



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG
Campus Avançado de Poços de Caldas

Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), Campus de Poços de Caldas
Curso de Especialização em Engenharia de Mineral (CEEM)

Luan Oliveira Lima

Modelagem e Estimativa de Teores de Óxido de Cromo em uma Mina de Omã

Poços de Caldas

2023



Luan Oliveira Lima

Modelagem e Estimativa de Teores de Óxido de Cromo em uma Mina de Omã

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) como parte dos requisitos para a integralização do curso de Especialização em Engenharia Mineral (CEEM).

Área de concentração: Lavra

Orientador: Prof. Dr. Guilherme José Ramos Oliveira

Poços de Caldas

2023



Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Lima, LUAN OLIVEIRA .

Modelagem e Estimativa de Teores de Óxido de Cromo em uma Mina de Omã : Estudo de Caso / LUAN OLIVEIRA Lima. - Poços de Caldas, MG, 2023.
35 f. : il. -

Orientador(a): Guilherme José Ramos Oliveira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2023.
Bibliografia.

1. Cromo. 2. Geoestatística, . 3. Krigagem Ordinária. 4. Estimativa de recursos minerais. I. Oliveira, Guilherme José Ramos, orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.



Luan Oliveira Lima

Modelagem e Estimativa de Teores de Óxido de Cromo em uma Mina de Omã

A banca examinadora abaixo-assinada aprova o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) como parte dos requisitos para a integralização do curso de Especialização em Engenharia Mineral (CEEM).

Área de concentração: Lavra

Aprovada em:

Orientador: Guilherme José Ramos Oliveira

Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Examinador 1: Fabiano Cabañas Navarro

Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Examinador 2: Ana Olivia Barufi Franco de Magalhães

Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:





LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sultanato de Omã, mostrando as principais localidades e suas características.....	13
Figura 2: Fluxograma simplificado das etapas do trabalho.....	20
Figura 3: Pontos dos collars utilizados para modelagem.....	21
Figura 4: Modelo litológico de Mahra.....	22
Figura 5: Seção geológica do modelo de Mahra, mostrando intervalos modelados.....	22
Figura 6: Histograma com os tamanhos dos intervalos das amostras (em metros).....	23
Figura 7: Histograma dos dados de óxido de cromo.....	24
Figura 8: Probability plot com as amostras de cromita contidas no modelo geológico a ser estimado.....	26
Figura 9: Semi variograma omnidirecional.....	27
Figura 10: Semi variograma downhole.....	28
Figura 11: Semi variogramas nos eixos do strike e dip.....	28
Figura 12: Modelos teóricos de variogramas obtidos.....	29
Figura 13: Modelo de blocos do depósito e seus teores de óxido de cromo, após estimativa.....	31
Figura 14: Validação visual comparando furo compositado vs modelo de blocos.....	31
Figura 15: Validação visual comparando furo compositado vs modelo de blocos.....	32



SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	10
2. OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo geral	11
2.2 Objetivos específicos	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1 Contexto Geológico	11
3.1.1 Geologia Regional	11
3.2 Contexto Natural do Dados	13
3.2.1 Amostras Geológicas Naturais	14
3.2.2 Amostras Geológicas	14
3.3 Geoestatística	15
3.3.1 Variabilidade no Espaço	15
3.3.2 Análise Exploratória dos Dados	16
3.3.3 Estatística Descritiva	16
3.3.4 Indicadores Descritivos de Dispersão	16
3.3.5 Valores Atípicos (outliers)	17
3.3.6 Variografia	17
3.3.7 Modelagem Variográfica	17
3.4 Modelagem Geológica	18
3.5 Estimativa por Krigagem Ordinária	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS	19



4.1 APRESENTAÇÃO DOS DADOS	20
4.1.1 Mapa de pontos de sondagem.....	20
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
5.1 Modelagem Geológica.....	21
5.2 Estatística básica e validação do banco de dados.....	22
5.3 Compositagem de Amostras Naturais	23
5.4 Análise Descritiva e Exploratória dos Dados	24
5.5 Variografia	27
5.6 Estimativas de Teores	30
5.6.1 Krigagem Ordinária.....	30
5.6.2 Validação visual	31
6. CONCLUSÕES	32
7. REFERÊNCIAS.....	34



RESUMO

Na exploração de minas de cromo nas sequências de rochas ofiolíticas de Omã, a avaliação dos recursos minerais desempenha um papel crucial na determinação da viabilidade econômica da operação. Para alcançar esse objetivo, são empregados diversos métodos de estimativa de recursos, sendo a krigagem ordinária um dos mais amplamente adotados e respeitados. Neste estudo de caso em uma mina de cromo de Omã, realizou-se um trabalho que iniciou-se desde a análise do banco de dados de perfuração, passando pela modelagem geológica e, por fim, à estimativa dos teores do recurso modelado. Com base no entendimento geoestatístico dos dados, pôde-se identificar e modelar as estruturas de continuidade presentes, além de obter os parâmetros necessários para realizar a interpolação numérica dos teores em áreas onde não havia medições diretas. A metodologia de interpolação escolhida foi a Krigagem Ordinária. Ao final de todas as etapas desse trabalho, os resultados incluíram um modelo de blocos estimando os teores de óxido de cromo no depósito e uma estimativa do volume do recurso presente na área de estudo. Os resultados obtidos desse trabalho demonstram uma carência de informações para que exista um estudo de viabilidade econômica no local.

Palavras-chave: Cromo, Geoestatística, Krigagem Ordinária, Estimativa de recursos minerais.



ABSTRACT

In the exploration of chromium mines in the ophiolitic rock sequences of Oman, the assessment of mineral resources plays a crucial role in determining the economic viability of the operation. To achieve this goal, various resource estimation methods are employed, with ordinary kriging being one of the most widely adopted and respected. In this case study at a chromium mine in Oman, a comprehensive study was conducted, starting from the analysis of the drilling database, progressing through geological modeling, and ultimately culminating in the estimation of modeled resource grades. Based on the geo-statistical understanding of the data, it was possible to identify and model the continuity structures present and obtain the necessary parameters for numerical interpolation of grades in areas where direct measurements were lacking. The chosen interpolation methodology was Ordinary Kriging. At the conclusion of all phases of this work, the results included a block model estimating chromium oxide grades in the deposit and an estimate of the volume of resources present in the study area. The results obtained from this work highlight a lack of information necessary for an economic feasibility study at the site.

Keywords: Chromium, Geostatistics, Ordinary Kriging, Mineral Resource Estimation.



1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Em termos gerais, métodos geoestatísticos são procedimentos matemáticos que exploram conjuntos de dados para criar funções capazes de prever valores em áreas não amostradas (Yamamoto, 1998).

O Ofiolito de Omã, um dos mais conhecidos do mundo, tem sido fonte de muitos estudos envolvendo todas as esferas da geologia. Dentre os inúmeros minerais que compõem as rochas desta cadeia montanhosa, o cromo ocupa um espaço considerável e seus afloramentos são buscados por diversas mineradoras da região.

Uma das características mais interessantes desses corpos de cromitito são que suas formas se repetem numa variedade imensa de escalas, então tudo o que é visto em pequenas porções pode se repetir em feições maiores. Essa característica – assim como os diferentes comportamentos dos depósitos de cromita – torna a modelagem dos depósitos de cromitito do Ofiolito de Omã um grande desafio, visto que, diferente dos grandes depósitos mundialmente conhecidos (p. Ex.: Bushveld, na África do Sul), os corpos mineralizados que compõem essa sequência de rochas não possui ainda um padrão bem definido.

Os dados medidos ao longo do depósito mineral são a chave para o reconhecimento das estruturas de variabilidade espacial, além de permitirem a observação do comportamento dos teores conhecidos e interpolação de teores onde não existe medição. O caminho para essa interpretação se dá pelo estudo estatístico de variáveis geoposicionadas e do comportamento variográfico apresentado pela população amostral do fenômeno.

