

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e
Materiais (PPGEM)

**DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIA DE SONDAGEM PARA AUMENTO NA
CONVERSÃO DE RECURSOS E RESERVAS**

Artur Almgren Saldanha

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2020

ARTUR ALMGREN SALDANHA

**DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIA DE SONDAÇÃO PARA AUMENTO NA
CONVERSÃO DE RECURSOS E RESERVAS**

Dissertação realizada no Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, dentro do programa de pós-graduação em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Porto Alegre

2020

"I have been impressed with the urgency of doing.

Knowing is not enough; we must apply.

Being willing is not enough; we must do"

(Leonardo da Vinci)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Rodrigo de Lemos Peroni pela orientação ao longo deste trabalho.

Aos professores, monitores e funcionários da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

À Deswik Brasil e em especial ao gestor Francisco Bittencourt pela possibilidade de realizar este mestrado, na flexibilização das horas, e no suporte com o software Deswik.

À Geovariances Brasil pelo apoio ao longo deste trabalho.

Aos amigos e colegas de trabalho Rafael Rosado, Saulo Batista, Gustavo Usero, Sílvia Misk, Laércio Bertossi, Ítalo Barreto e Ítalo Koyama, pelo incentivo e pelas valorosas discussões técnicas.

À minha família, pelo apoio e suporte incondicional.

RESUMO

Projetos de exploração mineral buscam converter a maior quantidade de recursos minerais Inferidos a Indicados, durante estágios de pré-viabilidade. O objetivo principal é de reduzir o risco geológico e aumentar a confiança do recurso, focando em uma campanha de sondagem com o menor custo possível e adicionar valor ao projeto. No entanto, quando a sondagem não está relacionada ao plano de produção, a campanha de sondagem pode se tornar custosa e ineficiente. Portanto, uma estratégia deve ser levada em conta para maximizar a conversão de recursos e minimizar os custos. Este estudo busca definir uma malha a de sondagem que leve em conta estes dois critérios, e que esteja baseada em três pontos: reduzir incerteza, definir onde e quando furar. A metodologia consiste em estabelecer uma relação entre malha de sondagem e espaçamento, a fim de encontrar uma malha de sondagem que possa ser convertida em recursos indicados. Inicialmente, a classificação é definida por critérios geométricos, suportada por um estudo de incerteza considerando 90% de intervalo de confiança para um período de produção anual. A segunda questão, onde furar, é definida a partir de uma abordagem probabilística, executando uma otimização da cava de recursos para cada realização. Se o bloco está dentro da cava de recursos, então o bloco possui probabilidade de ser convertido a reserva. O terceiro aspecto a ser proposto, quando furar, é baseado na mesma abordagem probabilística, considerando as fases de *pushback*. Se o bloco é parte da 1ª ou 2ª fase de *pushback*, então a área terá alta prioridade, e se está nas fases seguintes, a área é de baixa prioridade. Para demonstrar a metodologia, o estudo de caso é apresentado em um depósito de ouro a ser lavrado por cava a céu aberto em um estágio de pré-viabilidade, onde a continuidade em profundidade é sugerida, mas pouco sondada (Recursos Inferidos).

Palavras-chave: geoestatística, simulação, sondagem, classificação de recursos

ABSTRACT

Mineral exploration projects aim to convert the largest amount of mineral resources to a higher level of knowledge (Inferred to Measured and/or Indicated resources) during pre-feasibility stages. The main idea of this study is to reduce geological risk and increase reliability focusing the exploration budget to create value to the company. However, when not linked to a production plan, exploration drilling can become costly and ineffective. Therefore, a strategy should be performed to maximize ore resources conversion and minimize drilling capital costs. The study assesses the optimal infill drilling strategy that meets these criteria based mainly in three main aspects: reducing uncertainty, where to drill and when to drill. The methodology consists of carrying out a data spacing analysis and accessing uncertainty to define the ideal drill spacing which converts Inferred to Indicated resources. Firstly, classification is defined by data spacing supported by conditional simulation, considering the 90% confidence level for a specific production period. The second question, where to drill, is defined on a probabilistic approach, by running a pit optimization for each realization. If a block falls inside any of the simulated ultimate pits, then this block will have probability to be converted to ore reserve. The third aspect, when to drill, is based on the same probabilistic approach, but accounting the pushback phases: if the block falls inside the 1st or 2nd pushback phases, then this area will have high priority against others. To demonstrate the methodology, a case study is presented in a gold deposit to be mined using open pit method in the pre-feasibility stage, in which ore continuity in depth is suggested but still sparsely drilled (inferred resources).

Keywords – geostatistics, simulation, drilling, resources classification

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Meta.....	3
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Metodologia	3
1.4 Estrutura da dissertação.....	4
2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	5
2.1 Estudos Técnicos	5
2.2 Classificação de Recursos e Reservas Minerais.....	7
2.3 Evolução da metodologia de Classificação de Recursos	7
2.4 Métodos de Classificação de Recursos.....	12
2.4.1 Critérios geométricos	12
2.4.2 Métodos geoestatísticos	13
2.5 Simulação Condicional	16
2.5.1 Simulação de variáveis independentes.....	16
2.5.2 Simulação de variáveis dependentes – Aplicação de lei de Bayes....	17
2.5.3 Transformação gaussiana.....	19
2.5.4 Simulação Sequencial Gaussiana.....	20
2.5.5 Passo a passo prático para Simulação Sequencial Gaussiana	22
2.6 Planejamento de lavra a céu aberto	23
2.7 Função benefício	25
3. METODOLOGIA	26
3.1 Definição de malha de sondagem	26
3.2 Definição de zonas de sondagem e priorização de áreas	30
4. ESTUDO DE CASO.....	32
4.1 Banco de dados.....	32
4.2 Sumário estatístico	34
4.3 Variogramas	37
4.4 Simulação condicional.....	39
4.5 Validação da simulação.....	40
4.5.1 Validação da média global.....	40

4.5.2	Validação dos histogramas	42
4.5.3	Validação do variograma	43
4.6	Resultados - malha de sondagem	44
4.7	Resultados – alvos e prioridade de sondagem.....	47
5.	CONCLUSÕES	56
6.	REFERÊNCIAS	58

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Relação entre Resultados de Exploração, Recursos e Reservas Minerais (CBRR 2016).</i>	11
<i>Figura 2 – Critérios geométricos de classificação (modificado de Deutsch et al., 2006).</i>	12
<i>Figura 3 – Espaçamento médio para malhas irregulares.</i>	13
<i>Figura 4 – Gráfico esquemático da relação custo/benefício para definição de malha de sondagem (modificado de Wilde & Deutsch 2010).</i>	15
<i>Figura 20 – Transformação por meio de funções lineares de quantis (Isaaks & Srivastava 1989).</i>	20
<i>Figura 5 – Desenho esquemático da geração de número randômico para cada nó (Rossi & Deutsch, 2014).</i>	21
<i>Figura 6 – Relação entre VPL e cavas aninhadas, para modelo determinístico por krigagem ordinária e para as realizações da simulação condicional (modificado por Dimitrakopoulos et al. 2002).</i>	24
<i>Figura 7 – Fluxograma da estratégia de sondagem.</i>	26
<i>Figura 8 – Fluxograma do método de definição de malha versus incerteza.</i>	27
<i>Figura 9 – Malha de sondagem virtual em perspectiva, 60 x 60 m sobre o modelo de referência. Pontos vermelhos representam furos de sondagem a serem criados.</i>	28
<i>Figura 10 – Malha de sondagem virtual em perspectiva, 30 x 30 m sobre o modelo de referência. Pontos vermelhos representam furos de sondagem a serem criados.</i>	28
<i>Figura 11 – Malhas virtuais em diferentes densidades amostrais.</i>	29
<i>Figura 12 – Medida de incerteza com base no erro relativo. Modificado de Rossi & Deutsch (2014).</i> ...	30
<i>Figura 13 – Mapa em planta da boca dos furos.</i>	32
<i>Figura 14 – Mapa em perspectiva 3-D dos furos de sondagem.</i>	33
<i>Figura 15 – Vista em perspectiva dos setores do depósito.</i>	34
<i>Figura 16 – Seção vertical do Setor Norte.</i>	34
<i>Figura 17 – Histogramas de Au normalizado do Setor Sul (a) agrupado e (b) desagrupado.</i>	35
<i>Figura 18 – Histogramas de Au normalizado do Setor Central (a) agrupado e (b) desagrupado.</i>	35
<i>Figura 19 – Histogramas de Au normalizado do Setor Norte (a) agrupado e (b) desagrupado.</i>	36
<i>Figura 21 – Distribuição transformada no espaço Gaussiano do Setor Sul.</i>	37
<i>Figura 22 – Variogramas da variável normalizada do Setor Sul para as direções de (a) maior continuidade, (b) continuidade média e (c) menor continuidade.</i>	38
<i>Figura 23 – Variogramas da variável normalizada do Setor Central para as direções de (a) maior continuidade, (b) continuidade média e (c) menor continuidade.</i>	38
<i>Figura 24 – Variogramas da variável normalizada do Setor Norte para as direções de (a) maior continuidade, (b) continuidade média e (c) menor continuidade.</i>	38
<i>Figura 25 – Validação da média global - Setor Sul.</i>	41
<i>Figura 26 – Validação da média global - Setor Central.</i>	41
<i>Figura 27 – Validação da média global - Setor Norte.</i>	42
<i>Figura 28 – Validação do histograma das realizações do (a) Setor Sul, (b) Setor Central e (c) Setor Norte.</i>	42

<i>Figura 29 – Validação dos variogramas do Setor Sul para as direções de (a) maior, (b) média e (c) menor continuidade.</i>	43
<i>Figura 30 – Validação dos variogramas do Setor Central para as direções de (a) maior, (b) média e (c) menor continuidade.</i>	43
<i>Figura 31 – Validação dos variogramas do Setor Norte para as direções de (a) maior, (b) média e (c) menor continuidade.</i>	44
<i>Figura 32 – Volumes representando períodos de produção em base anual.</i>	44
<i>Figura 33 – Relação entre incerteza e espaçamento de dados.</i>	46
<i>Figura 34 – Seção E-W do Setor Norte com o E-type e com as cavas das realizações.</i>	49
<i>Figura 35 – Seção E-W do Setor Central com as cavas finais das realizações.</i>	49
<i>Figura 36 – Seção E-W mostrando a cava final para 4 realizações.</i>	50
<i>Figura 37 – Seção E-W mostrando a zona de sondagem.</i>	51
<i>Figura 38 – Seção longitudinal com a cava de recursos máxima para o E-type e para as realizações.</i>	52
<i>Figura 39 – Fases de pushback para a realização 1.</i>	52
<i>Figura 40 – Seção longitudinal com a 2ª fase de pushback para o E-type e para as realizações.</i>	53
<i>Figura 41 – Seção E-W mostrando as zonas de prioridade de amostragem.</i>	54
<i>Figura 42 – Seção longitudinal mostrando as zonas de prioridade de amostragem.</i>	55

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 – Sumário estatístico.</i>	36
<i>Tabela 2 – Protótipo do modelo</i>	39
<i>Tabela 3 - Parâmetros de vizinhança</i>	39
<i>Tabela 4 - Comparação das médias das realizações</i>	40
<i>Tabela 5 - Erro relativo médio de cada malha, para os períodos de produção.</i>	45
<i>Tabela 6 - Classificação dos recursos minerais.</i>	46
<i>Tabela 7 - Parâmetros Econômicos</i>	48

1. INTRODUÇÃO

Projetos avançados de exploração mineral em fase de pré-viabilidade têm como um de seus objetivos converter a maior quantidade de recursos minerais para um nível maior de conhecimento (Recurso Inferido para Recurso Indicado ou Medido). A conversão é realizada com um adensamento de amostragem, reduzindo o risco geológico e aumentando a confiabilidade de geometria e teor do minério. O passo seguinte consiste na avaliação econômica do depósito, com a otimização de cava e sequenciamento de lavra. Assim, o Recurso pode ser convertido a Reservas, adicionando-se valor ao projeto.

No entanto, quando a locação amostral não é dimensionada de maneira eficiente, ou quando não está associada ao planejamento de lavra, a campanha de sondagem pode se tornar muito custosa e pouco efetiva. Embora o dimensionamento de sondagem associado a planejamento de lavra seja uma boa prática na indústria mineral, não é implementado via de regra. Portanto, uma estratégia de sondagem deve ser realizada para maximizar a conversão de recursos e minimizar custos de capital.

Esta dissertação busca estabelecer uma estratégia de sondagem que leve em conta três principais aspectos: i. como, ii. onde e iii. quando furar. O primeiro item “como furar” corresponde a configuração e densidade amostral que deverá ser adotada. O estudo de malha de sondagem busca definir a relação entre espaçamento de sondagem e incerteza de teor. A malha considerada ideal será aquela que possua uma incerteza na estimativa de teores e continuidade do depósito, tal que permita classificar como Recurso Indicado.

A otimização de locação amostral é um dos assuntos mais estudados em geoestatística, uma vez envolve uma série de parâmetros interligados entre si, como por exemplo: i. objetivo da locação amostral, ii. configuração amostral, iii. método de classificação e medida de incerteza. O objetivo da locação amostral deve ser claro e objetivo, pois o orçamento disponível para sondagem é limitado e frequentemente sondagem de conversão de recursos confunde-se com sondagem exploratória. Em uma fase de estudo técnico de pré-viabilidade, o objetivo da sondagem é de converter

recursos. Portanto, a malha deve ser adequada a conversão de Recursos Inferidos a Indicados. Portanto, a configuração amostral deve levar em conta alguma medida de incerteza que garanta o nível de precisão adequado ao objetivo proposto. Nesse sentido, diversos trabalhos propõem medidas de incerteza para classificação de recursos, seja com variância de krigagem e/ou variâncias de krigagem relativas como Arik (1999) e Blackwell (1998), ou utilizando o alcance do variograma como Froidevaux (1982) e Snowden (1996). Segundo Journel (1989), a variância de krigagem é uma medida de erro de estimativa que considera configuração amostral, e não a variabilidade dos teores. Medidas de incerteza baseadas em simulação condicional possuem a vantagem de considerar os teores das amostras, e por isso podem ser empregadas para suportar classificação de Recursos. Como referência podemos citar Pilger (2000), Dohm (2005), Souza (2007), Koppe (2009), Murphy et al. (2004), Wilde & Deutsch (2010). Já em minas em operação, o espaçamento amostral para classificação de recursos pode utilizar dados de produção, como apresentado por Menin (2017), e Menin et al. (2016).

A segunda questão, “onde furar”, também está intimamente associada ao objetivo de sondagem. Em um estudo técnico de fase de pré-viabilidade, o método de lavra já deve estar definido, e para isso consideremos método de lavra a céu aberto. A sondagem de conversão deveria considerar esse cenário, no entanto, muitas vezes a sondagem de conversão é confundida com sondagem exploratória: boas intersecções de sondagem em profundidade podem ser sobrevalorizadas pela opinião subjetiva do geólogo, e o orçamento passa a ser gasto buscando continuidade destes corpos e o orçamento disponível é gasto em uma zona não econômica. Para isso, a boa prática recomenda que a sondagem deva ser realizada dentro de uma zona econômica, no caso a cava matemática final. A cava matemática realizada sobre o modelo estimado irá gerar uma resposta determinística segundo a qual todo o recurso dentro da cava de recursos possui um potencial de conversão. Ao se analisar a cava a na perspectiva de uma série de realizações geradas por métodos de simulação geoestatística, os limites de economicidade serão probabilísticos em função da incerteza de teores. Esse resultado será desejável para definir um limite seguro de toda a zona de potencial de conversão de recursos para reservas.

O terceiro aspecto, “quando furar”, será baseado na mesma abordagem anterior, porém de acordo com as fases de avanço definidos pelo sequenciamento matemático preliminar de lavra definindo precedências e prioridades. As primeiras fases de avanço (*pushback*) serão consideradas prioritárias, enquanto que as últimas fases de avanço serão consideradas como menos prioritárias. Para demonstrar esta metodologia, um estudo de caso é apresentado em um depósito de ouro em fase de pré-viabilidade, a ser lavrado a céu aberto.

1.1 Meta

A meta deste estudo é de definir uma metodologia que permita estabelecer um plano de sondagem que tenha como principal finalidade a maximização da conversão de recursos em reservas, levando em conta a incerteza de teores bem como critérios econômicos (critérios de planejamento de lavra e fluxo de caixa).

1.2 Objetivos

Por meio de um estudo de caso de um depósito de ouro, essa dissertação propõe atingir a sua meta realizando os seguintes passos:

- Avaliar e selecionar técnica de simulação estocástica e definir os critérios e a medida de incerteza utilizada na Classificação de Recursos.
- Propor uma malha de sondagem que garanta a conversão de Recursos Inferidos em Indicados.
- Propor uma definição de alvos de sondagem. As zonas de conversão são definidas a partir de critérios econômicos (zonas de maior economicidade), de forma a garantir a conversão de Recurso para Reserva.
- Propor uma priorização das zonas de sondagem em alta e baixa prioridade, de acordo com o sequenciamento de lavra.

1.3 Metodologia

Este estudo pode ser separado em duas partes. Na primeira etapa, é realizada a análise exploratória dos dados seguido pela estimativa de teores em um modelo de blocos assim como a construção de um segundo modelo contendo múltiplas realizações geradas por simulação condicional. Posteriormente foi realizada a

validação da estimativa e a validação do modelo simulado. Com o modelo estimado, realiza-se o estudo de malha e de sondagem. Na segunda parte, é realizada a otimização de cava matemática para o modelo estimado e para os modelos simulados, e é realizada a análise dos resultados. As etapas serão as seguintes:

- i. Modelo de blocos estimado
- ii. Simulação de teores
- iii. Estudo de malha de sondagem
- iv. Otimização de cava das realizações da simulação
- v. Definição da zona de sondagem e hierarquização das zonas de alta e baixa prioridade.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em 5 capítulos, conforme segue:

Capítulo 1 – Introdução ao tema, meta e objetivos.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica com as técnicas de simulação e planejamento de lavra, bem como estado da arte sobre os temas de definição de malhas de sondagem com base na incerteza de teores. Também são revistas as principais técnicas de classificação de recursos, e as boas práticas aceitas pelo mercado.

Capítulo 3 – Demonstração da metodologia para determinação da relação entre incerteza e malha. A definição de alvos de sondagem associada a hierarquia e priorização da sondagem no tempo também serão descritas.

Capítulo 4 – Estudo de caso com uso da incerteza dos teores no planejamento de lavra e impacto na conversão de recursos a reservas.

Capítulo 5 – Conclusão, discussão sobre os resultados e análise da aplicabilidade desta metodologia em campanhas de sondagem.

2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Com uma ampla variedade de métodos, a otimização de locação amostral é um dos temas mais estudados em geoestatística. Neste capítulo, serão revisados os principais métodos de locação amostral, sob a luz da Classificação de Recursos. Serão detalhadas as boas práticas de classificação, bem como o avanço do uso das ferramentas geoestatísticas para cálculo de incerteza, através do uso de simulação condicional. Também, será descrito o método de otimização de cava, para avaliação a economicidade do recurso mineral.

2.1 Estudos Técnicos

A Avaliação de Recursos de um depósito mineral costuma iniciar-se com trabalhos de gabinete e métodos indiretos de pesquisa, como mapas geoquímicos, geológicos, geofísicos, a fim de se definir os alvos regionais. A partir daí, ou concomitantemente, parte-se para trabalhos de campo com amostragem de afloramentos, solo, drenagem e, por fim, inicia-se campanhas de sondagem exploratória, a fim de delimitar o alvo de pesquisa. São chamados de Estudos Técnicos as fases de detalhamento de uma pesquisa mineral, cada qual com seu nível de detalhe e precisão pretendido. A seguir serão citados brevemente cada fase de estudo, e sua correlação com a amostragem e com a conversão de recursos, de acordo com os conceitos estabelecidos nos manuais do Instituto Australiano de Mineração e Metalurgia - AusIMM (AusIMM, 2012):

Estudo Conceitual

Após uma sondagem exploratória com resultados favoráveis, parte-se para uma campanha de sondagem, ainda exploratória, que irá delimitar o alvo de pesquisa, restringindo a zona de interesse econômico. Em geral esta fase de pesquisa é chamada também de Estudo de Escopo, no qual as primeiras tentativas de valoração do projeto são efetuadas, ainda com alto grau de incerteza, já que os recursos são, em sua maioria, inferidos e o espaçamento não tem a necessidade de confirmar Recursos Medidos ou Indicados. O grau de precisão não é acurado, podendo variar entre 40 e 50%, aproximadamente.

Estudo de pré-viabilidade

Nesta fase inicia-se o que se chama de estudo de pré-viabilidade, onde alguns critérios técnico-econômicos já estão estabelecidos, como por exemplo método de lavra e de beneficiamento. Nesta fase, busca-se converter a maior quantidade de Recursos Inferidos em Indicados. Assim, depósito mineral representado por um modelo de blocos estimado já pode ser utilizado para um plano de viabilidade econômica, com um grau de precisão mais acurado.

