilização dos dois métodos foi possível obter informações à respeito da qualidade local e global do modelo, ao longo do depósito.

A análise gráfica das médias variáveis dos modelos identificou três áreas principais de incerteza, sendo que tais áreas se localizavam nas bordas do depósito, caracterizadas por menor densidade de furos. Já a região de menor incerteza do depósito, localizada na área de furos em leque, apresentou flutuação de valores muito baixas, indicando que a principal condicionante da incerteza no depósito é a densidade de informação.

Visualmente, a krigagem de indicadoras se mostrou uma boa ferramenta para refinamento do modelo interpretado nas áreas de incerteza, já a simulação apresentou resultados difusos e heterogêneos, de utilização pouco viável para tal objetivo. Entretanto, as estatísticas dos volumes obtidos por simulação caracterizaram muito bem as áreas de incerteza e suas possíveis flutuações volumétricas, fornecendo informações importantes à respeito da variabilidade do depósito.

Os dois métodos de estimativa geraram corpos de material HG com maior continuidade lateral, e menor alcance vertical, mostrando que alguns prolongamentos dos corpos em profundidade não são justificáveis do ponto de vista matemático. Através deste estudo foi identificada ainda a possibilidade de ocorrência de mistura de materiais, sendo que uma parte do modelo HG pode ter sido interpretada erroneamente como LG, e vice-versa.

A partir desses resultados foi possível validar o modelo interpretado, quantificar as variações máximas e mínimas esperadas para o depósito e ressaltar as zonas de maior incerteza de interpretação. Para estudos futuros seria interessante aplicar essas informações com outro foco, tal como no planejamento de malha *infill*, refinamento da modelagem geológica e classificação dos recursos minerais do depósito.



## Referências

- ALABERT, F. The practice of fast conditional simulations through the lu decomposition of the covariance matrix. *Mathematical Geology*, v. 19, n. 5, p. 369–386, 1987.
- ALMEIDA, F. F. M. et al. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sciences Review*, v. 17, p. 1–29, 1981.
- ARMSTRONG, M. *Basic Linear Geostatistics*. Berlin: Springer, 1998. 153 p.
- BADI, W. R. S.; GONZALEZ, A. P. Jazida de metais básicos de santa maria, caçapava do sul, rs. *DNPM: Principais depósitos minerais do Brasil*, v. 3, p. 157–170, 1988.
- BARDOSSY, G.; FODOR, J. Tradicional and new ways to handle uncertainty in geology. *Natural Resources Research*, v. 10, n. 3, p. 179–187, 2001.
- BETTENCOURT, J. S. *A mina de cobre do Camaquã - RS*. São Paulo: Tese de doutoramento. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1972.
- BUBENICEK, L.; HAAS, A. Method of calculation of the iron ore reserves in the lorraine deposit. *The American Institute of mining, metallurgical and petroleum engineers*, v. 1, p. 179–210, 1969.
- CORDANI, U. G. Comentários sobre as determinações geocronológicas disponíveis nas folhas de asuncion e curitiba. In *Schobbenhaus Filho, C. Carta geológica do Brasil ao milionésimo*, v. 1, n. Brasília, DNPM, p. 58–67, 1974.
- DEUTSCH, C. V. *Geostatistical Reservoir Modeling*. New York: Oxford University Press, 2002. 376 p.
- DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. New York: Oxford University Press, 1998. 339 p.
- EMERY, X. Properties and limitations of sequential indicator simulation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 18, n. 6, p. 414–424, 2004.
- FAMBRINI, G. L. *O Grupo Santa Bárbara (Neoproterozóico III) a norte do rio Camaquã, Rio Grande do Sul, Brasil*. São Paulo: Tese de doutoramento. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2003.
- FRAGOSO-CESAR, A. R. S. et al. A bacia camaquã: um sistema intracontinental anorogênico de rifts do neoproterozóico iii - eopaleozóico no rio grande do sul. *Encontro sobre a estratigrafia do RS: Escudos e Bacias*, v. 1, p. 139–144, 2003.
- GOOVAERTS, P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York: Oxford University Press, 1997. 483 p.
- GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-art and perspectives. *Geoderma*, v. 89, p. 1–45, 1999.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *An introduction to Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JANIKIAN, L. et al. Evolução paleoambiental e sequências deposicionais do grupo bom jardim formação acampamento velho (supergrupo camaquã) na porção norte da sub-bacia camaquã ocidental. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, p. 245–256, 2005.