A krigagem é o nome dado a técnicas de regressão linear que minimizam erros nas estimativas e é amplamente utilizado na modelagem espacial. Entre as diversas formas de krigagem, destacam-se krigagem simples, krigagem ordinária e krigagem universal (Furuie, 2009). A krigagem ordinária se sobressai ao estimar valores não amostrados usando um modelo de semivariograma (Burgess; Webster, 1980). Esse método de interpolação é reconhecido por sua confiabilidade e precisão local.

Este trabalho busca a aplicação de ferramentas de geoestatísticas e de modelagem implícita para entendimento do comportamento espacial de um depósito de cromita localizado em uma mina de Omã.



2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Utilizando-se das técnicas de modelagem geológica implícita e da geoestatística, modelar, estimar e avaliar o potencial da mina de Mahra, depósito de cromitito localizado na sequência de rochas ultramáficas do Ofiolito de Omã.

2.2 Objetivos específicos

- 1) Realizar a análise exploratória dos dados de sondagem.
- 2) Construir modelo litológico do cromitito.
- 3) Realizar estudo variográfico dos dados amostrais do modelo.
- 4) Estimar teores de óxido de cromo do depósito.
- 5) Analisar dados de cubagem, classificação e viabilidade do depósito.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta parte do trabalho irá tratar dos conceitos teóricos essenciais tomando em consideração cada fase do projeto elaborado. O foco do projeto é o conjunto de informações oriundas da perfuração geológica em busca de óxido de cromo.

3.1 Contexto Geológico

3.1.1 Geologia Regional

A geologia regional é importante para compreender a origem e as fontes das diferentes rochas encontradas no local. O levantamento geológico da área do mapa de Buraymi foi realizado como parte de um projeto maior de mapeamento geológico, confiado ao BRGM, o Serviço Geológico Francês, pelo Ministério do Petróleo e dos Minerais, que agora é o Ministério do Petróleo e Gás do Sultanato de Omã.

A área de Buraymi, localizada nas partes central e norte das montanhas de Omã, é composta por cinco unidades geológicas principais, listadas a seguir:



1. Nappes de Sumeini (thrust sheet), consistindo principalmente de depósitos carbonáticos, foram depositadas nas encostas continentais da Plataforma Árabe durante o final do Permiano ao final do Cretáceo.
2. Nappes de Hawasina, compostas por depósitos pelágicos batiais e turbidíticos, além de rochas vulcânicas do final do Permiano ao final do Cretáceo.
3. Nappes de Samail, representam um fragmento da litosfera oceânica de idade Cretácea Média a Cretácea Tardia, originária do oceano Neo-Tetis. A área desse estudo está contida nesta unidade.
4. Unidades pós-Nappes de depósitos do Maastrichtiano ao Mioceno.
5. Depósitos superficiais de idade quaternária.

A área de Buraymi em Omã está localizada nas partes central e norte das Montanhas de Omã, entre a fronteira com os Emirados Árabes Unidos a oeste e norte e a costa do Golfo de Omã a leste. Ela compreende três principais regiões geológicas e fisiográficas:

- 1) Uma extensa cadeia de montanhas com orientação NNW-SSE, de relevo muito acidentado, localizada no centro, conhecida como Al Hajar al Gharbi. Essas montanhas são cortadas de oeste a leste pelos rios Wadi Hatta, ao norte, e Wadi Al Jizi, ao sul.
- 2) Uma área de planalto a leste formando a planície costeira de Batinah, que tem entre 10 a 25 km de largura e segue a orientação NNW-SSE, tornando-se ligeiramente côncava em direção ao nordeste.
- 3) Uma área descontínua de planalto que possui uma fronteira irregular com a vertente oeste da cadeia de montanhas. Ela forma uma região de planícies arenosas e dunas de areia na margem do Rub al Khali.

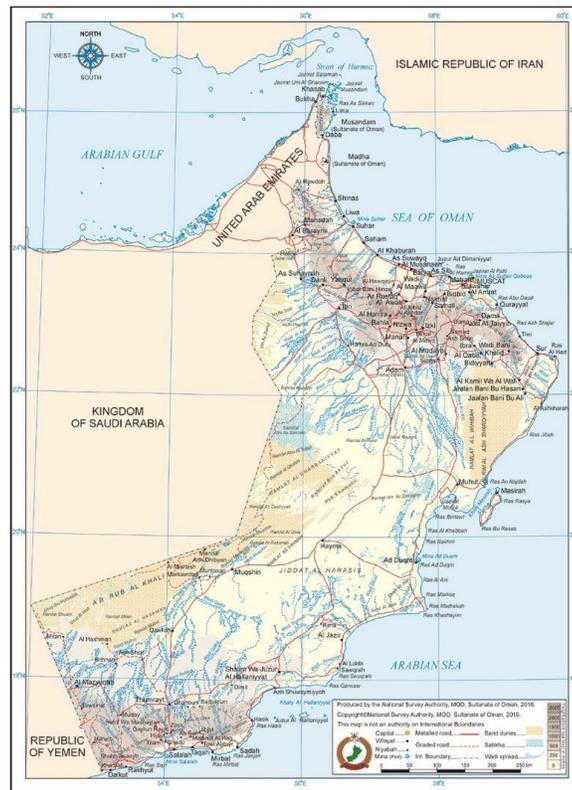


Figura 1: Sultanato de Omã, mostrando as principais localidades e suas características.
(National Survey Authority, MOD Sultanate of Oman, 2020)

A Nappe de Samail é estruturalmente a mais elevada das unidades alóctones das Montanhas de Omã; é um fragmento da litosfera oceânica neo-tetiana que foi obduzida sobre a margem continental árabe durante o Cretáceo Tardio (U-Pb). A nappe é composta por três unidades:

- Sequências de manto inferior (Tectonitos).
- Sequência magmática precoce.
- Unidade magmática tardia composta por intrusões que cortam as unidades anteriores, juntamente com rochas vulcânicas sobrepostas.

3.2 Contexto Natural do Dados

A área de estudo está localizada na parte norte do ofiolito de Omã, uma sequência ofiolítica completa, bem preservada e exposta desde o manto superior até a crosta superior. A sequência



de rochas do manto é composta por harzburgitos com foliação pervasiva, dunitos, lherzolitos e cromititos. (Roberts 1986).

3.2.1 Amostras Geológicas Naturais

A partir da observação superficial das formações rochosas presentes em uma determinada região de estudo, podendo ser combinada ou não com abordagens de custo acessível (como o processamento de imagens públicas captadas por sensores de satélites ou mesmo análises químicas de amostras pontuais), é possível identificar um potencial subterrâneo que justifique a utilização de técnicas como a sondagem geológica com testemunho. A exploração através da sondagem geológica oferece a oportunidade de entender as continuidades e configurações das rochas abaixo da superfície e a seleção da ferramenta de sondagem depende das características da área a ser perfurada e dos objetivos da pesquisa (HALDAR, 2013). Os intervalos de amostragem geralmente seguem um padrão predefinido de comprimento, principalmente porque essas amostras são frequentemente utilizadas para estimativas de conteúdo mineral. O controle dos comprimentos dos intervalos de amostragem é conhecido como suporte amostral (GY, 1979).

A utilização desse método confere uma uniformidade de peso à população de amostras da mesma categoria, garantindo que a inclusão de novas amostras não distorça a média entre elas, ao mesmo tempo em que preserva as características das curvas de parâmetros graças à manutenção do suporte (MATHERON, 1984).