Estudo de viabilidade

Após o estudo de pré viabilidade, novas campanhas são executadas com o fim de adensar a malha para garantir um plano de lavra com menor grau de incerteza para as fases de abertura da mina. A malha de sondagem pode ser adensada, para a conversão de Recursos Indicados em Medidos. Após estudos de processo da planta, por exemplo, pode-se verificar períodos (base mensal) de alta oscilação de teor na planta. Nesse momento, furos específicos podem ser executados para redução de incerteza em pontos específicos do depósito, a fim de diminuir a incerteza, e assim garantir estabilidade operacional da planta para períodos de base trimestral/mensal.

Fase de produção

Durante a operação de mina, novas campanhas de amostragem são realizadas sistematicamente pela equipe de geologia de curto prazo para garantir a previsibilidade na produção diária, e assim otimizar controle de teor no pátio de minério e assim garantir estabilidade operacional na escala diária e semanal. Extensos trabalhos de redução de incerteza e configuração amostral são encontrados na literatura.

O contexto deste trabalho insere-se na fase de estudos de pré-viabilidade, no qual o recurso total é predominantemente inferido, com recurso indicado em algumas porções. O objetivo da amostragem é de converter a maior quantidade de Recursos Inferidos a Indicados. A estratégia de sondagem, portanto, não será de executar furos exploratórios, nem furos orientados em zonas de alta variabilidade, mas apenas definir uma malha regular de sondagem que possa garantir a conversão de Recursos Indicado em Recurso Inferido.

2.2 Classificação de Recursos e Reservas Minerais

A avaliação econômica de projetos de mineração depende de muitos fatores, em especial a Classificação de Recursos. A qualidade da classificação é pré-requisito para avaliação de riscos associados ao depósito (Silva & Boisvert 2014). A Classificação de Recursos e Reservas consiste na setorização do depósito em função de níveis de confiança: recurso medido, indicado e inferido, enquanto que as reservas são classificadas em provadas ou prováveis.

Empresas de capital fechado podem definir metodologia própria para definição dos níveis de incerteza de seus recursos, e assumir riscos baseados na classificação proposta. Já empresas de capital aberto devem reportar seus recursos e reservas publicamente (*Public Disclosures*) nas bolsas de valores, seguindo procedimentos determinados pela mesma. Diversas padronizações de declaração são utilizadas em diferentes países, muito embora eles sejam bem parecidos entre si, cada qual com sua particularidade. Todos eles possuem, no entanto, regras claras para declaração pública, garantindo ao investidor tomada de decisão baseada em informações claras e confiáveis (Rossi & Deutsch, 2014).

2.3 Evolução da metodologia de Classificação de Recursos

Em 1989, é publicado o primeiro código australiano para sistematização de práticas e procedimentos para classificação de recursos e reservas minerais denominado *Joint Ore Reserves Committee - JORC* (JORC 2012). O código estabelece diretrizes e define conceitos de recurso e reserva e demais critérios como o conceito de *Competent Person*. Com a criação de códigos de outros países, é reunido, em 1997, um comitê entre representantes dos conselhos australiano (AusIMM), canadense (CIM), americano (SME) e sul-africano (SAIMM), denominado *Council of Mining and Metallurgical Institutions* (CMMI) no chamado Acordo de Denver, que teve por objetivo padronizar conceitos e terminologia entre os códigos.

Em 2000, o CIM atualiza seu código, o *National Instrument NI43-101*, estabelecendo procedimentos mais rígidos na declaração, ao definir que o recurso

medido deve suportar o planejamento de lavra e avaliação econômica do projeto. Em 2007, o americano SME, buscando reconhecimento junto ao *Securities and Exchange Commission's Industry Guide* (SEC), leva maior restrição na classificação ao limitar os recursos dentro de uma cava, aplicando critérios econômicos ao recurso. Em 2005, o CIM passa a considerar a publicação de um estudo preliminar, o *Preliminary Assessment* (PA), em que estudos são realizados em projetos iniciais de desenvolvimento, ainda que possua somente recursos inferidos.

O Comitê de Reservas Minerais e Padrões Internacionais de Relato (CRIRSCO) foi formado em 1994 através do CMMI, e consiste em um agrupamento de representantes de organizações de diversos países responsáveis pela elaboração de diretrizes gerais para os códigos de declaração de recursos e reservas minerais. As normatizações do CMMI e das posteriores adaptações de cada país, consolida os conceitos e é considerado o guia mais atual. Nele, estabelece-se que as declarações públicas devem estar assentadas em três pilares fundamentais, ou princípios constitutivos:

- **Transparência:** As informações de um relatório público devem apresentar as informações de forma clara e transparente, de forma a não permitir ao leitor interpretações ambíguas ou erradas.
- **Competência:** O relatório deve ser escrito por profissionais competentes e qualificados. Por competente entende-se uma pessoa que possui determinadas características aceitas para assinar um relatório: devem ser respeitados não apenas pela empresa contratada, mas também pelo órgão regulatório da bolsa de valores. O profissional também deve possuir experiência que demonstre sua habilidade e seja reconhecido por seus pares. Considera-se mínimo de 5 anos de experiência relevante no tipo de depósito mineral em questão, e que esteja associado em um órgão filiado ao CRIRSCO. O *Competent Person/Qualified Person* é o profissional habilitado a assinar um relatório de recursos e reservas, responsável pelas informações contidas.
- **Materialidade:** todas as informações necessárias para qualquer tomada de decisão devem estar contidas no relatório. Qualquer alteração ou modificação nos números apresentados devem ser acompanhadas de justificativas. Um aumento significativo na quantidade de recursos, por exemplo, deve vir acompanhado de

uma informação material, como resultados de sondagem justificando esse aumento.

O CRIRSCO produziu um documento denominado *Standard Definitions*, resumindo as nomenclaturas padrão a serem utilizadas pelos códigos de declaração dos órgãos e países associados. Segundo o documento, os termos em negrito nos parágrafos abaixo podem exigir esclarecimentos adicionais, o que foge do escopo deste estudo.

Recursos Minerais: Concentração ou ocorrência de um material sólido de interesse econômico na superfície ou no subsolo cuja geometria, teor (ou qualidade) e quantidade possuem perspectivas **razoáveis** para **eventual extração econômica**. Localização, quantidade, teor (ou qualidade), continuidade e demais características geológicas de um Recurso Mineral são conhecidas, estimadas ou interpretadas a partir de evidência geológica específica, incluindo amostragem. Recursos minerais são subdivididos, em ordem de confiança geológica, em categorias de Recurso Inferido, Indicado e Medido.

- Recurso Inferido: É aquela parte do recurso mineral cuja quantidade e teor (ou qualidade) são estimadas com base evidência geológica e amostragem limitadas. Evidência geológica é suficiente para **sugerir, mas não comprovar** a continuidade geológica e de teor (ou de qualidade). É baseado na exploração, amostragem e testes coletados através de técnicas apropriadas como afloramentos, trincheiras, pits e furos de sondagem. Possui nível de confiança inferior ao Recurso Indicado e não pode ser convertido e Reserva Mineral. É razoavelmente esperado que a maioria do recurso Inferido seja convertido para Recurso Indicado com contínuo trabalho de exploração mineral.
- Recurso Indicado: É aquela parte do recurso mineral cuja quantidade, teor (ou qualidade), densidade, geometria e características físicas são estimadas com nível de confiança suficiente para permitir a aplicação de fatores modificadores em detalhe suficiente para suportar um planejamento de lavra e avaliação da viabilidade econômica do depósito. Evidência geológica é derivada de exploração, testes e amostragem detalhada e confiável, coletada através de técnicas apropriadas como furos de sondagem, trincheiras e afloramentos, e com

confiança suficiente para **assumir** continuidade geológica e de teor (ou de qualidade) entre pontos de observação cujos dados e amostras são coletados. Possui nível de confiança inferior quando comparado ao Recurso Medido.

- Recurso Medido: É aquela parte do recurso mineral cuja quantidade, teor (ou qualidade), densidade, geometria e características físicas são estimadas com nível de confiança suficiente para permitir a aplicação de Fatores Modificadores a fim de suportar um **planejamento de lavra detalhado e avaliação final** da viabilidade econômica do depósito. Evidência geológica é derivada de exploração, testes e amostragem detalhada e confiável, coletada através de técnicas apropriadas como furos de sondagem, trincheiras e afloramentos, e com confiança suficiente para **confirmar** a continuidade geológica e de teor (ou de qualidade) entre pontos de observação cujos dados e amostras são coletados. Possui nível de confiança superior aos Recursos Indicado e Inferido e pode ser convertido para Reserva Provada ou Reserva Provável.
- Reserva Mineral: É a parte economicamente lavrável do Recurso Medido e/ou Indicado. Inclui diluição de material e provisões de perdas, que podem ocorrer quando o material é extraído ou lavrado e é definida por estudos em nível de Pré-Viabilidade ou Viabilidade conforme apropriado, que inclua a aplicação de Fatores Modificadores. Tais estudos demonstram que, no momento da declaração, a extração poderia ser razoavelmente justificada. O ponto de referência em que as reservas são definidas, geralmente o ponto em que minério é entregue à usina de processamento, deve ser declarado. É importante que, em todas as situações em que o ponto de referência é diferente, como uma venda do produto, uma declaração esclarecedora é incluída para garantir que o leitor esteja informado sobre o que está sendo relatado.
- Reserva Provável: é a parte economicamente lavrável de um Recurso Indicado e, **em algumas circunstâncias**, do Recurso Medido. A confiança nos Fatores Modificadores aplicados a uma Reserva Provável é menor que a aplicada a uma Reserva Provada.
- Reserva Provada: É a parte economicamente lavrável de um Recurso Medido. Uma Reserva Mineral Provada significa um alto grau de confiança nos Fatores Modificadores.

A Figura 1 mostra a interrelação entre os tipos de recurso e os tipos de reserva. Enquanto que o recurso pode mudar de categoria com base no nível de confiança, a reserva muda de categoria com base nos fatores modificadores.

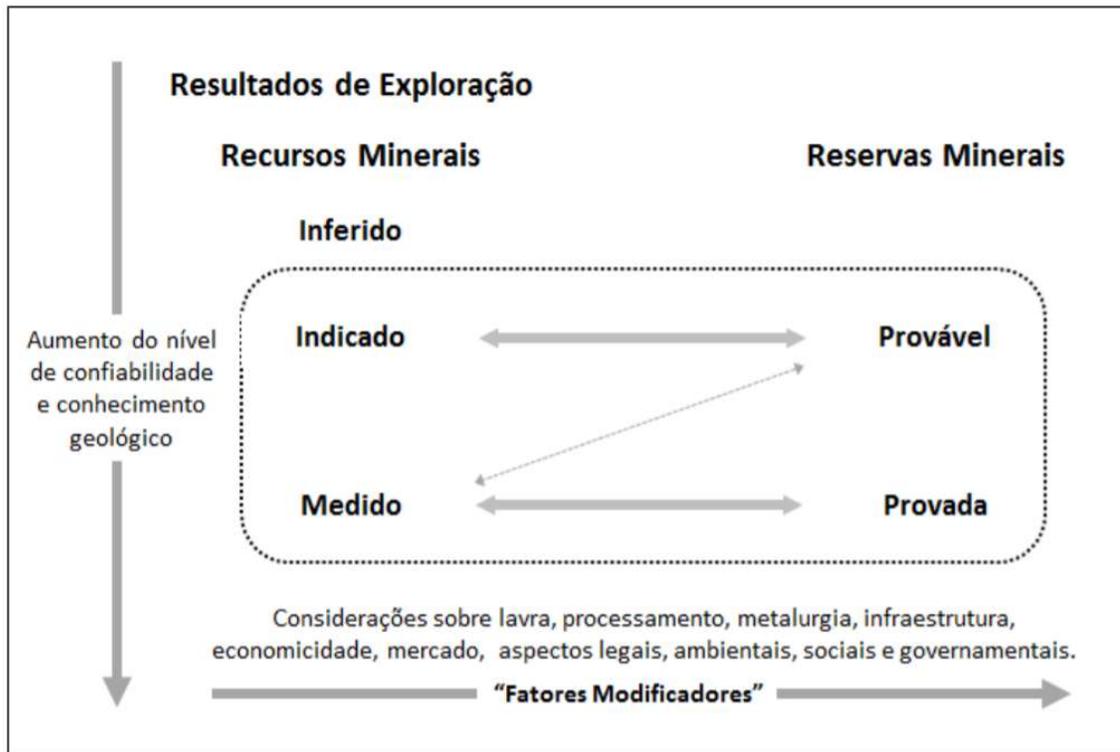


Figura 1 – Relação entre Resultados de Exploração, Recursos e Reservas Minerais (CBRR 2016).

Embora os códigos internacionais procurem uniformizar as normas de classificação de recursos e reservas, não há diretriz sobre qual metodologia ou índice de incerteza devem ser utilizados, ficando a critério de cada profissional definir aqueles métodos que melhor se encaixam no tipo de depósito mineral. Cabe ao *Competent Person* avaliar o método mais adequado, com base em sua experiência com depósitos similares, e com base em índices de incerteza quantitativos ou qualitativos. Considera-se continuidade geológica do corpo, teor e geometria, teor de contaminantes, quantificação da acurácia da estimativa local e impacto da incerteza na economicidade, seletividade de mina, qualidade da amostragem e análise, dentre outros. A Tabela 1 do JORC sugere que, quando possível, a classificação de recursos deve vir acompanhada de uma medida de incerteza (JORC, 2012).

Uma vez que o principal fator de classificação consiste na densidade e configuração amostral, segue um resumo sobre os tipos de métodos geométricos e geoestatísticos que levam em conta o espaçamento amostral.

2.4 Métodos de Classificação de Recursos

2.4.1 Critérios geométricos

Critérios geométricos são amplamente utilizados para classificação de recursos minerais, pois fornecem uma medida direta de quantidade, densidade e/ou espaçamento de furos, tornando-os simples e transparentes. Isso os torna mais fáceis de entendimento para acionistas (Deutsch et al., 2006). Os métodos geométricos mais comuns são: malha de sondagem, densidade de furos e proximidade do bloco ao furo (Figura 2):



Figura 2 – Critérios geométricos de classificação (modificado de Deutsch et al., 2006).

Embora a medida de raio a partir do furo seja bem intuitiva e lógica, existem limitações para seu uso. Uma vez que a classificação é aplicada sobre os blocos individualmente, ocorrem artifícios que não são adequados para a classificação de recursos, como por exemplo falta de continuidade espacial para cada categoria. Outra limitação é que a classificação de recursos depende não só de apenas um furo, mas de uma continuidade geológica. E a continuidade geológica só pode ser comprovada com dois ou mais furos.

Na malha de sondagem, cada bloco é classificado de acordo com o espaçamento entre os furos de sondagem. Este é um método muito útil principalmente quando os furos são verticais e estão espaçados em malha regular, pois reduz-se a área para 2D, e a classificação pode ser realizada manualmente através do uso de

polígonos. Em malhas com direções e espaçamento variados, ou ainda em furos com alto desvio, as distâncias podem ser obtidas de diversas fórmulas. Uma das formas é se definir um espaçamento médio com base no espaçamento regular em um volume, levando em conta o tamanho da composta (Figura 3). O volume corresponde a um paralelepípedo de lados L_1 , L_2 e L_3 , com composta de comprimento c . Para um número de compostas “ n ”, o espaçamento L é definido por:

$$L = \sqrt{\frac{L_A \cdot L_B \cdot L_C}{c \cdot n}}$$

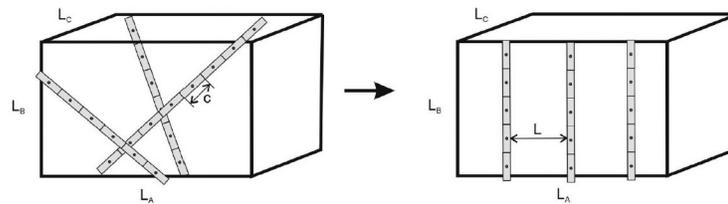


Figura 3 – Espaçamento médio para malhas irregulares.

2.4.2 Métodos geoestatísticos

Uma das vantagens da estimativa pelo método de krigagem é que, quando corretamente aplicada, produz-se estimativas não-enviesadas, através da obtenção de pesos os que minimizam a variância, e produzem uma medida de incerteza da estimativa, denominada variância de krigagem. Por isso, as primeiras propostas de classificação foram baseadas na variância de krigagem e suas variantes, chamadas de variância de krigagem relativas (Dohm, 2005). No entanto, cada vez menos a variância de krigagem tem sido utilizada para classificação de recursos, por fornecer uma medida de incerteza que não leva em conta a variabilidade de teores.

Uma forma tradicional de classificação é o uso do alcance do variograma (Snowden 1996). Neste método, o bloco é classificado a partir de restrições do elipsoide de busca. São realizadas diversas passadas de estimativas, com aumento da restrição a cada passada. Tais restrições costumam ser com relação ao número de amostras encontradas no entorno do bloco e/ou derivados dos alcances do variograma: distâncias do alcance máximo do variograma recebe classificação de

Indicado, e até 70% do alcance do variograma recebe classificação de medido. Uma restrição do número de amostras ou de furos também é comumente utilizada. Embora muito comum e bem aceita pela indústria, algumas considerações devem ser feitas: i. não é considerado o efeito pepita, ii. o uso do modelo exponencial pode gerar distorções na interpretação, e iii. não é considerada nenhuma medida de incerteza.

A Classificação de Recursos através de uso de simulação condicional é sugerido por uma série de autores, podendo-se citar Souza (2002), Dohm (2005) e Snowden (1996) e (Rossi & Camacho 2001). Ao incorporar a incerteza de teores, apresentam-se como métodos mais robustos quando comparados àqueles por variância de krigagem. Koppe (2009) aplica a simulação para melhoria na eficiência de locação e configuração amostral. Koppe et al. (2017) utilizam simulação para definição de malha a de sondagem para controle de lavra. Verly et al. (2014) não utiliza a simulação sequencial, mas define malha a de sondagem com base em suporte e precisão. A precisão, nesse caso, é definida a partir da variância de krigagem.

Silva & Boisvert (2014) realizaram uma compilação de métodos de classificação utilizados em relatórios técnicos NI43-101 entre os períodos de 2010-2014, ranqueando quais eram mais utilizados. Métodos geométricos foram citados como os mais utilizados, enquanto que métodos geoestatísticos como variância de krigagem também são usados, em menor proporção.

Deutsch et al. (2006) comentam que modelos de incerteza baseados em simulação condicional devem ser utilizados como um critério anterior a outros mais simples e transparentes. O principal deve-se ao fato de que intervalos de probabilidade são extremamente sensíveis a definição de alguns parâmetros usados, tornando o resultado menos transparente ao investidor. Os autores também citam que a reconciliação através dos dados de produção pode validar o modelo de incerteza tanto em termos teóricos como em termos práticos. Uma forma de se validar os intervalos de probabilidade é reconciliando o modelo de incerteza com os dados de produção de áreas já lavradas. Dessa maneira, a Classificação de Recursos através de modelos de incerteza seria uma boa ideia, pois garantiria: a. Malha de sondagem e magnitude dos dados, b. erro associado ao volume de produção, e c. a incerteza estaria fundamentada em aspectos práticos da operação da mina.

Idealmente, a malha de sondagem poderia ser definida a partir da melhor relação custo/benefício, como mostra um gráfico esquemático da Figura 6. Nesse gráfico, o custo de sondagem aumenta com o aumento de sondagem e maior amostragem de maneira linear. Já o custo derivado do erro de modelagem diminui com o aumento de informação. A malha de sondagem ideal seria aquela que minimiza o custo. No entanto, custo de erro de modelagem nem sempre é fácil de se obter (Wilde & Deutsch, 2010), por isso a linha tracejada. O custo derivado do erro de um modelo de longo prazo irá depender de uma série de elementos futuros (custo de retrabalho de sequenciamento, custo de operação de mina, custo de processamento, custo variável de geologia de curto prazo, dentre outros). Embora extremamente relevantes, estes parâmetros não são tema desta dissertação por fugir do tema principal.