JOURNEL, A. G. Geostatistics for conditional simulation of orebodies. *Economic Geology*, v. 69, p. 673–680, 1974.

JOURNEL, A. G. Nonparametric estimation of spacial distributions. *Journal of the International Association for Mathematic Geology*, v. 15, p. 445–468, 1983.

JOURNEL, A. G. *Fundamentals of Geostatistics in five lessons*. Washington: American Geophysical Union, 1989. 561p.

LEINZ, V.; ALMEIDA, S. Gênese da jazida de cobre de camaquã. porto alegre, dpm. *Secretaria dos Negócios de Agricultura Indústria e Comércio do Estado do Rio Grande do Sul*, v. 88, p. 56, 1941.

LEUANGTHONG, O.; KHAN, K. D.; DEUTSCH, C. V. *Solved Problems in Geostatistics*. New Jersey: Wiley, 2008. 207 p.

MANN, C. J. Uncertainty in geology. *Computers in Geology - 25 years of Progress*, v. 1, p. 241–254, 1993.

MATHERON, G. *Les variables Regionalisées et leur Estimation*. Paris: Masson et cie, 1965. 212 p.

MATHERON, G. *The Theory of Regionalized Variables and its Applications*. Fontainebleau, France: Ecole Nationale Superieure des Mines de Paris, 1971. No 5. (Cahiers du CMM, No 5). 218 p.

NOBREGA, J. E. S. *Proveniência sedimentar do Grupo Guaritas, Cambriano da bacia do Camaquã (RS)*. São Paulo: Tese de mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2011.

OLEA, R. A. *Geostatistical glossary and multilingual dictionary*. Oxford: Oxford University press, 1991. 175 p.

REMUS, M. D. V. *Metalogênese dos depósitos hidrotermais de metais-base e Au do Ciclo Brasileiro no Bloco São Gabriel, RS*. Porto Alegre: Tese de doutoramento. Instituto de Geociências, Universidade federal do Rio Grande do Sul, 1999.

REMUS, M. D. V. et al. Distal magmatic-hydrothermal origin for the camaquã cu-(au-ag) and santa maria pb, zn (cu-ag) deposits, southern brazil. *Gondwana Research*, v. 3, p. 155–174, 2000. Monograph Series.

RIBEIRO, M. J. O metamorfismo dos campos termais do escudo sul-riograndense. *Série Geológica*, v. 11, p. 15–28, 1986.

RIBEIRO, M. J. *Sulfetos em sedimentos detríticos Cambrianos do Rio Grande do Sul, Brasil*. Porto Alegre: Tese de doutoramento. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

RIOS, F. S. *Caracterização petrográfica e mineralógica da alteração hidrotermal no depósito de Pb-Zn(Cu-Ag) de Santa Maria, distrito mineiro de Camaquã (RS)*. São Paulo: Trabalho de conclusão de curso. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2003.

RIVOIRARD, J. *Introduction to Disjunctive Kriging and Non-Linear Geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1994. 180 p.

SINCLAIR, A. J.; BLACKWELL, G. H. *Applied Mineral Inventory Estimation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 354 p.

SOARES, A. *Geoestatística Para as Ciências da Terra e do Ambiente*. Lisboa: IST Press, 2014. 214 p.

VALENTE, J. M. G. P. *Geomatemática - Lições de Geoestatística*. 2. ed. Ouro Preto: Fundação Gorceix, 1982. v. 3.

VEIGEL, R.; DARDENNE, M. A. Paragênese e sucessão mineral nas diferentes etapas da evolução da mineralização de cu-pb-zn do distrito de camaquã - rs. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 1, n. 4, p. 55–67, 1990.

WELLMANN, J. F. et al. Towards incorporating uncertainty of structural data in 3d geological inversion. *Tectonophysics*, v. 490, p. 141–151, 2010.

YAMAMOTO, J. K. *Avaliação e Classificação de Reservas Minerais*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo - Edusp, 2001.