3.2.2 Amostras Geológicas

As informações derivadas das amostras obtidas através da sondagem são incorporadas a um banco de dados. A estrutura desse banco inclui a localização das amostras na tabela "Collar", detalhes sobre a profundidade máxima e direção das perfurações na tabela "Survey" e o comprimento dos intervalos categorizados de amostras na tabela "Assay". Essas tabelas podem ser utilizadas para modelar os furos de sondagem em um ambiente tridimensional, permitindo análises espaciais, como identificação de contatos litológicos ou zonas com alto teor mineral, além de atividades como a criação de modelos geológicos em seções verticais e horizontais. Ao analisar esses furos de sondagem, podem ser observadas características naturais simples, como variações nos teores de minerais em uma mesma camada geológica, assim como desafios, por exemplo, relacionados ao suporte amostral, especialmente em regiões de transição entre



diferentes tipos de rochas. É comum ocorrer uma discrepância entre o suporte amostral predefinido e a variação natural da espessura em registros geológicos, o que acontece exatamente nesse estudo. Contudo, essa situação pode ser abordada através da aplicação de parâmetros de amostragem que estabeleçam valores mínimos e máximos para a delimitação de cada amostra, com o propósito de orientar a subdivisão dos intervalos conforme necessário.

O processo de ajustar amostras naturais é conhecido como "Compositagem", que visa a reduzir a variabilidade no suporte amostral dos dados (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004). Essa regularização é crucial para a estimativa de recursos minerais, especialmente durante os procedimentos de interpolação utilizando técnicas como a Krigagem (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004; ROSSI; DEUTSCH, 2014).

3.3 Geoestatística

Variáveis que possuam atribuições geográficas são designadas como variáveis regionalizadas e constituem o foco de estudo da Geoestatística (MATHERON, 1963). A Geoestatística encontra aplicabilidade em diversos fenômenos (ROSSI; DEUTSCH, 2014), mas é notável o seu amplo uso no campo da mineração (MATHERON, 1963; SINCLAIR; BLACKWELL, 2004; ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989; GOOVAERTS, 1997a). No contexto da mineração, a Geoestatística pode ser empregada desde as fases de pesquisa e licenciamento até as etapas de modelagem geológica e estimativa de teores.

3.3.1 Variabilidade no Espaço

Variáveis regionalizadas refletem características locais do fenômeno e possibilitam a correlação entre amostras espacialmente separadas. Essa correlação entre diferentes variáveis permite compreender a estrutura de continuidade do fenômeno regionalizado (HUIJBREGTS, 1975), enquanto a relação de uma variável com o ambiente ao seu redor define a dependência espacial (MEDAK; CRESSIE, 1991). A análise interpretativa dessa estrutura de continuidade e dependência espacial pode ser conduzida usando abordagens geomatemáticas baseadas no método polinomial dos mínimos quadrados (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989), possibilitando a representação do fenômeno por meio de uma superfície de regressão ajustada, minimizando a discrepância entre os valores medidos e os valores previstos.



3.3.2 Análise Exploratória dos Dados

Técnicas estatísticas ou geomatemáticas devem ser empregadas para obter uma compreensão da população amostral do fenômeno estudado, especialmente em relação às características resultantes dos processos genéticos do depósito (HAMLETT et al., 1986; ISAACS; SRIVASTAVA, 1989) e antes da aplicação de métodos estatísticos mais complexos. Nessa fase inicial de análise exploratória, a estacionaridade dos dados é um dos principais fatores observados, definindo grupos de amostras que compartilham propriedades variográficas e podem ser analisados conjuntamente (HAMLETT et al., 1986).

3.3.3 Estatística Descritiva

Simplificando a compreensão do fenômeno em análise, instrumentos analíticos como tabelas de frequência e seus correspondentes gráficos, os gráficos de barras (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989; DEGROOT; SCHERVISH, 2012), desempenham um papel crucial. Os gráficos de barras representam funções de distribuição de probabilidade, mapeando intervalos de frequência no eixo x e o número de observações em cada intervalo no eixo y. Mesmo quando os dados não são suficientes para um gráfico de barras completo, é possível criar gráficos de probabilidade e resumos estatísticos de uma ou mais amostras, independentemente da população de uma variável específica (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

3.3.4 Indicadores Descritivos de Dispersão

Para avaliar a variação nos valores dos dados, utilizamos indicadores de dispersão, como a variância, o desvio padrão e a amplitude interquartil. Esses indicadores estão relacionados com a extensão e frequência da distribuição dos dados, revelando o grau de propagação do fenômeno. A variância de uma amostra da população mede a distância entre cada amostra e o valor central dos dados, sendo calculada pela soma dos quadrados das diferenças entre cada valor da amostra e a média da amostra da população. Devido à sua ligação com a média, essa métrica também é sensível a valores atípicos. A variabilidade dos valores também exerce influência nesse indicador, tornando-o diretamente relacionado ao nível de dispersão nos valores das amostras. Como a variância é calculada de forma exponencial, sua magnitude não coincide com a das amostras e da média, dificultando uma análise direta. A raiz quadrada desse valor resolve essa questão, resultando no desvio padrão σ , que também é influenciado por valores atípicos. Ambos os



indicadores mencionados se diferenciam da amplitude interquartil (IQR), que não é afetada por valores atípicos. Essa última métrica de dispersão é definida pela diferença entre os valores dos quartis Q1 e Q3.

3.3.5 Valores Atípicos (outliers)

É frequente encontrar valores discrepantes nos conjuntos de dados, muitas vezes situados muito distantes da média da amostra populacional. Essa presença pode ter um impacto adverso nas análises de estimativa, distorcendo consideravelmente os valores calculados devido à sua influência extrema (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). Os autores indicam que, em virtude disso, valores discrepantes são geralmente excluídos ou ajustados de forma arbitrária para minimizar seu impacto. A detecção desses outliers pode ser realizada usando o método baseado na amplitude interquartil, como explicado por (EIWECK, 2010).

A análise desses valores discrepantes deve levar em consideração sua relevância e sua relação com a amostra populacional, a fim de determinar se são pontos isolados ou seguem alguma tendência.

3.3.6 Variografia

A avaliação de variáveis regionalizadas dentro de um mesmo domínio estacionário (MATHERON, 1963; HUIJBREGTS, 1975; HAMLETT, 1986) é fundamental para definir as estruturas de continuidade do fenômeno, evitando a interferência de pares de amostras de domínios estacionários distintos e prevenindo análises tendenciosas. Além da delimitação dos domínios estacionários e suas relações com a amostra populacional, é necessário possuir uma quantidade adequada de dados para realizar a modelagem variográfica de forma representativa do fenômeno.

3.3.7 Modelagem Variográfica

A modelagem variográfica é uma técnica de parametrização do variograma experimental que busca representar a distribuição espacial da variável em âmbito regional, permitindo a estimativa em qualquer ponto do fenômeno. O modelo é construído considerando os valores do efeito pepita, o número de estruturas, o comportamento do modelo de variograma próximo à



origem e as características de variabilidade do fenômeno (ARMSTRONG 1984; HAMLETT et al., 1986; ROSSI; DEUTSCH, 2014). Em situações de escassez de dados significativos, como é o caso do presente estudo, pode-se empregar um variograma omnidirecional, que depende exclusivamente do comprimento do vetor h (JOURNEL, 1989), englobando todas as direções possíveis e gerando variogramas que refletem a continuidade sem especificar a orientação. Integrar o variograma omnidirecional com a estimativa do efeito pepita por meio de um variograma downhole, que avalia a continuidade em pequena escala em furos de sondagem, permite modelar o fenômeno sem levar em conta a orientação (ROSSI; DEUTSCH, 2014).

Apesar dos avanços computacionais, os ajustes desses modelos ainda são preferencialmente realizados manualmente, utilizando um método frequentemente chamado de "ajuste visual", no qual a curva do modelo é adaptada para se alinhar com os lags relevantes para a análise (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978; ISAAKS; SRISVASTAVA, 1989; CRESSIE, 1991).