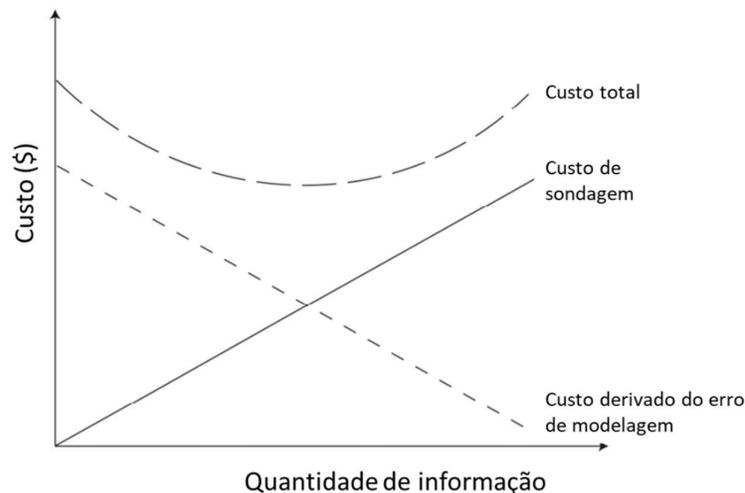


Figura 4 – Gráfico esquemático da relação custo/benefício para definição de malha de sondagem (modificado de Wilde & Deutsch 2010)

Assim, os autores citados acima propõem a definição de malha associada a incerteza, e não ao custo. Neste trabalho, optou-se por utilizar este método: a classificação será baseada por um método geométrico de malha regular, suportado pela incerteza de teor a partir da simulação condicional, conforme as melhores práticas da indústria (Deutsch et al., 2006).

2.5 Simulação Condicional

A aplicação da técnica de simulação em modelos geológicos tem por objetivo quantificar a incerteza de uma variável (por ex. teor, espessura, recuperação). Por quantificação de incerteza entende-se a determinação da probabilidade de um evento ocorrer, condicionado a algum fator. Passa a ser necessário, portanto, a criação da distribuição de probabilidade condicional daquela variável.

A simulação é uma técnica que cria uma distribuição de probabilidade por meio da geração de uma série de modelos. Tais resultados são informações ditas sintéticas, ou seja, não são modelos reais medidos em campo. São aproximações de um modelo real, a partir de conhecimentos prévios das variáveis em questão. Utiliza-se o termo **realização** para definir os resultados do processo de simulação. O processo de simulação irá produzir, portanto, uma série de realizações do fenômeno estudado.

A primeira técnica de simulação estocástica foi definida por Matheron (1973) e depois otimizada por Journel (1974), em que se chamou de Método por Bandas Rotativas. Outro método de simulação é a Simulação Sequencial Gaussiana (sGs) (Isaaks, 1990). Segue abaixo um breve resumo sobre a teoria da simulação condicional. Maiores detalhes podem ser encontrados em Deutsch & Journel (1998).

2.5.1 Simulação de variáveis independentes

A simulação de variáveis independentes, também chamada de "Simulação de Monte Carlo" é definida como um método estatístico de amostragens aleatórias para obtenção de resultados numéricos e, após a repetição sucessiva deste processo, cria-se uma distribuição, e utiliza-se para o cálculo de probabilidades. A amostragem aleatória é realizada através de algoritmos que geram números randômicos segundo uma distribuição uniforme. A distribuição uniforme é necessária para garantir o não enviesamento dos resultados.

Para o entendimento da simulação das variáveis independentes, imaginemos o jogo de dados, a incerteza de apenas um dado é tranquilo: de 6 faces, o resultado será apenas uma delas. Logo, a probabilidade é de $1/6$. Ao jogar 3 (três) dados simultâneos, a probabilidade é a multiplicação de todas as possibilidades: $6 \times 6 \times 6 =$

216. Todos os 216 resultados passam a ser os possíveis resultados dos eventos. Chama-se o resultado = n^e , onde n é a variável, e e é a quantidade de eventos.

Quando a quantidade de eventos aumenta, a dimensionalidade do problema aumenta, ficando impossível fazer uma conta sem o auxílio de um sistema computadorizado. Esta pode ser entendida como a base da Simulação de Monte Carlo. As amostragens são realizadas aleatoriamente em muitas locações simultâneas, a fim de se obter a probabilidade destes eventos ocorrerem.

Como E_1 e E_2 são eventos independentes, então o evento E_1 não fornece informação adicional para o evento E_2 e a equação é entendida como:

$$P(E_1|E_2) = P(E_1)$$

$$P(E_1 e E_2) = P(E_1) \cdot P(E_2)$$

2.5.2 Simulação de variáveis dependentes – Aplicação de lei de Bayes

Para o cálculo de um ponto, mas de vários pontos simultâneos, por exemplo uma região da mina, um *stope*, ou uma região que representa um determinado intervalo de produção, seja 10 nós ou 10^n , onde n pode ser um número bem grande, como milhões de nós simulados simultaneamente. A diferença entre a simulação de um ponto e de uma região é que, nesta última, os pontos não são independentes, mas carregam uma dependência de continuidade espacial, e por isso técnicas de simulação de variáveis independentes não podem ser utilizadas.

Para a simulação de variáveis dependentes, o processo não é tão simples assim. O fato de as variáveis serem dependentes umas das outras, não se pode multiplicar as probabilidades apenas multiplicando os eventos. A solução para a simulação de variáveis dependentes envolve que uma variável depende da outra, é condicionada ao valor da outra. O cálculo necessita usar uma distribuição condicional.

Segundo Rossi & Deutsch (2014), o cálculo de uma distribuição condicional é realizado pela aplicação da Lei de Bayes, uma das leis mais importantes da teoria da estatística. A Lei de Bayes é a teoria que descreve a probabilidade de um evento ocorrer dado que (ou condicional a) um evento diferente já ocorreu. A expressão matemática pode ser escrita como:

$$P(E_2|E_1) = \frac{P(E_1 \text{ e } E_2)}{P(E_1)}$$

onde E_1 e E_2 são os eventos, e P representa a probabilidade. A notação $E_2|E_1$ representa a distribuição condicional E_2 dado um valor de E_1 . No exemplo acima, pode-se descrever como: a probabilidade de E_2 dado que E_1 possui um determinado valor é igual a probabilidade de E_1 e E_2 dividido pela probabilidade de E_1 .

A aplicação da Lei de Bayes para a distribuição condicional pode ser expressa pela seguinte fórmula:

$$P(E_1, E_2) = P(E_2|E_1) \cdot P(E_1)$$

A distribuição de E_2 e E_1 é a distribuição de E_2 dado que E_1 possui um determinado valor multiplicado pela distribuição de E_1 .

Ou seja, a distribuição bivariada é decomposta em duas distribuições univariadas. A simulação de variáveis dependentes passa por duas etapas: i. Simular E_1 , e ii. Simular E_2 condicionada ao valor de E_1 .

Segundo esta ideia, é possível estender o conceito para simulação de n variáveis. Pode-se calcular:

- a distribuição de E_1 ;
- a distribuição de E_2 condicionada a E_1 ;
- a distribuição de E_3 condicionada a E_2 e E_1 ;

e assim por diante. É o que se chama de decomposição recursiva da distribuição multivariada. A decomposição de uma distribuição multivariada pode ser expressa como:

$$\begin{aligned} P(E_1, \dots, E_N) &= P(E_N|E_1, \dots, E_{N-1}) \cdot P(E_1, \dots, E_{N-1}) \\ &= P(E_N|E_1, \dots, E_{N-1}) \cdot P(E_{N-1}|E_1, \dots, E_{N-2}) \cdot P(E_1, \dots, E_{N-2}) \\ &= P(E_N|E_1, \dots, E_{N-1}) \cdot P(E_{N-1}|E_1, \dots, E_{N-2}) \cdots P(E_2|E_1) \cdot P(E_1) \end{aligned}$$

2.5.3 Transformação gaussiana

A transformação da distribuição dos dados originais em distribuição gaussiana normal é realizada a partir de funções bijetoras quantil a quantil (Isaaks & Srivastava 1989). A distribuição gaussiana, é uma distribuição paramétrica que, como o próprio nome diz, é formada a partir de dois parâmetros: média e variância:

$$f(y; \sigma, \mu) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

onde μ é a média e σ é o desvio padrão. Quando $\mu=0$ e $\sigma=1$ a distribuição é dita normal, ou gaussiana estandardizada, e é reduzida para

$$f(y; \sigma, \mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}}$$

Em uma distribuição multivariada, as variáveis univariadas passam a ser multivariadas, e podem ser expressas como vetores:

$$f(\vec{y}; \vec{\sigma}, \vec{\mu}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Onde:

$y^T = [y_1, y_2, \dots, y_N,]$ é um ponto arbitrário em um espaço N-Dimensional, e

$\mu^T = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N,]$ é o vetor da média.

$\vec{\sigma} = \begin{pmatrix} C_{ij} & \dots & C_{ij} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{ij} & \dots & C_{ij} \end{pmatrix}$, uma matriz de covariância NxN

A distribuição Gaussiana também pode ser expressa graficamente, e dessa forma entender suas características. Possui um formato de sino (*bell shape*), centrada na média μ , com uma variância σ^2 . A variância pode ter um valor mais elevado, deixando o formato de sino mais “aberto”, ou uma variância bem baixa, deixando um formato mais “fechado”. A transformação da distribuição original para uma Gaussiana normalizada é denominada *Normal Score Transformation*. O primeiro passo consiste em atribuir os quantis de cada valor, acumulando os dados a partir de uma função de distribuição cumulada. Como os quantis de $f(z)$ variam entre 0 e 1, e a distribuição

gaussiana normal $g(z)$ também varia entre 0 e 1, é possível fazer essa transformação (Figura 5).

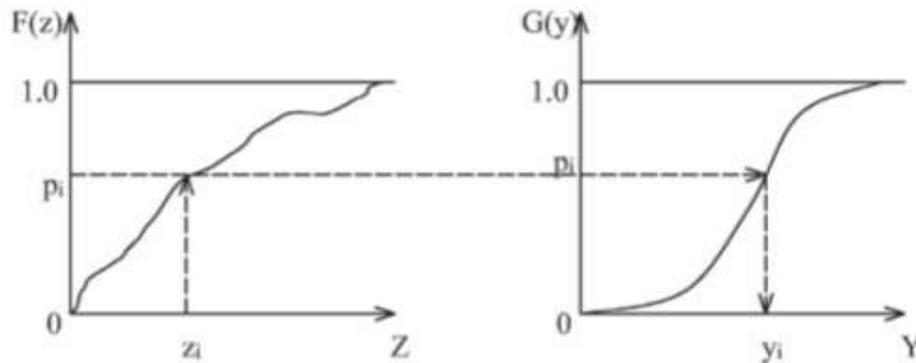


Figura 5 – Transformação por meio de funções lineares de quantis (Isaaks & Srivastava 1989).

2.5.4 Simulação Sequencial Gaussiana

Nos processos de simulação, é esperado que a simulação produza realizações que representem a variabilidade geológica. Caso contrário, a simulação não irá gerar resultados realísticos. Por isso, chamam-se de cenários equiprováveis aqueles que honrem o mesmo histograma e o mesmo fenômeno de continuidade espacial (variograma) das amostras originais. Tais cenários, ou realizações, são chamados de cenários numéricos de um depósito real (Journel & Huijbregts, 1978). Segundo os mesmos autores, a série de realizações fornece uma medida visual e quantitativa da incerteza espacial. Os requisitos típicos para aceitação de mapas simulados como representativos do depósito em estudo são:

- Valores amostrais devem ser honrados nas suas locações;
- Histograma dos valores simulados deve reproduzir aproximadamente o histograma amostral desagrupado.
- O modelo de variograma deve ser reproduzido.

Então, basta o cálculo de uma série de distribuições condicionais, que são calculadas a partir da krigagem simples. O método da Simulação Sequencial Gaussiana consiste na aplicação da equação em uma função aleatória estacionária com distribuição Gaussiana multivariada com os seguintes parâmetros: média e

variância de krigagem (Isaaks, 1990). Neste processo, a técnica de Simulação de Monte Carlo é utilizada para gerar um valor a partir da distribuição de probabilidade de cada nó. Um número randômico entre 0 e 1 é gerado, e o valor simulado é obtido lendo o quantil associado à da distribuição condicional, conforme Figura 6:

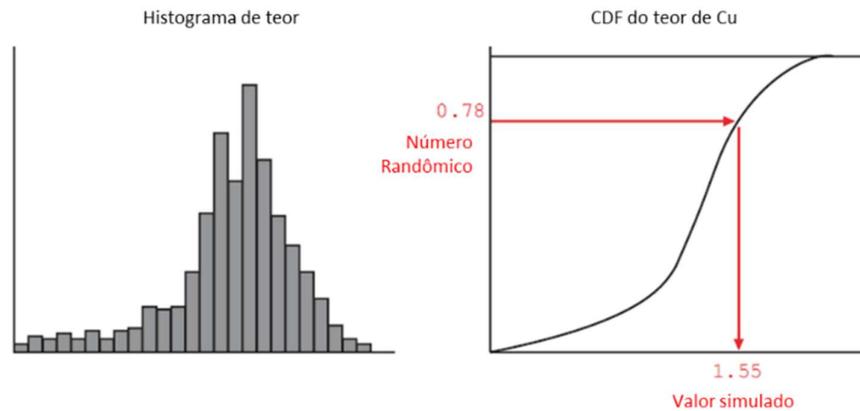


Figura 6 – Desenho esquemático da geração de número randômico para cada nó (Rossi & Deutsch, 2014).

Considerando uma distribuição bivariada de Z_1 e Z_2 , o valor de $Z(\mathbf{u})$ pode ser determinado a partir de uma distribuição condicional dado um valor de Z_2 , na mesma locação \mathbf{u} .

O princípio da simulação sequencial é uma generalização desta ideia: a distribuição condicional passa a abranger também todos os dados disponíveis dentro da vizinhança de \mathbf{u} , incluindo os dados originais e os dados previamente simulados.

Considere uma distribuição multivariada de N variáveis randômicas Z_i , com N extremamente grande. As N variáveis randômicas Z_i podem representar um mesmo atributo em N nós de um grid de um domínio A , ou podem também representar N diferentes atributos medidos em uma mesma locação. Também poderiam representar uma combinação de K atributos distintos definidos em N^t nós de um grid em que $N = K \cdot N^t$.

A seguir consideramos uma condição para estas N variáveis randômicas por um set de n dados simbolizados pela notação $I(n)$. A função de distribuição condicional cumulada é notada por:

$$F_{(N)}(z_1, \dots, z_N | (n)) = Prob\{Z_i \leq z_i, i = 1, \dots, N | (u)\}$$

2.5.5 Passo a passo prático para Simulação Sequencial Gaussiana

A Simulação Sequencial Gaussiana é realizada seguindo os seguintes passos modificado de Deutsch & Journel (1992):

- i. Geração de uma análise exploratória dos dados originais com definição de domínios e variografia.
- ii. Aplicar a transformação *Normal Score* aos dados originais para obter a distribuição gaussiana.
- iii. Gerar variogramas da variável transformada gaussiana.
- iv. Definir um caminho randômico para cada domínio a ser simulado. O caminho randômico é necessário para evitar artefatos nas realizações.
- v. Estimar por krigagem simples a distribuição condicional de cada nó a ser simulado no espaço gaussiano. O valor estimado da krigagem simples $Y^*(u)$ é a média da distribuição condicional, e sua variância é a variância da krigagem simples.
- vi. Obter randomicamente, para cada nó, o valor simulado a partir da distribuição condicional.
- vii. Incorporar o valor simulado como um dado condicional a ser utilizado para os próximos nós. Este item é necessário para garantir a reprodução do variograma.
- viii. Repetir e continuar o processo até que todos os 'nós' do domínio sejam simulados.
- ix. Retro transformar os valores gaussianos em valores originais.
- x. Validar do modelo simulado.

Segundo Deutsch & Journel (1998), a simulação condicional é muito sensível à premissa de domínio estacionário. A definição de domínio é a chave para obter modelos de simulação representativos.

2.6 Planejamento de lavra a céu aberto

Nesta seção serão descritos os métodos de otimização de cava a fim de se buscar o retorno financeiro do projeto.

Segundo Hustrulid & Kuchta (1995), o cálculo e a valoração de um depósito mineral dependem da otimização de uma cava, cuja dimensão e geometria são estabelecidas por fatores econômicos e geológicos. Com base em uma função benefício, é atribuído para cada bloco um valor monetário líquido (de ganho ou perda), considerando as receitas menos os custos. A otimização matemática da cava final é realizada utilizando o algoritmo de Lerchs & Grossmann (1965), reconhecidamente o algoritmo que fornece a solução ótima para a definição da cava final (Peroni, 2002). O método Lerchs-Grossmann busca a maximização do lucro, calculado com base no valor de cada bloco e nos critérios geométricos definidos para a cava.

A partir do método exposto, foi proposta a geração de uma série de cava aninhadas, em que se aplica um fator que varia de 0 a 1 sobre a receita da função benefício (Whittle, 2006). Na prática, estas cavas aninhadas, denominadas família de cavas, tem como característica que as primeiras possuem um preço de minério mais baixo, são menos profundas, e possuem uma baixa relação estéril/minério (REM). Cavas com preço de minério possuem dimensões maiores, serão mais profundas e possivelmente com maior REM. A cava ótima, ou cava matemática final, considera lucratividade máxima. No entanto, uma análise dos limites da cava é realizada durante essa fase: diversos parâmetros econômicos são sistematicamente modificados, resultando em diversas cavas finais, sendo que nem sempre a cava matemática é a escolhida (Hustrulid & Kuchta, 1995)

A partir da determinação da cava final, inicia-se a fase de sequenciamento de lavra. O objetivo é buscar uma sequência adequada de extração dos blocos no espaço e no tempo. Nessa fase, determina-se a vida útil da mina, bem como os avanços de lavra (*pushbacks*). As cavas aninhadas podem ser utilizadas como referência para a sequência de lavra ao longo do tempo (Kim & Zhao, 1994).

Segundo Journel (1988), um processo de mineração ou uma sequência de processos, como por exemplo definição de cava e sequenciamento de lavra (Rossi & Van Brunt, 1997), são conceituados como função de transferência. Em geral, o

processo de planejamento de lavra inicia com um modelo de blocos determinístico, que é processado por uma função de transferência a fim de se obter a cava ótima, ou a sequência de lavra. Outra abordagem é a utilização de um conjunto de modelos de blocos como parâmetro de entrada e, ao processá-los no modelo de transferência sucessivamente, obtém-se uma série de resultados distintos.

Esse conceito é aplicado com base em simulação condicional, gerando-se múltiplos modelos equiprováveis a fim de se realizar uma análise de sensibilidade do planejamento de lavra como Dimitrakopoulos et al. (2002), Peroni (2002), Peroni et al. (2014), Cherchenevski et al. (2019), Rosado et al. (2019) e Mello (2015). A Figura 7 mostra a relação entre o eixo Y com a valor presente líquido (VPL) e o eixo X com as cavas aninhadas, para um modelo determinístico e para uma série de realizações (Dimitrakopoulos et al, 2002). Ao comparar as realizações com o modelo determinístico estimado por krigagem ordinária, é possível realizar uma análise de sensibilidade.

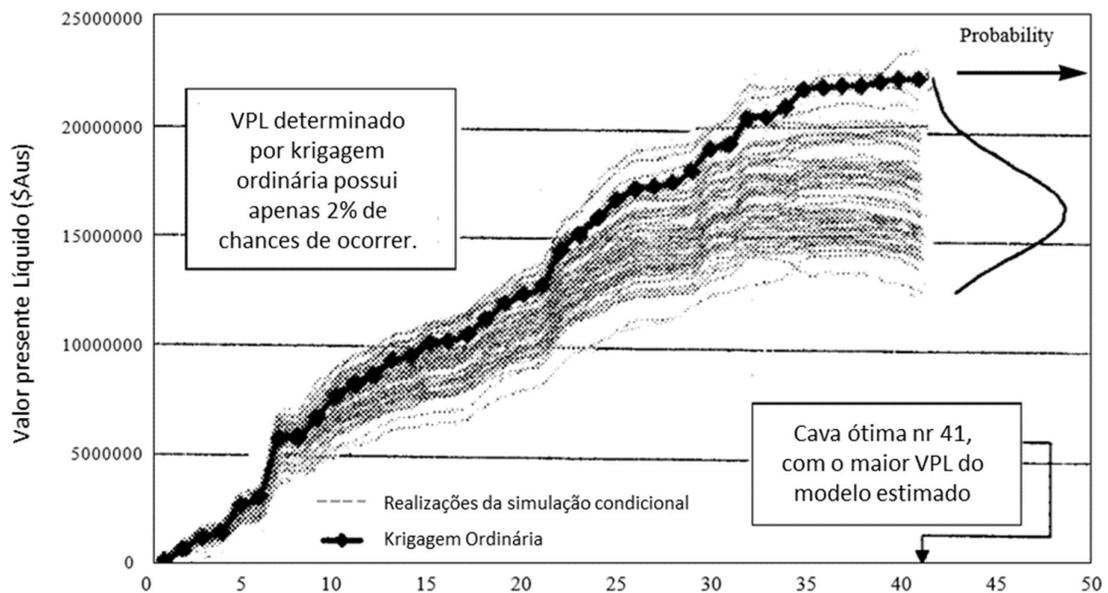


Figura 7 – Relação entre VPL e cavas aninhadas, para modelo determinístico por krigagem ordinária e para as realizações da simulação condicional (modificado por Dimitrakopoulos et al. 2002).