Link consultado: <http://geobank.sa.cprm.gov.br/>



# ANEXO A – Estatísticas das realizações da Simulação Sequencial de Indicadoras

REALIZAÇÃO	BLOCOS	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIA	DESV.PAD.	VARIÂNCIA
SIM-ORE[00001]	47497	1	3	2,39	0,82	0,67
SIM-ORE[00002]	47497	1	3	2,4	0,82	0,66
SIM-ORE[00003]	47497	1	3	2,36	0,83	0,69
SIM-ORE[00004]	47497	1	3	2,39	0,82	0,67
SIM-ORE[00005]	47497	1	3	2,39	0,82	0,67
SIM-ORE[00006]	47497	1	3	2,37	0,83	0,69
SIM-ORE[00007]	47497	1	3	2,38	0,81	0,66
SIM-ORE[00008]	47497	1	3	2,39	0,82	0,68
SIM-ORE[00009]	47497	1	3	2,36	0,84	0,7
SIM-ORE[00010]	47497	1	3	2,37	0,83	0,69
SIM-ORE[00011]	47497	1	3	2,37	0,83	0,68
SIM-ORE[00012]	47497	1	3	2,33	0,85	0,72
SIM-ORE[00013]	47497	1	3	2,35	0,84	0,71
SIM-ORE[00014]	47497	1	3	2,37	0,83	0,69
SIM-ORE[00015]	47497	1	3	2,36	0,84	0,7
SIM-ORE[00016]	47497	1	3	2,36	0,83	0,69
SIM-ORE[00017]	47497	1	3	2,37	0,83	0,7
SIM-ORE[00018]	47497	1	3	2,39	0,82	0,68
SIM-ORE[00019]	47497	1	3	2,39	0,83	0,68
SIM-ORE[00020]	47497	1	3	2,39	0,83	0,68
SIM-ORE[00021]	47497	1	3	2,38	0,82	0,67
SIM-ORE[00022]	47497	1	3	2,36	0,83	0,7
SIM-ORE[00023]	47497	1	3	2,36	0,84	0,7
SIM-ORE[00024]	47497	1	3	2,37	0,84	0,7
SIM-ORE[00025]	47497	1	3	2,37	0,82	0,68
SIM-ORE[00026]	47497	1	3	2,37	0,84	0,7
SIM-ORE[00027]	47497	1	3	2,36	0,83	0,68
SIM-ORE[00028]	47497	1	3	2,39	0,82	0,66
SIM-ORE[00029]	47497	1	3	2,39	0,82	0,68
SIM-ORE[00030]	47497	1	3	2,38	0,82	0,67
SIM-ORE[00031]	47497	1	3	2,37	0,83	0,69
SIM-ORE[00032]	47497	1	3	2,37	0,83	0,7
SIM-ORE[00033]	47497	1	3	2,37	0,84	0,7
SIM-ORE[00034]	47497	1	3	2,36	0,83	0,69
SIM-ORE[00035]	47497	1	3	2,37	0,84	0,71
SIM-ORE[00036]	47497	1	3	2,42	0,81	0,66
SIM-ORE[00037]	47497	1	3	2,39	0,82	0,68
SIM-ORE[00038]	47497	1	3	2,38	0,82	0,68
SIM-ORE[00039]	47497	1	3	2,4	0,81	0,66
SIM-ORE[00040]	47497	1	3	2,38	0,83	0,68