3.4 Modelagem Geológica

A modelagem geológica tridimensional é um processo que combina dados de superfície e subsuperfície para representar a geometria e as relações de contato dos corpos rochosos em uma região, além de conter informações sobre localização e identificação de mineralização. Vários métodos podem ser empregados para essa modelagem, e o método mais estabelecido na indústria é o método explícito, que se baseia na interpretação geológica para criar seções espaçadas integrando dados de sondagem em profundidade e mapeamento de superfície. Por outro lado, o método mais recente é a modelagem implícita, que utiliza funções de base radial (RBF) para interpolar variáveis, criando uma função contínua que atualiza os campos tridimensionais de cada litologia à medida que os dados são atualizados.

Esses modelos têm uma importância fundamental na estimativa de recursos minerais, uma vez que permitem compreender a distribuição espacial de diferentes características geológicas, o que é crucial para estimar com precisão a quantidade e a qualidade dos recursos presentes em uma área.



3.5 Estimativa por Krigagem Ordinária

A modelagem da conectividade espacial oferece uma solução para reduzir as incertezas na estimativa de recursos minerais. Quando os parâmetros variográficos são conhecidos, a interpolação de valores dependentes separados por um vetor 'h' relaciona-se de maneira confiável com a continuidade do fenômeno (JOURNEL, 1989). Entre as abordagens de estimativa, as técnicas de krigagem calculam os pesos das amostras para minimizar o erro de variância esperado entre elas (ROSSI; DEUTSCH, 2014). Alguns autores explicam que a interpolação por meio da krigagem atribui a uma localização específica uma média ponderada ou uma soma linear dos dados em sua vizinhança, com os pesos das amostras interdependentes ajustados para minimizar o erro de variância. Rossi & Deutsch (2014) delineiam os tipos mais comuns de krigagem: Krigagem Simples (SK), Krigagem Ordinária (OK), Krigagem com Modelo de Tendência ou Krigagem Universal (KT ou UK), Krigagem com Desvio Externo, Krigagem Fatorial e Krigagem Não Linear.

O método utilizado neste estudo é a Krigagem Ordinária, baseado na estimativa linear de erro mínimo de variância em locais onde o valor real é desconhecido, sem assumir previamente uma média. A média local é reestimada implicitamente como uma constante dentro de cada vizinhança de busca, tornando a Krigagem Ordinária adequada para estimativas intermediárias. Essa abordagem se baseia na restrição de que a soma dos pesos seja igual a 1,0 para cada vizinhança estimada, minimizando, assim, a variância da estimativa. Essa característica faz da KO um algoritmo não-estacionário que tem sido e continuará sendo a base da geoestatística (ROSSI; DEUTSCH, 2014).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada pode ser dividida em 05 etapas principais. A primeira consistiu na validação do banco de dados de sondagem da região de Mahra, com substância a ser estimada sendo Cr_2O_3 . A segunda etapa consistiu na modelagem litológica do cromitito, com cutoff grade de 18% para teores de óxido de cromo. A terceira etapa foi a análise estatística dos dados. A quarta foi a preparação e realização da krigagem ordinária e a última etapa a análise dos resultados obtidos após a estimativa dos teores.



A total divulgação dos dados, bem como informações quantitativas gerais do depósito, não foi autorizado pela empresa cedente, e, portanto, algumas informações podem parecer faltantes ou inconclusivas.

Todas essas etapas foram realizadas utilizando o software Micromine Origin & Beyond 2023.5 (Micromine 2023). O fluxograma simplificado pode ser visto na figura abaixo.

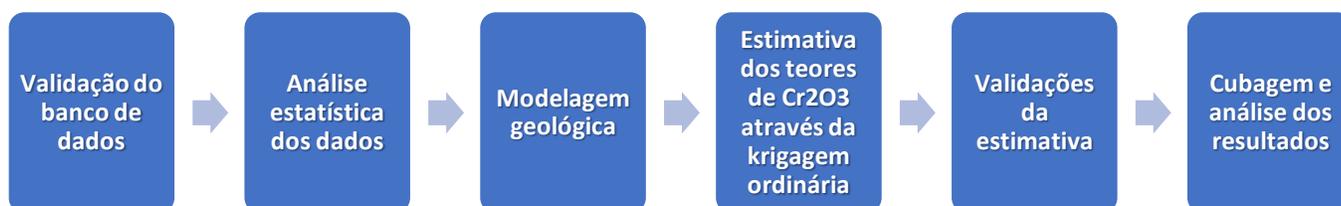


Figura 2: Fluxograma simplificado das etapas do trabalho. Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4.1 APRESENTAÇÃO DOS DADOS

4.1.1 Mapa de pontos de sondagem

A base de dados utilizada para modelagem apresenta 478 furos de sondagem, sendo 37 furos realizados com sonda diamantada e 441 com RAB. Ao total, foram coletadas 14256

amostras. As amostras estão distribuídas em malha irregular 5 x 5 (X e Y), com esses valores variando para 30 x 30 em regiões potenciais. O intervalo de amostragem nos furos de sonda diamantada pode variar entre 30cm e 3m e é determinado a partir da espessura da camada de cromitito. A distribuição das amostras bem como os seus teores podem ser vistos na Figura 4.

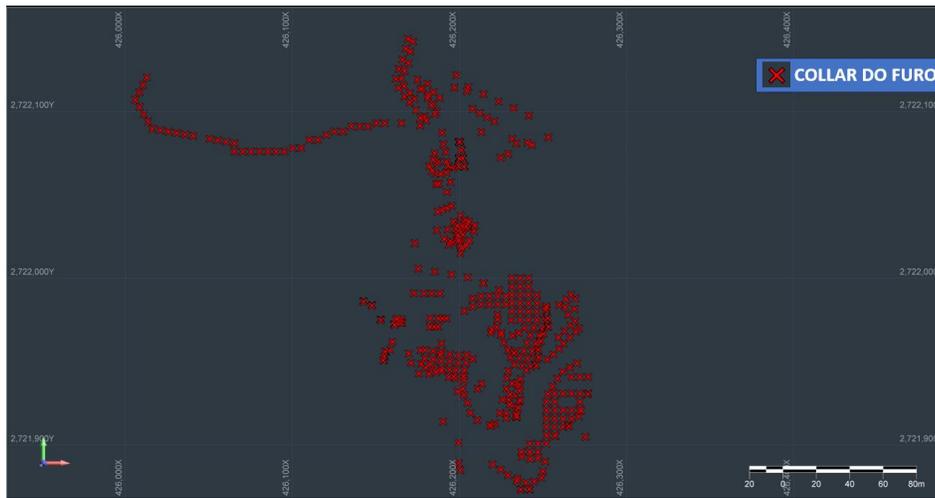


Figura 3: Pontos dos collars utilizados para modelagem. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Modelagem Geológica

Além de informações estruturais e litológicas através do mapeamento e descrições minuciosas de furos de sondagem, foram adotadas duas premissas principais para criação do modelo geológico:

- 1) Apenas amostras descritas como “Cromitito” e suas variedades (Tabela 1) foram incluídas no modelo.
- 2) Amostras descritas como “Cromitito” e suas variedades e que possuírem intervalos com menos de 18% de Cr_2O_3 foram excluídas do modelo.