A figura mostra que, para a cava 41, denominada cava ótima matemática, a distribuição dos resultados de valor presente líquido das realizações, quando

comparadas com o valor presente líquido do modelo estimado, mostra uma probabilidade de apenas 2% de que o modelo determinístico ocorra.

No presente trabalho, a mesma técnica será adotada para a cava de recursos. Porém, o objetivo não será acessar a distribuição valor presente líquido, mas acessar a distribuição dos limites de cavas, para definir os limites máximos para sondagem de conversão de recursos.

2.7 Função benefício

A função benefício consiste em montar uma formulação matemática na qual os blocos são valorados economicamente (Rendu, 2008). Com base no teor de cada bloco, a função benefício será calcular as receitas que o bloco com determinado teor trará, subtraindo-se os custos de operação e de processo. A função benefício irá gerar blocos positivos e negativos. Os blocos negativos estarão abaixo do teor de corte, e os blocos positivos estarão acima. Os blocos que resultem em valor 0 (zero), possuem exatamente o teor do teor de corte.

Segundo Rendu (2008), a função benefício é expressa por:

$$\text{Função benefício} = t * y(s - r) - (m + c + a)$$

Onde:

t = Teor do Bloco (g/t)

m = Custo de Lavra (U\$/t)

c = Custo de processo (U\$/t)

a = Custo custos gerais e administrativos (G&A) (U\$/t)

y = recuperação do beneficiamento (%)

s = preço do metal (U\$)

r = custos de transporte, refino e *royalties* (U\$/t)

3. METODOLOGIA

Este estudo pode ser separado em três partes: na primeira etapa foi realizada a análise exploratória dos dados seguido pela construção de um modelo probabilístico contendo múltiplas realizações geradas por simulação condicional. Na segunda parte, utiliza-se o modelo simulado para estudo de malha de sondagem. Na terceira parte é realizada a otimização de cava matemática para o modelo estimado e para os modelos simulados e análise de *pushbacks*. O fluxograma geral do trabalho está apresentado na Figura 8:

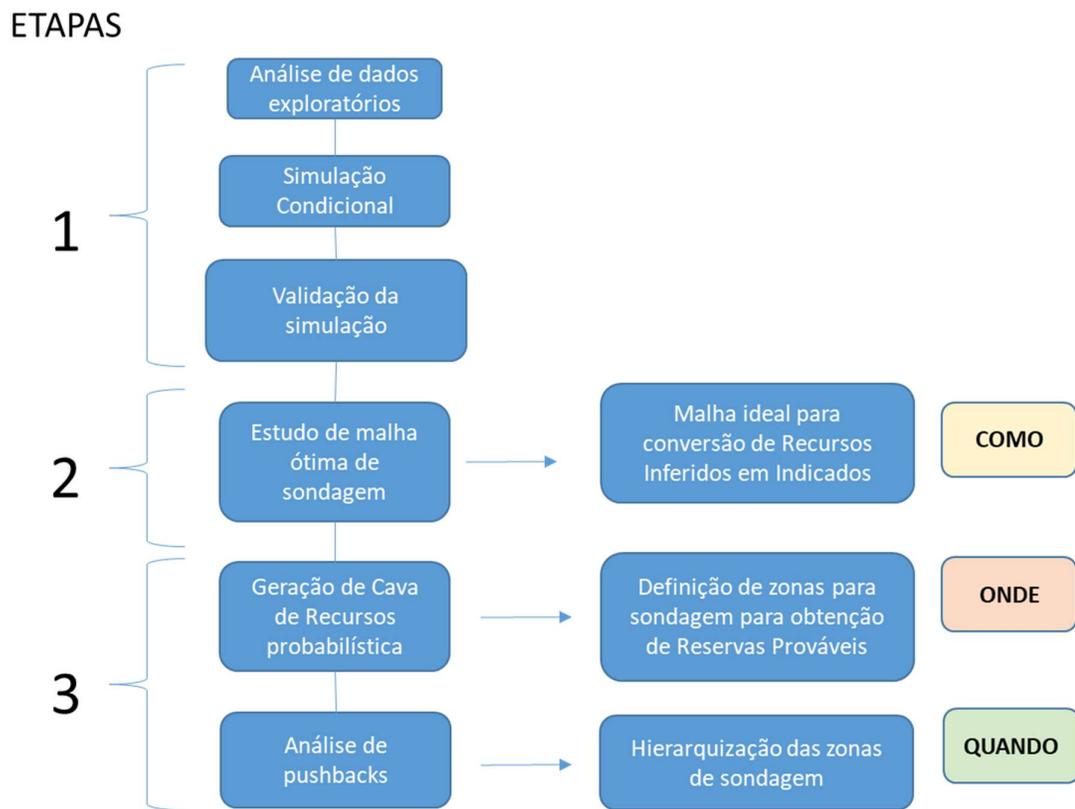


Figura 8 – Fluxograma da estratégia de sondagem.

3.1 Definição de malha de sondagem

- A metodologia é largamente utilizada na indústria, e pode ser encontrada em vários trabalhos, como Pilger (2000), Wilde & Deutsch (2010), Koppe (2009), Boucher et al. (2005). A definição de uma malha de sondagem consiste em se “testar” diversos espaçamentos de amostragem em um dado depósito e

correlacionar cada espaçamento a uma determinada incerteza. Um fluxograma do processo pode ser visto na Figura 9:

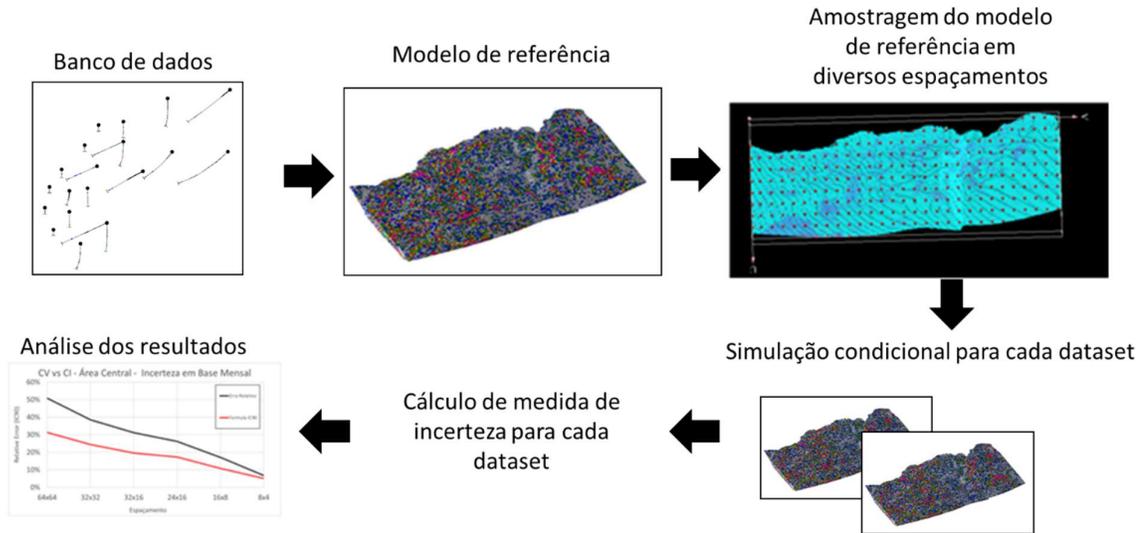


Figura 9 – Fluxograma do método de definição de malha versus incerteza.

O processo consiste em seis etapas:

Etapa 1: Geração cenários equiprováveis através da Simulação sequencial gaussiana.

Etapa 2: Dentre as 100 realizações, escolher uma realização aleatória para ser o modelo de referência. Esta realização não pretende ser aquela mais próxima do valor verdadeiro, nem servir de base para comparativos com o modelo estimado. Espera-se somente que esta realização seja representativa do depósito, que possua as mesmas características estatísticas e de continuidade espacial, e será utilizada como referência para se obter as malhas de sondagem virtuais.

Etapa 3: Amostrar o modelo de referência em diversos espaçamentos. Um exemplo pode ser visto na Figura 10, no qual foram extraídas informações em uma malha regular de 60 x 60 m e na Figura 11 apresenta um adensamento amostral em uma malha regular de 30 x 30 m.

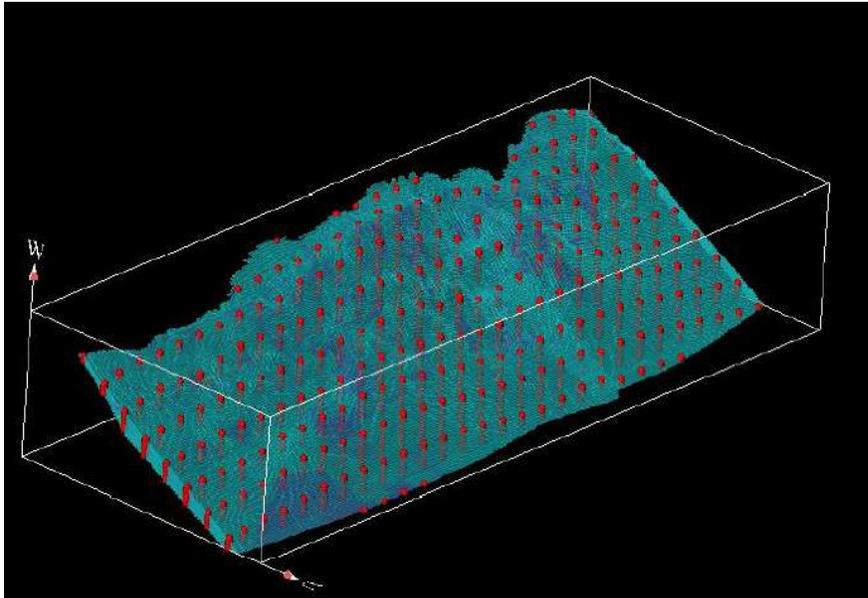


Figura 10 – Malha de sondagem virtual em perspectiva, 60 x 60 m sobre o modelo de referência. Pontos vermelhos representam furos de sondagem a serem criados.

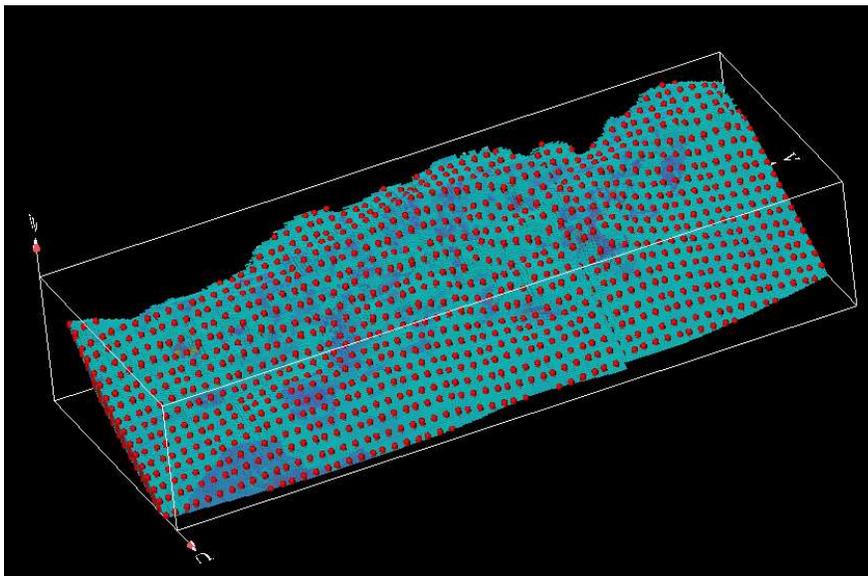


Figura 11 – Malha de sondagem virtual em perspectiva, 30 x 30 m sobre o modelo de referência. Pontos vermelhos representam furos de sondagem a serem criados.

A Figura 12 apresenta as quatro configurações amostrais que foram testadas no estudo para análise de incerteza:

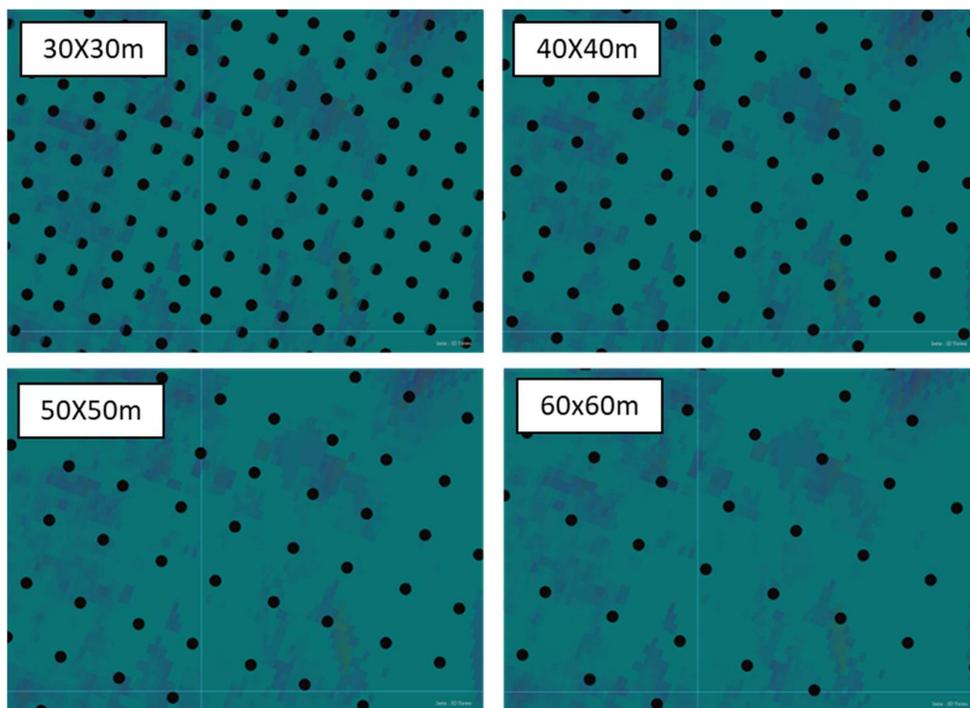


Figura 12 – Malhas virtuais em diferentes densidades amostrais.

Etapa 4 – Para cada banco de dados virtual, executar uma simulação, com os mesmos modelos de variograma do banco de dados original.

Etapa 5 – Calcular a medida de incerteza para cada malha. A medida de incerteza pode ser estabelecida de diversas formas. Existe uma convenção adotada na indústria mineral utilizada para Classificação de Recursos, no qual considera-se dois parâmetros: suporte e precisão, como ilustrado na Figura 13. O Recurso Indicado pode ser definido como “+- 15% de erro com 90% de confiança para um período de produção anual (Verly et al. 2014). A chamada “regra dos 15%”, ou regra do “Harry Parker” é validada com base na experiência dos autores (Harry Parker e Georges Verly) em depósitos de metal-base, no qual consideram que uma projeção de fluxo de caixa de um projeto de mineração acomoda uma queda de até 15% na tonelagem, teor ou metal, sem comprometer a economicidade de um projeto, sendo possível refazer o sequenciamento de lavra frente a um novo cenário um pouco mais pessimista. Erros de fluxo de caixa superiores a 15% podem ser fatais para um projeto.

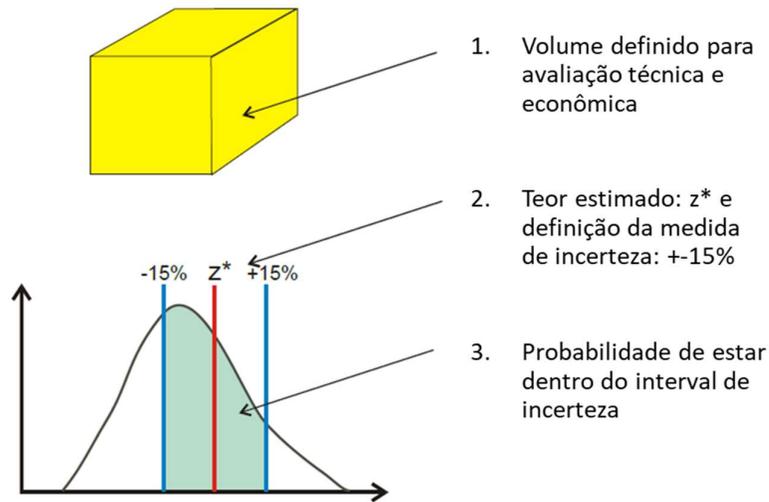


Figura 13 – Medida de incerteza com base no erro relativo. Modificado de Rossi & Deutsch (2014).

O intervalo de confiança de 90% é delimitado a partir das bandas de percentis, conforme fórmula abaixo: superior P_{95} e banda inferior P_5 . Tendo os valores da média, de P_{95} e do P_5 , é aplicada a fórmula do Erro Relativo (Koppe et al. 2017). O erro relativo é definido por:

$$\text{Erro relativo} = \frac{P_{95} - P_5}{2 * m}$$

onde P_{95} corresponde ao percentil 95, P_5 ao percentil 5, e m é a média das realizações. Alguns autores (Murphy et al. 2004) utilizam os percentis teóricos de uma distribuição normal (média+desvio padrão*1.645). Caso a distribuição de erros seja normal, os resultados deverão ser os mesmos.

Etapa 6 – Selecionar a malha mais aberta que possua um erro médio inferior a $\pm 15\%$. O erro médio é obtido na etapa anterior, que corresponde à média de cada volume de produção.

3.2 Definição de zonas de sondagem e priorização de áreas

Após a definição da malha de sondagem para conversão de Recursos Inferidos para Recursos Indicados, busca-se definir a zona em que a malha deve ser executada.

Esta zona é definida por critérios econômicos, a partir de uma otimização de cava. A otimização de cava é realizada para cada realização. A fim de facilitar (reduzir) o trabalho, foram escolhidas 20 realizações para geração de cava.

A geração de cava para cada realização irá gerar uma distribuição de valores categóricos para cada bloco, informando se o bloco é econômico ou não econômico. Para cada realização, os blocos receberão um valor 0 (não econômico) ou 1 (econômico). O contorno dos limites finais de sondagem deve considerar sempre o cenário mais otimista: se ao menos um bloco é econômico, este bloco estará dentro dos limites de sondagem. Dessa maneira, o alvo de sondagem irá ser definido como todas as possíveis áreas econômicas, não importando se de alta ou baixa probabilidade.

Já para a priorização das áreas de sondagem, será considerada a segunda fase de *pushback* como referência: se o bloco pertence a primeira ou segunda fase de *pushback*, então o bloco é prioritário e recebe valor 1, caso contrário, recebe valor 2. Assim, novamente haverá uma série de distribuição categórica para cada bloco. Os limites da zona de sondagem prioritária consideram a seguinte regra: se ao menos um bloco, de vinte, tiver sido classificado com prioridade 1, então o bloco faz parte da zona prioritária.

4. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso desta dissertação foi realizado com os dados de um depósito de ouro localizado no Norte de Minas Gerais. O domínio mineralizado é definido pela textura de cisalhamento e associação mineral de alteração hidrotermal a partir da descrição geológica dos testemunhos. Foram realizadas modificações de localização, amostragem e teor das amostras. Assim, o banco de dados pode ser chamado de sintético, derivado de um depósito real.

4.1 Banco de dados

O banco de dados consiste em um conjunto de 139 furos de sondagem que possuem entre 30 a 400m de profundidade, com um total de 1308 amostras. A mineralização possui dimensões de 2km de comprimento por 600m de profundidade, variando de 20m a 100m de espessura. A Figura 14 mostra uma vista em planta da boca dos furos, indicando uma orientação Norte-Sul do depósito.

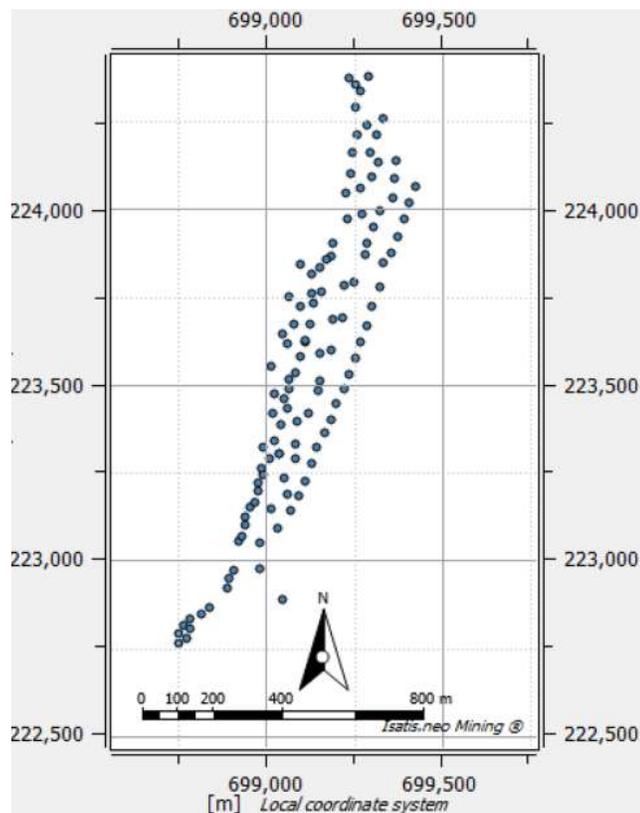


Figura 14 – Mapa em planta da boca dos furos.