REALIZAÇÃO	BLOCOS	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIA	DESV.PAD.	VARIÂNCIA
SIM-ORE[00041]	47497	1	3	2,38	0,82	0,67
SIM-ORE[00042]	47497	1	3	2,39	0,82	0,67
SIM-ORE[00043]	47497	1	3	2,38	0,83	0,69
SIM-ORE[00044]	47497	1	3	2,4	0,82	0,68
SIM-ORE[00045]	47497	1	3	2,38	0,83	0,68
SIM-ORE[00046]	47497	1	3	2,38	0,82	0,67
SIM-ORE[00047]	47497	1	3	2,36	0,84	0,7
SIM-ORE[00048]	47497	1	3	2,37	0,83	0,68
SIM-ORE[00049]	47497	1	3	2,37	0,83	0,68
SIM-ORE[00050]	47497	1	3	2,35	0,84	0,71
SIM-ORE[00051]	47497	1	3	2,36	0,83	0,68
SIM-ORE[00052]	47497	1	3	2,37	0,84	0,7
SIM-ORE[00053]	47497	1	3	2,36	0,83	0,69
SIM-ORE[00054]	47497	1	3	2,39	0,81	0,66
SIM-ORE[00055]	47497	1	3	2,37	0,83	0,69
SIM-ORE[00056]	47497	1	3	2,37	0,82	0,68
SIM-ORE[00057]	47497	1	3	2,38	0,83	0,69
SIM-ORE[00058]	47497	1	3	2,37	0,83	0,69
SIM-ORE[00059]	47497	1	3	2,38	0,82	0,67
SIM-ORE[00060]	47497	1	3	2,37	0,83	0,69
SIM-ORE[00061]	47497	1	3	2,36	0,84	0,7
SIM-ORE[00062]	47497	1	3	2,39	0,83	0,68
SIM-ORE[00063]	47497	1	3	2,4	0,83	0,68
SIM-ORE[00064]	47497	1	3	2,38	0,83	0,69
SIM-ORE[00065]	47497	1	3	2,38	0,82	0,68
SIM-ORE[00066]	47497	1	3	2,36	0,83	0,7
SIM-ORE[00067]	47497	1	3	2,38	0,83	0,69
SIM-ORE[00068]	47497	1	3	2,39	0,82	0,68
SIM-ORE[00069]	47497	1	3	2,37	0,84	0,7
SIM-ORE[00070]	47497	1	3	2,36	0,83	0,69
SIM-ORE[00071]	47497	1	3	2,35	0,84	0,7
SIM-ORE[00072]	47497	1	3	2,41	0,81	0,66
SIM-ORE[00073]	47497	1	3	2,38	0,83	0,69
SIM-ORE[00074]	47497	1	3	2,39	0,82	0,67
SIM-ORE[00075]	47497	1	3	2,36	0,83	0,69
SIM-ORE[00076]	47497	1	3	2,39	0,83	0,69
SIM-ORE[00077]	47497	1	3	2,39	0,83	0,68
SIM-ORE[00078]	47497	1	3	2,39	0,83	0,69
SIM-ORE[00079]	47497	1	3	2,39	0,82	0,67
SIM-ORE[00080]	47497	1	3	2,37	0,82	0,67
SIM-ORE[00081]	47497	1	3	2,36	0,84	0,7
SIM-ORE[00082]	47497	1	3	2,37	0,83	0,68
SIM-ORE[00083]	47497	1	3	2,36	0,83	0,7
SIM-ORE[00084]	47497	1	3	2,39	0,82	0,67
SIM-ORE[00085]	47497	1	3	2,4	0,81	0,66
SIM-ORE[00086]	47497	1	3	2,37	0,83	0,68
SIM-ORE[00087]	47497	1	3	2,39	0,81	0,66

---

REALIZAÇÃO	BLOCOS	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIA	DESV.PAD.	VARIÂNCIA
SIM-ORE[00088]	47497	1	3	2,39	0,82	0,68
SIM-ORE[00089]	47497	1	3	2,38	0,83	0,68
SIM-ORE[00090]	47497	1	3	2,38	0,83	0,68
SIM-ORE[00091]	47497	1	3	2,41	0,81	0,66
SIM-ORE[00092]	47497	1	3	2,38	0,83	0,68
SIM-ORE[00093]	47497	1	3	2,37	0,83	0,69
SIM-ORE[00094]	47497	1	3	2,38	0,83	0,68
SIM-ORE[00095]	47497	1	3	2,37	0,83	0,69
SIM-ORE[00096]	47497	1	3	2,41	0,81	0,66
SIM-ORE[00097]	47497	1	3	2,39	0,82	0,68
SIM-ORE[00098]	47497	1	3	2,38	0,83	0,69
SIM-ORE[00099]	47497	1	3	2,37	0,83	0,69
SIM-ORE[00100]	47497	1	3	2,37	0,84	0,7