Tabela 1 – Variedades do cromitito

Variedades do Cromitito
Disseminado
Leopardo
Maciço
Semi-Maciço
Não-Contínuo

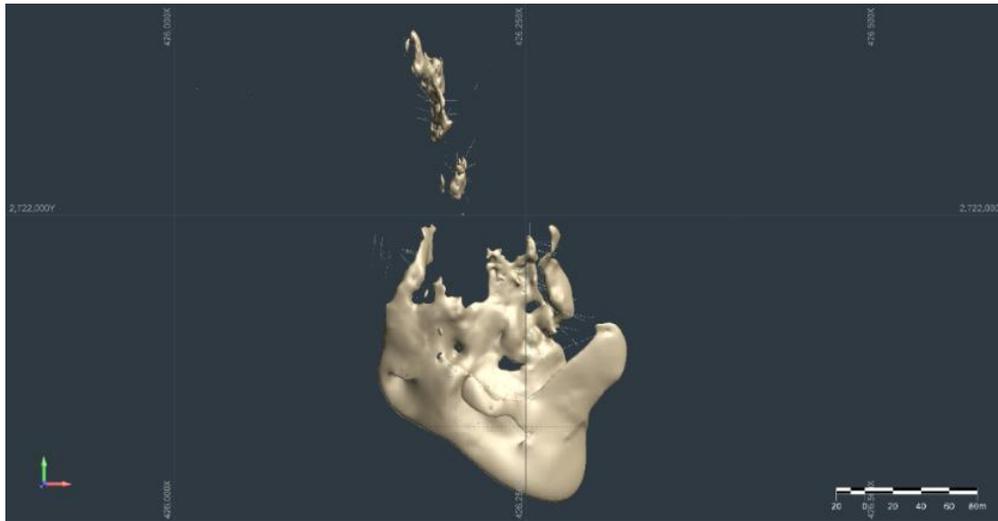


Figura 4: Modelo litológico de Mahra. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

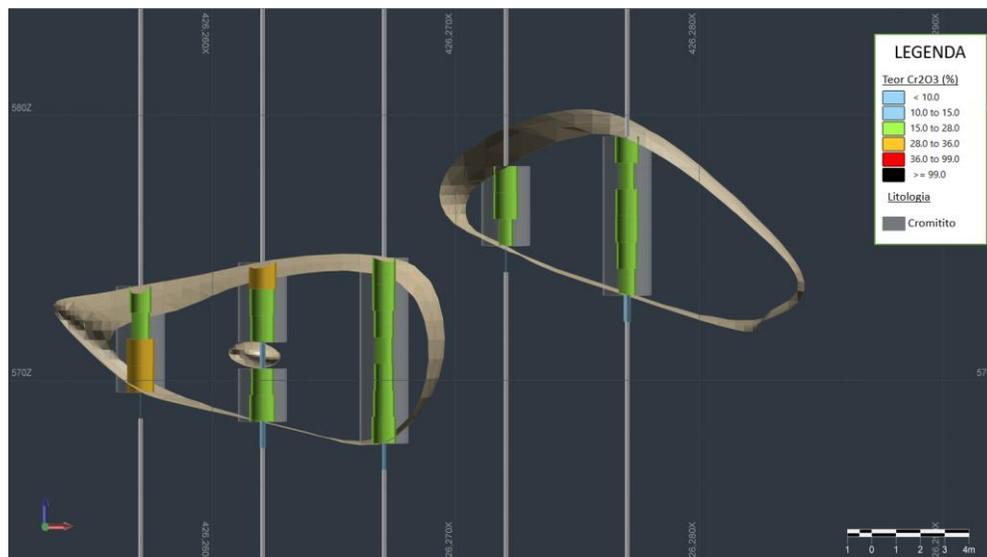


Figura 5: Seção geológica do modelo de Mahra, mostrando intervalos modelados. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5.2 Estatística básica e validação do banco de dados

Na avaliação mineral, a análise estatística é uma etapa importante que deve seguir a análise geoestatística. Nessa fase, a base de dados é examinada para identificar valores anômalos, pois esses dados serão usados para estimativas e inferências. Para o banco de dados do estudo em questão, não foram identificadas quaisquer inconsistências.



5.3 Composição de Amostras Naturais

A padronização do suporte dessas amostras coletadas, tratamento essencial dos dados de sondagem para fins de estimativa, foi possibilitada através do software Micromine. Os parâmetros desse processo foram determinados a partir das características dos dados. A menor amostra coletada - e que está no banco de dados do presente trabalho – possui 30 centímetros, já a maior, 3,23 metros. Os valores seguem na Tabela 2.

Tabela 2 – Banco de Dados

Comprimento Mínimo de Amostra (m)	Comprimento Máximo de Amostra (m)	Metragem Total (m)
0.3	3.23	721.13

A análise crítica da composição se baseou a partir da quantidade de amostras resultantes para cada intervalo, metragem total, média e desvio padrão dos comprimentos de cada amostra.

A seleção do tamanho da compósita ideal foi baseada principalmente na preservação do número total de amostras e sua metragem total. Como segundo critério, considerou-se a média e o desvio padrão dos comprimentos em relação às amostras originais. O histograma abaixo exemplifica o padrão de tamanho de amostras que foi utilizado para a campanha e, ao mesmo tempo, junto com a média, reforça o valor adotado de 1 metro para cada compósita.

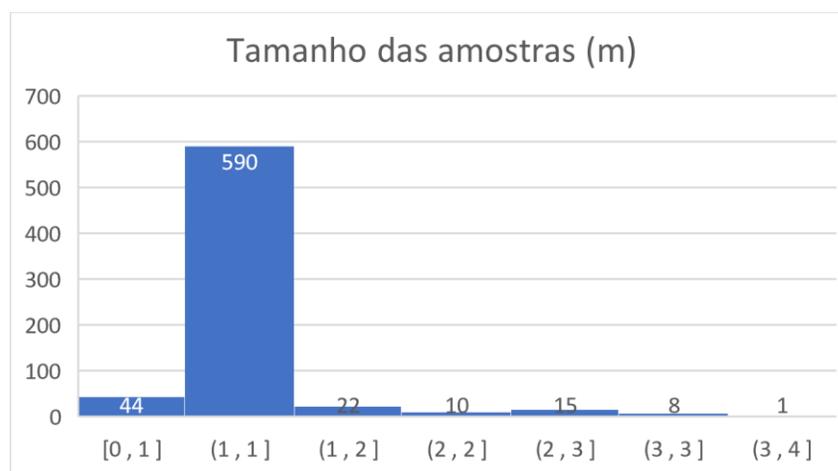


Figura 6: Histograma com os tamanhos dos intervalos das amostras (em metros).



5.4 Análise Descritiva e Exploratória dos Dados

Foi realizada a análise estatística dos teores de óxido de cromo das amostras que compõem o modelo litológico do cromitito. Somente os furos de sondagem diamantada foram considerados para análise estatística. Para realizá-la, foram gerados histograma e o sumário geoestatístico.

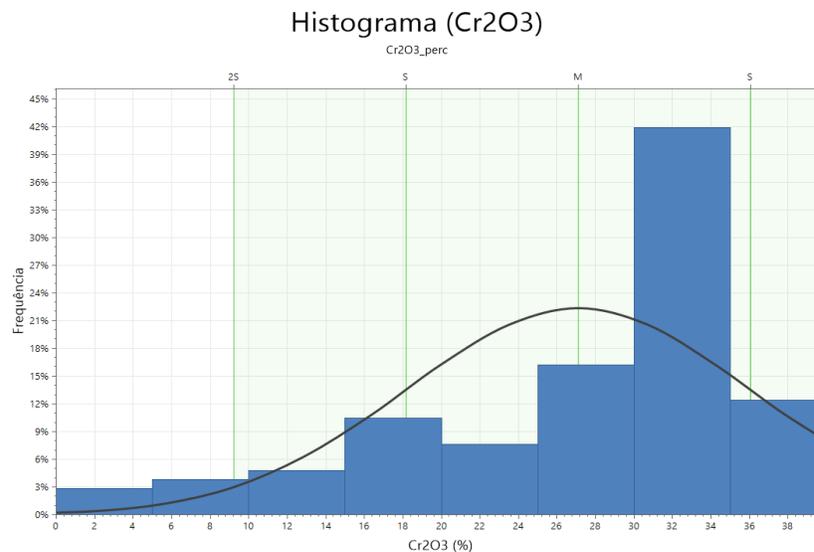


Figura 7: Histograma dos dados de óxido de cromo.