A malha de sondagem atual é relativamente regular formando três linhas de sondagem longitudinais, espaçadas 50m entre cada furo. Já na superfície e zonas rasas, a sondagem é irregular, mantendo uma média não superior a 50m aproximadamente entre os furos. A Figura 15 mostra uma seção em perspectiva dos furos de sondagem e da envoltória do corpo de minério, definido por um *grade shell* de 0.1g/t Au.

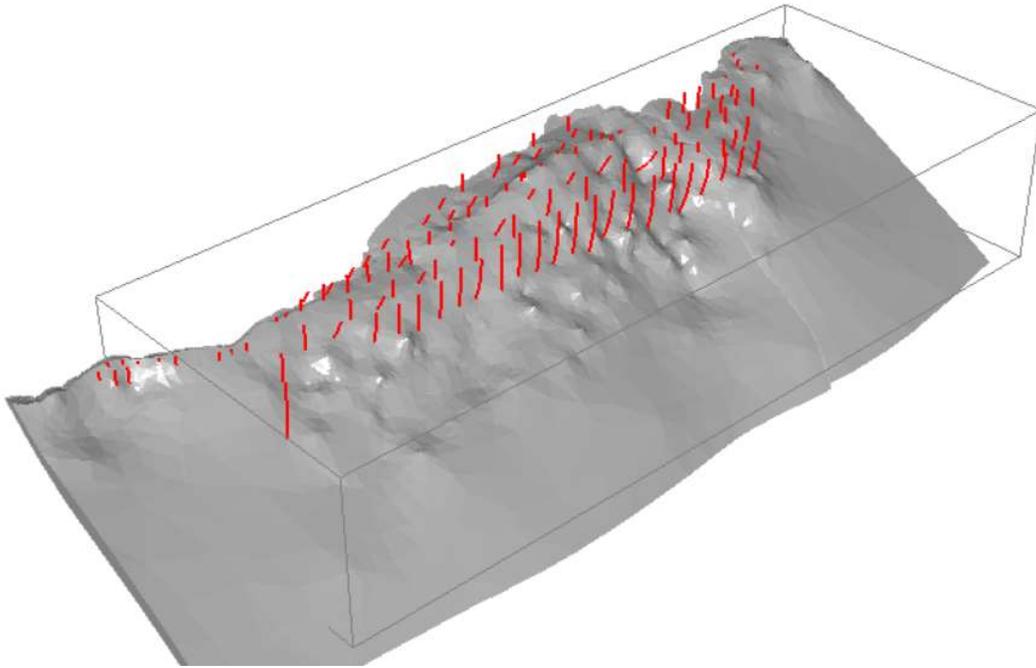


Figura 15 – Mapa em perspectiva 3-D dos furos de sondagem.

O domínio está subdividido em três zonas conforme apresentado na Figura 16: Zona Sul (azul), Central (verde) e Norte (vermelho). As zonas são segmentadas por falhas transversais ao corpo mineralizado, e cada zona possui características próprias de geometria, azimute e mergulho, bem como de continuidade geológica e de teores.

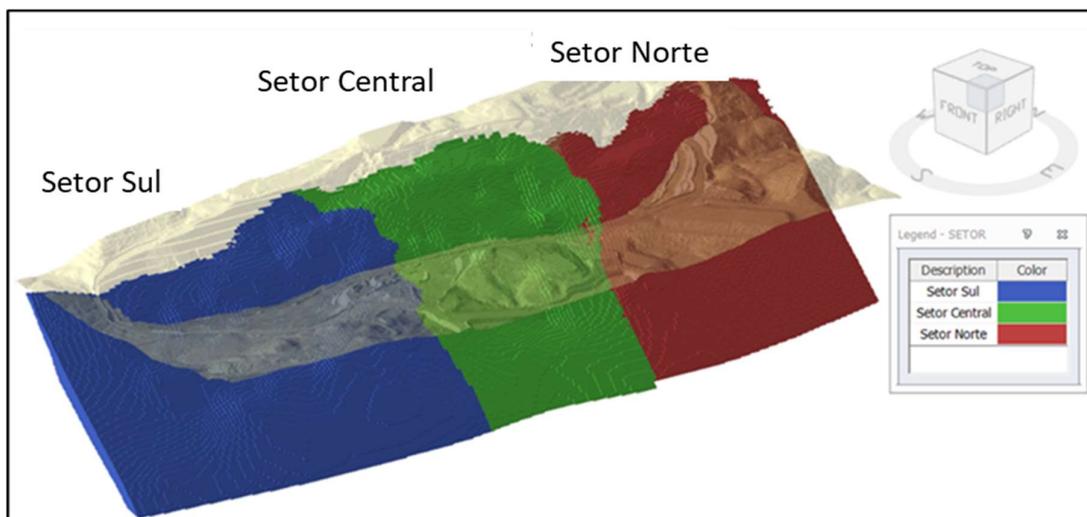


Figura 16 – Vista em perspectiva dos setores do depósito.

A Figura 17 mostra uma seção vertical do Setor Norte. Na seção, é possível verificar três furos de sondagem, interceptando o corpo entre as cotas 850m e 750m. A espessura é variável, em geral mais estreita na superfície e mais espessa em profundidade.

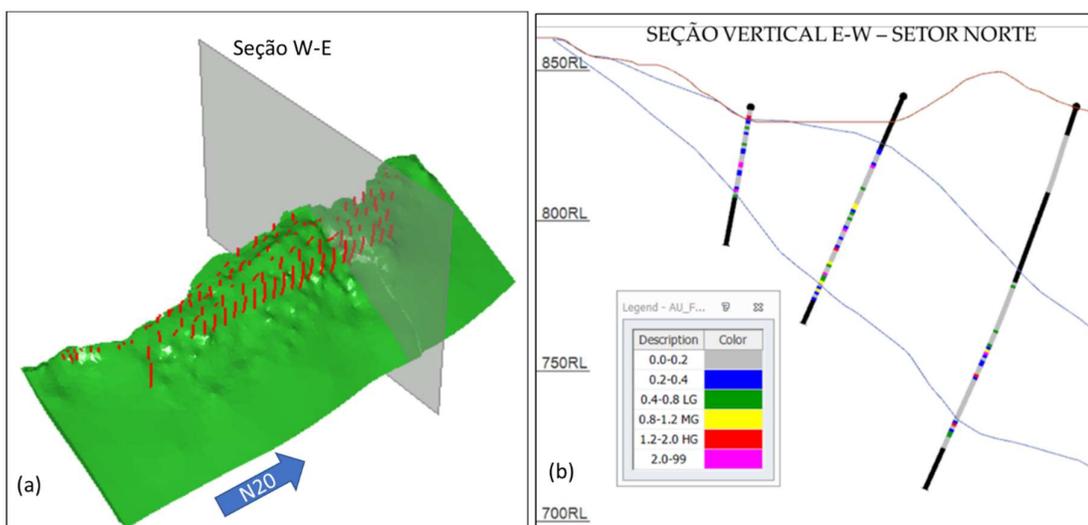


Figura 17 – Seção vertical do Setor Norte.

4.2 Sumário estatístico

A distribuição de teores nos três setores é assimétrica positiva, variando entre 0,01 a 13,60g/t Au, com média global de 0,6g/t. O CV (coeficiente de variação σ/m)

observado em cada setor possui valores elevados (acima de 1,5), mostrando alta variabilidade. Embora a malha seja pseudo-regular, algumas regiões foram privilegiadas. Por isso, também foram construídos histogramas de amostras desagrupadas. O procedimento de desagrupamento adotado foi o da média móvel (Isaaks & Srivastava, 1989), realizado através do software Isatis (Bleines et al 2012). No Setor Norte houve um maior agrupamento preferencial, sendo que a diferença entre os dados agrupados e desagrupados diminuiu de 0,87g/t para 0,80g/t Au. Nos outros dois setores, a diferença não foi relevante. Os histogramas agrupados e desagrupados estão representados nas Figura 18, Figura 19 e Figura 20.

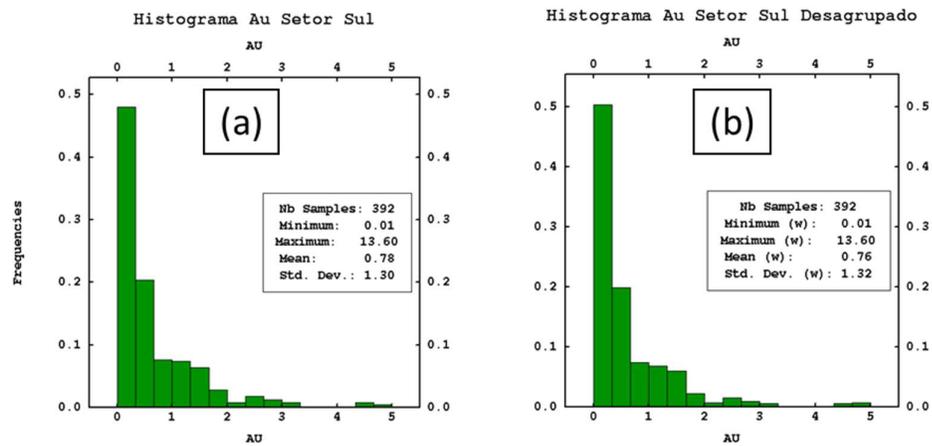


Figura 18 – Histogramas de Au normalizado do Setor Sul (a) agrupado e (b) desagrupado.

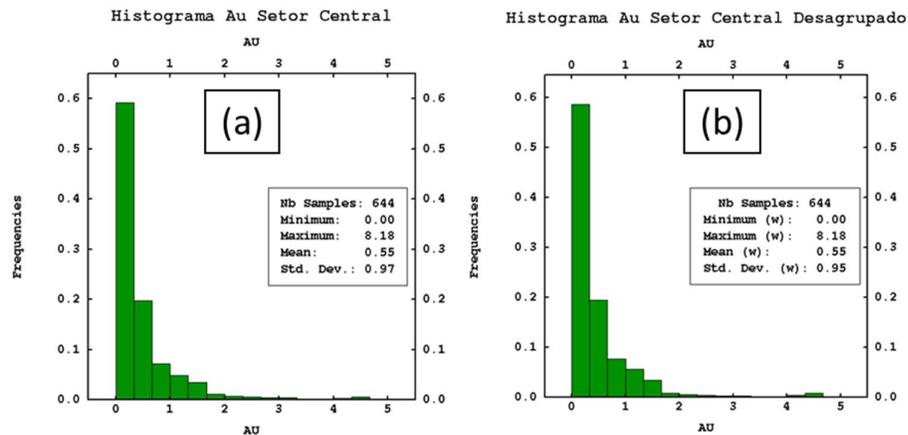


Figura 19 – Histogramas de Au normalizado do Setor Central (a) agrupado e (b) desagrupado.

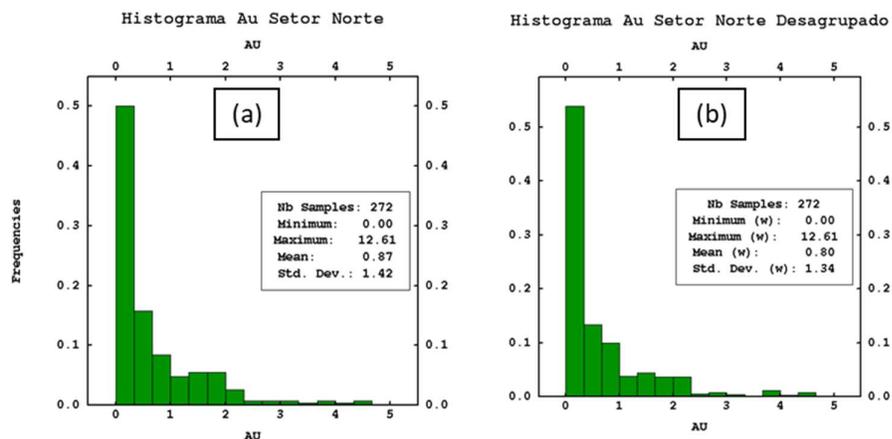


Figura 20 – Histogramas de Au normalizado do Setor Norte (a) agrupado e (b) desagrupado.

O sumário estatístico está resumido na Tabela 1, para as amostras agrupadas e desagrupadas:

Tabela 1 – Sumário estatístico.

Setor	Amostras agrupadas						Amostras desagrupadas		
	Amostras	Mín	Máx	Média	σ	CV	Média	σ	CV
Sul	392	0,01	13,60	0,78	1,30	1,67	0,76	1,32	1,74
Central	644	0,01	8,18	0,55	0,97	1,76	0,55	0,95	1,73
Norte	272	0,01	12,61	0,87	1,42	1,63	0,80	1,34	1,67

Neste trabalho, foi considerada uma densidade de rocha constante de 2,65 t/m³.

A Figura 21 mostra a distribuição no espaço Gaussiano para o Setor Sul.

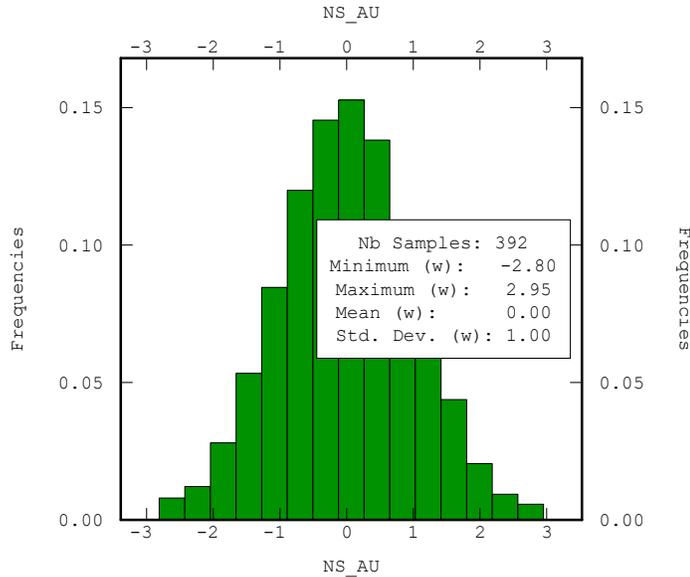


Figura 21 – Distribuição transformada no espaço Gaussiano do Setor Sul.

4.3 Variogramas

A continuidade espacial foi definida a partir de variogramas direcionais no espaço gaussiano. Para definição da variabilidade aleatória (efeito pepita) foram ajustados variogramas omnidirecionais com passo de 3m. O modelo de continuidade espacial para o Setor Sul é:

$$\gamma(h) = 0.3 + 0.3 \left(\frac{N20/0}{60}, \frac{N110/40}{70}, \frac{N110/-50}{5} \right) + 0.4 \left(\frac{N20/0}{70}, \frac{N110/40}{70}, \frac{N110/-50}{8} \right)$$

O modelo de continuidade espacial para o Setor Central é:

$$\gamma(h) = 0.3 + 0.3 \left(\frac{N20/0}{60}, \frac{N110/43}{70}, \frac{N110/-47}{15} \right) + 0.4 \left(\frac{N20/0}{100}, \frac{N110/43}{180}, \frac{N110/-47}{30} \right)$$

O modelo de continuidade espacial para o Setor Norte é:

$$\gamma(h) = 0.3 + 0.4 \left(\frac{N0/0}{30}, \frac{N90/35}{20}, \frac{N90/-55}{19} \right) + 0.3 \left(\frac{N0/0}{150}, \frac{N90/35}{100}, \frac{N90/-55}{20} \right)$$

Quando comparamos a continuidade de cada setor para a primeira estrutura do variograma, é possível observar que o Setor Sul e o Central possuem continuidade similares nas direções de azimute e de mergulho, a 60% da variância máxima. Já o Setor Norte é o que apresenta as menores continuidades na primeira estrutura, que corresponde a 70% do variograma.

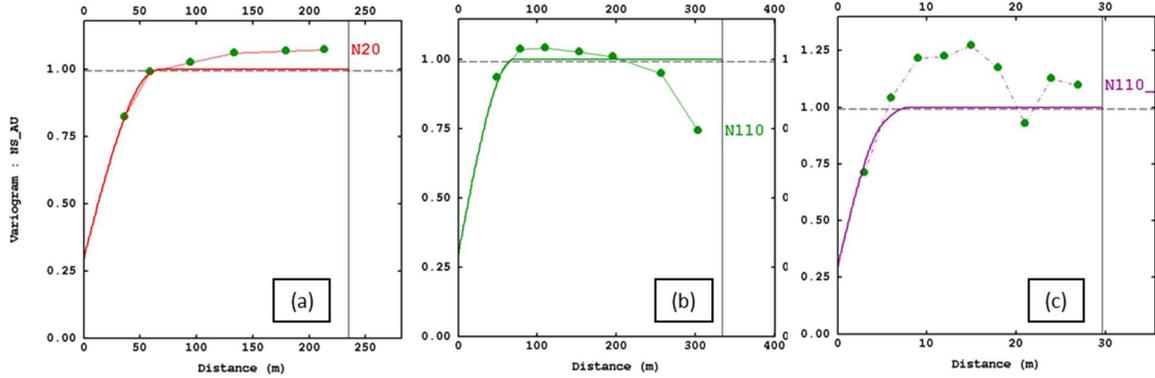


Figura 22 – Variogramas da variável normalizada do Setor Sul para as direções de (a) maior continuidade, (b) continuidade média e (c) menor continuidade

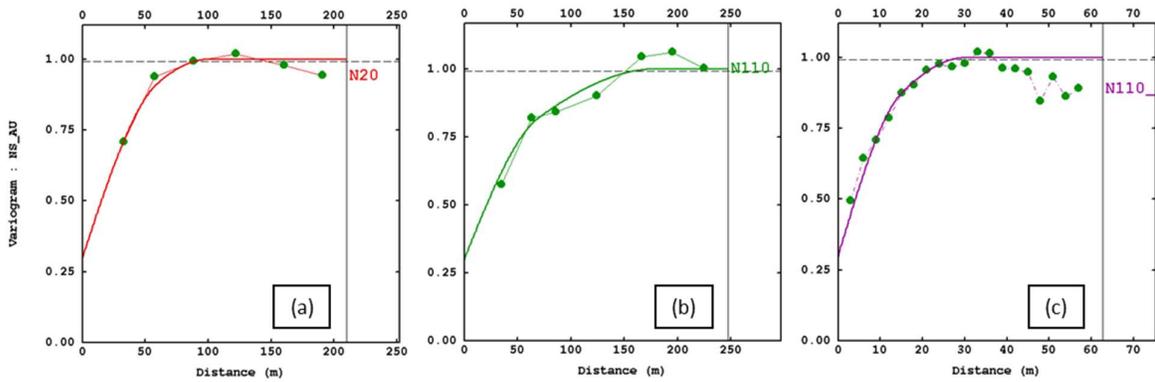


Figura 23 – Variogramas da variável normalizada do Setor Central para as direções de (a) maior continuidade, (b) continuidade média e (c) menor continuidade

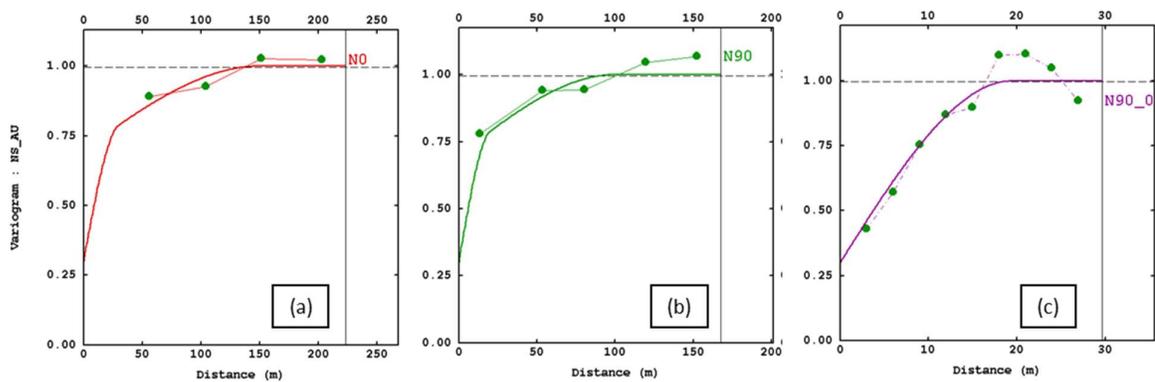


Figura 24 – Variogramas da variável normalizada do Setor Norte para as direções de (a) maior continuidade, (b) continuidade média e (c) menor continuidade

4.4 Simulação condicional

A simulação foi realizada no Software Isatis (Bleines et al. 2001) utilizando o método de Simulação Sequencial Gaussiana (Isaaks, 1989). A dimensão do modelo de blocos, bem como os parâmetros de simulação foram definidos em função de seu objetivo: servir como base para um planejamento de lavra e valoração de projeto em fase de viabilidade. O grid de simulação foi realizado sobre uma malha de 2m x 4m x 3m, para representar suportes pontuais. Após a simulação o modelo foi reblocado para 4m x 8m x 3m, que é o tamanho do bloco considerado durante a lavra. Os parâmetros gerais dos blocos são exibidos na Tabela 2. Foram utilizados 12 nós previamente simulados junto com os dados originais, e semente no valor de 418369.

Tabela 2 – Protótipo do modelo

XC	YC	ZC	NX	NY	NZ	XMORIG	YMORIG	ZMORIG
2	4	3	1400	3600	351	0	0	0

A Tabela 3 mostra a os parâmetros da simulação para cada domínio. A convenção de rotação utilizada no Isatis foi a “*Geologist Direction*”, onde *Az* e *dip* equivalem ao azimute e mergulho geológico, respectivamente. O vetor U equivale a direção de maior continuidade (azimute), e V equivale a direção de continuidade intermediária (mergulho). W equivale a direção ortogonal ao plano UV (espessura do corpo e menor continuidade).

Tabela 3 - Parâmetros de vizinhança

Parâmetros	Setores	Min Amostras	Max por setor	Az	Dip	U (m)	V (m)	W (m)
Setor Sul	4	4	6	25	40	150	180	10
Setor Central	4	4	6	20	43	95	80	20
Setor Norte	4	4	6	0	47	200	120	20

4.5 Validação da simulação

A validação dos modelos simulados foi realizada através da comparação da média global, a validação da distribuição dos histogramas e validação dos variogramas dos dados com os modelos, no suporte de pontos da simulação. A validação do variograma foi realizada sobre o espaço gaussiano, enquanto que as outras duas foram realizadas considerando os dados no espaço original não transformado.

4.5.1 Validação da média global

Foram produzidos gráficos comparativos entre os valores das médias das amostras globais, com e sem desagrupamento, e médias da simulação, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação das médias das realizações

Setor	Média amostras desagrupadas	Média das realizações
Sul	0,76	0,76
Central	0,55	0,55
Norte	0,80	0,81

Nas Figura 25 a Figura 27 os gráficos mostram a mesma comparação, porém avaliando a média global de cada realização. O setor Norte apresentou uma variação de 0,01 g/t acima da média desagrupada, representando um viés de 2%. Embora indesejável, o autor considera aceitável um viés de até 2%.

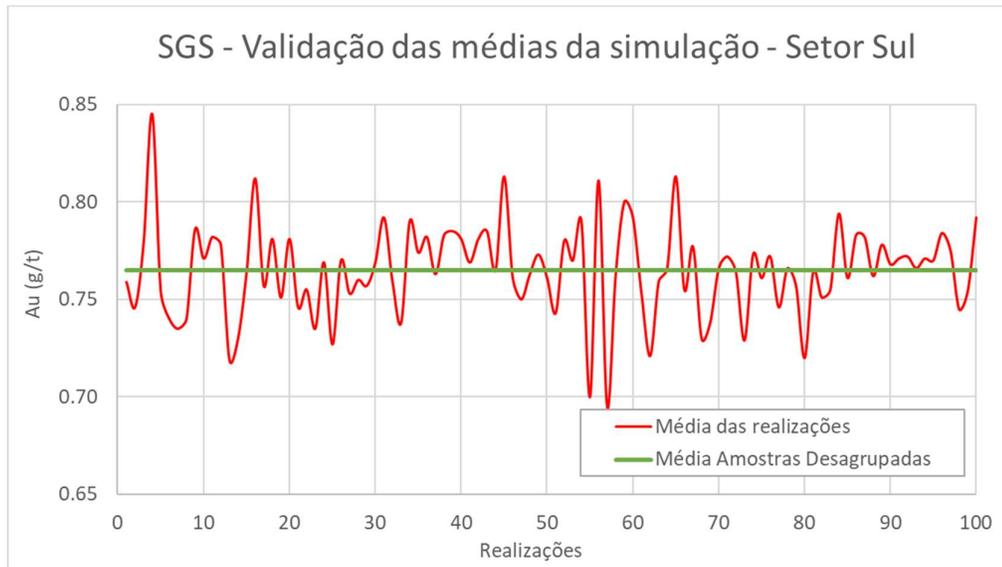


Figura 25 – Validação da média global - Setor Sul.

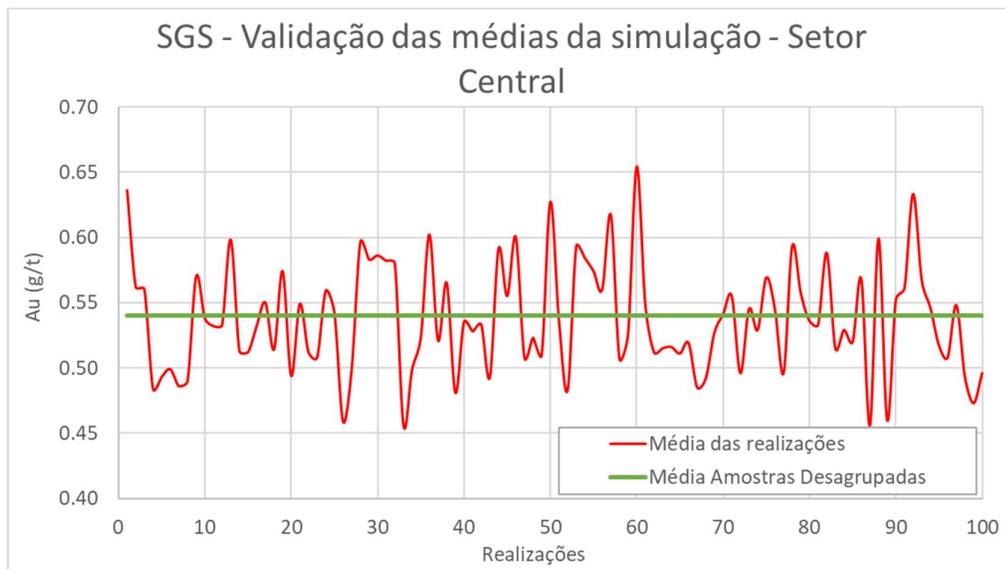


Figura 26 – Validação da média global - Setor Central.

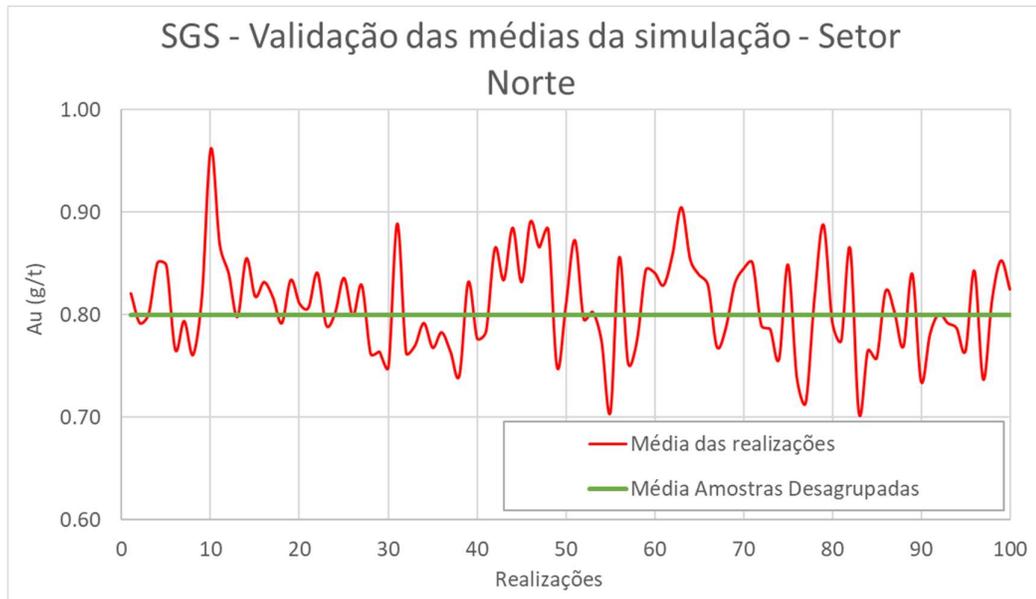


Figura 27 – Validação da média global - Setor Norte.

4.5.2 Validação dos histogramas

Outro tipo de validação das simulações é feito pelo histograma acumulado, onde se compara a distribuição das realizações com a distribuição das amostras desagrupadas. A Figura 28 mostra que a distribuição das amostras foi corretamente reproduzida para os três setores.

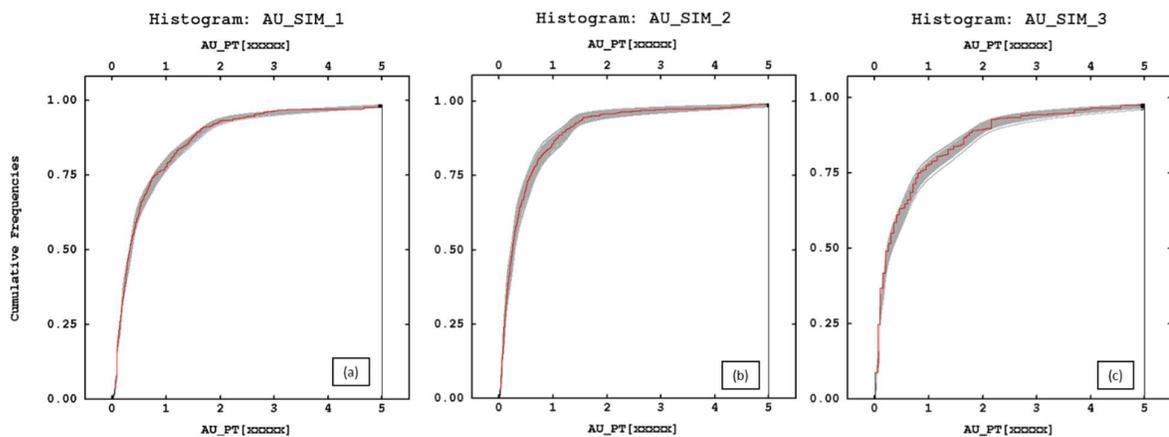


Figura 28 – Validação do histograma das realizações do (a) Setor Sul, (b) Setor Central e (c) Setor Norte.

4.5.3 Validação do variograma

A validação do variograma foi executada para as três direções dos três setores. As oscilações do variograma das diversas realizações em torno do modelo variográfico são chamadas de flutuações ergódicas, e pode-se verificar que as realizações honram continuidade e variância conforme o modelo variográfico das amostras normalizadas.

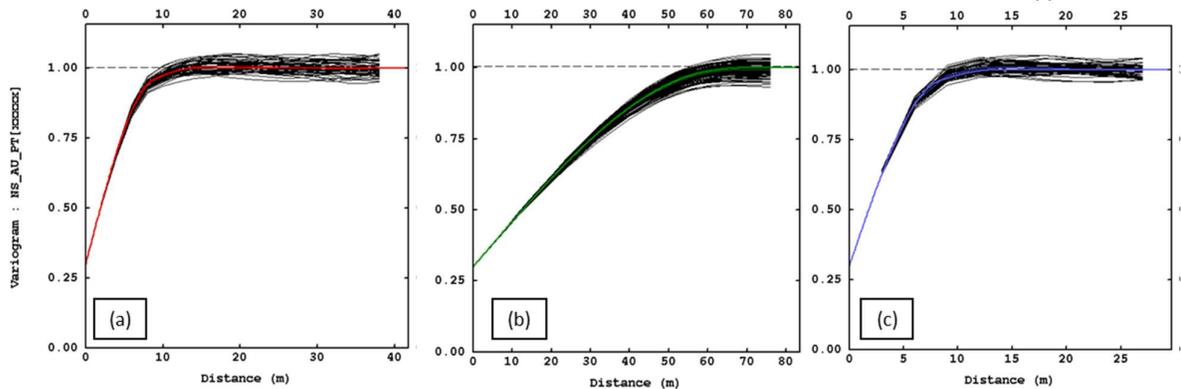


Figura 29 – Validação dos variogramas do Setor Sul para as direções de (a) maior, (b) média e (c) menor continuidade.

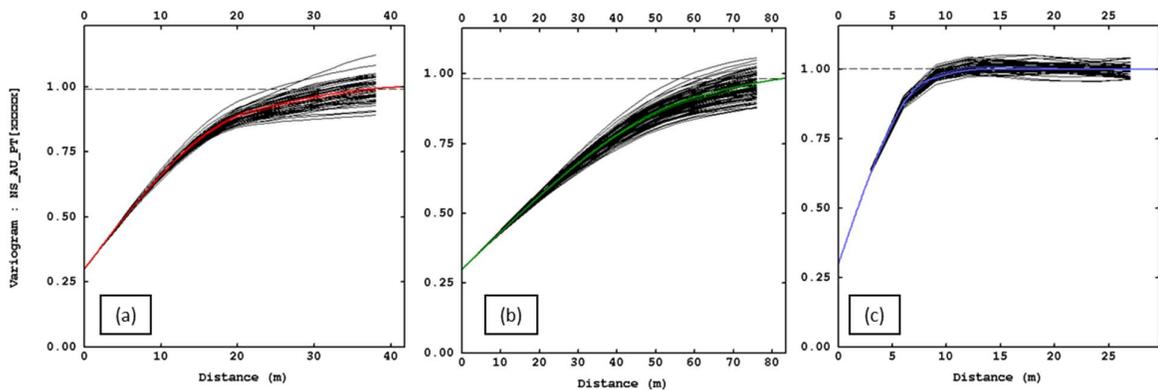


Figura 30 – Validação dos variogramas do Setor Central para as direções de (a) maior, (b) média e (c) menor continuidade.

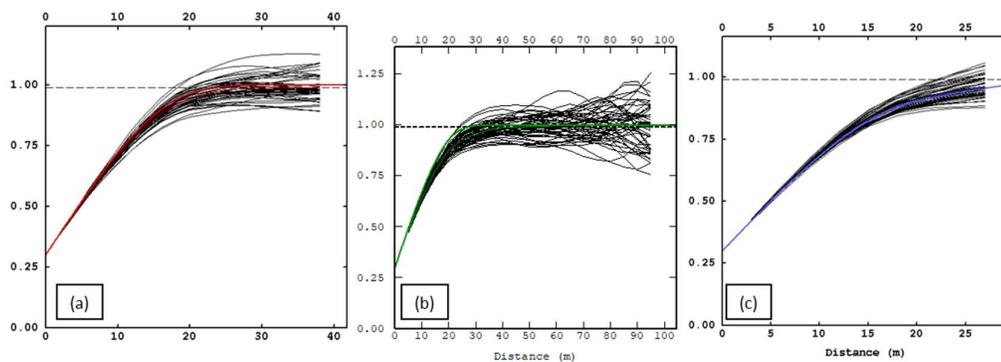


Figura 31 – Validação dos variogramas do Setor Norte para as direções de (a) maior, (b) média e (c) menor continuidade.

4.6 Resultados - malha de sondagem

O depósito foi dividido em grandes volumes de dimensões retangulares, e cada volume representa um período de produção de 1 ano (3,6 milhões de toneladas). Uma vez que a geometria dos volumes possa ser definida de diversas maneiras (retângulos relacionados as direções de continuidade do variograma, ou ainda buscando uma lavra sequencial por bancos), optou-se por gerar volumes de formas mais isotrópicas possíveis, acumulando a tonelagem ao longo das direções Z-Y-X, divididos por setor. Cada setor possui entre 10-13 volumes (Figura 32).

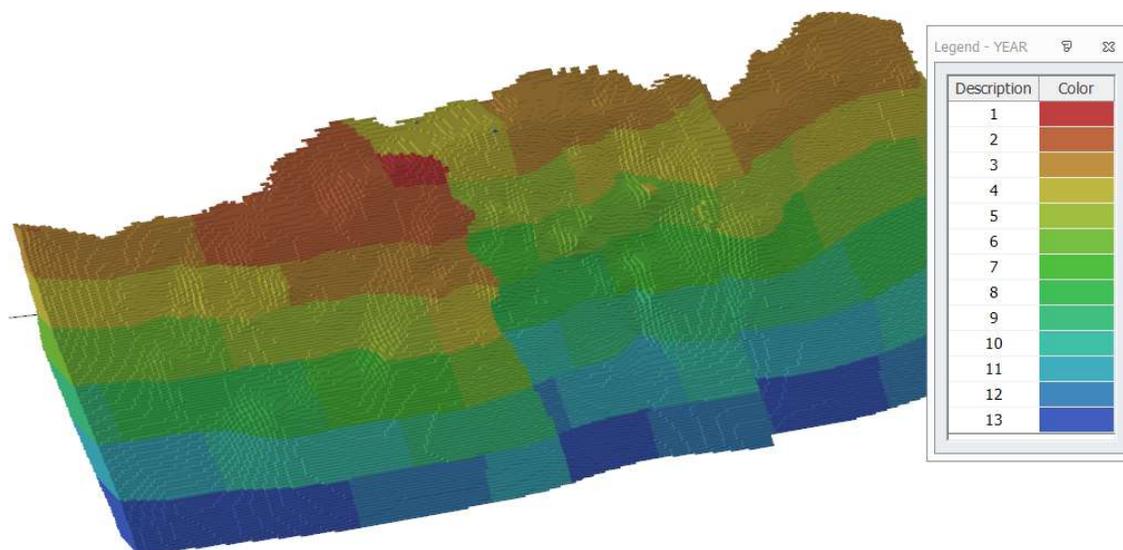


Figura 32 – Volumes representando períodos de produção em base anual.

O erro relativo foi sumarizado para cada setor e para cada malha para um período de produção anual. Para o Setor Central, por exemplo, o cálculo de erro relativo foi realizado para 11 períodos de 1 ano. A Tabela 5 mostra um exemplo da incerteza de cada “ano” (ou volume). Para a malha 50x50m, o erro médio foi de 14,6%, sendo que 5 volumes, de 11, possuem um erro inferior a 15%. Considerando a regra dos 15%, a malha é suficiente para ser classificada de Recurso Indicado.

Tabela 5 - Erro relativo médio de cada malha, para os períodos de produção.

Setor Central - Malha 60 x 60		
Ano	Erro	Categoria
1	16.3%	Inferido
2	14.5%	Indicado
3	13.6%	Indicado
4	15.1%	Inferido
5	13.5%	Indicado
6	14.5%	Indicado
7	13.9%	Indicado
8	15.6%	Inferido
9	12.3%	Indicado
10	15.4%	Inferido
11	15.7%	Inferido
Média	14.6%	Indicado

Os valores de erro relativo médio para cada malha e para cada setor estão resumidos na Figura 33. Assim, pode-se fazer a escolha da malha mais espaçada possível (menor investimento) que possua erro inferior a 15% (variabilidade aceitável). Para o Setor Sul a malha adequada é 60x60m. Já para o Setor Central, a malha recomendada é 50x50m. Por fim, o Setor Norte admite uma malha de 40x40m para garantir um erro inferior a 15% em um volume de produção anual.

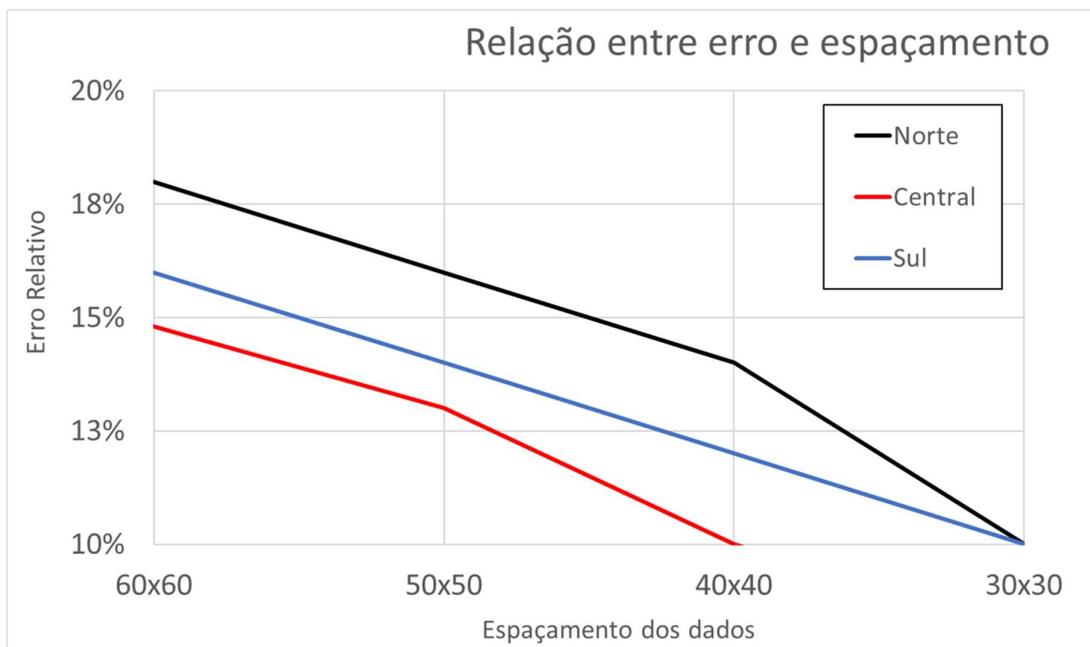


Figura 33 – Relação entre incerteza e espaçamento de dados.