A assimetria negativa observada é caracterizada por uma grande quantidade de teores altos e alguns poucos teores baixos. Essa configuração é observada principalmente pela determinação de cutoff durante a fase da modelagem, sendo selecionado somente amostras acima do limite inferior estabelecido. Amostras de baixo teor e que estão no mesmo domínio litológico, ou entre duas amostras com teores acima do cutoff, foram incorporadas ao modelo e podem influenciar na assimetria negativa observada no histograma acima.

Os histogramas geralmente possibilitam uma visualização rápida de características importantes dos conjuntos de dados analisados, porém são apenas uma pequena parte dos valores estatísticos que caracterizam essa população de amostras. O estudo completo dessa população amostral, que possibilita a visualização dos valores de cada medida descritiva, é denominado sumário estatístico. Foram obtidas as medidas de tendência central e medidas de dispersão. A média representa o valor esperado para distribuição, que nesse caso corresponde a 27,1, já a mediana é uma medida de posição, que divide os dados em duas partes iguais. Como



o valor da mediana é igual a 30,4, sabe-se que mais da metade dos valores das amostras possuem valores maiores que a mediana. O desvio padrão (raiz quadrada da variância) calculado foi de 8,9, indicando uma distância dos dados quando comparados com a média. Essa discrepância pode sugerir a influência de outliers, que podem ser, inclusive, valores abaixo do *cutoff* estabelecido para modelagem, muitas vezes incluídos no modelo por estarem entre duas amostras que possuem teores altos e representam o mesmo domínio.

A tabela abaixo mostra os resultados do processo.

Tabela 3 – Estatística básica dos valores de óxido de cromo (Cr_2O_3)

Cr ₂ O ₃ (%)	
Valor Mínimo	0.13
Valor Máximo	37.3
Quantidade de amostras	105
Média	27.1
Variância	79.8
Desvio Padrão	8.9
Coef. De Variação	0.33
Mediana	30.4
Media Lognormal	3.2
Desvio Padrão Lognormal	0.8
Média Geométrica	23.7
Desvio Padrão Geométrico	2.1

Os valores de média e mediana apresentam valores próximos, o que pode sugerir a ausência de outliers no banco de dados.

No gráfico “Probability Plot” observam-se 3 domínios. Um de baixo teor, um de teor médio e outro com teores acima do cutoff de 15% de óxido de cromo. Pelo conhecimento da geologia local, método de lavra e venda do produto – além dos valores abaixo do cutoff representarem apenas cerca de 15% do total de amostras – foi decidido utilizar todas as amostras como uma mesma população.

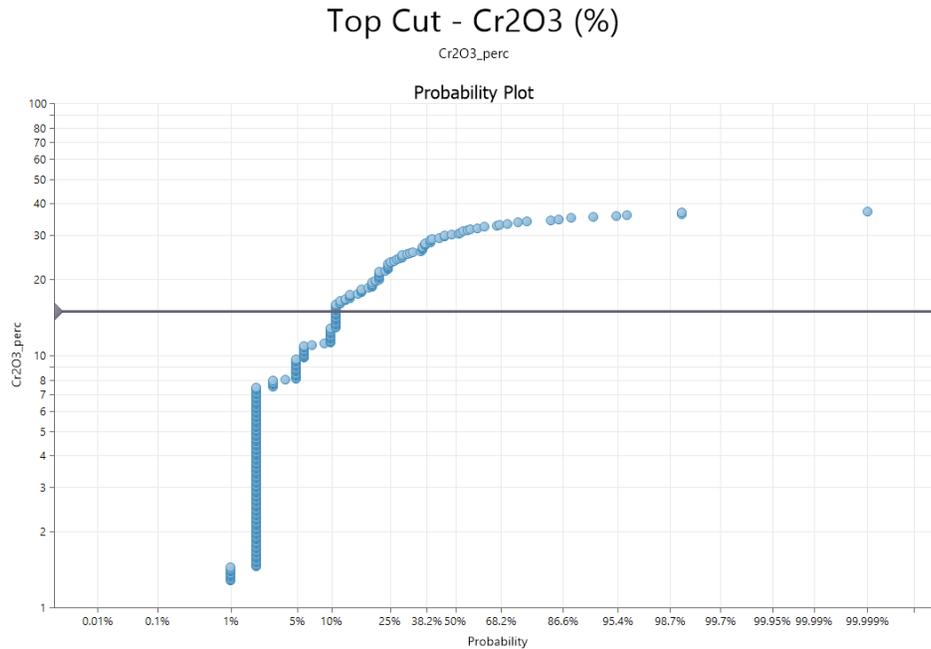


Figura 8: Probability plot com as amostras de cromita contidas no modelo geológico a ser estimado.

Uma outra maneira de se observar a população amostral é através de setores fracionados. As estatísticas descritivas de localização permitem conhecer os intervalos de valores existentes em cada quartil da distribuição dos dados, conforme tabela a seguir.

Tabela 4 – Medidas Descritivas de Localização

PERCENTIL	MÉDIA	VARIÂNCIA	%
q= 0 (mínimo)	14.043	43.199	13.32
q = 25 (Q1)	27.477	5.337	26.07
q = 50 (M)	32.607	0.883	30.94
q = 75 (Q3)	35.186	0.703	29.67

As medidas de localização possibilitam observar os valores contidos em cada posição da distribuição. A alta variância no quartil mínimo é aceitável visto que representa menos de 15% das amostras contidas no modelo, conforme indicado durante análise do histograma e, desta forma, não possui tanto impacto na variabilidade dos dados de maneira geral.



5.5 Variografia

Por meio da observação e análise dos dados do resumo estatístico e ao reconhecer que as amostras da população em estudo apresentavam padrões variográficos característicos de um único domínio estacionário, foi possível seguir a progressão natural no processo de análise do fenômeno. Nesse contexto, procurou-se identificar tendências e semelhanças entre os valores das amostras e as estruturas de continuidade. Foi aplicado um variograma omnidirecional, que depende exclusivamente do comprimento do vetor h (JOURNEL, 1989), englobando todas as direções possíveis e gerando variogramas que refletem a continuidade sem especificar a orientação, uma vez que o depósito ainda carece de informações mais específicas quanto às suas características anisotrópicas.



Figura 9: Semi variograma omnidirecional.

A variância mínima define a variabilidade intrínseca da variável e foi determinada a partir do variograma downhole, representando a variância do primeiro lag identificado (35). A partir desse variograma, também foi identificado um valor de alcance no eixo vertical do fenômeno (3m), definido pela distância em que o gráfico deixa de ter um movimento ascendente e passar a ter um movimento descendente, conforme a figura a seguir.

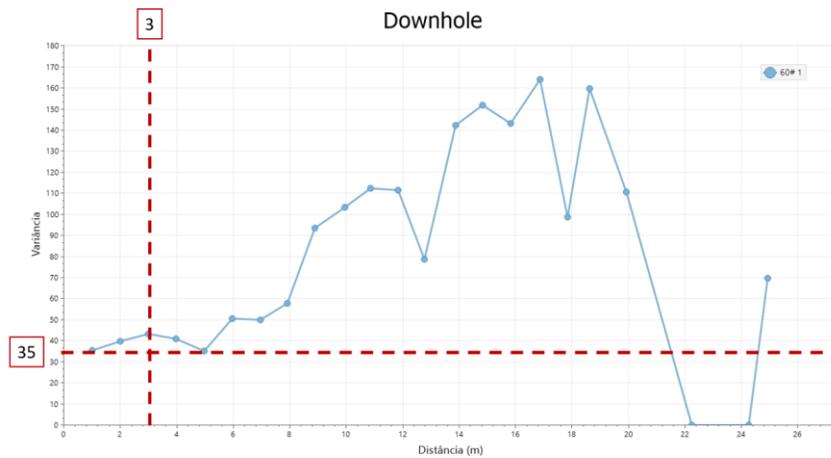


Figura 10: Semi variograma downhole.