A Tabela 6 resume as malhas sugeridas para Classificação de Recursos.

Tabela 6 - Classificação dos recursos minerais.

Setor	Critério Geométrico	Incerteza
Setor Sul	50 x 50m	Erro < 15% Ano
Setor Central	60 x 60m	Erro < 15% Ano
Setor Norte	40 x 40m	Erro < 15% Ano

Os resultados guardam coerência com os modelos de variograma normalizado: o setor Sul possui alcances muito similares ao do Setor Central na primeira estrutura, cujo alcance é de 60% da variância total. Já na segunda estrutura, o Setor Central mostra alcances muito mais longos. Por isso, é natural esperar que a malha de Indicado para o Setor Central seja superior ao Setor Sul. O setor Central admite uma malha de 60x60m, enquanto que o Sul admite 50x50m. Já o Setor Norte mostra alcances baixos na primeira estrutura do variograma (70% da variância total), da

ordem de 30m na direção de maior continuidade. Assim, o Setor Norte apresentou uma malha admitida máxima de 40x40m.

Este resultado é interessante porque demonstra que a leitura do alcance do variograma para definição de malha considerando a variância máxima pode levar a interpretações distintas. Caso se considerasse somente o alcance do variograma máximo para definir malha de classificação, o Setor Norte teria um espaçamento mais aberto que o Setor Sul. Por isso, quando a classificação de recursos é baseada no alcance do variograma, em geral utiliza-se critérios arbitrários como 70% da variância máxima. No entanto, a classificação pelo variograma foge ao tema desta dissertação por não levar em conta a variabilidade de teores, nem critérios de suporte e precisão.

4.7 Resultados – alvos e prioridade de sondagem

Após a definição da malha de sondagem para conversão de Recursos Inferidos para Recursos Indicados, busca-se definir a zona em que a malha deve ser executada. Esta zona é definida por critérios econômicos, a partir de uma otimização de cava.

Neste capítulo, foi executado uma geração de cava final utilizando o modelo E-type a partir do método de *Pseudoflow* (Muir 2007), que é um método similar ao Lerchs Grossmann, porém otimizado para executar o mesmo processo de forma mais rápida. Esta cava final será denominada de caso base para analisar os resultados quando comparados com cavas geradas pelos cenários simulados. Dado que praticamente todo o recurso mineral do depósito no estágio inicial de sondagem é constituído de Recursos Inferidos, é intuitivo que exista alta incerteza de teores. Por isso, o mesmo processo de otimização de cava foi repetido para as demais realizações da simulação, para que os limites de sondagem contemplassem não apenas um modelo determinístico, mas um conjunto de realizações de forma a mapear a incerteza dos limites da cava.

A otimização de cava não apresentou nenhuma restrição física para a sua geração. De acordo com as premissas geotécnicas foram adotados os ângulos de face dos taludes da cava de 65°, com ângulo final de talude de 55°. A Tabela 7 discrimina as premissas econômicas utilizadas na função benefício do projeto para valorização dos blocos, retirada a partir de valores médios de mercado. A função

benefício atribui um valor econômico calculado pela diferença entre a receita e o custo de toda a cadeia produtiva em cada bloco do modelo. O modelo foi reblocado para altura de banco de 12m.

Tabela 7 - Parâmetros Econômicos

Parâmetros	Unidade	Valor
Custo de lavra	US\$/t	3
Custo de processo	US\$/t	10
Custo G&A	US\$/t	1
Rec Beneficiamento	%	90
Preço do Metal	US\$/oz	1.800
WACC	%	10

A metodologia de valoração por NSR (*Net Smelter Return*) consiste no cálculo bloco a bloco levando em consideração o metal pago, recuperação do metal, dedução de custo de tratamento, custo de refino e transporte além dos royalties (caso existam). Os cálculos foram realizados no software Deswik®. Os tipos de materiais foram definidos em função da litologia: tipo 1 considerado minério e, tipo 2, estéril. O plano de produção foi desenvolvido baseado na taxa de alimentação anual na planta de ROM da ordem de 3,6 Mtpa, movimentação máxima de 10 Mtpa e vida útil de 22 anos. A Figura 34 mostra uma seção E-W do Setor Norte com a cava final do modelo de blocos E-type (em negrito), bem como a cava final de cada uma das *n* realizações em linhas cinzas mais finas. É possível observar que existe uma incerteza relacionada aos limites da cava final. Existem cenários cuja cava é um pouco menor, e alguns cenários no qual a cava é um pouco maior. A dispersão no nível de base varia entre 700 e 750m.

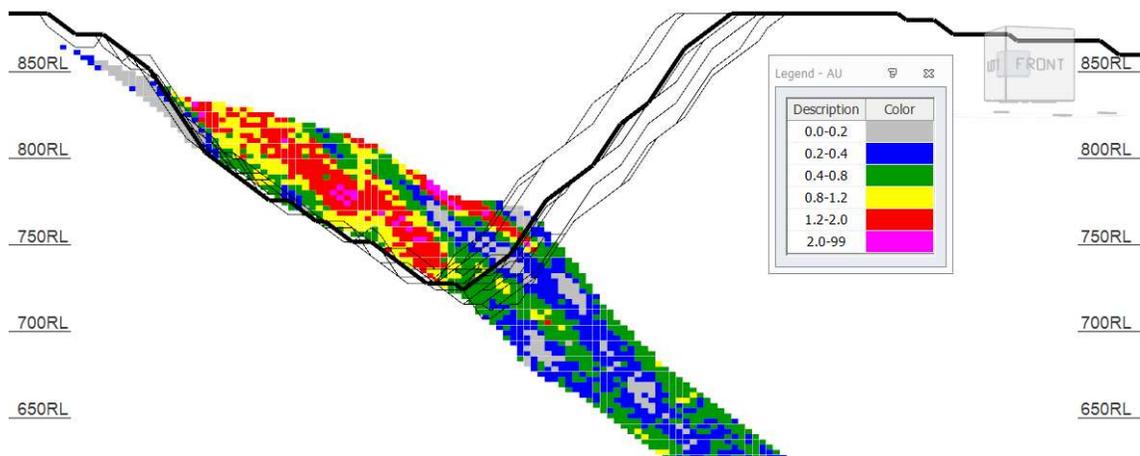


Figura 34 – Seção E-W do Setor Norte com o E-type e com as cavas das realizações.

Quando comparados ao setor Central (Figura 35), é possível verificar uma dispersão maior dos limites da cava, tanto em extensão lateral quanto em profundidade. Existe uma zona de alto teor abaixo da cota 700m que no caso base não é econômica, mas em algumas realizações, essa zona torna-se econômica. O limite de base oscila entre 750 e 650m, sendo que o E-type está em torno da elevação 700m.

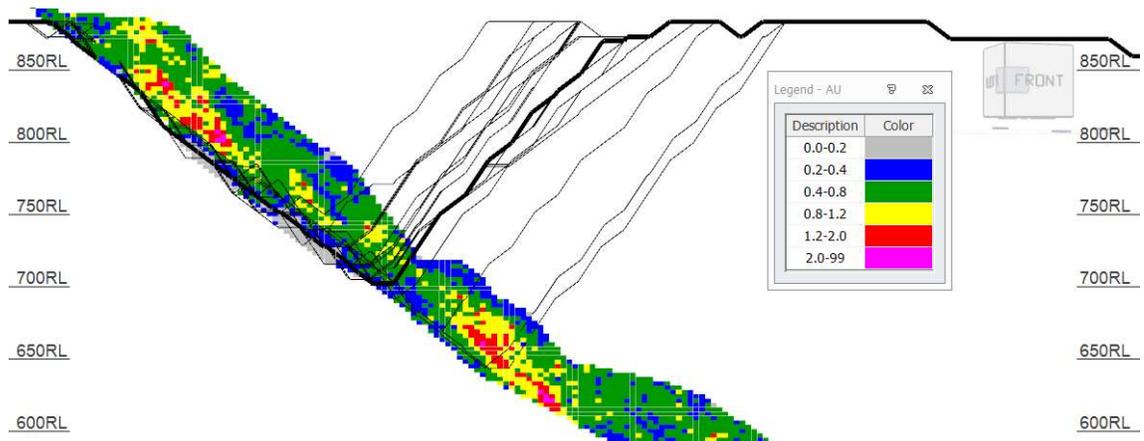


Figura 35 – Seção E-W do Setor Central com as cavas finais das realizações.

O quadro abaixo mostra uma seção E-W no Setor Sul, para análise em detalhe de como as realizações variam. As figuras mostram uma mesma seção, o que muda é a cava de cada realização. Na Figura 36 A, o pit chega ao nível 760m, enquanto que

na Figura 36 B, o pit chega à cota 750 m. Na Figura 36 C e D, também é possível ver variações de geometria da cava.

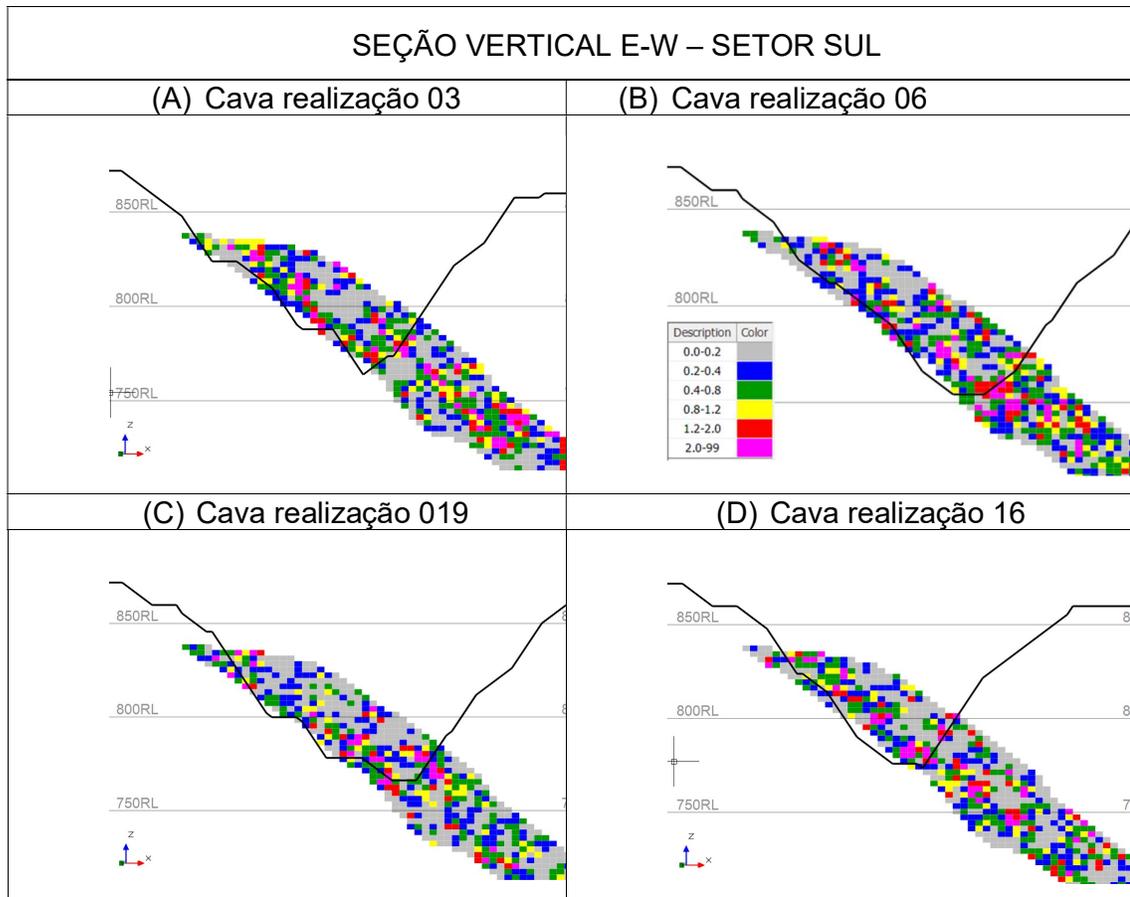


Figura 36 – Seção E-W mostrando a cava final para 4 realizações.

Verifica-se que as zonas de sondagem, quando definidas a partir de um critério de economicidade somado a um critério probabilístico, podem variar de acordo com a cava escolhida. Quando consideramos as realizações, é possível entender a zona de sondagem e com isso considerar uma região maior que aquela imaginada em um estudo somente com o caso base do modelo estimado.

A zona econômica foi definida a partir da seguinte condição: se o bloco está dentro de alguma das cavas das realizações geradas por simulação, o bloco recebe um *flag*. Assim, ao final do processo tem-se todos os possíveis blocos econômicos, dada a incerteza de teores. A Figura 37 mostra uma seção vertical com todos os

possíveis blocos econômicos, ou seja, toda a zona para sondagem marcados em vermelho. Os blocos em cinza são não econômicos.

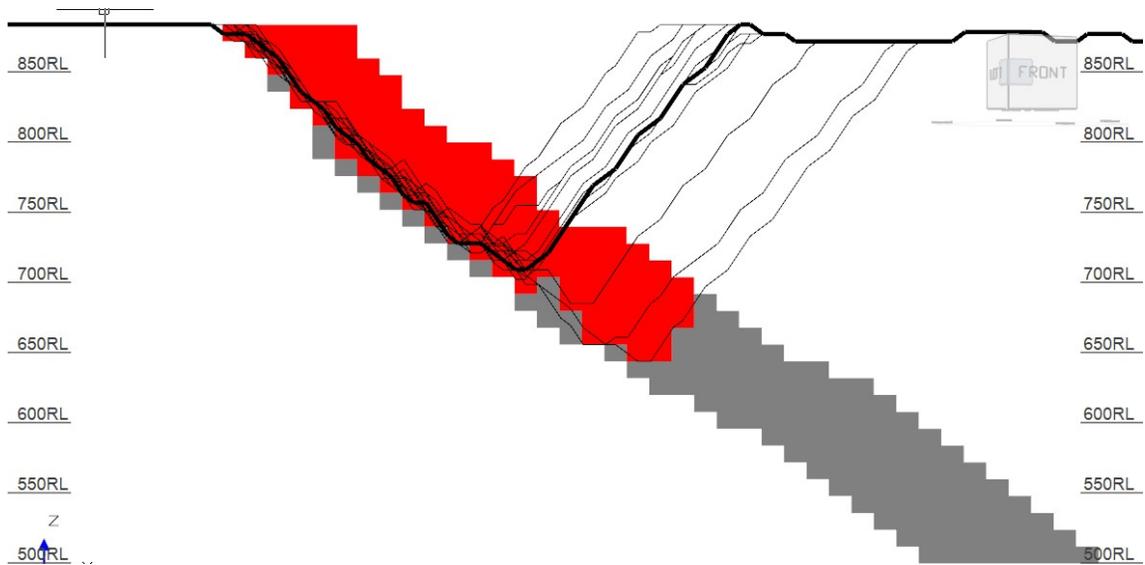


Figura 37 – Seção E-W mostrando a zona de sondagem.

A diferença entre a cava máxima do E-type e a cava máxima das realizações pode ser vista

Na Figura 38 é apresentada uma seção longitudinal N-S com dois limites de cava: A cava máxima a partir das realizações, e o E-type. A cava de recursos das realizações será utilizada para definição das zonas econômicas. Já a cava de recursos do E-type está exposta apenas como referência, mostrando que a interpretação de “limite econômico” pode variar em até quase 100m de profundidade.

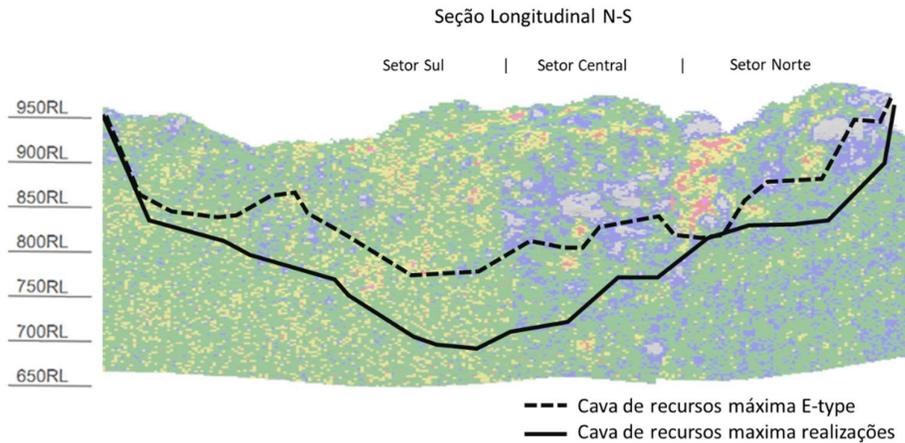


Figura 38 – Seção longitudinal com a cava de recursos máxima para o E-type e para as realizações.

A mesma abordagem probabilística foi utilizada para classificar zonas de prioridade de amostragem. Foram definidas quatro fases de avanços operacionais e analisadas frente a todos os 20 cenários simulados. A Figura 39 mostra um exemplo da realização 1 com as 4 fases de *pushback*.

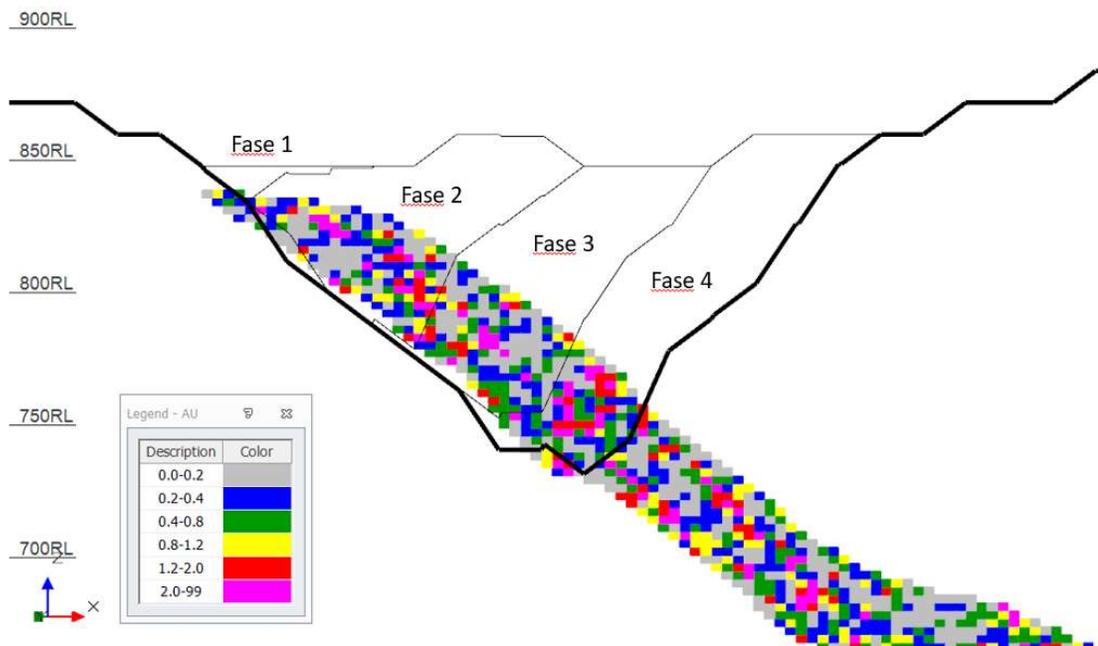


Figura 39 – Fases de pushback para a realização 1.

A abordagem probabilística foi definida da seguinte maneira: se o bloco pertence à segunda fase, então este bloco será classificado com prioridade alta de sondagem. Caso contrário, o bloco será classificado com prioridade baixa. Caso o bloco não pertença a nenhuma das fases, ou seja, está fora dos limites das cavas, então será classificado com prioridade baixíssima.

A Figura 40 mostra a 2ª fase de *pushback* para o E-type e para as realizações. A 2ª fase das realizações, que possui limites mais profundos, será utilizada como zona de alta prioridade. Já o E-type é mostrado apenas como referência para demonstrar que sondagens adicionais devem ser previstas ao se considerar os modelos simulados, pois existe uma diferença de até 50m de profundidade entre as linhas contínua (simulação) e pontilhada (E-type).