A baixa distância do semi variograma downhole sugere que há pouca ou nenhuma relação de continuidade entre os teores dentro de um mesmo furo, o que pode ser evidenciado, também, através da avaliação visual da quantidade de cromita que se dissipa à medida com que se aproxima do contato litológico.

Através de mapeamentos geológicos na região de estudo e da construção do modelo litológico, foi possível a criação de variogramas nas direções do strike e do dip do corpo mineralizado.

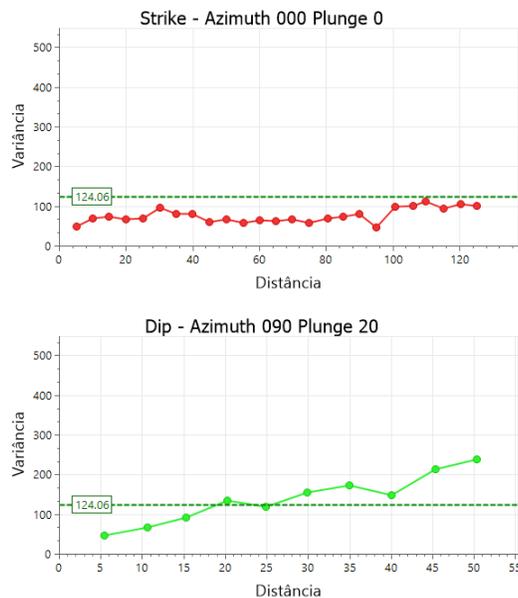


Figura 11: Semi variogramas nos eixos do strike e dip.



A necessidade de ajustar uma função matemática que descreva continuamente a variabilidade ou correlação espacial entre os dados surge devido ao variograma experimental ser uma função discreta, ou seja, ter valores definidos e só se conhecer a variância espacial para cada passo. Os modelos teóricos de variograma, por sua vez, não passam de uma função matemática que transforma o variograma experimental em uma função contínua. O ajuste do variograma experimental foi realizado com o objetivo de fazer com que a função do variograma incidisse principalmente nos pontos com maiores quantidades de pares de amostras. Os dados considerados no ajuste foram:

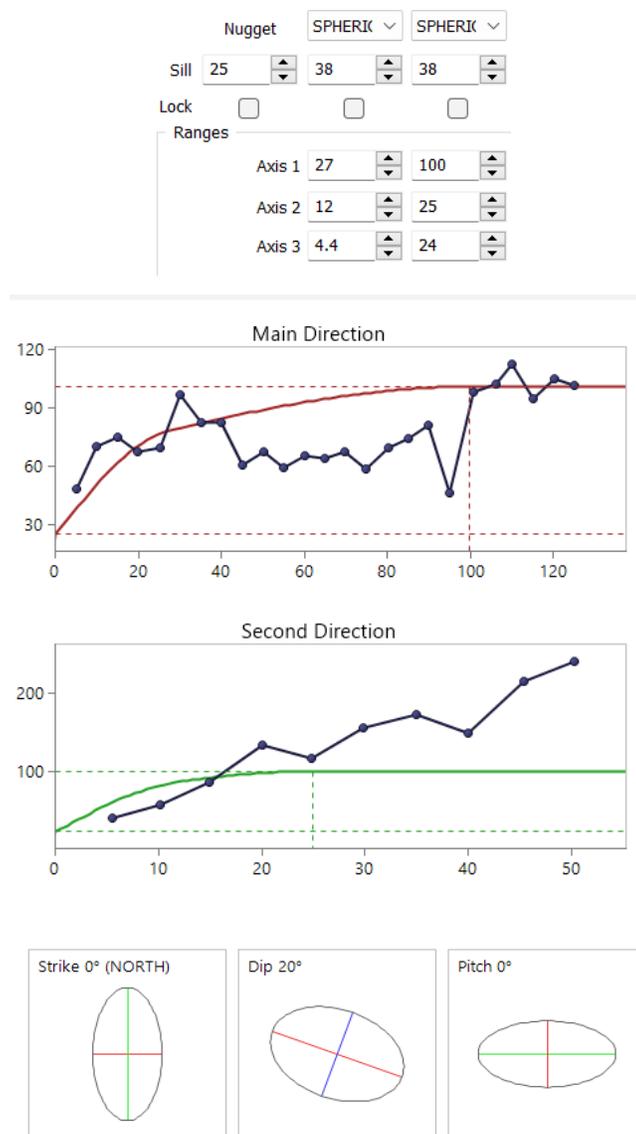


Figura 12: Modelos teóricos de variogramas obtidos.



5.6 Estimativas de Teores

Com base nos trabalhos de perfuração anteriores na jazida de cromita, verificou-se que há uma boa presença de cromita nas amostras. Análises químicas de laboratório identificaram média de teor de cromita próxima a 34%. De acordo com os preços atuais do produto e custos de produção, esse percentual é considerado como teor médio a alto.

O levantamento topográfico, mapeamento geológico, resultados de perfuração e amostragem química foram usados como base para estimar os teores de óxido de cromo no depósito de Mahra. Os dados foram integrados para estabelecer a continuidade da cromita no subsolo e estimar a quantidade do recurso. A modelagem da estimativa foi desenvolvida utilizando o software Micromine 2023.5.

5.6.1 Krigagem Ordinária

A aplicação da Krigagem ocorre após a conclusão dos estudos geoestatísticos que determinam a viabilidade desse método. Para estimar os teores de Cr_2O_3 no depósito, optou-se pelo uso da Krigagem Ordinária. Essa técnica se mostra eficaz na previsão de valores em pontos amostrados em uma grade regular, especialmente quando há uma alta dispersão. Embora a abordagem inclua um efeito de suavização que resulta em menor precisão global, ela é amplamente empregada e desempenha um papel crucial na estimativa de recursos minerais, oferecendo uma precisão global excelente. O resultado deste método pode ser visualizado através do modelo de blocos.

Para o presente estudo, foi determinado blocos regulares com dimensões 1m x 1m x 1m para que possa melhor se adequar ao corpo mineralizado e, também, ao intervalo amostral compositado. O modelo de blocos com teores estimados de cromo pode ser visualizado a seguir.

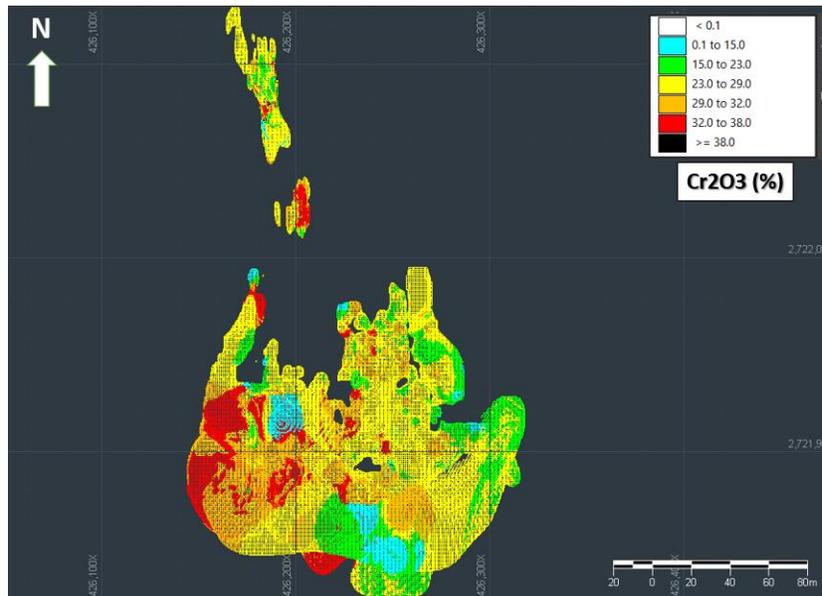


Figura 13: Modelo de blocos do depósito e seus teores de óxido de cromo, após estimativa.

5.6.2 Validação visual

Após a estimativa, foi realizada algumas validações, incluindo a validação visual. Nela, observa-se que os valores da krigagem apresentaram boa correlação com os valores amostrados. As áreas em que não foram estimadas não obedeceram aos critérios de busca.

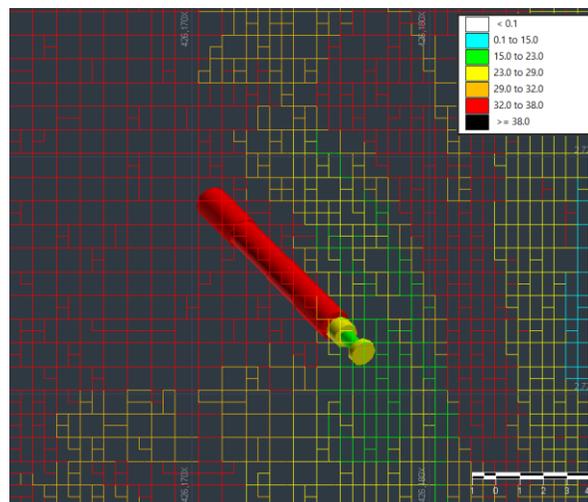


Figura 14: Validação visual comparando furo compositado vs modelo de blocos. Visão em mapa.

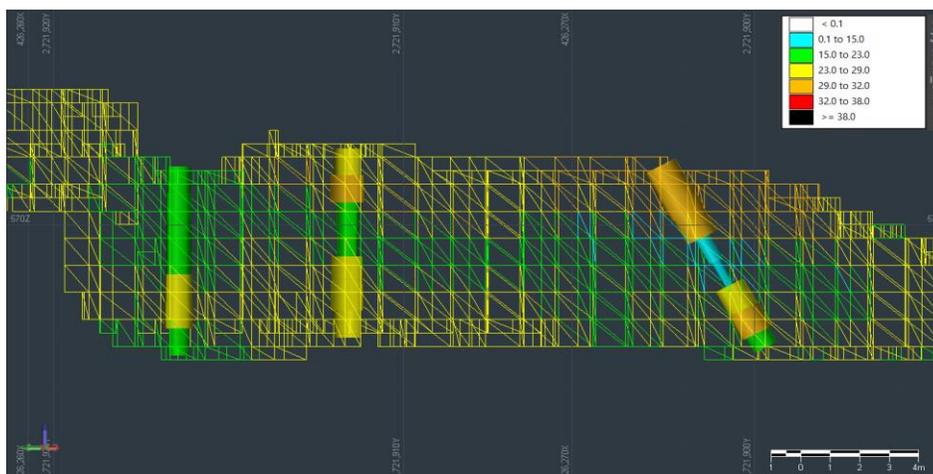


Figura 15: Validação visual comparando furo compositado vs modelo de blocos. Visão seccional, olhando para NE.

6. CONCLUSÕES

O processo de compositagem não teve impacto no centro da distribuição dos dados, e a pequena diferença entre os valores de média e mediana do teor sugere que não houve influência de outliers. No entanto, o teor do recurso, considerado baixo a médio após a estimativa, pode ter sido afetado pela abordagem de tratar os dados como um único domínio, misturando amostras de alto teor com amostras de teores inferiores. Portanto, a remodelagem do recurso, considerando diferentes domínios dentro do mesmo pacote litológico, deve resultar em maior seletividade e, conseqüentemente, em teores mais precisos.

A escassez de furos de amostragem pode ter afetado a escolha dos parâmetros variográficos, tornando-os menos adequados para a estimativa. Além disso, a baixa distância do semivariograma downhole sugere que há pouca ou nenhuma continuidade espacial entre os teores dentro de um mesmo furo. No entanto, os valores de média e mediana são próximos, o que sugere a ausência de outliers no banco de dados.

A alta variância no quartil mínimo é aceitável, uma vez que representa menos de 15% das amostras contidas no modelo, conforme indicado na análise do histograma, e, portanto, tem um impacto limitado na variabilidade dos dados de maneira geral. Os valores mais elevados estão concentrados no quartil superior. A moda é pouco relevante na geoestatística, pois está



relacionada à configuração do intervalo de frequência e pode ser modificada conforme necessário.

A validação visual é uma prática essencial que, quando realizada corretamente, pode detectar problemas desde o início do processo de estimativa do recurso. Foram identificadas estruturas de continuidade do fenômeno estudado, e o teor médio global do depósito é de cerca de 28%, o que sugere um potencial para a mineração subterrânea. No entanto, é recomendável realizar um estudo de malha ótima para o recurso a fim de otimizar o processo de exploração.



7. REFERÊNCIAS

BELGRANO, T. M., Diamond, L. W., Vogt, Y., Biedermann, A. R., Gilgen, S. A., and Al-Tobi, K.: A revised map of volcanic units in the Oman ophiolite: insights into the architecture of an oceanic proto-arc volcanic sequence, *Solid Earth*, 10, 1181–1217, <https://doi.org/10.5194/se-10-1181-2019>, 2019.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The variogram and punctual kriging. *Journal Soil Science*, Chichester, v. 31, n. 2, p. 315-331, 1980.

COLEMAN, Robert G. Tectonic setting for ophiolite obduction in Oman. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 86, n. B4, p. 2497-2508, 1981.

FURUIE, R. D. A. Estudo comparativo de métodos geoestatísticos de estimativas e simulações estocásticas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Paulo. São Paulo, p. 183. 2009.

GY, P. **Sample preparation.** In: **Computer Methods for the'80s.** New York: American Institute of Mining Engineers, 1979. p. 163-169.

HALDAR, S. K. **Statistical and geostatistical applications in geology.** In: mineral exploration: principles and applications. Waltham: Elsevier, p. 157-82, 2013.

ISAAKS, Edward H.; SRIVASTAVA, Mohan R. **Applied geostatistics.** 1989.

JOURNEL, Andre G.; JOURNEL, André G. Fundamentals of geostatistics in five lessons. Washington, DC: American Geophysical Union, 1989.

MATHERON, Georges. **Principles of geostatistics.** *Economic geology*, v. 58, n. 8, p. 1246-1266, 1963.



MATHERON, Georges. **The selectivity of the distributions and “the second principle of geostatistics”**. In: Geostatistics for natural resources characterization. Springer, Dordrecht, 1984. p. 421-433.

Roberts S (1986) The role of igneous processes in the formation of ophiolitic chromitite. PhD Thesis, Open University, Milton Keynes

ROSSI, Mario E.; DEUTSCH, Clayton V. **Recoverable Resources: Estimation**. In: Mineral Resource Estimation. Springer, Dordrecht, 2014. p. 133-150.

SINCLAIR, Alastair J.; BLACKWELL, Garston H. **Applied mineral inventory estimation**. Cambridge University Press, 2006.

TILTON, G. R.; HOPSON, C. A.; WRIGHT, J. E. Uranium-lead isotopic ages of the Samail ophiolite, Oman, with applications to Tethyan ocean ridge tectonics. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, v. 86, n. B4, p. 2763-2775, 1981.

TIPPIT, P. R.; PESSAGNO JR, E. A.; SMEWING, J. D. The biostratigraphy of sediments in the volcanic unit of the Samail ophiolite. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, v. 86, n. B4, p. 2756-2762, 1981.

YAMAMOTO, J. K. A Review of Numerical Methods for the Interpolation of Geological Data. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 70, 1998. ISSN 1.