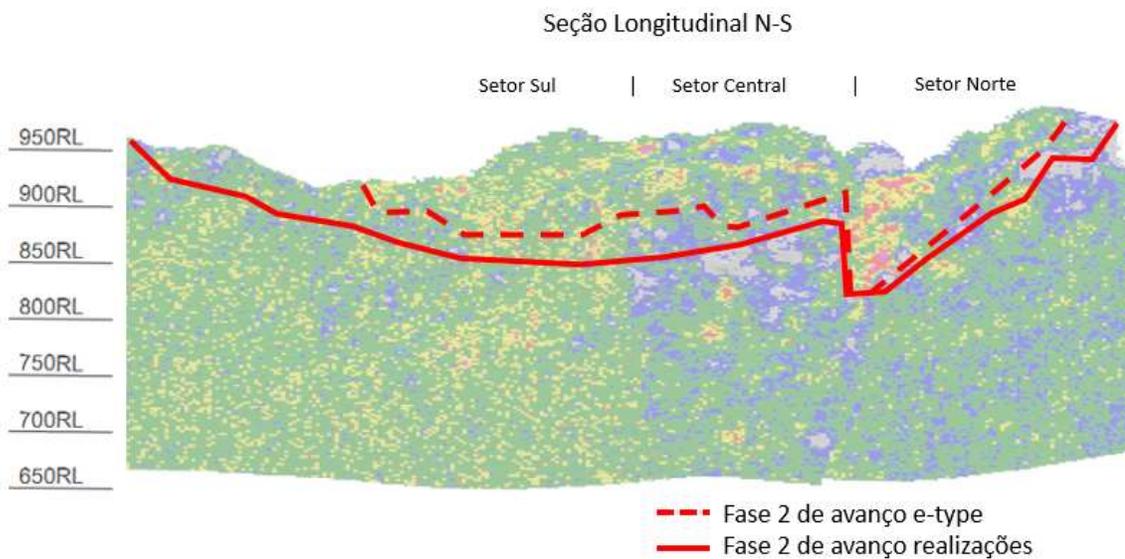


Figura 40 – Seção longitudinal com a 2ª fase de *pushback* para o E-type e para as realizações

A Figura 41 mostra uma seção vertical mostrando as duas informações juntas: a cava máxima (das realizações e do E-type), e a 2ª fase de *pushback* (das realizações e do E-type). As linhas verdes representam a 2ª fase de *pushback* das realizações, e as linhas pretas representam as cavas finais. As linhas em negrito mostram as cavas obtidas a partir do modelo E-type. Os blocos vermelhos definem o que seriam as

zonas de maior prioridade; os blocos em azul define áreas de menor prioridade e cinza fora de zona de prioridade.

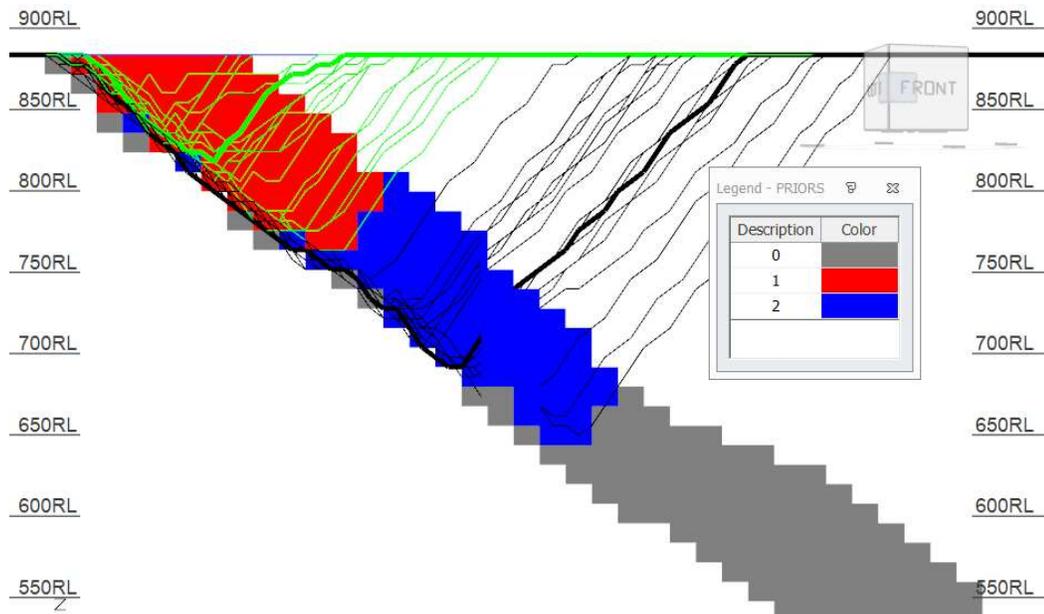


Figura 41 – Seção E-W mostrando as zonas de prioridade de amostragem.

A Figura 42 mostra as mesmas zonas, agora em seção longitudinal: zonas de alta prioridade representadas pela linha vermelha, e as zonas de baixa prioridade, representadas pela linha preta. A Figura 42 também mostra que existem bons resultados de estimativas de teores na zona Central do depósito, representados pelos blocos de alto teor em torno da cota 850 metros. Ainda assim, mesmo com boas perspectivas de mineralização rica, é improvável que esta zona seja lavrada nos primeiros cinco anos de produção.

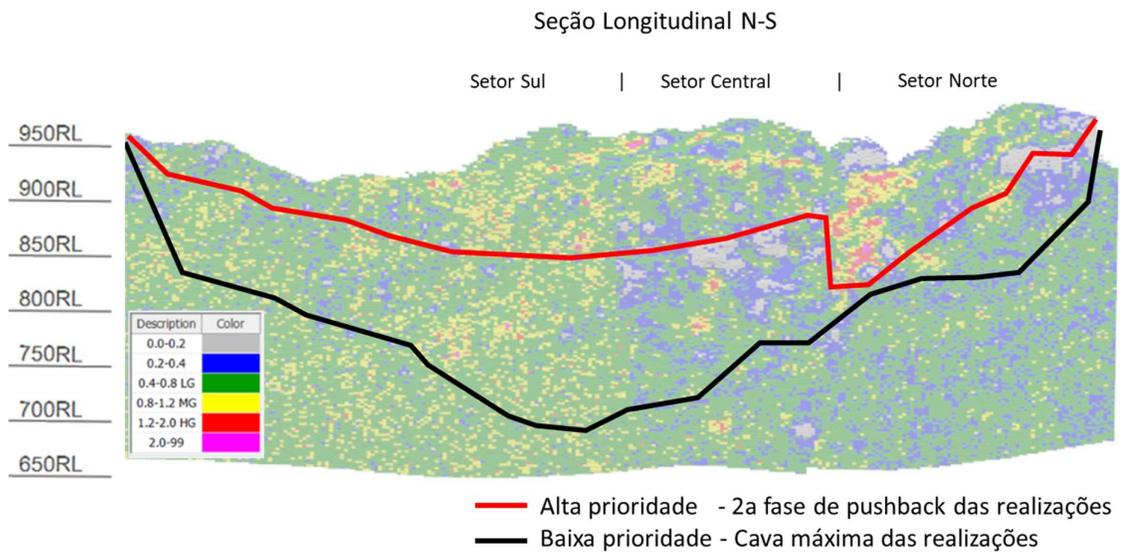


Figura 42 – Seção longitudinal mostrando as zonas de prioridade de amostragem.

Este exemplo mostra que com o uso das realizações, é possível ter uma interpretação de sequência de lavra distinta daquela realizada apenas com o caso base. Desta forma, a interpretação de sequência de amostragem também pode ser modificada. De acordo com esta análise, a zona Norte deve ser alvo de sondagem para promoção de recursos ou mesmo para conversão para reservas até a cota 800, enquanto que os Setores Sul e Central serão sondados até a cota 850 no máximo.

5. CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma estratégia de sondagem para converter Recursos Inferidos em Recursos Indicados e, aplicando fatores modificadores, possibilitou a conversão de Recursos Indicados a Reservas Prováveis, em um projeto de fase de viabilidade econômica de uma mina de ouro a céu aberto. Foram levados em conta parâmetros de incerteza geológica e economicidade.

A malha de sondagem escolhida foi definida como aquela que possibilita a conversão de Recursos Inferidos a Recursos Indicados. Simulação condicional foi utilizada para quantificar a incerteza geológica associada aos teores em um período de produção. Na Zona Norte, a malha definida foi de 40x40m. Na Zona Sul, a malha pode ser mais espaçada para 50x50m e, na Zona Central, a malha adequada é 60x60. Ao se trabalhar com uma malha geométrica para Classificação de Recursos, garante-se ao acionista um critério transparente, claro e de fácil entendimento. A malha, sendo suportada por uma incerteza geológica, traz robustez ao resultado. Este método é considerado como melhores práticas no mercado.

A otimização de cava foi aplicada para analisar os limites econômicos do caso base bem como das realizações selecionadas. Assim, definiu-se onde furar. Foi verificado que com o uso das realizações, a zona de sondagem pode-se estender em até 100m de profundidade, quando comparados ao caso base.

Finalmente, as áreas foram classificadas em zonas de alta, baixa e baixíssima prioridade, de acordo com a sequência de *pushbacks*. Os resultados mostraram que a Zona Norte possui a maior prioridade de sondagem até a cota 800m, enquanto que as Zonas Sul e Central não necessitam de sondagem abaixo da cota 850 metros.

Portanto, o método apresentado demonstrou como planejar uma estratégia de sondagem que maximiza a conversão de Reservas. Ao responder as três perguntas (onde?, como? e quando?) foi gerada a maior taxa de conversão de recursos e que potencialmente posteriormente serão convertidos em reservas, ao menor custo possível.

Trabalhos Futuros

Este trabalho definiu a estratégia de sondagem a partir de dois critérios principais: incerteza de teor e retorno econômico. No entanto, outros fatores também poderiam ser levados em conta, dados sua importância em maior ou menor escala. O primeiro fator são as demais incertezas geológicas: volumétrica e estrutural. A disposição de veios tardios mineralizados que ainda não tenham sido mapeados e conhecidos em detalhe podem gerar novos cenários econômicos. Em casos de veios estreitos, a espessura passa a ter uma importância maior que o teor. Em casos de depósitos sulfetados, a densidade do minério igualmente também passa a ser relevante. O segundo fator está relacionado a parâmetros operacionais e metalúrgicos, como geotecnia e recuperação. Zonas de maior ou menor estabilidade podem comprometer a economicidade de uma zona de alto teor. Igualmente uma zona geotecnicamente estável de baixo teor e baixo retorno financeiro pode ser priorizada na lavra. Minerais contaminantes que impactam na recuperação também podem alterar a economicidade e assim a prioridade de conversão. Outro trabalho futuro pode ser a utilização de malhas virtuais inclinadas, como apresentado por Koppe (2008), para representar melhor uma malha de sondagem real.

Outra recomendação para seguimento do trabalho consiste na utilização de malhas com espaçamentos distintos para as direções de maior e menor continuidade, uma vez que existe anisotropia geométrica mostrando direções com diferentes alcances. A malha de sondagem pode ser otimizada utilizando malhas com espaçamentos distintos daqueles utilizados nesta dissertação.

6. REFERÊNCIAS

ARIK, A., 1999. An Alternative Approach to Ore Reserve Classification. 1999 APCOM Proceedings, SME. Denver, p. 45-53

BLACKWELL, G., 1998. Relative Kriging Errors – A Basis for Mineral Resource Classification, Explor. Mining Geol., Vol.7 Nos 1 and 2, p. 99-105.

DOHM, C.E., 2003. Application of simulation techniques for combined risk assessment of both geological and grade models – an example. 2003 APCOM Proceedings, SAIMM, Cape Town, p. 351-354

AusIMM (Australasian Institute of Mining and Metallurgy), 2012. Mine Managers Handbook. AusIMM Monograph 26. Carlton, VIC.: AusIMM.

BLEINES, C., DERAISME, J., GEFFROY, F., PERSEVAL, S., RAMBERT, F., RENARD, D., TOUFFAIT, Y., 2001. ISATIS software manual. Geovariances and École des Mines de Paris, 531p.

BOUCHER A, DIMITRAKOPOULOS R, VARGAS-GUZMAN JA, 2005. Joint simulations, optimal drillhole spacing and the role of stockpile. In: Leuangthong O., Deutsch C.V. (eds) Geostatistics Banff 2004. Quantitative Geology and Geostatistics, vol 14. Springer, Dordrecht. pp 35–44

CBRR, 2016. Guia CBRR para declaração de resultados de exploração, recursos e reservas minerais. Comissão Brasileira de Recursos e Reservas – CBRR. Brasília, 1ª edição. 54p. Disponível em <http://www.cbrr.org.br/docs/estatuto.pdf>.

CHERCHENEVSKI, P. K; COSTA, J.F.C.L., RUBIO, R.H., 2019. Grade uncertainty embedded in long term scheduling: stochastic mine planning. REM, Int. Eng. J., Ouro Preto, v. 72, n. 2, p. 275-284.

DEUTSCH, C.V.; JOURNAL, A.G., 1992. GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford University Press, New York, 340p.

DEUTSCH, C. V., LEUANGTHONG, O., ORTIZ, J. M., 2006. A case for geometric criteria in resources and reserves classification. Centre for Computational Geostatistics, Report 7, University of Alberta, Edmonton

DIMITRAKOPOULOS, R., 1997. Conditional simulations: tools for modeling uncertainty in open pit optimization. Optimizing with Whittle. Whittle Programming Pty Ltd, Perth, pp.31–42.

DIMITRAKOPOULOS, R., MARTINEZ, L., RAMAZAN, S., 2007. A maximum upside / minimum downside approach to the traditional optimization of open pit mine design. Journal of Mining Science. v.43. pp.73-82.

DIMITRAKOPOULOS, R., FARRELLY, C. T., GODOY, M., 2002. Moving forward from traditional optimization: grade uncertainty and risk effects in open-pit design, Mining Technology, 111:1, 82-88, DOI: 10.1179/mnt.2002.111.1.82

DOHM C., 2005. Quantifiable mineral resource classification — a logical approach. In: Leuangthong O., Deutsch C.V. (eds) Geostatistics Banff 2004. Quantitative Geology and Geostatistics, vol 14. Springer, Dordrecht. pp 333-243

FROIDEVAUX, R., 1982. Geostatistics and Ore Reserve Classification. The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 75(843), p. 77-83.

HUSTRULID, W., KUCHTA, M., 1995. Open pit mine planning and design. Rotterdam, A. A. Balkema. 636p.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M., 1989. Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press, 558p.

ISAAKS, E.H., 1990. The application of monte carlo methods to the analysis of spatially correlated data. 213p. PhD. Thesis, Stanford University, USA.

JORC, 2012. Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code) [online]. Available from: <<http://www.jorc.org>> (The Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia).

JOURNEL, A.G., 1974. Geostatistics for conditional simulation of ore bodies. Economic Geology, Vol. 69, N° 5, pp. 673-687.

JOURNEL, A.G., HUIJBREGTS, C.H.J., 1978. Mining Geostatistics, Academic Press Inc., London, UK, 600p.

JOURNEL, A.G., 1989. Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons: American Geophysical Union, Short Course in Geology, Vol. 8, 40 p.

KIM, Y., ZHAO, Y., 1994. Optimum open pit production sequencing – the current state of the art, in Proceedings SME Annual Meeting, 1994, Preprint Littleton, CO, pp.94-224.

KOPPE V.C., 2009. Metodologia para comparar a eficiência de alternativas para a Disposição de Amostras. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 181p.

KOPPE, V.C., COSTA, J.F.C.L., PERONI, R.L., KOPPE, J.C., 2011. Choosing Between Two Kind of Sampling Patterns Using Geostatistical Simulation: Regularly Spaced or at High Uncertainty Locations? Natural Resources Research (New York, N.Y.), v. 20, p. 131-142.

KOPPE, V. C., RUBIO, R. H.; COSTA, J.F.C.L., 2017. A chart for judging optimal sample spacing for ore grade estimation. Natural Resources Research, 26(2), 191–199.

LERCHS, H., GROSSMANN, L.F., 1965. Optimum design of open pit mines. CIM Bulletin, vol. 58, January, pp.47-54.

MATHERON, G., 1973. The Intrinsic Random Function and Their Applications. Advances in Applied Probability. v.5. p.439 - 468.

MELLO, P.R.G., 2015. Planejamento de lavra sob a incerteza de teores aplicado à lavra subterrânea. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 162p.

MENIN, R., 2017. Definição de espaçamento amostral para Classificação de Recursos Minerais baseada em dados de Reconciliação da Produção. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 78p.

MENIN, R., DIEDRICH, C., REUWSAAT, J. D., PAULA, W. F., 2016. Drilling grid analysis for defining open pit and underground mineral resources classification. *Quantitative Geology and Geostatistics: Geostatistics Valencia 2016*. Springer, p. 271-285.

MUIR, D.C.W., 2007. Pseudoflow, New Life for Lerchs-Grossman Pit Optimization, in: *Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, AusIMM Spectrum Series 14.

MURPHY M., PARKER H., ROSS A., AUDET MA., 2004. Ore-Thickness and Nickel Grade Resource Confidence at the Koniambo Nickel Laterite (A Conditional Simulation Voyage of Discovery). In: Leuangthong O., Deutsch C.V. (eds) *Geostatistics Banff 2004*. *Quantitative Geology and Geostatistics*, vol 14. Springer, Dordrecht.

PERONI, R. L., 2002. Análise da sensibilidade do sequenciamento de lavra em função da incerteza do modelo geológico. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 126p.

PERONI, R.L., COSTA, J.F.C.L., KOPPE, J.C., 2012. Análise da variabilidade de teores e sua incorporação no planejamento de lavra. *Rem: Revista Escola de Minas*, 65(2), 263-270.

PILGER, G.G., 2000. Critérios para locação amostral baseados em simulação estocástica. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 102p.

PILGER, G.G., COSTA, J.F.C.L., KOPPE, J.C., 2000. Projeto de amostragem: uma proposição baseada em simulação estocástica. *Revista da Escola de Minas, Ouro Preto*, v. 53, n.4, p. 265-274.

PILGER, G.G., COSTA, J.F.C.L., KOPPE, J.C., 2001. Additional samples: where they should be located. *Natural Resources Research*. v.10 (3). pp. 197-207.

RENDU, J.M. 2008. An Introduction to Cut-Off Grade Estimation. 112p, Society of Mining Metallurgy & Exploration, SME.

ROSADO, R.C., SALDANHA, A.A., COSTA, J.F.C.L., 2019. Incorporation of mineralization risk into underground mine planning. In: 39th Apcom, 2019, Wroclaw. 39th Apcom. Londres: Taylor & Francis Group. v. 39. p. 286-297.

ROSSI, M.E., CAMACHO, V.J., 2001. Applications of geostatistical conditional simulations to assess resource classification schemes. Proceedings of the 102nd annual meeting of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy, and Petroleum (CIM), Quebec City (April 29–May 2)

ROSSI, M.E., VAN BRUNT, B.H., 1997. Optimizing conditionally simulated orebodies with Whittle 4D. Optimizing with Whittle 97, Perth, Whittle Programming Pty Ltd, pp.119-128.

ROSSI, M.E., DEUTSCH, C.V., 2014. Mineral Resource Estimation. Alberta: Springer. p.332.

SILVA, D.; BOISVERT, J., 2014. Mineral resource classification: a comparison of new and existing techniques. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 114(3):265—273

SNOWDEN, D.V., 1996. Practical Interpretation of Resource Classification Guidelines, AusIMM Annual Conference Proceedings, Perth March 24-28, p. 305-308.

SOUZA, L.E., GAMBIN, F., COSTA, J.F.C.L., KOPPE, J.C., 2001. Estimativa de incerteza na classificação de recursos minerais por simulação geoestatística. REM. Revista Escola de Minas (Impresso), Ouro Preto, MG, v. 54, n.2, p. 143-148.

SOUZA, L.E., 2002. Estimativa de incertezas e sua aplicação na classificação de recursos minerais. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 171 p.

SOUZA, L.E., 2007. Proposição geoestatística para quantificação do erro em estimativas de tonelagens e teores. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação

em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 152 p.

VERLY, G., POSTOLSKI, T., PARKER H.M., 2014. Assessing uncertainty with drill hole spacing studies: applications to mineral resources. Orebody modelling and strategic mine planning symposium 2014, AusIMM. Melbourne: 109-118.

WHITTLE, D., 2006. Whittle Strategic Mine Planning. 8.ed. Perth.p.163.

WILDE B., DEUTSCH C.V., 2010. Data spacing and uncertainty: Quantification and complications. In: IAMG 2010 Budapest - 14th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences.