

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Engenharia de Minas
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais

Ariane Raissa Pinheiro Côrtes

MODELAGEM E ANÁLISE DE ESTIMADORES LINEARES
APLICADOS SOBRE VARIÁVEIS GEOMETALÚRGICAS

Belo Horizonte

2022

Ariane Raissa Pinheiro Côrtes

**MODELAGEM E ANÁLISE DE ESTIMADORES LINEARES
APLICADOS SOBRE VARIÁVEIS GEOMETALÚRGICAS**

Versão Final

Monografia de especialização apresentada ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Pedro Henrique Alves Campos

Belo Horizonte

2022



ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DA ALUNA ARIANE RAISSA PINHEIRO CORTES

Realizou-se, no dia 29 de agosto de 2022, às 09:00 horas, na Plataforma Teams, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa da Monografia, intitulada **“Modelagem e análise de estimadores lineares para predição de propriedades geometalúrgicas”**, apresentada por ARIANE RAISSA PINHEIRO CORTES, número de registro 2020719961, graduada no curso de GEOLOGIA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof. Pedro Henrique Alves Campos - Orientador, Prof. Pedro Benedito Casagrande (Universidade Federal de Minas Gerais), Prof. Douglas Batista Mazzinghy (Universidade Federal de Minas Gerais).

A Comissão considerou a defesa do artigo:

Aprovada

Reprovada

Nota: 95

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Prof. Pedro Henrique Alves Campos (Mestre)

Prof. Pedro Benedito Casagrande (Doutor)

Prof. Douglas Batista Mazzinghy (Doutor)

Risia Magriotis Papini
Coordenadora do Curso de Especialização
em Engenharia de Recursos Mineirais

Aurea Domingos
Secretaria do Curso de Especialização
em Engenharia de Recursos Mineirais

RESUMO

Atividades de modelagem e estimativa de teores são essenciais e rotineiramente aplicadas na indústria mineira para o propósito de avaliação de recursos minerais, planejamento econômico e estratégico de lavra à curto, médio e longo prazos e dimensionamento de parâmetros para operação. A inclusão de variáveis geometalúrgicas no modelo de blocos – como dados de recuperação e teores no rejeito da flotação - sinaliza materiais potencialmente deletérios no beneficiamento mineral que, quando devidamente programados em *blend* adequado, podem viabilizar seu aproveitamento e otimizar a produção. Assim como para interpolação clássica de teores, a geoestatística pode ser utilizada como ferramenta para popular os blocos com a estimativa de variáveis geometalúrgicas. Entretanto, o desafio é apresentado na escolha de um método adequado que possa respeitar a condição de não aditividade desse tipo de variável, uma vez que não é possível calcular um valor médio que possa caracterizar de forma fidedigna um ponto não amostrado. Apesar da limitação de métodos de estimativa lineares na quantificação dessas variáveis, este estudo propõe a análise de sua utilização para fins qualitativos e comparação dos resultados obtidos entre interpoladores clássicos, uma vez que são amplamente conhecidos e rotineiramente utilizados na indústria. Como estudo de caso foram selecionadas duas áreas distintas da Mina Morro do Ouro, de atual propriedade da Kinross Gold, cuja tentativa de elaboração de modelos geometalúrgicos foi motivada pela presença de material argiloso potencialmente deletério. O método de vizinho mais próximo é o que mais preserva a ocorrência de valores extremos e que, em uma malha de sondagem ótima, pode melhor representar numericamente a característica geometalúrgica de determinado material.

Palavras-chave: geometalurgia, recuperação, estimativa, modelagem, interpolação linear.

ABSTRACT

Modeling activities and grade estimation are essential and routinely applied in the mining industry to evaluate mineral resources, economic and strategic planning of mining in the short, medium, and long terms, and to choose the best operations parameters. The addition of geometallurgical variables in the block model – such as recovery data and flotation tailings grades – make it a potentially deleterious material in mineral processing which, when properly programmed in an appropriate *blend*, can enable its use, and optimize production. As well as for classical interpolation of grade, geostatistics can be used as a tool to stamp blocks with the estimation of geometallurgical variables. However, the challenge is presented in the choice of an appropriate method that can respect the condition of non-additivity of this type of variable, since it is not possible to calculate an average value that can accurately characterize an unsampled point. Despite the limitation of linear estimation methods in the quantification of these variables, this study proposes the analysis of its use for qualitative purposes and comparison of the accuracy of the estimation between classical interpolators, widely known and used in the industry. As a case study, two distinct areas of the Morro do Ouro Mine were selected, the current property of Kinross Gold, whose attempt to develop geometallurgical models was motivated by the presence of potentially deleterious clay material. The nearest neighbor method is the one that best preserves the occurrence of extreme values and represents numerically the geometallurgical characteristic of a material, but in an ideal drilling grid.

Key-words: geometallurgy, recovery, estimation, modelling, linear interpolation.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 - Localização da Área de Estudo. Fonte: Relatórios Internos Kinross.	14
Figura 3.2 - Mapa geológico com as unidades do domínio central e o sistema de dobras continentais da Faixa Brasília, com destaque para a Mina Morro do Ouro (bolinha azul) (modificado de Oliver <i>et. al.</i> , 2015).	16
Figura 3.3 - Afloramento do filito carbonoso fresco da Mina Morro de Ouro, com exemplo de boudin de quartzo. À direita, detalhe dos sulfetos que ocorrem associados com a mineralização de ouro.	17
Figura 3.4 – Seção esquemática do perfil intempérico da Mina Morro do Ouro, com exemplos de fotos de testemunhos e frente de lavra subdividida nas diversas unidades.	18
Figura 6.1 - Distribuição dos furos de sondagem/amostras na Área 1. Em azul, as amostras inseridas em rocha fresca e, em laranja, as amostras inseridas no oxidado. ...	29
Figura 6.2 - Distribuição dos furos de sondagem/amostras na Área 2. Em azul, as amostras inseridas em rocha fresca e, em laranja, as amostras inseridas no oxidado. ...	30
Figura 6.3 - Sólidos resultantes da modelagem geológica do perfil de intemperismo no boundary limite de modelagem e, na direita, no boundary da Área 1 com topografia aplicada.	30
Figura 6.4 - Sólidos resultantes da modelagem geológica do perfil de intemperismo no boundary limite de modelagem considerado para a Área 2.	31
Figura 6.5 - Seções verticais W-E ilustrando a modelagem do perfil intempérico na Área 1 e a diferença dos contatos antigos e novo entre o oxidado e a rocha fresca.	32
Figura 6.6 - Seções verticais NE-SW ilustrando a modelagem do perfil intempérico na Área 2 e a diferença dos contatos antigos e novo entre o oxidado e a rocha fresca.	33
Figura 6.7 - Sólidos resultantes da modelagem geológica da argila e refinamento em pouca, média e alta quantidade na Área 1.	34
Figura 6.8 - Sólidos resultantes da modelagem geológica da argila e refinamento em pouca, média e alta quantidade na Área 2.	34
Figura 6.9 - Seções verticais W-E ilustrando a modelagem da argila na Área 1 e a diferença do contato antigo e o novo.	35
Figura 6.10 - Seções verticais NE-SW ilustrando a modelagem da argila na Área 2 e a diferença do contato antigo e o novo.	36

Figura 6.11 - Histogramas e dados estatísticos do banco de dados de geometalurgia da Área 1.	37
Figura 6.12 - Boxplot das variáveis de Au pelo modelo de perfil de intemperismo e de argila da Área 1.....	39
Figura 6.13 - Histogramas e dados estatísticos do banco de dados de geometalurgia da Área 2.	40
Figura 6.14 - Boxplot das variáveis de processo de Au pelo modelo total de argila e pelo refinado em alta, média e pouca quantidade (dado qualitativo) da Área 2.	42
Figura 6.15 - Domínios de estimativa utilizados no modelo geometalúrgico da Área 1 (de azul, o domínio de oxidado e, de vermelho, domínio de rocha fresca).	43
Figura 6.16 - Blocos estimados pela 1ª (vermelho), 2ª (verde) e 3ª busca (azul) na Área 1.	47
Figura 6.17 - Blocos estimados pela 1ª (verde), 2ª (amarelo) e 3ª busca (vermelho) na Área 2.	48
Figura 6.18 - Variogramas das variáveis geometalúrgicas relacionadas ao Ouro na Área 1.	49
Figura 6.19 - Variogramas das variáveis geometalúrgicas relacionadas ao Enxofre para a Área 1.	50
Figura 6.20 - Variogramas das variáveis geometalúrgicas relacionadas ao Ouro para a Área 2.	51
Figura 6.21 - Variogramas das variáveis geometalúrgicas relacionadas ao Enxofre para a Área 2.	51
Figura 6.22 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de ouro (Au Rec), teor de ouro no rejeito (Au Rej) e teor de ouro retrocalculado estimados por NN, ID e KO para rocha fresca da Área 1.	52
Figura 6.23 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de enxofre (S Rec), teor de enxofre no rejeito (S Rej) e teor de enxofre retrocalculado estimados por NN, ID e KO para rocha fresca da Área 1.	53
Figura 6.24 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de ouro (Au Rec), teor de ouro no rejeito (Au Rej) e teor de ouro retrocalculado estimados por NN, ID e KO para o oxidado da Área 1.....	56
Figura 6.25 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de enxofre (S Rec), teor de enxofre no rejeito (S Rej) e teor de enxofre retrocalculado estimados por NN, ID e KO para o oxidado da Área 1.....	57

Figura 6.26 - Box Plot das variáveis Au Rec e Au Rej pela quantidade de argila modelada para a Área 1.....	60
Figura 6.27 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de ouro (Au Rec), teor de ouro no rejeito (Au Rej) e teor de ouro retrocalculado estimados por NN, ID e KO para rocha fresca da Área 2.	61
Figura 6.28 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de enxofre (S Rec), teor de enxofre no rejeito (S Rej) e teor de enxofre retrocalculado estimados por NN, ID e KO para rocha fresca da Área 2.	62
Figura 6.29 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de ouro (Au Rec), teor de ouro no rejeito (Au Rej) e teor de ouro retrocalculado estimados por NN, ID e KO para o oxidado da Área 2.....	64
Figura 6.30 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de enxofre (S Rec), teor de enxofre no rejeito (S Rej) e teor de enxofre retrocalculado estimados por NN, ID e KO para o oxidado da Área 2.....	65
Figura 6.31 - Box Plot das variáveis Au Rec e Au Rej pela quantidade de argila modelada para a Área 2.....	68
Figura 6.32 - Box Plot comparativo entre métodos de estimativa empregados no trabalho para Área 1.....	69
Figura 6.33 - Box Plot comparativo entre métodos de estimativa empregados no trabalho para Área 2.....	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 6-1 - Variáveis geometalúrgicas estimadas e a metodologia utilizadas para as Áreas 1 e 2.....	45
Tabela 6-2 - Parâmetros de estimativa utilizados para as variáveis de processo na Área 1.	46
Tabela 6-3 - Parâmetros de estimativa utilizados para as variáveis de processo na Área 2.	46
Tabela 6-4 - Parâmetros de variografia utilizados para a Áreas 1.....	49
Tabela 6-5 - Parâmetros de variografia utilizados para a Área 2.	50
Tabela 6-6 - Comparação dos dados estatísticos das amostras x krigado para Área 1... 58	
Tabela 6-7 - Comparação dos dados estatísticos das amostras x krigado para Área 2... 66	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	13
3. ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTO GEOLÓGICO.....	14
4. CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA	19
4.1 Vizinho mais próximo.....	20
4.2 Inverso da Distância	21
4.3 Krigagem	22
4.4 Considerações sobre Simulação Condicional	23
5. METODOLOGIA	25
5.1 Sondagem, Descrição e Análises	25
5.2 Modelagem Geológica.....	26
5.3 Análise Exploratória dos Dados	27
5.4 Estimativa	27
5.5 Validação da estimativa e análise comparativa	28
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
6.1 Análise dos Dados	29
6.2 Modelagem Geológica.....	30
6.3 Análise Estatística dos Dados.....	37
6.4 Estimativa	43
6.4.1 Parâmetros de estimativa	44
6.4.2 Parâmetros de busca	45
6.4.3 Parâmetros de Variografia	48
6.5 Validação	52
6.6 Considerações sobre os métodos de estimativa	68
7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

1. INTRODUÇÃO

A Mina Morro do Ouro, localizada em Paracatu, noroeste do Estado de Minas Gerais, apresenta mineralizações auríferas encaixadas em sericita xistos e filitos carbonosos da Formação Paracatu. O intenso intemperismo foi responsável pela formação de um perfil oxidado classificado, da base para o topo, como zona de transição, saprólito e solo; entretanto, a maior parte da mineralização está disposta na rocha fresca sulfetada. Em áreas altamente fraturadas, a percolação de fluidos é facilitada e a intensidade da alteração hidrotermal e dos processos intempéricos são mais intensos, o que favorece a formação de material argiloso (principalmente no oxidado) e outros materiais que podem ser deletérios ou não ao processo de beneficiamento.

A lavra do minério oxidado argiloso, em particular, apresentou performances distintas na etapa de processamento mineral ao longo do tempo, pois é altamente dependente das características físico-químicas e mineralógicas das argilas e do *blend* com os demais tipos de minério presentes na mina (principalmente rocha fresca). Os principais questionamentos giram em torno da possibilidade da existência de diferentes tipos de argilas (capazes de alterar o desempenho da usina) e da proporção em massa que esse tipo de material pode ser considerado na alimentação da planta sem impactar a recuperação, bem como a relação entre esses dois fatores.

O início da lavra em novas regiões dentro da mina, sobretudo aquelas com espessura considerável de minério oxidado (minério com adequados teores e baixo Índice de Trabalho de Bond para Moagem de Bolas – BWI – Bond Work Index), foi o fator motivador inicial para o estudo do desempenho desses materiais na planta de beneficiamento. Ao longo desse estudo foi verificado que o minério fresco sulfetado também pode apresentar desempenhos distintos, apesar da ampla homogeneidade litológica, o que pode estar relacionado com regiões altamente fraturadas e intensamente alteradas.

Na Mina Morro do Ouro, a lavra é realizada concomitantemente em diversas frentes de lavra de material friável e semi-friável (minério oxidado, por vezes argiloso) e de rocha fresca (minério sulfetado). A integração de controles geológicos e metalúrgicos

vinculados a um adequado planejamento de lavra podem aprimorar o planejamento estratégico da mina a partir de uma blendagem adequada de materiais e, assim, otimizar a exploração dos recursos minerais. Para tal, é imprescindível um modelo robusto do depósito que considere variáveis geometalúrgicas para que seja possível prever com precisão a recuperação do recurso mineral na usina (Pereira, 2019).

As variáveis geometalúrgicas podem ser mapeadas no depósito mineral utilizando a geoestatística, ciência que engloba o conceito de variável regionalizada para estimar, simular e interpretar dados georreferenciados (Drumond, 2019). Apesar do uso de técnicas geoestatísticas permitir uma estimativa mais precisa e maior conhecimento da incerteza do fenômeno, a escolha do interpolador deve considerar a natureza não aditiva dessas variáveis. Em outras palavras, uma mistura de 50/50 de materiais distintos não irá gerar uma média linear (média ponderada de massa ou volume) pois um tipo de rocha pode ter mais influência na propriedade efetiva (Deutsch, 2020).

Nos últimos anos, muito tem se discutido sobre os melhores métodos de estimativa para variáveis geometalúrgicas, uma vez que muitos autores (Dunham & Vann, 2007, Deutsch et. al., 2016, Morales et. al., 2019, Deutsch, 2020) indicam a baixa confiabilidade dos resultados a partir da aplicação direta de técnicas de krigagem e de demais interpoladores lineares. Nesse contexto, a geração de um modelo geometalúrgico pode ser uma tarefa altamente complexa, uma vez que a condição de não aditividade deve ser respeitada utilizando metodologias adequadas para estimar as variáveis geometalúrgicas (Pereira, 2019).

Além de não aditiva, variáveis geometalúrgicas como recuperação são uma resposta do volume processado na planta. O trabalho de Campos *et. al.* (2021) discute os impactos de tais características na mistura de diferentes *blends* e na estimativa dessas variáveis no modelo de blocos, principalmente no uso de modelos de regressão de uma variável primária (como teor) x recuperação. Segundo os autores, dependendo da combinação entre o volume alimentado x tamanho do bloco, o comportamento do modelo de regressão e as variáveis primárias utilizadas na correlação com a recuperação metalúrgica, as características de não aditividade e de suporte podem ter (ou não) grande impacto na estimativa da recuperação global e, conseqüentemente, nos resultados financeiros do projeto.

Por serem naturalmente mais complexos, os métodos de predição mais adequados para variáveis não aditivas – tais como *machine learning* e simulação condicional – requerem conhecimento técnico mais avançado e maior capacidade e tempo de processamento e, por essas razões, ainda não são rotineiramente utilizadas na indústria.

Apesar de não serem os métodos conceitualmente adequados para quantificação de variáveis geometalúrgicas, os interpoladores lineares são amplamente conhecidos e empregados no dia a dia da maioria dos empreendimentos mineiros. Na impossibilidade de aplicação dos métodos que respeitem a condição de não aditividade, é importante compreender a diferença entre os resultados obtidos pelos diversos interpoladores lineares e discorrer sobre a utilização destes em análises mais generalistas, que possam atuar como um guia qualitativo da lavra, por exemplo.

2. OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é a comparação de distintos métodos de estimativa lineares para variáveis geometalúrgicas nos perfis de oxidado e de rocha fresca utilizando, como estudo de caso, duas regiões específicas da Mina Morro do Ouro localizada em Paracatu/MG.

Cabe ressaltar que este trabalho não visa promover a utilização de interpoladores lineares como os métodos mais adequados para obter uma estimativa acurada e menos enviesada possível desse tipo de variável, tampouco que os resultados sejam passíveis de serem considerados no planejamento estratégico e financeiro do negócio. Apesar de não serem os métodos conceitualmente mais adequados na estimativa de variáveis não aditivas, este trabalho propõe sua utilização para análises mais qualitativas e generalistas, que possam auxiliar decisões rotineiras de curto prazo.

A principal finalidade da utilização desse tipo de dado é otimizar a exploração dos recursos minerais e fornecer previsibilidade sobre o desempenho do material para o planejamento de lavra a partir de técnicas de estimativa que são amplamente conhecidas e utilizadas no dia a dia da mina, e que não requerem esforço adicional para serem aplicadas.

Para tal, foram estabelecidos alguns objetivos específicos:

- Modelagem do perfil de intemperismo;
- Modelagem do corpo de material argiloso;
- Estimativa das principais variáveis geometalúrgicas por meio de métodos clássicos de interpolação;
- Comparação e análise de acurácia entre métodos de interpolação lineares na estimativa de variáveis não-aditivas.

3. ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTO GEOLÓGICO

A Mina Morro do Ouro é uma mina de ouro a céu aberto localizada na região de noroeste do Estado de Minas Gerais, mais precisamente no município de Paracatu (Figura 3.1). O município está localizado a aproximadamente 230km à sudeste de Brasília e 480km à noroeste de Belo Horizonte. A propriedade está centrada a aproximadamente 17°13'15" de latitude S e 46°52'30"W de longitude e é facilmente acessível por estrada a partir do trecho urbano de Paracatu.

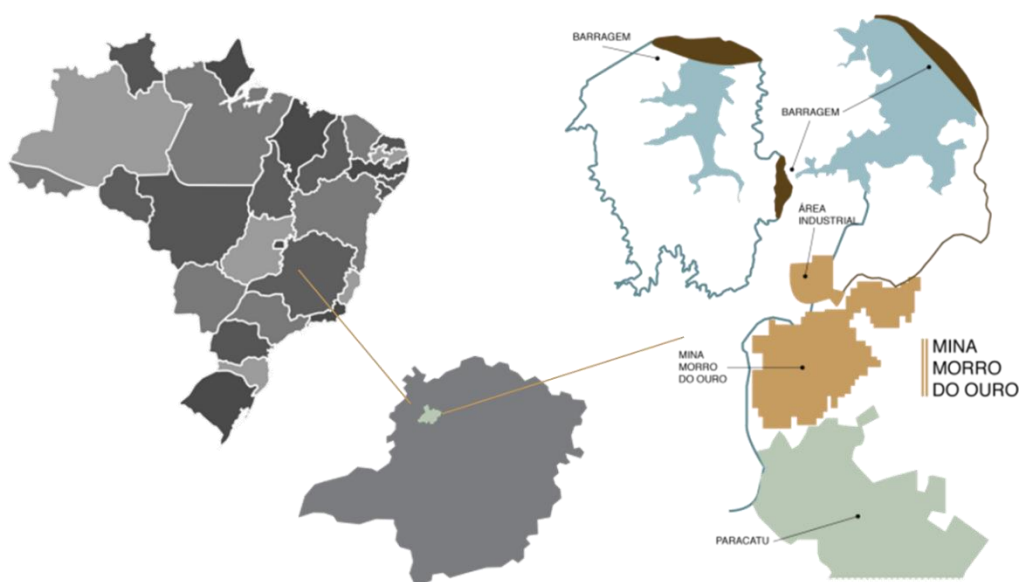


Figura 3.1 - Localização da Área de Estudo. Fonte: Relatórios Internos Kinross.

As operações incluem mineração a céu aberto com *shovel*, pá carregadeiras e caminhões, operações de reprocessamento de rejeitos e duas plantas de processo com extração de ouro usando processos de recuperação por gravimetria/flotação/lixiviação de carbono. A mina de Paracatu produziu 150.919 onças de ouro equivalentes no segundo trimestre de 2021 e 277.466 onças de ouro equivalente no primeiro semestre do ano (Brasil Mineral, 2021). Segundo o site oficial da empresa, a Kinross é responsável por 22% da produção nacional de ouro.

A história da mineração da região de Paracatu remonta ao século XVIII com a descoberta de depósitos aluvionares pelos bandeirantes portugueses. A produção de ouro diminuiu acentuadamente durante a primeira década do século XIX e, a partir daí, foi

limitada à mineração garimpeira praticada pelos habitantes locais. As operações economicamente viáveis foram limitadas devido à natureza de baixo teor das jazidas.

A partir de 1970, Paracatu atraiu atenção de empresas de exploração mineral que procuravam depósitos de chumbo e zinco. Em 1984, a Riofinex do Brasil (subsidiária da Rio Tinto) iniciou um programa de exploração de superfície com foco nos horizontes oxidados e intemperizados da área do Morro do Ouro. A produção em Paracatu começou em outubro de 1987 com o tratamento de minério oxidado, sendo a primeira barra de ouro produzida em dezembro de 1987. A Kinross adquiriu o projeto no ano de 2003.

No que concerne ao contexto geológico, Paracatu está localizada na Faixa Brasília, faixa neoproterozóica com *trend* norte-sul que se estende ao longo do oeste do Cráton São Francisco (Figura 3.2). As unidades sedimentares foram em sua maioria preservadas na parte norte do cinturão, enquanto na parte sul, onde se localiza Paracatu, há intensa deformação e metamorfismo, e os contatos entre unidades metassedimentares são principalmente tectônicos. Uma série de falhas de cavalgamento de *trend* leste-nordeste foi desenvolvida extensivamente ao longo do cinturão. O grau metamórfico aumenta em direção ao oeste à medida que aumenta a espessura do cinturão de dobramentos. O tempo de deformação é estimado em 800 Ma a 600 Ma, que coincide com o ciclo orogênico Brasileiro.

A geologia local é composta por rochas metassedimentares arenosas e xistosas, metamorfoseadas para grau xisto verde, do Grupo Canastra (Proterozóico Superior). Ao redor de Paracatu, o Grupo Canastra é subdividido da base para o topo nas Formações Serra do Landim, Formação Paracatu e Formação Chapada dos Pilões, separadas umas das outras por falhas de empurrão.

A Formação Serra do Landim é composta por calcifilitos ou calcixistos com lentes de mármore e calcário. A Formação Paracatu engloba um Membro basal denominado Morro do Ouro que consiste em filitos carbonosos escuros (expostos ao longo da porção centro-sul da Faixa Brasília) e o Membro Serra da Anta, composto predominantemente por filitos sericíticos. Ambos os filitos apresentam intercalações de quartzitos de granulação fina. A Formação Serra dos Pilões, por sua vez, inclui o Membro basal Serra da Urucânia que consiste em uma sucessão de quartzitos e filitos e o Membro

Hidroelétrica Batalha superior, composto por quartzitos de grão fino e filitos de estratificação fina.

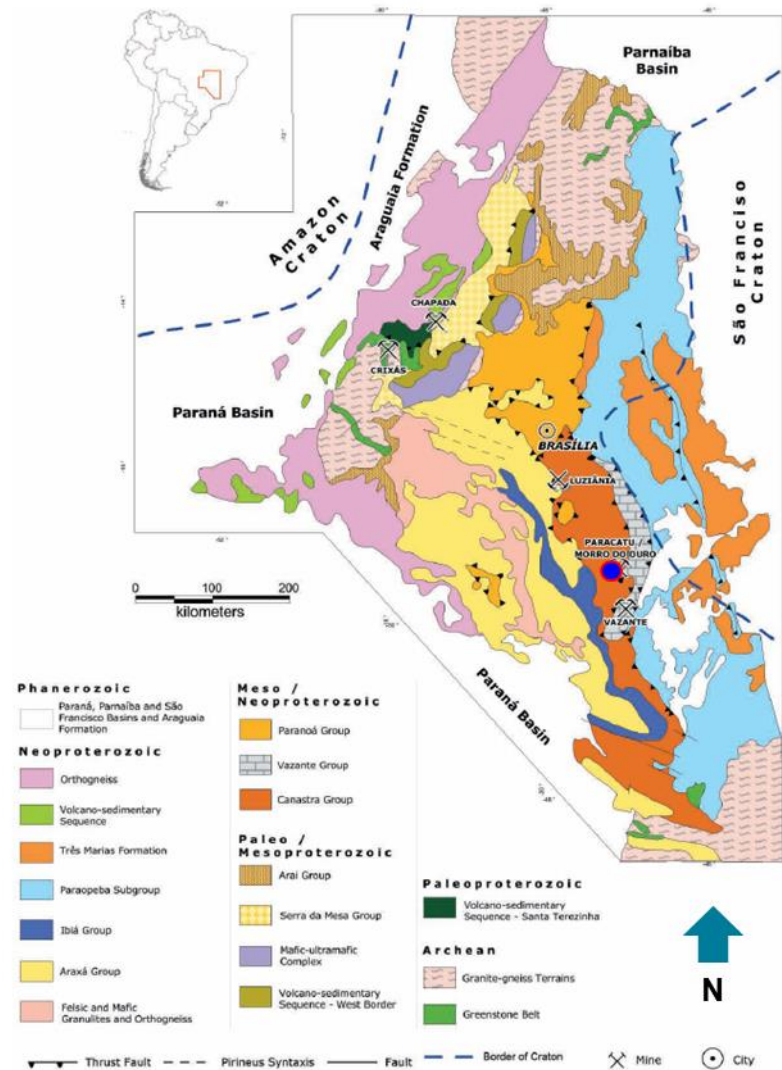


Figura 3.2 - Mapa geológico com as unidades do domínio central e o sistema de dobras continentais da Faixa Brasília, com destaque para a Mina Morro do Ouro (bolinha azul) (modificado de Oliver *et. al.*, 2015).

O modelo genético do depósito é classificado como ouro metamórfico, com mineralização aurífera finamente disseminada hospedada em rochas metassedimentares. As rochas hospedeiras são os filitos da parte basal da Formação Paracatu, intensivamente alterados devido processos hidrotermais do metamorfismo regional. A mineralização em Paracatu está intimamente relacionada a um período de deformação dúctil, cisalhamento e falhamento de empurrão. No geral, a sequência do Morro do Ouro foi empurrada para nordeste. Dobras isoclinais intensas e de baixo ângulo são comumente observadas. A

mineralização mergulha para o oeste sudoeste em 15° a 20° e há dobras secundárias com planos axiais atingindo o noroeste.

A mineralização do ouro foi introduzida *sin-tectonicamente* como resultado da alteração metamórfica durante o empurrão da Sequência Morro do Ouro sobre as rochas da Formação Vazante. Muito possivelmente a mineralização foi precipitada dentro de uma zona de alta tensão onde a sílica e o carbonato foram depletados dos filitos hospedeiros. Esse processo resultaria em um aumento no teor de grafite, que pode ter agido como uma armadilha química e possibilitado a precipitação de ouro e sulfeto que foram remobilizados com o metamorfismo do Membro Morro do Ouro.

Na região de estudo, os filitos apresentam *boudins* de quartzo bem desenvolvidos e mineralização de sulfetos associada (arsenopirita, pirita, pirrotita, esfalerita, galena e calcopirita), assim como pode ser observado na Figura 3.3. O depósito tem extraordinária continuidade lateral e longitudinal. Minerais de sericita são comuns, provavelmente como resultado de extensas alterações metamórficas das rochas hospedeiras. As feições sedimentares primárias e os planos de estratificação são facilmente reconhecíveis, mas são intensamente deformados por empurrões - particularmente ao longo dos planos de estratificação - e pelo desenvolvimento de estruturas sigmoidais e boudinagem.



Figura 3.3 - Afloramento do filito carbonoso fresco da Mina Morro de Ouro, com exemplo de boudin de quartzo. À direita, detalhe dos sulfetos que ocorrem associados com a mineralização de ouro.

A alteração intempérica sobre os filitos carbonosos foi responsável pela formação de um perfil oxidado de 40m a 60m de espessura que é classificado, da base para o topo, como zona de transição, saprólito e solo. A zona de transição é representada por rocha alterada que adquire características cada vez mais semelhantes à rocha fresca quanto mais

próximo ao contato. O grau de intemperismo no saprólito é maior, mas ainda é possível reconhecer estrutura de rocha e algumas porções mineralizadas. O solo é diferenciado dos demais pela rocha totalmente decomposta e presença de matéria orgânica.

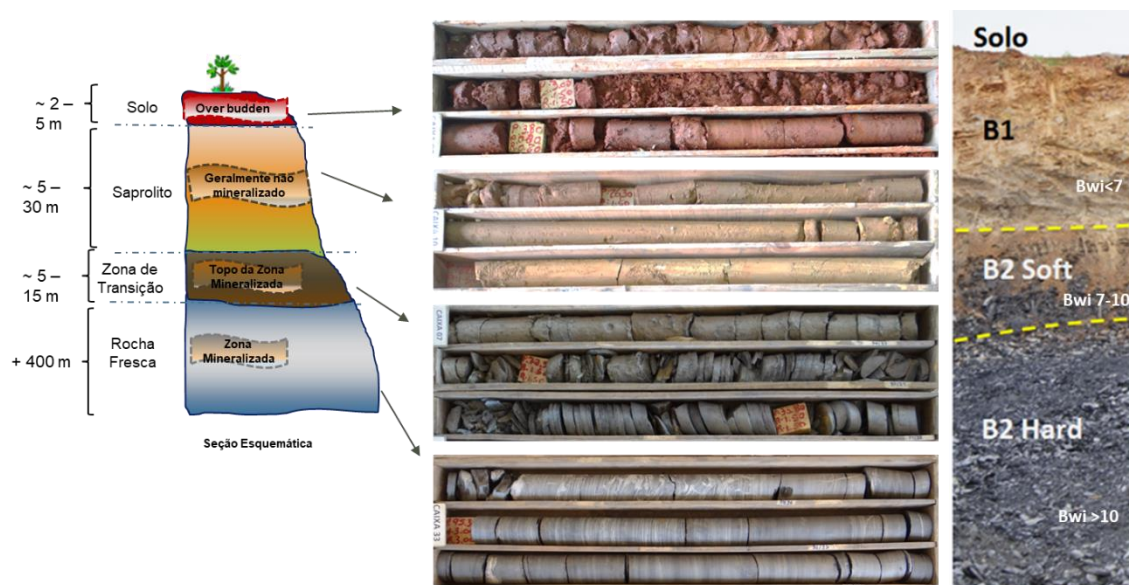


Figura 3.4 – Seção esquemática do perfil intempérico da Mina Morro do Ouro, com exemplos de fotos de testemunhos e frente de lavra subdividida nas diversas unidades.

As unidades oxidadas são por vezes caracterizadas por material argiloso, fruto de intensa percolação de fluidos em regiões altamente fraturadas. A argila é parte importante do *blend* da lavra, pois pode compor minério de alto teor e baixo BWI. Apesar disso, pode conter minerais que podem ser deletérios no processamento mineral e que podem ser mapeados com ajuda da geometalurgia.

4. CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

A atividade de modelagem e estimativa de recursos minerais é realizada em um empreendimento mineiro a partir dos teores do minério – definidos por análises químicas – e da construção de um modelo de blocos 3D que contém informações geológicas e a química do minério (Ferreira, 2018). Variáveis químicas são do tipo lineares, ou seja, o teor final (ou propriedade da rocha) de uma mistura de diferentes tipos de materiais rochosos é obtido a partir de uma média ponderada de massa ou volume (Deutsch, 2020).

Para a interpolação de teores de variáveis químicas, podem ser utilizados os métodos clássicos de vizinho mais próximo, inverso da distância ou da krigagem. A krigagem, em particular, é o mais indicado para determinar o valor médio esperado dos blocos utilizando dados amostrais, pois considera o modelo de continuidade espacial (Caixeta, 2015).

A complexidade de certos depósitos - principalmente aqueles com alta variabilidade e de baixos teores, como no caso da Mina Morro do Ouro – reforça a necessidade de modelos mais robustos que considerem variáveis provenientes da caracterização do minério, obtidas através de ensaios realizados em escala de laboratório (Ferreira, 2018). A partir desse conhecimento, é possível prever o desempenho do minério antes da sua entrada na usina para o planejamento de *blends* que possam otimizar a produção.

Nesse contexto, programas de geometurgia que englobam a integração de conhecimento geológico, mineralogia, processamento mineral e metalurgia visam a construção de um modelo espacialmente baseado na gestão da produção, capaz de prever quantitativamente a qualidade dos concentrados e rejeitos, desempenho metalúrgico como recuperações metalúrgicas e rendimento (Lishchuk et. al., 2015).

Para Deutsch et. al. (2016), as propriedades metalúrgicas de interesse incluem aquelas que medem produção, recuperação de metais, consumo de energia (índices de cominuição) e consumo de reagentes, entre outros. Na Mina Morro do Ouro, as variáveis analisadas pelo laboratório de processos incluem o teor de ouro e de enxofre no rejeito, a

recuperação de ouro e de enxofre, o teor retro calculado de ouro e enxofre da alimentação e o BWI, todas medidas a partir de amostras de 12m que respeitam as cotas das bancadas de lavra.

Ao contrário das variáveis químicas, variáveis metalúrgicas são caracterizadas pela sua condição de não linearidade. Médias não lineares não podem ser tomadas a partir de uma ponderação, uma vez que um tipo de rocha pode ter maior influência na propriedade efetiva de uma dada composição com diferentes materiais combinados. A combinação de rochas com diferentes valores de BWI dentro do moinho, por exemplo, não resultará em um material com BWI médio, mas significará que o material com maior BWI pode ter mais chances em configurar uma maior carga circulante, enquanto o de menor BWI poderá ser processado mais rapidamente.

Assim como supracitado, o método da krigagem é amplamente eficiente na interpolação de variáveis químicas, mas devido ao efeito de suavização da média pode não ser eficiente em reproduzir as estatísticas globais e espaciais do depósito (Caixeta, 2015). Segundo Deutsch (2020), o modelo krigado de uma variável não linear poderia ser utilizado para visualizar a estrutura espacial, mas é tendencioso para quaisquer cálculos de engenharia subsequentes.

Variáveis não lineares são cada vez mais abordadas dentro da geoestatística, apesar de ainda existirem dúvidas sobre a melhor abordagem de estimativa. Apesar da quantificação desse tipo de variável não ser recomendada através do uso de métodos lineares, neste trabalho foram aplicados os métodos clássicos e rotineiramente utilizados em trabalhos de estimativa da indústria como vizinho mais próximo, inverso da distância e krigagem ordinária.

4.1 Vizinho mais próximo

Esse método é uma variação do método dos polígonos que consiste na atribuição de uma área de influência sobre o ponto amostrado, onde os blocos ou pontos serão estimados a partir da seleção da amostra vizinha mais próxima (Oliveira, 2018). O método não utiliza a média de amostras distintas e a variância original dos dados é mantida. Também cabe ressaltar que não há suavização e os teores de um bloco para o outro podem

mudar abruptamente, o que pode resultar em descontinuidades artificiais (Rossi & Deutsch, 2014).

4.2 Inverso da Distância

O método do inverso da distância é da família de métodos que utilizam a média ponderada para estimativas mais suavizadas em relação aos dados originais (Rossi & Deutsch, 2014). A principal premissa do método é atribuir maior peso às amostras mais próximas e menor às que estão mais distantes, diferentemente de métodos clássicos (triangulação ou média da amostra local, por exemplo) que utilizam interpolação linear simples onde todos os pesos são iguais a $1/N$ (N = número de amostras). Para tal, o peso de cada amostra é inversamente proporcional à sua distância do ponto que está sendo estimado (Isaaks & Srivastava, 1989). Em outras palavras, a estimativa é realizada a partir da média das amostras mais próximas ponderadas por sua distância até o ponto de estimativa.

Pelo método do inverso da distância, os teores das variáveis dos blocos ou demais avaliações são obtidos a partir da aplicação dos ponderadores médios obtidos na equação 1:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} \times v_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde d_i, \dots, d_n são as distâncias de cada um dos n locais de amostra para o ponto a ser estimado e v_1, \dots, v_n são os valores das amostras. A equação 1 pode ser adaptada para incluir uma ampla gama de estimativas. Ao invés de usar pesos que são inversamente proporcionais à distância, é possível utilizar pesos inversamente proporcionais a qualquer potência da distância, de modo que diferentes valores do expoente ρ irão resultar em estimativas distintas.

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^\rho} \times v_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^\rho}} \quad (\text{Equação 2})$$

Na equação 2, quanto maior o valor de ρ as amostras mais distantes recebem uma proporção menor de peso total, enquanto as amostras mais próximas se tornam mais influentes. A medida que ρ se aproxima de 0 e os pesos se tornam mais semelhantes, a estimativa pelo inverso da distância se aproxima da média simples dos valores amostrais próximos. Em contrapartida, a medida que ρ se aproxima de ∞ , a estimativa é realizada com todo o peso sendo fornecido para a amostra mais próxima.

O método assume que a variável a ser interpolada é isotrópica, ou seja, a variação da correlação entre as amostras é a mesma independente da distância adotada. É empregado quando há uma distribuição uniforme dos dados, e quando existe um volume de informações consideráveis. Todavia, não é interessante utilizá-lo para estimar dados que se encontram agrupados, visto que sofre influência de amostras anômalas locais (Oliveira, 2018).

4.3 Krigagem

A krigagem é o estimador mais utilizado na geoestatística por fornecer, em média, estimativas não tendenciosas com a menor variância possível. Nele, os pesos são determinados a partir de uma análise espacial baseada no semivariograma experimental, que considera a distância entre as amostras e os pontos ou blocos a serem estimados, além da continuidade espacial das variáveis. Existem alguns tipos de krigagem cujas formas básicas diferem principalmente nas suposições que eles fazem em relação à média local ou estacionária, expressas como condições no conjunto de pesos (Rossi & Deutsch, 2014).

Os tipos mais comuns de krigagem são a simples e a ordinária. A krigagem simples minimiza a variância do erro sem restrições nos pesos e a média é uma constante conhecida (inferida das amostras disponíveis) para todo o domínio. Na krigagem ordinária, a média local é implicitamente reestimada como uma constante dentro de cada vizinhança de busca (Rossi & Deutsch, 2014). Neste método, a soma dos pesos é restringida a 1 e, como resultado, a média não precisa ser conhecida.

A estimativa por meio da krigagem ordinária proporciona resultados superiores aos demais métodos, pois permite corrigir anisotropias geométricas, bem como ponderar

adequadamente na presença de agrupamento de pontos (Yamamoto, 1995). A krigagem ordinária é “linear” porque suas estimativas são combinações lineares ponderadas dos dados disponíveis, é “sem viés” pois tenta resultar no resíduo ou erro médio igual a 0 e é considerado o “melhor” estimador porque visa minimizar a variância dos erros (Isaaks & Srivastava, 1989). O estimador da krigagem ordinária pode ser definido pela equação 3:

$$Z_{KO}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (\text{Equação 3})$$

De acordo com Journel e Huijbregts (1978), assumindo que a média existe para todos os pontos de uma região ($E[Z(x)] = \bar{m}, x \in D$) e que o erro de estimativa seja zero ($E[Z_{KO}^*(x_0) - Z(x)] = 0$), tem-se:

$$E[\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)] = E[Z(x_0)] \quad (\text{Equação 4})$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i E[Z(x_i)] = E[Z(x_0)] \quad (\text{Equação 5})$$

Portanto,

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (\text{Equação 6})$$

4.4 Considerações sobre Simulação Condicional

Os métodos de simulação seriam os mais indicados para reprodução das estatísticas globais e espaciais do depósito por reproduzirem uma variedade de cenários equiprováveis da variável desejada, das quais os valores e incertezas associadas podem ser utilizados para diversos fins, como otimização de planos de produção, sequenciamento de lavra, classificação de recursos, estratégias de blendagem, entre outros (Caixeta, 2015).

As simulações reproduzem a variabilidade original observada nos dados e permitem uma avaliação da incerteza, o que implica que os valores extremos da distribuição original são preservados (Rossi & Deutsch, 2014). A simulação não é uma estimativa, mas sim um conjunto bi ou tridimensional de valores com a mesma natureza estatística que os dados originais (Takafugi, 2015).

A simulação é amplamente utilizada para gerar múltiplas realizações de variáveis dentro dos domínios estabelecidos a partir de um sistema de coordenadas que facilita a integração de informação geológica em grande escala (Deutsch, 2017). Neste contexto,

esses métodos têm sido cada vez mais empregados para acessar prováveis valores e incertezas das variáveis geometalúrgicas devido à sua natureza de não aditividade.

A performance da simulação pode ser prejudicada por desvios da estacionaridade estrita (o que inclui mudanças graduais e controles geológicos sobrepostos complexos), decisões de implementação (incluindo os parâmetros de variograma) e inconsistências entre os dados condicionais e a distribuição multivariada implícita da abordagem de simulação (Deutsch, 2017).

Dentre os diversos tipos de simulação geoestatística já apresentados na literatura, o método da simulação sequencial gaussiana é o mais utilizado na indústria da mineração. Sua popularidade se deve à sua fácil aplicação e pela representação razoável das distribuições espaciais (Rossi & Deutsch, 2014).

Na simulação sequencial gaussiana, a reprodução da covariância da krigagem se mantém independente da distribuição de dados e a correção da variância é feita através da adição de um resíduo aleatório que funciona independentemente da forma de distribuição residual (Takafugi, 2015). A reprodução da probabilidade conjunta dos dados pode ser atingida estimando as distribuições locais sequencialmente. Uma distribuição é estimada e dela é simulado aleatoriamente um valor por meio de um algoritmo de geração de números aleatórios. Esse valor é então utilizado como condicionante para a simulação dos pontos subsequentes (Caixeta, 2015).

5. METODOLOGIA

Para a execução do trabalho foram selecionadas amostras de duas áreas específicas da Mina Morro do Ouro (aqui denominadas Áreas 1 e 2) que tiveram campanhas de sondagem recentes realizadas especificamente para o estudo de geometurgia do minério oxidado (motivado pela presença de argila). Para tal, foram realizados estudos de modelagem geológica do perfil intempérico e argila e, posteriormente, estimativa das variáveis geometúrgicas via métodos do vizinho mais próximo, inverso da distância e krigagem.

Todos os métodos supracitados foram testados no domínio de rocha fresca por concentrar o maior número de amostras disponíveis. Para o domínio de oxidado, o número reduzido de amostras não possibilitou a análise variográfica e krigagem.

5.1 Sondagem, Descrição e Análises

Os testes de geometurgia são solicitados apenas em casos de projetos específicos ou em amostras com presença de minerais conhecidamente deletérios no processamento mineral, o que resulta em uma malha de amostragem muito aberta quando comparada à malha das amostras de teores. Como o banco de dados de geometurgia não possui a mesma abrangência espacial e quantidade de amostras que o banco de dados de teores, foram realizadas campanhas de sondagem específicas para tal em duas regiões distintas da mina planejadas para lavra de médio prazo e que apresentavam todo o perfil intempérico *in situ*. Deste modo, foram realizados modelos geometúrgicos com *boundary* reduzido nessas áreas e que, posteriormente, foram integrados ao modelo de recursos da mina.

As amostras foram obtidas através de furos de sondagem diamantada de diâmetro HQ perfurados em malha do tipo losangular aproximada de 70m x 70m, com profundidade média de 37 a 42m (os furos mais profundos possuem em torno de 60m), muitas vezes suficiente para atingir a rocha fresca. Da praça de sondagem, os furos eram direcionados para o galpão de testemunhos para conferência de metragem e boletim, delimitação de amostras de 12m, registro fotográfico, descrição geológica e amostragem.

O suporte amostral das amostras de geometalurgia respeitam as cotas mínima e máxima das bancadas, que também possuem altura de 12m.

A descrição geológica dos testemunhos englobou características qualitativas como perfil intempérico, presença de argila e sua quantidade, deformação, coloração, oxidação e outras observações. Depois de prontas, as amostras eram encaminhadas para o laboratório de preparação física e, posteriormente, para o laboratório metalúrgico onde foram realizados os testes.

Assim como exposto em Chieregati (2007), como não há amostragem do material que alimenta a usina (amostra-cabeça), são utilizados os valores de ouro produzido, ouro enviado ao rejeito e ouro retido nos equipamentos para estimar o teor da alimentação, o qual é denominado teor *back*-calculado (Chieregati, 2007). Os testes de flotação padrão realizados no laboratório metalúrgico simulam as mesmas etapas que são realizadas na usina de beneficiamento, ou seja, flotação *rougher* e flotação *cleaner*.

O último passo consistiu no envio das amostras para o laboratório químico para que fossem obtidos os teores no rejeito utilizados para calcular a recuperação das usinas, os teores do rejeito utilizados para calcular a recuperação da hidrometalurgia e os teores do concentrado final. De posse desses três dados, é possível calcular a recuperação metalúrgica da amostra. Antes dos resultados serem disponibilizados, são submetidos ao processo de controle de qualidade que determina a aprovação da amostra ou uma nova realização do teste.

5.2 Modelagem Geológica

De posse dos dados de descrição geológica e resultados das amostras geometalúrgicas, o banco de dados foi importado no software Leapfrog Geo para realização da modelagem geológica, análise estatística e estimativa das variáveis. A técnica utilizada foi a de modelagem implícita, que é a formação rápida e automatizada de superfícies como teores, falhas e alterações baseados diretamente em dados geológicos.

Para o trabalho nas Áreas 1 e 2, além dos dados das campanhas de sondagem recentes, foram utilizados dados de descrição e geometalúrgicos de campanhas anteriores, quando existentes. Os dados de descrição geológica e mapeamento geológico de curto prazo permitiram a modelagem do perfil intempérico (subdividido de baixo para cima em rocha fresca, zona de transição, saprólito e solo) e argila, cujo sólido total foi refinado para faixas com alta, média e baixa quantidade. Cabe ressaltar que a modelagem da argila foi contida dentro do domínio de oxidado (solo + saprólito + zona de transição). Dados de S (%) e valores de BWI foram utilizados de forma qualitativa como indicadores de nível de intemperismo, uma vez que são duas variáveis com valores bem característicos e distintos entre o oxidado (muitas vezes também entre suas unidades) e rocha fresca.

5.3 Análise Exploratória dos Dados

O passo seguinte consistiu na análise exploratória dos dados, que é uma análise introdutória aos aspectos espaciais dos dados e suas correlações utilizadas para descrevê-los e balizar a definição de domínios de estimativa e a metodologia empregada na estimativa de recursos. Essa abordagem interagiu em um sentido amplo com a etapa de aquisição de dados – geologia de campo, condições de ensaios, gerenciamento de dados e seu controle de qualidade. Ferramentas estatísticas tais como histogramas, gráficos de probabilidade, box plots, gráficos de dispersão foram utilizados para comparações das distribuições das variáveis químicas e de processos dentro de cada um dos domínios identificados.

5.4 Estimativa

A estimativa foi realizada para as seis variáveis metalúrgicas disponíveis no banco de dados de geometalurgia: recuperação de Au (Au Rec), recuperação de enxofre (S Rec), teor de ouro no rejeito (Au Rej), teor de enxofre no rejeito (S Rej), teor retrocalculado de ouro (Au Back) e teor retrocalculado de enxofre (S Back). O protótipo de modelo utilizado foi o mesmo de recursos (longo prazo) para possibilitar a integração com o modelo de teores.

Não foram geradas compostas, uma vez que as amostras utilizadas para os testes foram idealizadas no tamanho das bancadas da mina (12m) e nas suas cotas mínima e

máxima. Por este motivo, neste trabalho a opção foi de utilizar o banco de dados bruto. A utilização ou não de *capping* foi analisada cuidadosamente, visto que é de interesse estudar justamente os *outliers* das variáveis geometalúrgicas. Outra configuração aplicada foi a utilização de *hard boundary*, ou seja, apenas as amostras do próprio domínio foram consideradas na estimativa.

Anisotropia dinâmica foi aplicada para reorientar a busca de acordo com as características locais, o que resulta em melhores estimativas do valor local. As direções principais das variáveis a serem estimadas podem mudar no domínio quando este apresenta estruturas onduladas ou suavemente dobradas e, por este motivo, o uso de uma única orientação fixa para a busca de amostras pode resultar em uma seleção e ponderação inadequada localmente.

Para estimar as variáveis metalúrgicas, foram utilizados os interpoladores de vizinho mais próximo (NN), inverso da distância (ID) e krigagem ordinária (KO), métodos amplamente conhecidos e empregados na indústria para estimativa de teores. A comparação entre os três interpoladores foi realizada de modo a possibilitar a comparação dos 3 métodos lineares na estimativa de variáveis não-aditivas. Os parâmetros de estimativa utilizados para as Áreas 1 e 2 tiveram algumas distinções e serão apresentadas posteriormente.

Todos os estimadores utilizados consideraram a mesma anisotropia dinâmica, suporte amostral, *hard boundary* e *capping* (quando aplicável). Para os métodos de inverso da distância e krigagem ordinária, foram utilizados os mesmos parâmetros de estimativa como número e volume de buscas, número mínimo e máximo de amostras, busca por quadrantes, etc. Na estimativa via inverso da distância foi considerada a média desagrupada, obtida através da atribuição de pesos para cada amostra a partir de seu desagrupamento. Como o interpolador por vizinho mais próximo carimba no bloco o valor da amostra mais próxima, foi utilizada apenas uma passada de estimativa com um maior raio de busca (o mesmo considerado na terceira passada para o ID e KO).

5.5 Validação da estimativa e análise comparativa

O último passo deste trabalho consistiu na validação da estimativa por meio de *check* visual, pelos dados estatísticos das amostras x blocos krigados, *swath plots* e outros.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análise dos Dados

A sondagem da Área 1 realizada com fins exclusivos de caracterização geometalúrgica englobou um total de 1661m distribuídos em 41 furos. Na região, os dados históricos contavam com 34 furos que totalizavam 1970m perfurados majoritariamente em rocha fresca. A modelagem contou, portanto, com um total de 75 furos que totalizam 3492m – 667 m no oxidado e 2825m na rocha fresca (Figura 6.1).

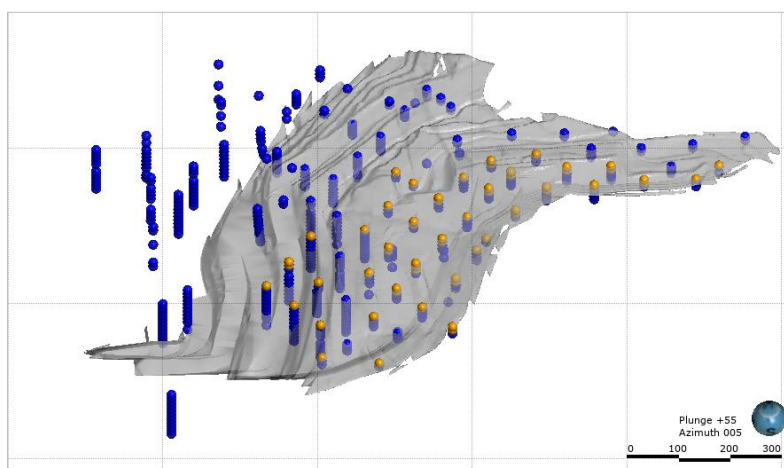


Figura 6.1 - Distribuição dos furos de sondagem/amostras na Área 1. Em azul, as amostras inseridas em rocha fresca e, em laranja, as amostras inseridas no oxidado.

A sondagem da Área 2, por sua vez, englobou um total de 1090m distribuídos em 29 furos. Na região, os dados históricos englobavam 51 furos que totalizavam 1610m perfurados majoritariamente em rocha fresca (antes da nova sondagem, praticamente não haviam dados de geometalurgia no oxidado). A modelagem contou, portanto, com um total de 80 furos que totalizam 2700m (Figura 6.2). Para a Área 2, estavam disponíveis menos amostras para estimativa quando comparado à Área 1, e em algumas regiões com espaçamento de malha maior.

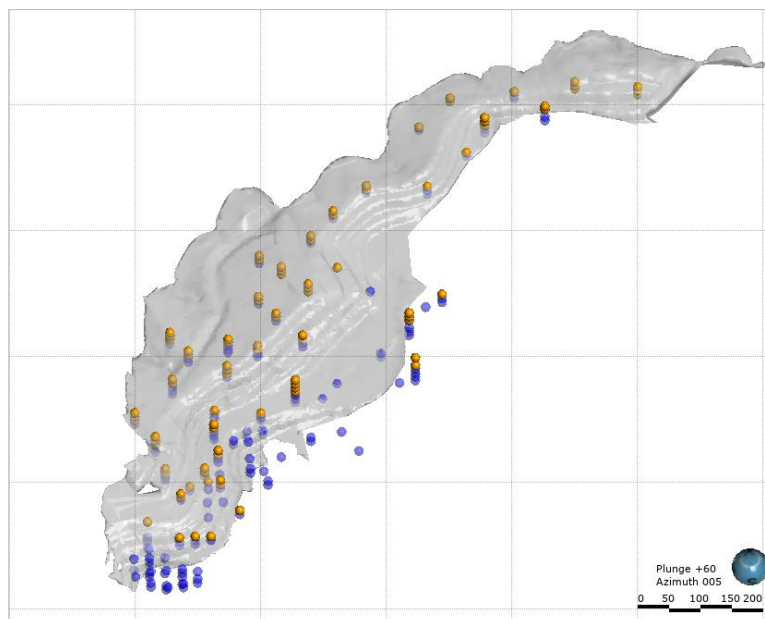


Figura 6.2 - Distribuição dos furos de sondagem/amostras na Área 2. Em azul, as amostras inseridas em rocha fresca e, em laranja, as amostras inseridas no oxidado.

6.2 Modelagem Geológica

A modelagem do perfil intempérico englobou 3 superfícies de contato: da base para o topo, contato rocha fresca/zona de transição, contato zona de transição/saprólito e contato saprólito/solo. Deste modo, foram definidos 4 sólidos: rocha fresca, zona de transição, saprólito e solo. Todas unidades do perfil intempérico podem ter mineralização de ouro associada. As Figuras 6.3 e 6.4 ilustram os sólidos modelados e a distribuição das unidades do perfil nas Áreas 1 e 2, respectivamente.

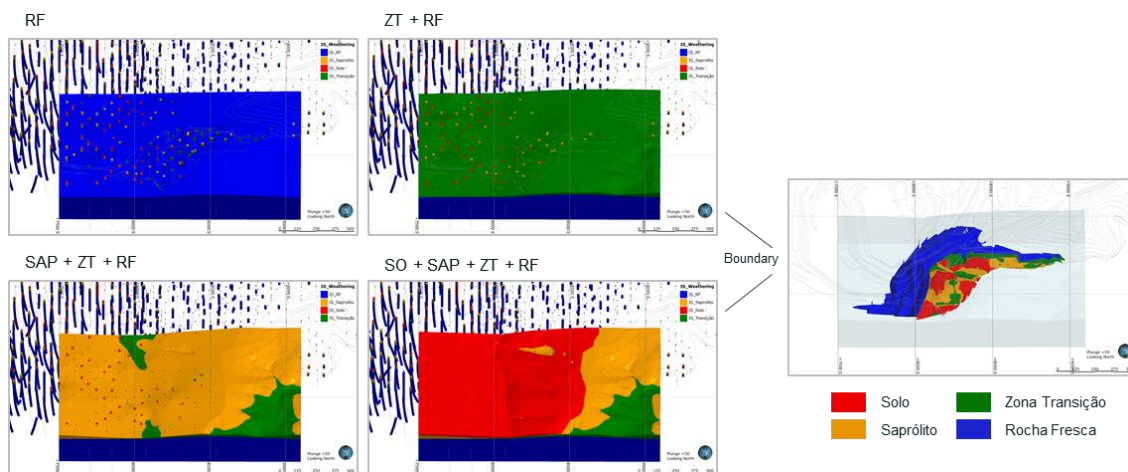


Figura 6.3 - Sólidos resultantes da modelagem geológica do perfil de intemperismo no boundary limite de modelagem e, na direita, no boundary da Área 1 com topografia aplicada.

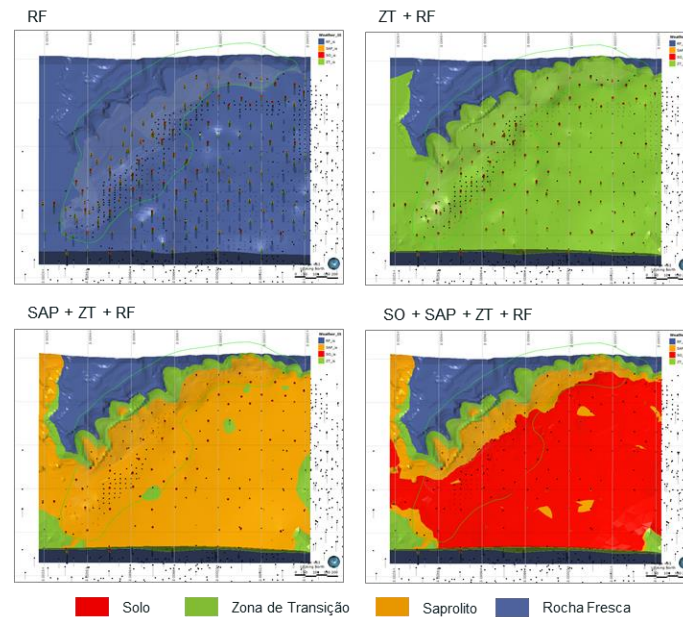


Figura 6.4 - Sólidos resultantes da modelagem geológica do perfil de intemperismo no boundary limite de modelagem considerado para a Área 2.

A intensidade do intemperismo diminui gradualmente com a profundidade e, por este motivo, os contatos não são abruptos. O solo é o material friável da porção superior do perfil onde não são mais observadas estruturas remanescentes da rocha pretérita. Geralmente apresenta matéria orgânica associada e pouca espessura (na média, entre 2 a 7m). O saprólito consiste em material mais preservado que o solo e, portanto, é possível observar certa estruturação de rocha. Como o próprio nome diz, a zona de transição é o material intermediário entre o altamente alterado e friável e o preservado, representado pela rocha sã. Assim sendo, na sua porção superior, o material é mais similar ao saprólito e, na porção inferior, mais similar à rocha fresca.

Na Área 1, a interpretação realizada resultou na redução de 43% de massa de oxidado e 7% de teor de Au quando comparado à versão anterior do modelo de intemperismo e de teores, expresso principalmente pela nova delimitação do saprólito (que diminuiu cerca de 55%) e zona de transição (que diminuiu cerca de 40%). O volume de rocha fresca aumentou cerca de 10%, assim como é possível observar nas seções W-E da Figura 6.5.

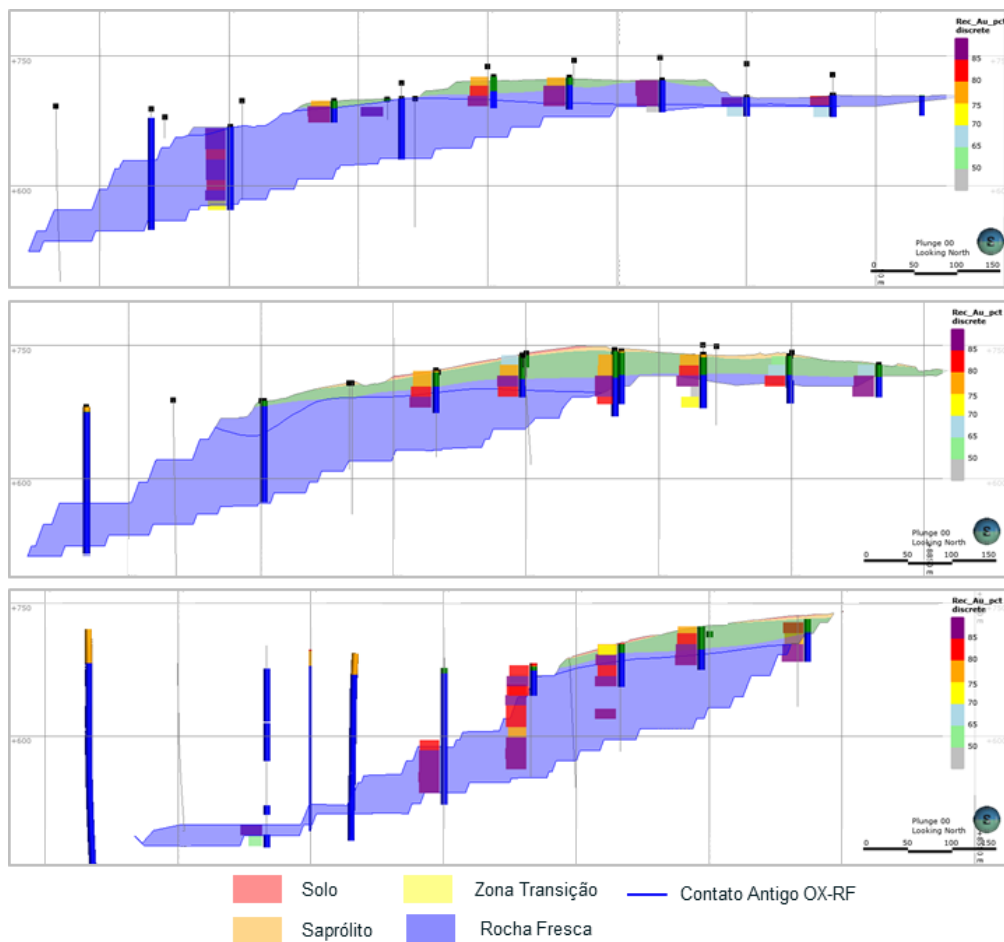


Figura 6.5 - Seções verticais W-E ilustrando a modelagem do perfil intempérico na Área 1 e a diferença dos contatos antigos e novo entre o oxidado e a rocha fresca.

A revisão do modelo do perfil de intemperismo para a Área 2 não resultou em diferenças tão expressivas assim como observado na Área 1. Foi obtida uma redução na massa de oxidado de 10% e redução no teor de 5% quando comparado à versão anterior do modelo de intemperismo e de teores. A redução na massa é resultado principalmente da reinterpretação das unidades de solo e saprólito, que reduziram cerca de 14% e 20%, respectivamente. A massa da zona de transição foi mantida e a de rocha fresca aumentou 7%. A Figura 6.6 ilustra seções verticais NE-SW ao longo da Área 2 que ilustra as principais diferenças entre o modelo de intemperismo anterior e o modelo realizado neste trabalho.

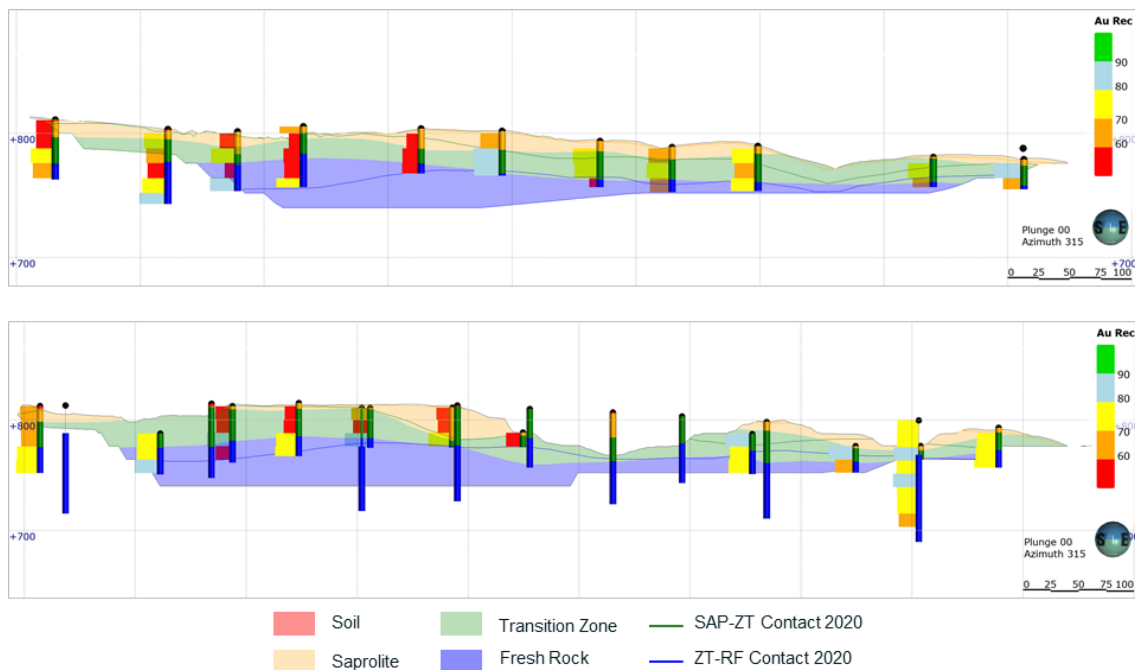


Figura 6.6 - Seções verticais NE-SW ilustrando a modelagem do perfil intempérico na Área 2 e a diferença dos contatos antigos e novo entre o oxidado e a rocha fresca.

A modelagem da argila, por sua vez, englobou apenas 1 superfície de contato que delimita os materiais com e sem presença de argila e foi realizada majoritariamente a partir da descrição dos testemunhos de sondagem. O material argiloso foi refinado dentro do sólido de oxidado (solo + saprólito + zona de transição) e, depois de definido, foi subdividido em três sólidos: pouca quantidade de argila, média quantidade de argila e muita quantidade de argila (dados qualitativos, obtido por inspeção visual na descrição geológica). Para tal, dentro do sólido de argila foram modeladas as superfícies de contato entre alta e média quantidade de argila e entre média e baixa quantidade de argila. As Figuras 6.7 e 6.8 ilustram os sólidos modelados e a distribuição da quantidade de argila nas Áreas 1 e 2, respectivamente.

Como o volume de material oxidado diminuiu consideravelmente na Área 1 com a nova interpretação geológica, a quantidade de argila também foi reduzida cerca de 46%. Assim como esperado, ela está distribuída principalmente nas unidades superiores do perfil intempérico (principalmente saprólito), diminuindo gradativamente até a rocha fresca. A razão para uma redução tão expressiva foi atribuída ao fato dos modelos terem sido realizados por diferentes modeladores (cada qual com sua técnica e conhecimento), pela adição de novos dados, por terem sido utilizados critérios distintos para a definição de argila e pela falta de *check* de campo.

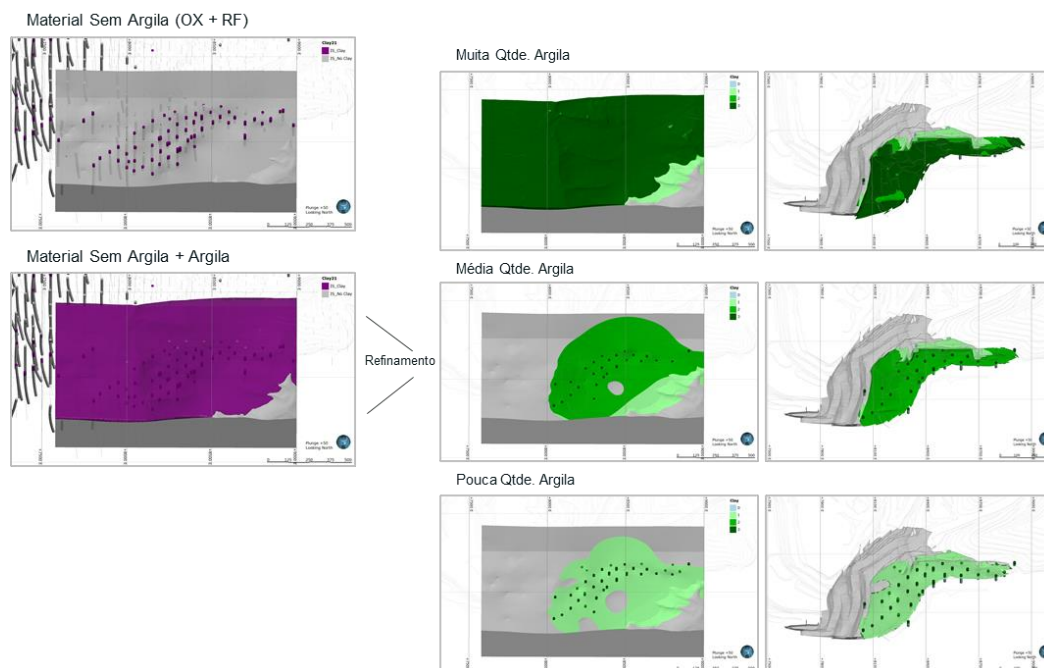


Figura 6.7 - Sólidos resultantes da modelagem geológica da argila e refinamento em pouca, média e alta quantidade na Área 1.

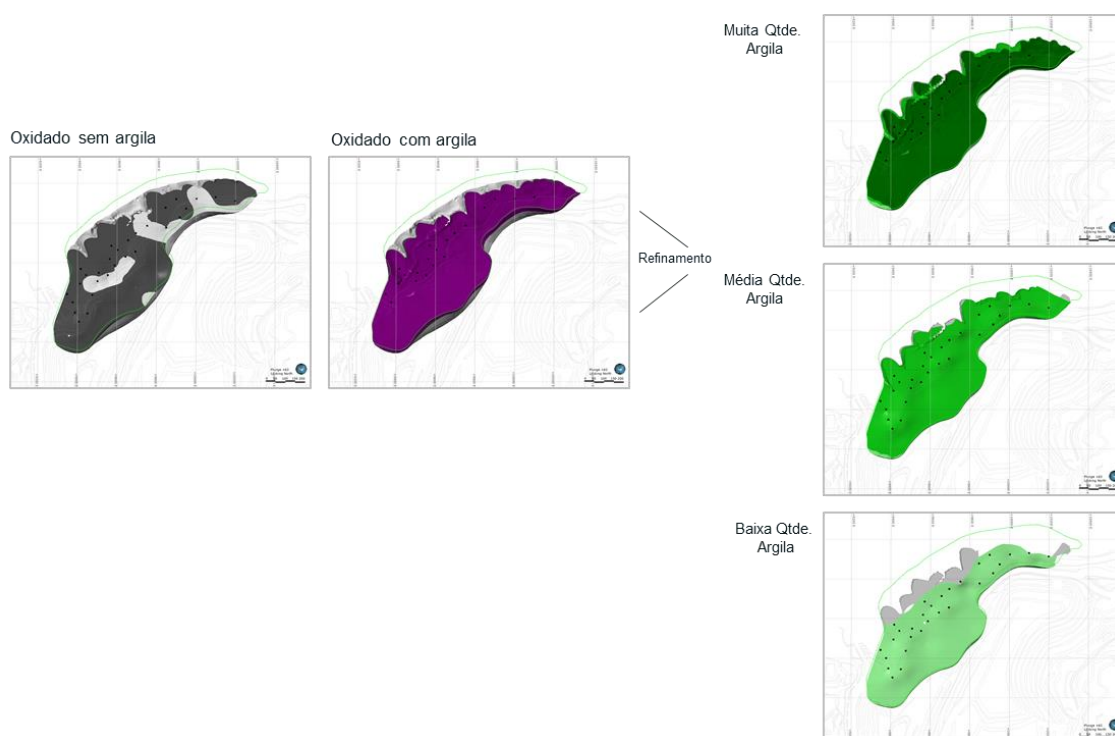


Figura 6.8 - Sólidos resultantes da modelagem geológica da argila e refinamento em pouca, média e alta quantidade na Área 2.

Mesmo com a reinterpretação da modelagem, a redução da massa da argila foi insignificante para a Área 2. O teor de ouro, por sua vez, aumentou cerca de 4% (o que consequentemente resultou em um pequeno aumento nas onças). A argila parece estar presente mais intensamente na Área 2 quando comparado à Área 1, visto que cerca de 86% da massa de oxidado é composto por material argiloso. Para a Área 2, além da grande contribuição de argila nas unidades superiores do perfil (solo e saprólito), ela também se faz bastante presente na zona de transição. As Figuras 6.9 e 6.10 ilustram seções verticais com a modelagem de argila e comparação com a interpretação do modelo antigo para Áreas 1 e 2, respectivamente.

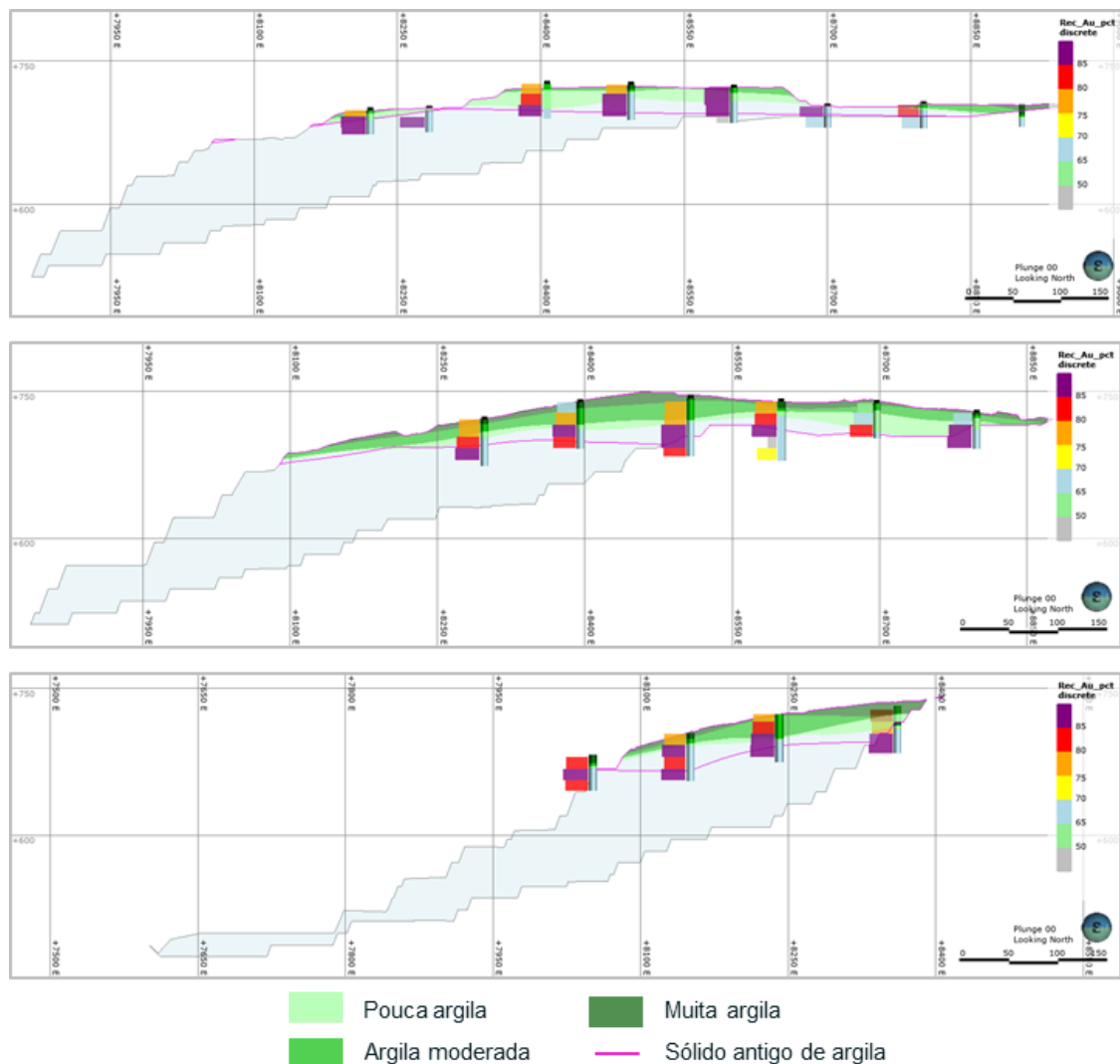


Figura 6.9 - Seções verticais W-E ilustrando a modelagem da argila na Área 1 e a diferença do contato antigo e o novo.

Apesar de não constituir regra, as recuperações na planta de flotação tendem a ser maiores quanto mais próximo à rocha fresca. Baixo desempenho na usina de beneficiamento foram, ao longo do tempo, em grande parte correlacionadas com o material argiloso presente no oxidado. Entretanto, alguns resultados revelaram amostras com baixas recuperações em minério fresco sulfetado que não apresentam diferença visual das amostras com alta recuperação. As razões pelas quais certos tipos de materiais argilosos e de rocha fresca apresentam baixo desempenho devem ser melhor investigados para definir as características mineralógicas, estruturais e texturais que os tornam deletérios para os processos atuais de beneficiamento.

Nesse sentido, a geoestatística pode contribuir com o estudo da distribuição espacial de áreas com baixas recuperações para guiar campanhas mais específicas de mapeamento geológico e de amostragem para análises mineralógicas.

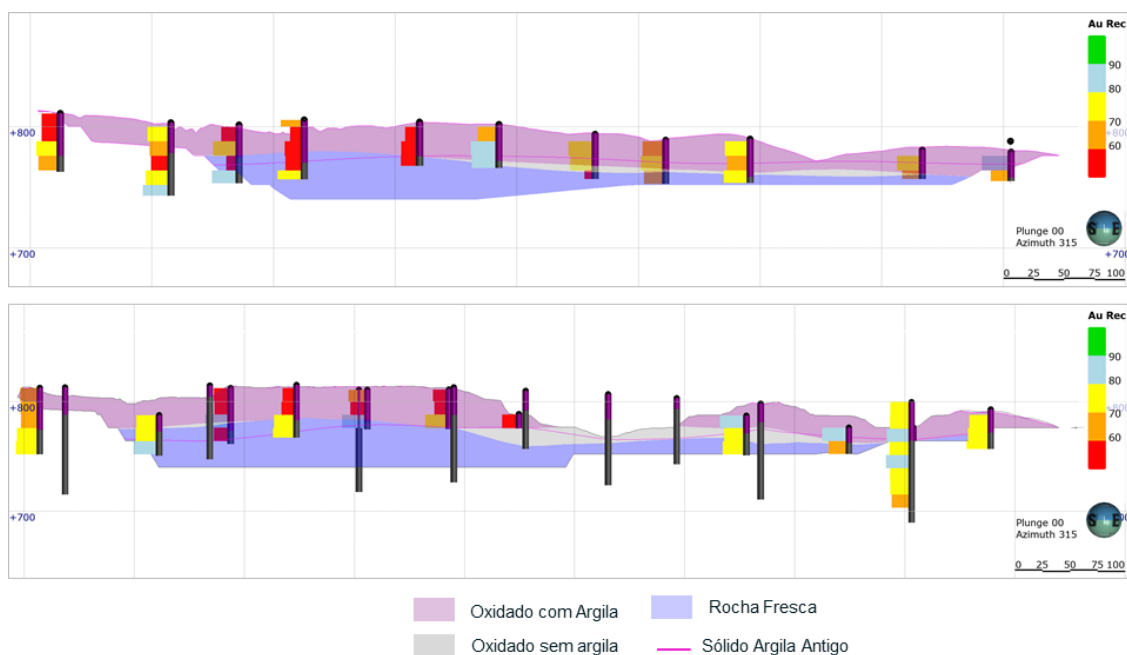


Figura 6.10 - Seções verticais NE-SW ilustrando a modelagem da argila na Área 2 e a diferença do contato antigo e o novo.

Para que os domínios de estimativa sejam adequados e respeitem a condição de estacionaridade, é necessária uma modelagem geológica adequada e embasada em interpretações e critérios geológicos coerentes. Neste tópico foi apresentada a diferença entre a modelagem antiga e a nova (apresentada neste trabalho), cuja atualização foi motivada pela inserção de novas amostras e pela redescrição geológica daquelas mais

antigas. Já nesta etapa do trabalho é possível observar grandes diferenças em relação à tonelagens e teores e o impacto que isso pode ter na definição de áreas que podem conter materiais deletérios ao beneficiamento mineral.

6.3 Análise Estatística dos Dados

Após a etapa de modelagem geológica, foi realizada a análise estatística dos dados compostos pelos bancos de dados de geometurgia das Áreas 1 e 2. Para a Área 1, os histogramas das variáveis de processo (Figura 6.11) apresentam distribuição assimétrica com exceção da recuperação de enxofre (S Rec) que possui distribuição aproximadamente simétrica.

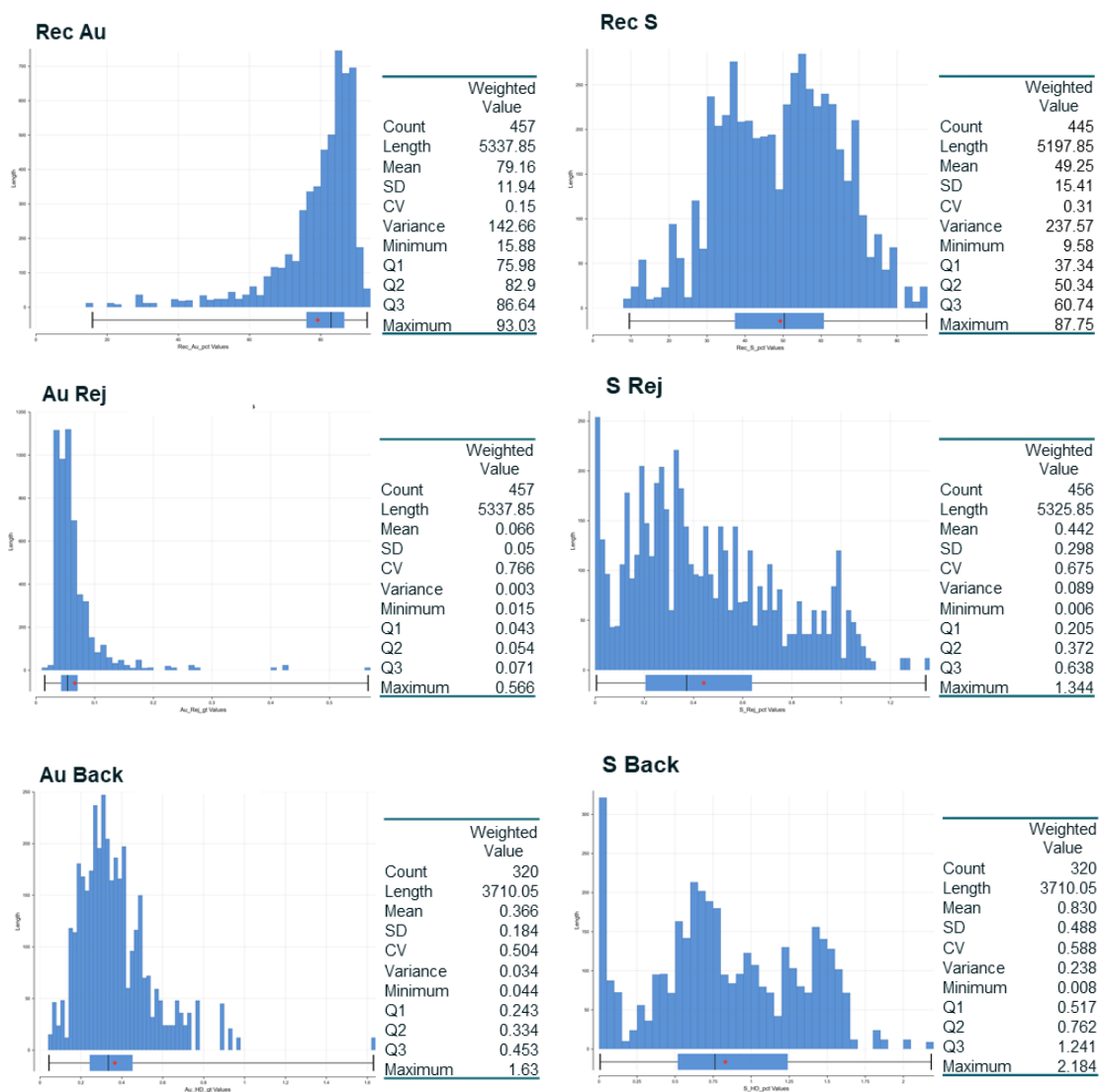


Figura 6.11 - Histogramas e dados estatísticos do banco de dados de geometurgia da Área 1.

Do total de amostras, apenas 13% estão inseridas dentro do oxidado enquanto 87% estão inseridas dentro da rocha fresca. Apesar disso, os histogramas relacionados ao enxofre mostram claramente a mistura de populações representadas por esses domínios. De fato, o enxofre é um bom indicador na modelagem do perfil intempérico, uma vez que é um elemento facilmente lixiviado quando a rocha é alterada, o que resulta nos baixíssimos teores altamente contrastantes com a rocha fresca sulfetada.

Como a maior parte das amostras são de rocha fresca, a média da recuperação de ouro é relativamente alta (79.16%), uma vez que para este domínio a recuperação média é de 80%. O domínio de oxidado apresenta uma recuperação média um pouco menor (72.6%). Consequentemente, o teor de Au no rejeito para rocha fresca é menor (0.065 g/ton) do que para o oxidado (0.080 g/ton).

O boxplot construído para as variáveis geometalúrgicas pelo perfil de intemperismo (Figura 6.12) da Área 1 confirma que quanto mais intemperizado o material, maior a tendência de baixas recuperações (cabe ressaltar que o número de amostras para o solo é insuficiente para reproduzir seu real comportamento). Como o próprio nome diz, a zona de transição de fato apresenta um comportamento intermediário entre o saprólito e a rocha fresca.

A alta variabilidade da rocha fresca pode ser justificada por amostras em regiões de contato e/ou *outliers*, visto que nesta unidade a maior parte das amostras apresentam valores de recuperação próximos (a variância entre o primeiro e terceiro quartil é, de fato, menor). Apesar de ocorrerem localmente e de não serem o foco desse trabalho, baixas recuperações na rocha fresca devem ser melhor estudadas, pois não estão relacionadas diretamente com material argiloso.

Os teores de Au no rejeito tendem a ser menores quanto maior a recuperação do material, embora essa configuração não constitua regra. São observadas amostras com boas recuperações e ainda assim com alto teor de Au no rejeito, geralmente explicadas pelos altos teores de cabeça. O teor back tenta reproduzir o teor de cabeça das amostras, embora a correlação observada seja em torno de 40%. Entretanto, assim como observado, a rocha fresca contém os maiores teores de Au e maior variabilidade.

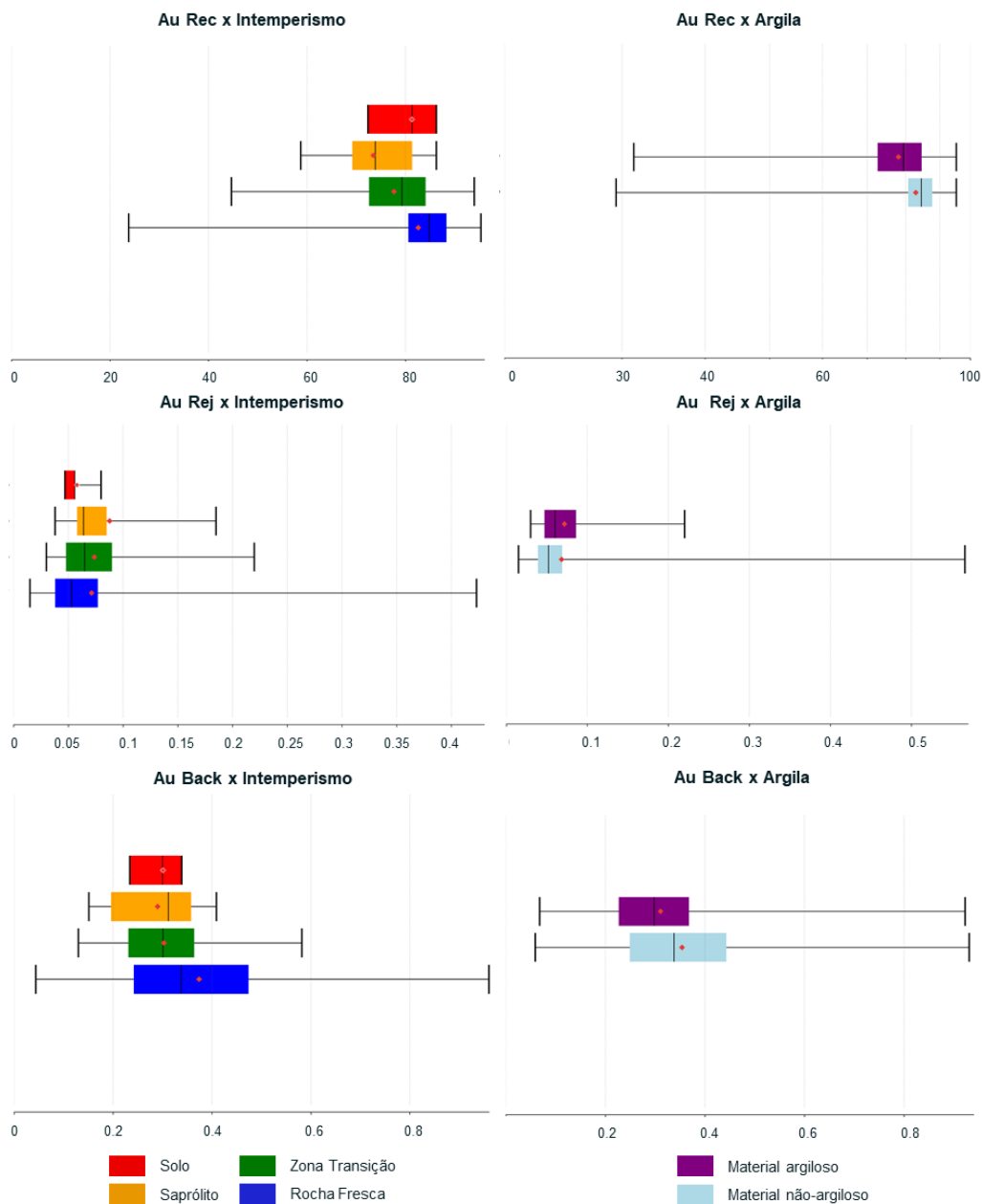


Figura 6.12 - Boxplot das variáveis de Au pelo modelo de perfil de intemperismo e de argila da Área 1.

O boxplot das variáveis geometalúrgicas pelo modelo de argila revela que, de fato, as recuperações são menores no material argiloso quando comparado à rocha fresca. Os teores de ouro no rejeito também são maiores na argila, o que pode ser em grande parte consequência das recuperações menores. A variabilidade de teores indicado pelo Au Back é similar entre o material argiloso e a rocha fresca, porém esta última contém os maiores teores médios.

Para a Área 2, os histogramas das variáveis geometalúrgicas (Figura 6.13) apresentam distribuição assimétrica. A recuperação média de ouro de 69.3% é bem menor do que a obtida para a Área 1, o que indica que o material da Área 2 tende a ser mais problemático na etapa de beneficiamento (oxidado e rocha fresca). A recuperação média de ouro reflete tanto os baixos valores médios obtidos para oxidado (66.70%), representada por 40% do total de amostras, quanto para rocha fresca (71.10%), representada por 60% do total de amostras. Além disso, o coeficiente de variação da Área 2 (0.24) é muito maior do coeficiente de variação para a Área 1 (0.15).

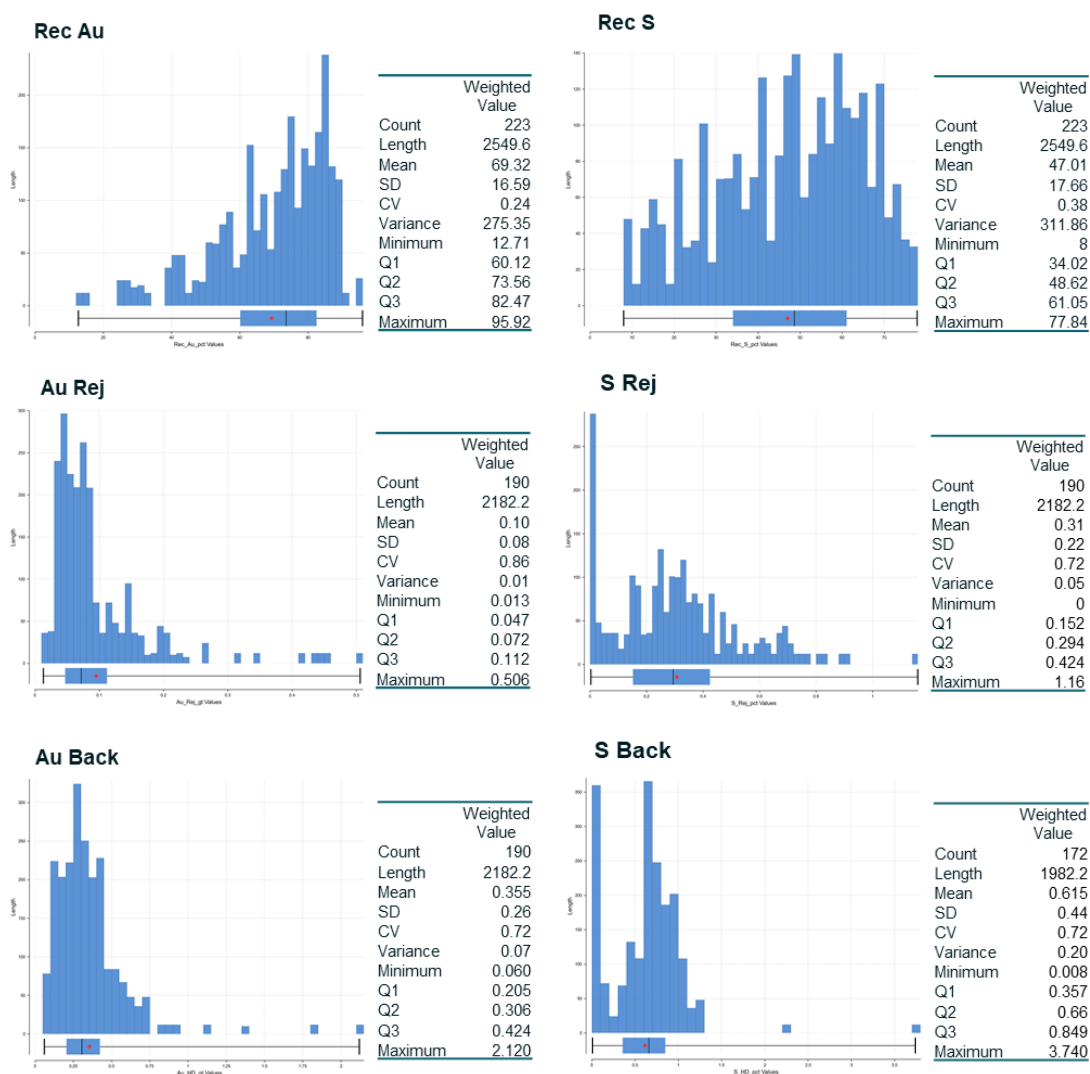


Figura 6.13 - Histogramas e dados estatísticos do banco de dados de geometalurgia da Área 2.

A variabilidade de valores para o teor de Au no rejeito e Au Back também é maior na Área 2 quando comparada à Área 1. O teor de Au no rejeito médio para rocha fresca (0.105 g/ton) e para o oxidado (0.082 g/ton) é maior aos calculados para a Área 1 (0.065

g/ton para rocha fresca e 0.079 g/ton para oxidado), o que reflete a maior dificuldade de recuperação de ouro na Área 2. Cabe considerar que o teor médio de Au no rejeito ser maior para rocha fresca do que para o oxidado na Área 2 pode ser reflexo da quantidade de amostras disponíveis em cada domínio ou de maiores problemas na recuperação de rocha fresca nesta região.

Os histogramas para S Rej e S Back também revelam a existência de duas populações distintas – uma representada pelo oxidado (cujo teor de enxofre é muito menor do que o observado para rocha fresca, cujo contato é praticamente abrupto), a outra pela rocha fresca. Como a Área 2 tende a apresentar maior presença de argila no oxidado e maiores desafios relativos à recuperação do material, foi realizada uma análise mais detalhada da recuperação, teor de ouro no rejeito e teor de ouro back a partir de boxplots (Figura 6.14).

Como já mencionado, o material argiloso tende a apresentar recuperação menor quando comparado ao oxidado sem argila e a rocha fresca. A variabilidade de valores de recuperação também é menor. Além disso, quanto maior a quantidade de argila (dado qualitativo), menor a recuperação (apesar disso, a média e mediana entre o material com pouca e média argila são muito similares).

A média dos teores de Au no rejeito para a argila e a rocha fresca são muito semelhantes, mas a mediana e a variabilidade são maiores para este último. Para as variáveis de teor de Au no rejeito e teor de Au Back, a quantidade de argila não apresenta diferenças expressivas entre uma classe e outra (apenas maior variabilidade de teores para baixa quantidade de argila). A variabilidade de teores indicado pelo Au Back é menor para o material argiloso quando comparado à rocha fresca, que assim como na Área 1 contém os maiores teores médios.

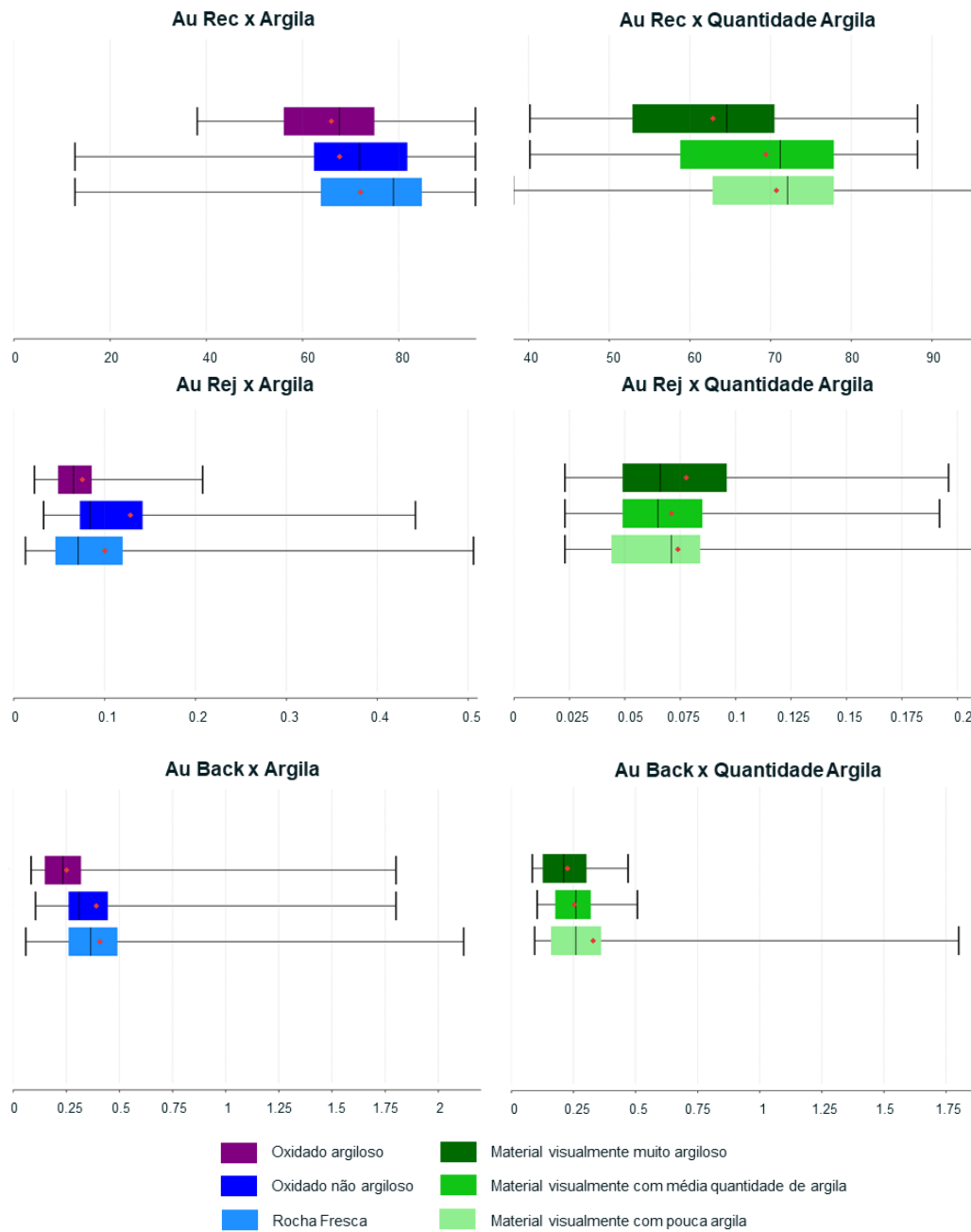


Figura 6.14 - Boxplot das variáveis de processo de Au pelo modelo total de argila e pelo refinado em alta, média e pouca quantidade (dado qualitativo) da Área 2.

Com base na análise estatística dos dados foram determinados dois domínios de estimativa: oxidado (solo + saprólito + zona de transição) e rocha fresca para ambas as áreas de estudo. A Figura 6.15 é um exemplo da definição de domínios para a Área 1, em particular. Como a estimativa das variáveis de processo é relevante apenas no minério, foi realizado um modelo combinado entre envelope de minério de Au + perfil de intemperismo para a definição final dos domínios de estimativa.

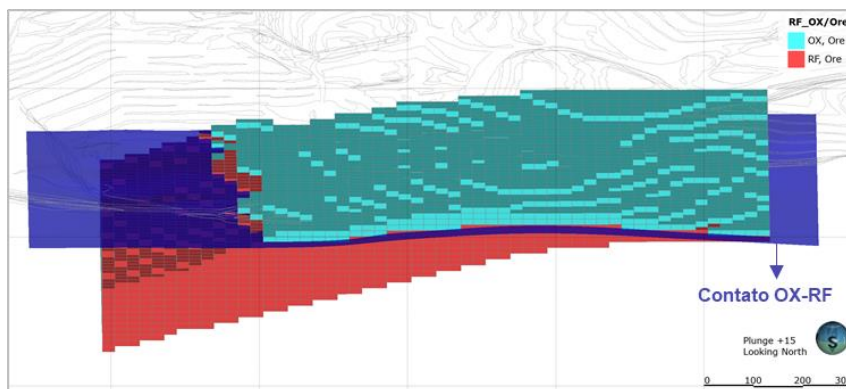


Figura 6.15 - Domínios de estimativa utilizados no modelo geometalúrgico da Área 1 (de azul, o domínio de oxidado e, de vermelho, domínio de rocha fresca).

Ao considerar que o desempenho do material oxidado na planta é ditada pela presença ou não de argila, sua superfície modelada foi considerada na configuração da anisotropia dinâmica para as variáveis de recuperação.

6.4 Estimativa

A estimativa foi realizada no mesmo protótipo do modelo de blocos de recursos e foi realizada em blocos de 25m x 25m x 12m. Para o domínio de oxidado, foram utilizados os métodos de vizinho mais próximo e de inverso da distância. A análise variográfica e krigagem não foram realizados devido ao baixo número de amostras disponíveis, o que pode prejudicar a qualidade da estimativa. Para a rocha fresca, foram aplicados os métodos de vizinho mais próximo, inverso da distância (potência ao cubo) e krigagem ordinária. De modo geral, foram utilizados parâmetros de estimativa muito semelhantes entre todos os métodos aplicados.

Cabe considerar que a condição metalúrgica dos materiais não é necessariamente contínua lateralmente e verticalmente, e tampouco a estimativa de uma região entre dois furos será a média entre as amostras mais próximas. Entretanto, a escolha da utilização dos métodos lineares (clássicos na estimativa de teores) foi uma alternativa simples e a caráter de teste visando a comparação entre métodos aplicado à variáveis não aditivas, bem como o efeito de malhas mais abertas e fechadas de amostragem na aplicação dos métodos aqui propostos.

Apesar das limitações matemáticas, este estudo visa esclarecer se esses tipos de modelos podem atuar como um guia de lavra para o planejamento de curto prazo e para o estudo da distribuição espacial de possíveis regiões com baixos desempenhos na planta de beneficiamento (e que precisam ter os seus tipos rochosos investigados em detalhe). Cabe ressaltar que os resultados obtidos poderão ser verdadeiramente validados a partir da prática de reconciliação mineira, que deve ser feita além das análises aqui realizadas para conclusões mais assertivas.

6.4.1 Parâmetros de estimativa

Para todos os métodos de estimativa utilizados, foram adotadas as mesmas configurações de *capping* (quando aplicável) e anisotropia dinâmica. Para os métodos de inverso da distância e krigagem, também foram adotados os mesmos volumes de busca das 3 buscas de estimativa, bem como número mínimo e máximo de amostras e demais parâmetros. O que os diferencia, em grande parte, é a análise variográfica que é utilizada na definição dos pesos de cada amostra na estimativa via krigagem.

As variáveis de teores retrocalculados foram estimadas via inverso da distância ao quadrado e as variáveis de recuperação e de teor no rejeito foram estimadas via inverso da distância ao cubo. A utilização do ID3 foi realizada com a intenção de incentivar uma estimativa ainda mais restringida ao entorno das amostras mais próximas, visto que os seus resultados podem estar condicionados por estruturas e materiais geológicos inseridos localmente (tipos específicos de argila e falhas, por exemplo).

A Tabela 6.1 ilustra as variáveis estimadas e as variações do método utilizadas para tal, bem como *capping* e a superfície (wireframe) utilizada para configurar anisotropia dinâmica para cada Área. Valores anômalos de recuperação e de teores no rejeito são importantes e devem ser considerados na estimativa de variáveis dessa natureza e, por esse motivo, a utilização de *capping* foi analisada cuidadosamente e aplicada somente quando da descontinuidade dos histogramas.

Na configuração da anisotropia dinâmica foram consideradas as superfícies que teriam maior influência na estimativa de cada variável dentro do contexto de cada domínio. De modo geral, para as variáveis de teores, foram consideradas as superfícies

que delineiam o envelope de minério (*hangwall* e *footwall*). Para recuperação, foi utilizada a superfície de argila no oxidado e de minério na rocha fresca. Como o oxidado da Área 2 é composto majoritariamente por material argiloso, foi realizado um teste de considerar a superfície modelada de argila na configuração da anisotropia dinâmica no domínio de oxidado também para a variável de teores no rejeito.

Variável	Significado	Estimador	Área 1			Área 2		
			Capping	Anisotropia Dinâmica		Capping	Anisotropia Dinâmica	
				Ox Ore Domain	RF Ore Domain		Ox Ore Domain	RF Ore Domain
Au Back	Teor retrocalculado de Au (g/ton)	NN, ID2 & KO	-	Hangwall	Footwall	0.95 g/ton	Hangwall	Footwall
S Back	Teor retrocalculado de S (%)	NN, ID2 & KO	-	Hangwall	Footwall	1.30%	Hangwall	Footwall
Au Rec	Recuperação Au (%)	NN, ID3 & KO	-	Clay	Footwall	-	Clay	Footwall
S Rec	Recuperação S (%)	NN, ID3 & KO	-	Clay	Footwall	-	Clay	Footwall
Au Rej	Teor Au Rejeito (g/ton)	NN, ID3 & KO	-	Hangwall	Footwall	0.35 g/ton	Clay	Footwall
S Rej	Teor S Rejeito (%)	NN, ID3 & KO	2.5 %	Hangwall	Footwall	0.92%	Clay	Footwall

Tabela 6-1 - Variáveis geometalúrgicas estimadas e a metodologia utilizadas para as Áreas 1 e 2.

6.4.2 Parâmetros de busca

Para ambas as Áreas de estudo foram considerados 3 volumes de busca na estimativa via inverso da distância e krigagem ordinária. Na Área 1, a primeira busca correspondente à malha de sondagem aproximada (70m x 70m) na região, a segunda o dobro e a terceira o triplo. Como a malha de amostragem é mais espaçada na Área 2 (e o número de amostras é menor), para o primeiro volume de busca foi considerado uma distância um pouco maior (100m x 100m) que foi multiplicado por 2 na segunda busca e, desta para a terceira busca, também multiplicado por 2. Esta foi a configuração encontrada que possibilitaria a estimativa de todos os blocos a partir da malha de amostragem disponível. O volume único de busca configurado na estimativa via vizinho mais próximo é o mesmo da terceira busca dos outros interpoladores.

Assim como esperado, o primeiro volume de busca é mais restritivo e o terceiro é mais flexível, de modo que os blocos não estimados nas primeiras buscas também tenham a chance de serem populados. Como forma de garantir que as amostras utilizadas para estimar o bloco estejam distribuídas espacialmente, foi configurado um número máximo

de amostras para cada quadrante e um número máximo de quadrantes vazios para as duas primeiras buscas na Área 1 e apenas para a primeira busca na Área 2. Para o número mínimo e máximo de amostras, foram testadas algumas configurações que permitissem a estimativa do maior número de blocos de maneira mais fidedigna possível às amostras mais próximas. Também devido ao menor número de amostras disponíveis na estimativa da Área 2, o número máximo de amostras foi mais abrangente.

O “*DH Limit*” expressa o número máximo de amostras por furo considerada na estimativa e impede que sejam consideradas muitas amostras ao longo do furo (estimativa “verticalizada”). Para a Área 1, a configuração utilizada foi de apenas 1 amostra de cada furo (suporte amostral de 12m) para ser utilizada na estimativa de determinado bloco (espessura de 12m); como o número de amostras na Área 2 é menor, a estimativa foi menos conservadora na vertical por considerar até 2 amostras de um mesmo furo (portanto, foi admitida a influência de 24m na vertical).

As configurações de busca por quadrante, número mínimo e máximo de amostras e limite de amostras por furo (*DH Limit*) foram as mesmas para todas as buscas via inverso da distância e krigagem ordinária. Por ser um interpolador mais simples, o método do vizinho mais próximo não abrange essas opções. A Tabela 6.2 ilustra os parâmetros de estimativa utilizados para a Área 1 e, a Tabela 6.3, para a Área 2.

Área	Busca	Alcances			Busca por Quadrante		Amostras		DH Limit
		Máx.	Intermed.	Min.	Max. Amostras	Max. Quadrantes Vazios	Min.	Máx.	
NN	SVOL1	210	210	24	-	-	1	1	-
ID & KO	SVOL1	70	70	24	3	2	3	6	1
	SVOL2	140	140	24	3	2	3	6	1
	SVOL3	210	210	24	-	-	2	6	1

Tabela 6-2 - Parâmetros de estimativa utilizados para as variáveis de processo na Área 1.

Área	Busca	Alcances			Busca por Quadrante		Amostras		DH Limit
		Máx.	Intermed.	Min.	Max. Amostras	Max. Quadrantes Vazios	Min.	Máx.	
NN	SVOL1	400	400	36	-	-	1	1	-
ID & KO	SVOL1	100	100	24	3	2	3	8	2
	SVOL2	200	200	24	-	-	3	8	2
	SVOL3	400	400	36	-	-	2	10	-

Tabela 6-3 - Parâmetros de estimativa utilizados para as variáveis de processo na Área 2.

As buscas podem ser correlacionadas com a confiabilidade do modelo, que é gradativamente menor conforme abertura da malha de sondagem. Os blocos estimados na primeira busca delimitam a região em que a malha é mais fechada e, ao seu redor, estão os blocos estimados pela segunda busca. A terceira busca engloba, principalmente, os blocos das bordas e apresenta baixa confiabilidade na estimativa, o que agrava por se tratar de variáveis não aditivas.

O *boundary* utilizado na estimativa da Área 1 foi mais amplo do que o limite da sondagem disponível e, por este motivo, diversos blocos da borda do modelo foram estimados com a terceira busca. Cabe ressaltar que os elipsoides de busca utilizados na Área 1 foram mais restritivos que os da Área 2 devido malha de sondagem mais fechada. Na Figura 6.16 é possível observar os blocos estimados pela primeira (principalmente nas adjacências das amostras), segunda e terceira busca na Área 1.

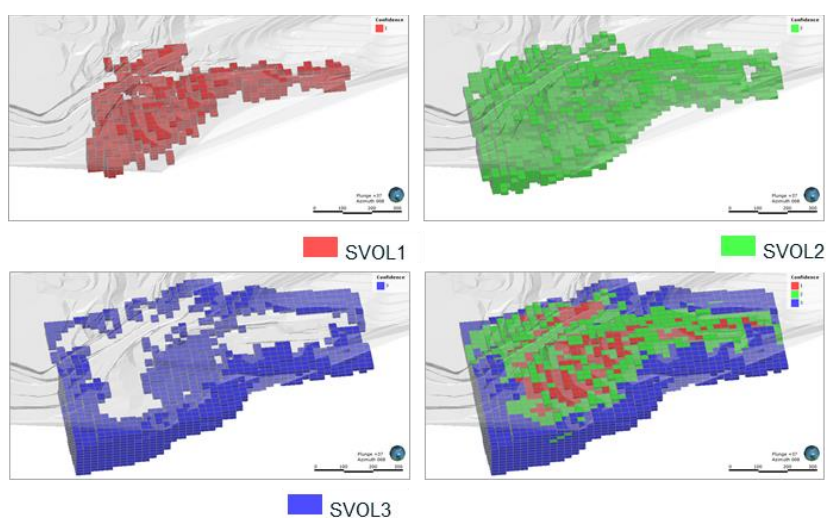


Figura 6.16 - Blocos estimados pela 1ª (vermelho), 2ª (verde) e 3ª busca (azul) na Área 1.

A Figura 6.17, por sua vez, ilustra os blocos estimados pela primeira, segunda e terceira busca na Área 2. O *boundary* considerado para a Área 2 é menor e contorna apenas a região com informações de sondagem e, por este motivo, a quantidade de blocos estimados pela primeira busca é maior quando comparado à Área 1 (além dos parâmetros de busca menos restritivos).

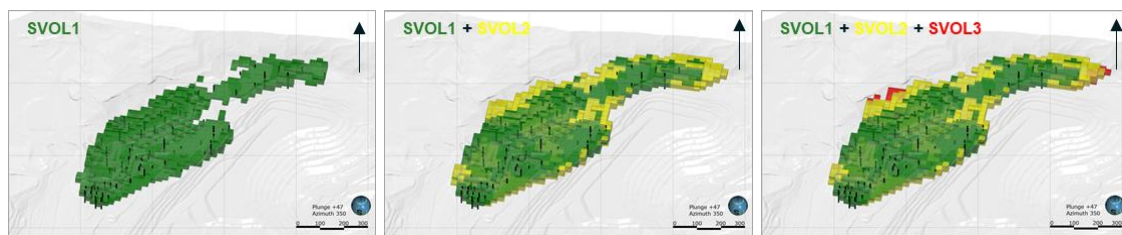


Figura 6.17 - Blocos estimados pela 1ª (verde), 2ª (amarelo) e 3ª busca (vermelho) na Área 2.

6.4.3 Parâmetros de Variografia

O estudo variográfico para embasar a interpolação de teores via krigagem ordinária foi realizado para as 6 variáveis geometalúrgicas, especificamente para o domínio de rocha fresca. Devido ao número reduzido de amostras, não foi possível obter variogramas passíveis de serem modelados para o domínio de oxidado.

A primeira análise de continuidade realizada foi a do plano horizontal, onde a direção preferencial (ou de menor variância) foi identificada a partir dos contornos de variância. Após configurar a orientação do elipsoide do variograma, o efeito pepita foi definido pelo variograma de “*downhole*” (o *lag* utilizado foi de 12m, mesmo tamanho da amostra).

A última etapa consistiu em analisar os modelos de continuidade para a modelagem variográfica. Um conjunto de três variogramas são apresentados: um da direção de continuidade máxima, outro na direção ortogonal e o último que é ortogonal às direções anteriores (direção de menor continuidade). Cada um dos variogramas foram modelados quanto à variância da estrutura e seu alcance. Para facilitar a modelagem, foi utilizado o sill normalizado que é o dimensionado proporcionalmente para um intervalo entre 0 e 1, onde 1 representa a variância dos dados.

A Tabela 6.4 apresenta um resumo com os parâmetros de variografia utilizados para Área 1 e as Figuras 6.18 e 6.19 ilustram os variogramas modelados para as variáveis geometalúrgicas relacionadas ao ouro e ao enxofre da mesma Área. A Tabela 6.5, por sua vez, apresenta um resumo com os parâmetros de variografia utilizados para a Área 2 e as Figuras 6.20 e 6.21 ilustram os variogramas modelados para as variáveis geometalúrgicas relacionadas ao ouro e ao enxofre.

Variable	Direction (Range)	Dip	Dip Azimuth	Pitch	Nugget	Structure 1	1st ST (m)	Structure 2	2nd ST (m)
Au Rec	Major	0	0	105	0.05	0.65	115	0.3	510
	Semi Major	0	0	105	0.05	0.65	115	0.3	340
	Minor	0	0	105	0.05	0.65	15	0.3	80
Au Rej	Major	0	0	150	0.02	0.35	37	0.63	350
	Semi Major	0	0	150	0.02	0.35	100	0.63	275
	Minor	0	0	150	0.02	0.35	12	0.63	25
Au Back	Major	0	0	55	0.25	0.52	80	0.23	525
	Semi Major	0	0	55	0.25	0.52	110	0.23	400
	Minor	0	0	55	0.25	0.52	15	0.23	35
S Rec	Major	0	0	135	0.12	0.35	100	0.53	600
	Semi Major	0	0	135	0.12	0.35	90	0.53	450
	Minor	0	0	135	0.12	0.35	15	0.53	100
S Rej	Major	0	0	155	0.05	0.35	130	0.6	550
	Semi Major	0	0	155	0.05	0.35	175	0.6	340
	Minor	0	0	155	0.05	0.35	20	0.6	60
S Back	Major	0	0	65	0.05	0.27	110	0.68	450
	Semi Major	0	0	65	0.05	0.27	85	0.68	370
	Minor	0	0	65	0.05	0.27	35	0.68	55

Tabela 6-4 - Parâmetros de variografia utilizados para a Áreas 1.

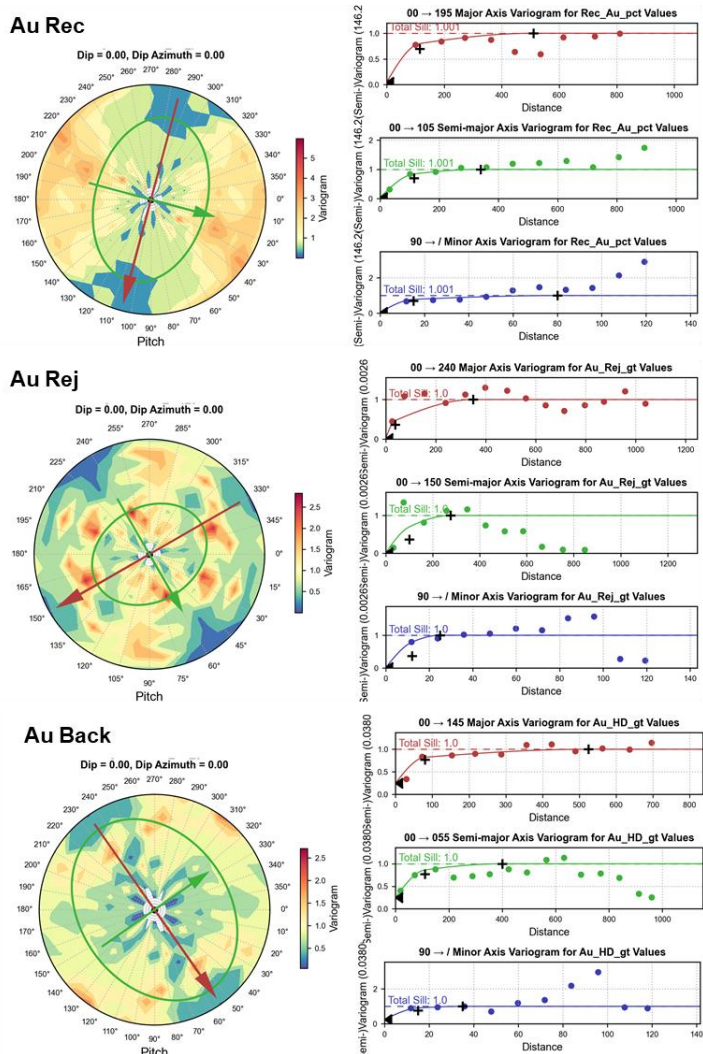


Figura 6.18 - Variogramas das variáveis geometalúrgicas relacionadas ao Ouro na Área 1.

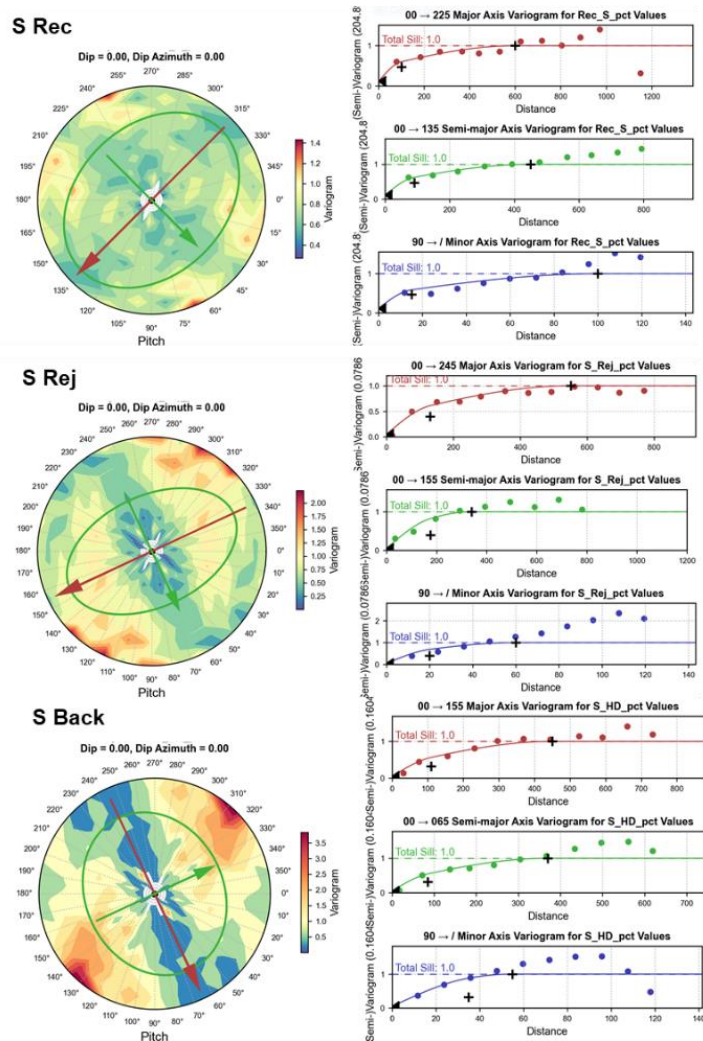


Figura 6.19 - Variogramas das variáveis geometalúrgicas relacionadas ao Enxofre para a Área 1.

Variable	Direction (Range)	Dip	Dip Azimuth	Pitch	Nugget	Structure 1	1st ST (m)	Structure 2	2nd ST (m)	
Área 2	Au Rec	Major	0	0	155	0.4	0.3	70	0.3	700
		Semi Major	0	0	155	0.4	0.3	70	0.3	600
		Minor	0	0	155	0.4	0.3	18	0.3	48
	Au Rej	Major	0	0	105	0.2	0.57	80	0.23	350
		Semi Major	0	0	105	0.2	0.57	30	0.23	110
		Minor	0	0	105	0.2	0.57	20	0.23	48
	Au Back	Major	0	0	25	0.2	0.45	60	0.35	240
		Semi Major	0	0	25	0.2	0.45	35	0.35	115
		Minor	0	0	25	0.2	0.45	12	0.35	55
S Rec	Major	0	0	165	0.05	0.55	45	0.4	210	
	Semi Major	0	0	165	0.05	0.55	30	0.4	175	
	Minor	0	0	165	0.05	0.55	15	0.4	35	
S Rej	Major	0	0	20	0.05	0.2	40	0.75	200	
	Semi Major	0	0	20	0.05	0.2	50	0.75	150	
	Minor	0	0	20	0.05	0.2	12	0.75	48	
S Back	Major	0	0	30	0.05	0.4	120	0.55	190	
	Semi Major	0	0	30	0.05	0.4	65	0.55	150	
	Minor	0	0	30	0.05	0.4	12	0.55	45	

Tabela 6-5 - Parâmetros de variografia utilizados para a Área 2.

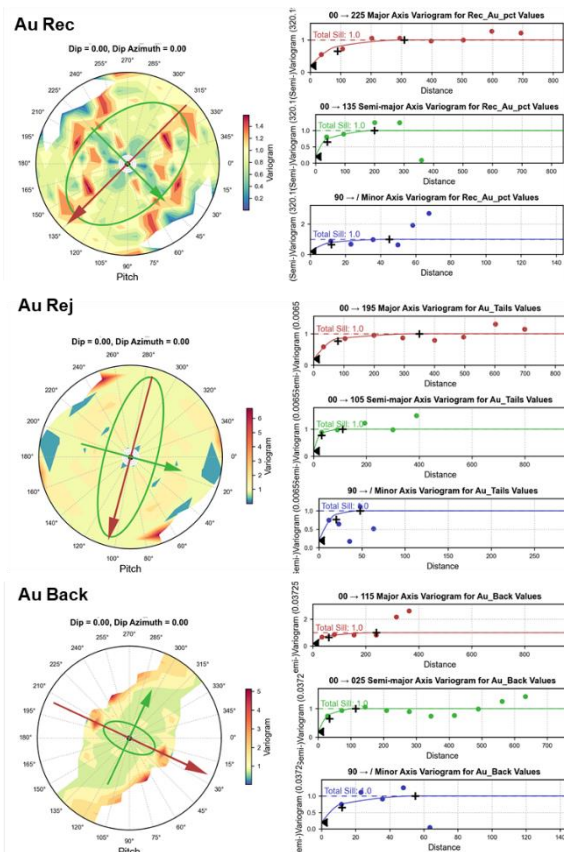


Figura 6.20 - Variogramas das variáveis geometalúrgicas relacionadas ao Ouro para a Área 2.

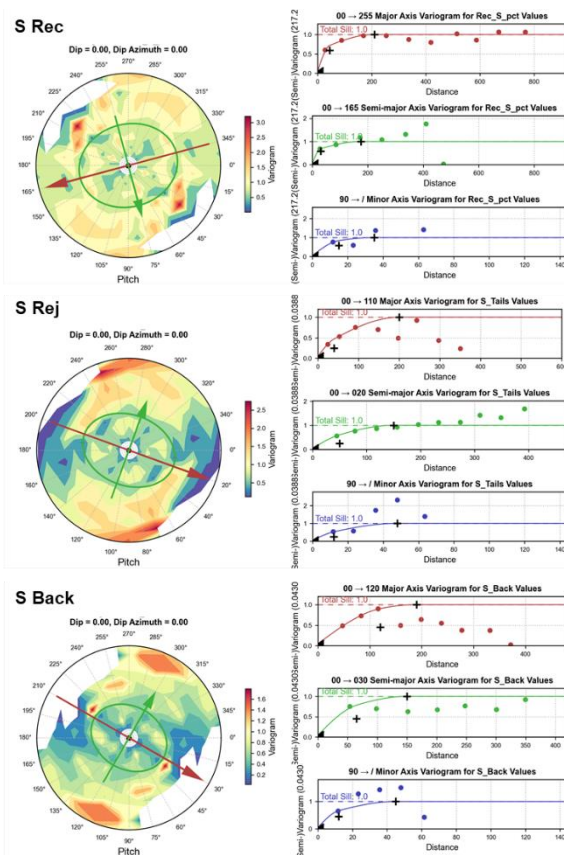


Figura 6.21 - Variogramas das variáveis geometalúrgicas relacionadas ao Enxofre para a Área 2.

6.5 Validação

6.5.1 Área 1

A expectativa condicional para a recuperação de ouro, teor de ouro retrocalculado e teor de ouro no rejeito nas direções leste, norte e vertical realizada para o domínio de rocha fresca da Área 1 são apresentadas na forma de *swath plots* ilustrados na Figura 6.22 e, para as variáveis de recuperação de enxofre, teor de enxofre no rejeito e teor de enxofre retrocalculado, na Figura 6.23. Neles, são apresentadas as curvas de teores médios estimados pelos estimadores de vizinho mais próximo, inverso da distância, krigagem ordinária e o teor médio das amostras.

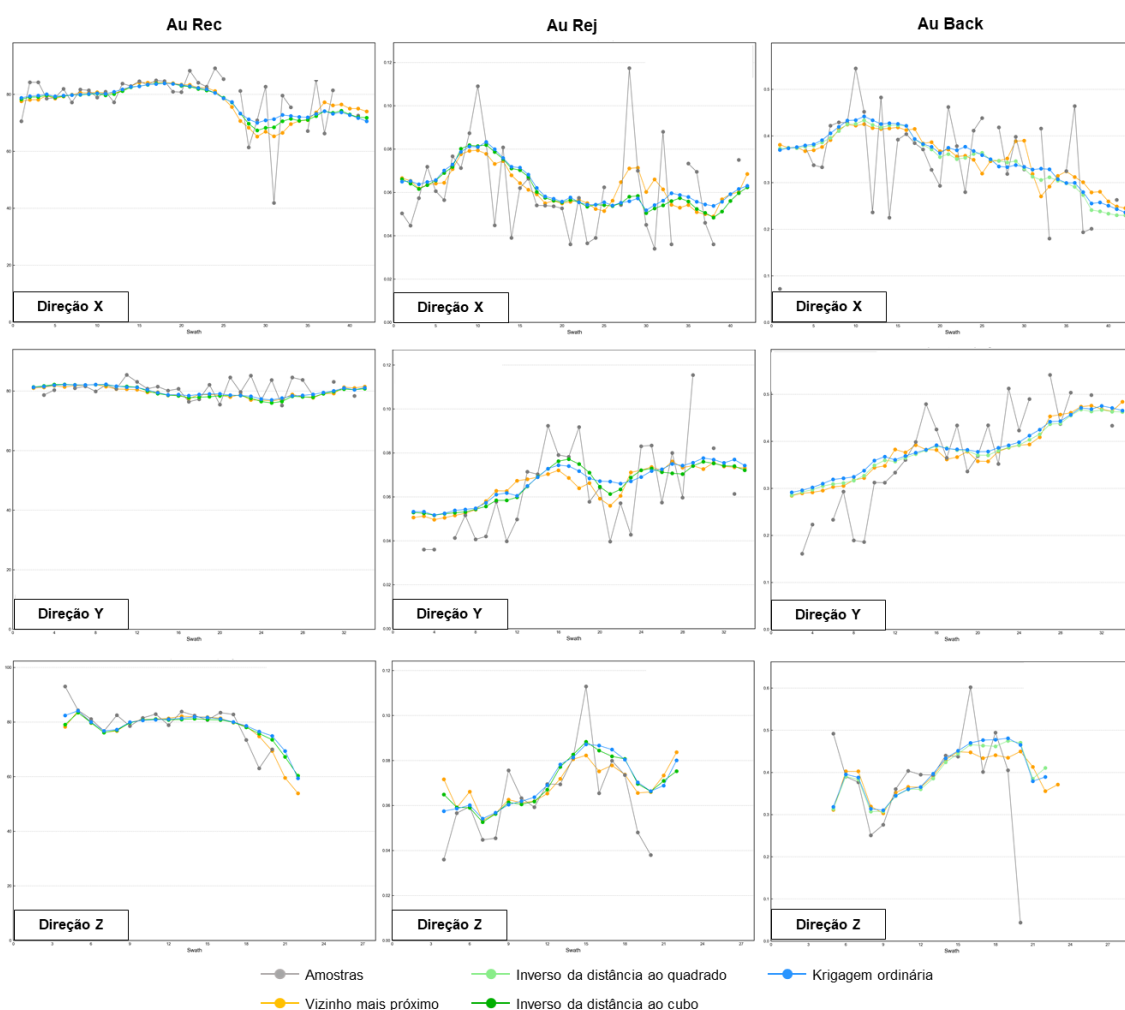


Figura 6.22 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de ouro (Au Rec), teor de ouro no rejeito (Au Rej) e teor de ouro retrocalculado estimados por NN, ID e KO para rocha fresca da Área 1.

De modo geral, as curvas de todos os interpoladores são muito próximas em regiões com alta densidade de amostras. A estimativa por vizinho mais próximo fica discrepante das demais quanto maior ou menor forem as diferenças de médias de valores entre uma região e outra adjacente e em regiões com poucas amostras. A interpolação por krigagem ordinária e inverso da distância apresentam resultados muito semelhantes, com uma leve diferença em regiões com valores anômalos/*outliers* onde a potência ao cubo do ID favorece uma estimativa mais localizada. Assim como esperado, a suavização observada é consequência da utilização de métodos de estimativa lineares e é mais expressiva na estimativa por krigagem ordinária.

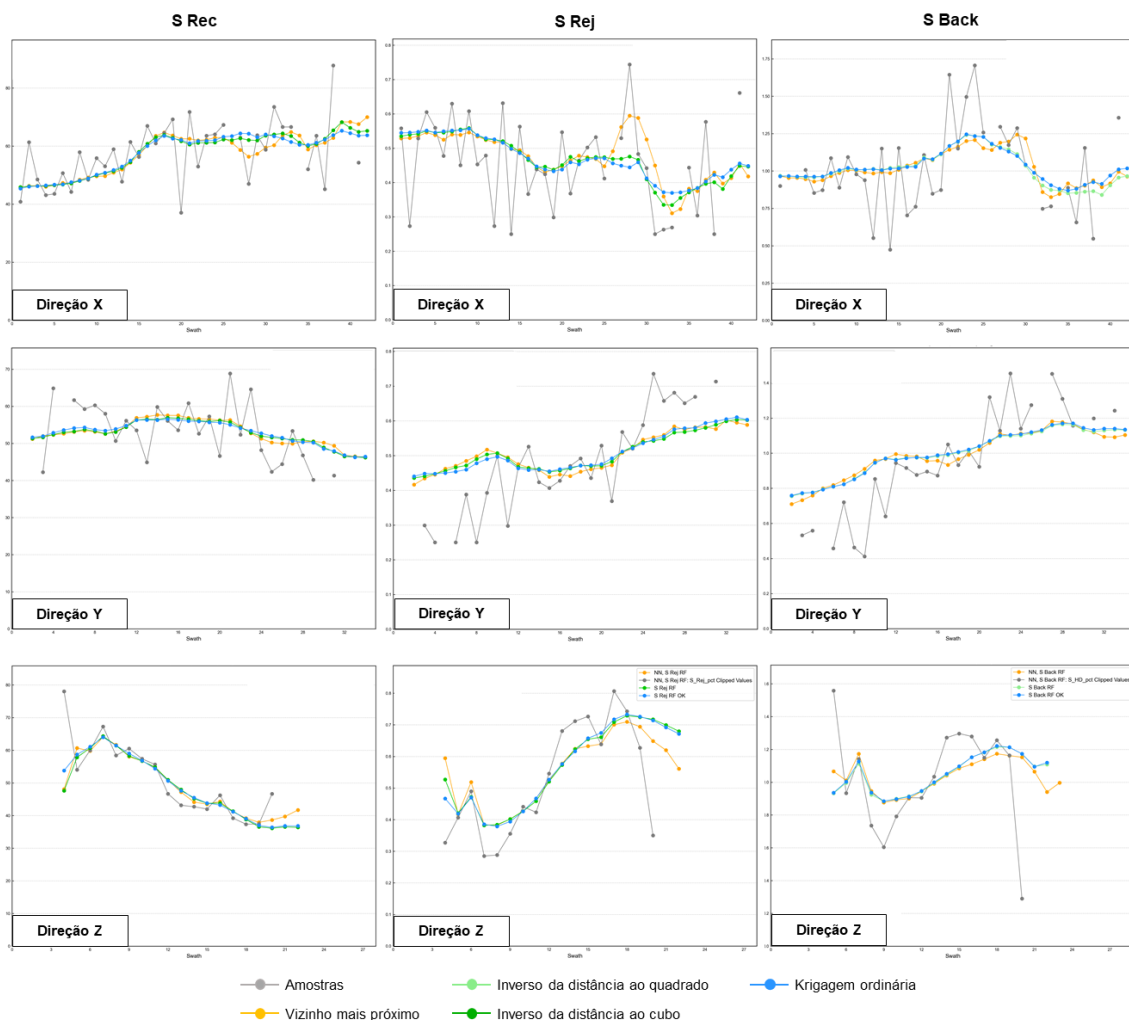


Figura 6.23 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de enxofre (S Rec), teor de enxofre no rejeito (S Rej) e teor de enxofre retrocalculado estimados por NN, ID e KO para rocha fresca da Área 1.

A presença de valores extremos deve ser bem representada na estimativa de variáveis de processo, uma vez que são as baixíssimas recuperações/altos teores de ouro

no rejeito (ou altas recuperações/baixos teores de enxofre no rejeito) que devem ser destacadas para investigação do material deletério e otimização no planejamento de lavra. A utilização de métodos de estimativa lineares, principalmente a krigagem ordinária, pode mascarar a presença de valores anômalos e não destacar regiões que seriam problemáticas no processamento mineral.

Para as variáveis relacionadas ao ouro, as recuperações parecem serem menores na região leste da Área 1 e nas porções mais profundas. Na porção leste, o teor de ouro no rejeito parece aumentar e o teor retrocalculado diminuir. Essas análises devem ser realizadas com cautela, uma vez que pode ser produto do efeito de borda de modelo ou simplesmente pela ausência/menor quantidade de amostras em algumas porções, o que pode resultar em uma estimativa menos precisa. Ao longo da direção Y, os valores de recuperação são aproximadamente constantes e os teores de ouro no rejeito e retrocalculado tendem a aumentar. Regiões com altos teores retrocalculados apresentam, de modo geral, aumento no teor de ouro no rejeito.

Para a recuperação de ouro, a baixa variabilidade de valores das amostras ao longo de todas as direções resulta em estimativas muito próximas e fidedignas aos valores reais através de todos os interpoladores propostos. Assim como observado para os teores de ouro no rejeito e teor de ouro retrocalculado, quanto maior a presença de valores discrepantes, mais as curvas se distanciam uma das outras (apesar de apresentarem a mesma tendência de sub/superestimativa de valores quando comparado às amostras). Nesses casos, o valor interpolado por vizinho mais próximo é o que mais se aproxima do valor das amostras.

Além das variáveis relacionadas ao ouro, um adequado desempenho do processamento do material também pode ser medido pela recuperação de enxofre e seu teor no rejeito. São esperadas baixas recuperações de enxofre (o que significa que os sulfetos estão sendo devidamente separados do ouro) e altos teores no rejeito para o minério de rocha fresca sulfetada. Como o enxofre é depletado no processo de alteração intempérica (sulfetos são facilmente alterados), para o oxidado são esperadas baixas recuperações e baixo teor de enxofre no rejeito.

As maiores variações na recuperação, teor no rejeito e teor retrocalculado estimados de enxofre na rocha fresca são observadas na direção X. De modo geral, as recuperações tendem a aumentar e os teores no rejeito tendem a diminuir ao longo dessa direção. Na direção Y, os teores estimados variam menos apesar de serem observados valores discrepantes entre amostras. Ao longo da direção Z, as recuperações de enxofre tendem a diminuir e os teores no rejeito aumentar, o que pode ser reflexo dos maiores teores (retrocalculados) nas porções mais profundas (quanto mais profundo, mais preservados e em maior abundância estarão os sulfetos). A partir da análise dos *swath plots* das variáveis de enxofre, a região com melhor desempenho de rocha fresca dentro da Área 1 seria a sudoeste devido as baixas recuperações e teores mais elevados no rejeito.

As curvas de todos os estimadores são muito próximas em regiões com maior número de amostras e com menor variação dos valores. A presença de valores extremos/*outliers* faz com que a estimativa por vizinho mais próximo se afaste mais das demais. A estimativa por ID é um pouco menos suavizada quando comparado à KO, por preservar uma estimativa mais localizada, mas em regiões com baixa variância dos valores as curvas são praticamente idênticas.

De modo geral, regiões com malha amostral mais fechada e com baixa variabilidade local de valores tendem a serem melhores estimadas quando utilizado um método linear de interpolação. No caso da estimativa de variáveis como a recuperação de ouro, o ideal seria uma abordagem mais conservadora: valores estimados muito próximos aos das amostras (quanto mais próximas, melhor) ou levemente subestimados. Para o teor de ouro no rejeito é melhor lidar com certo grau de superestimativa (amostras de baixo teor serem estimadas com altos teores) do que o contrário (amostras com alto teor serem consideradas normais, dentro do aceitável).

Os valores das variáveis metalúrgicas podem variar bruscamente de uma amostra para a outra, mesmo que imediatamente próxima, devido diversos fatores geológicos (mineralogia, grau de alteração e hidrotermalismo, presença de estruturas). Essas variações não são bem representadas quando a interpolação dos valores é realizada via métodos lineares. Como esses estimadores buscam sempre a média entre dois valores muito discrepantes, o valor estimado pode não representar à realidade do local e resultar em blocos subestimados/superestimados.

A expectativa condicional para a recuperação de ouro, teor de ouro retrocalculado e teor de ouro no rejeito nas direções leste, norte e vertical realizada para o domínio de oxidado da Área 1 são apresentadas na forma de *swath plots* ilustrados na Figura 6.24 e, para as variáveis de recuperação de enxofre, teor de enxofre no rejeito e teor de enxofre retrocalculado, na Figura 6.25. Neles, são apresentadas as curvas de teores médios estimados pelos estimadores de vizinho mais próximo, inverso da distância e o teor médio das amostras.

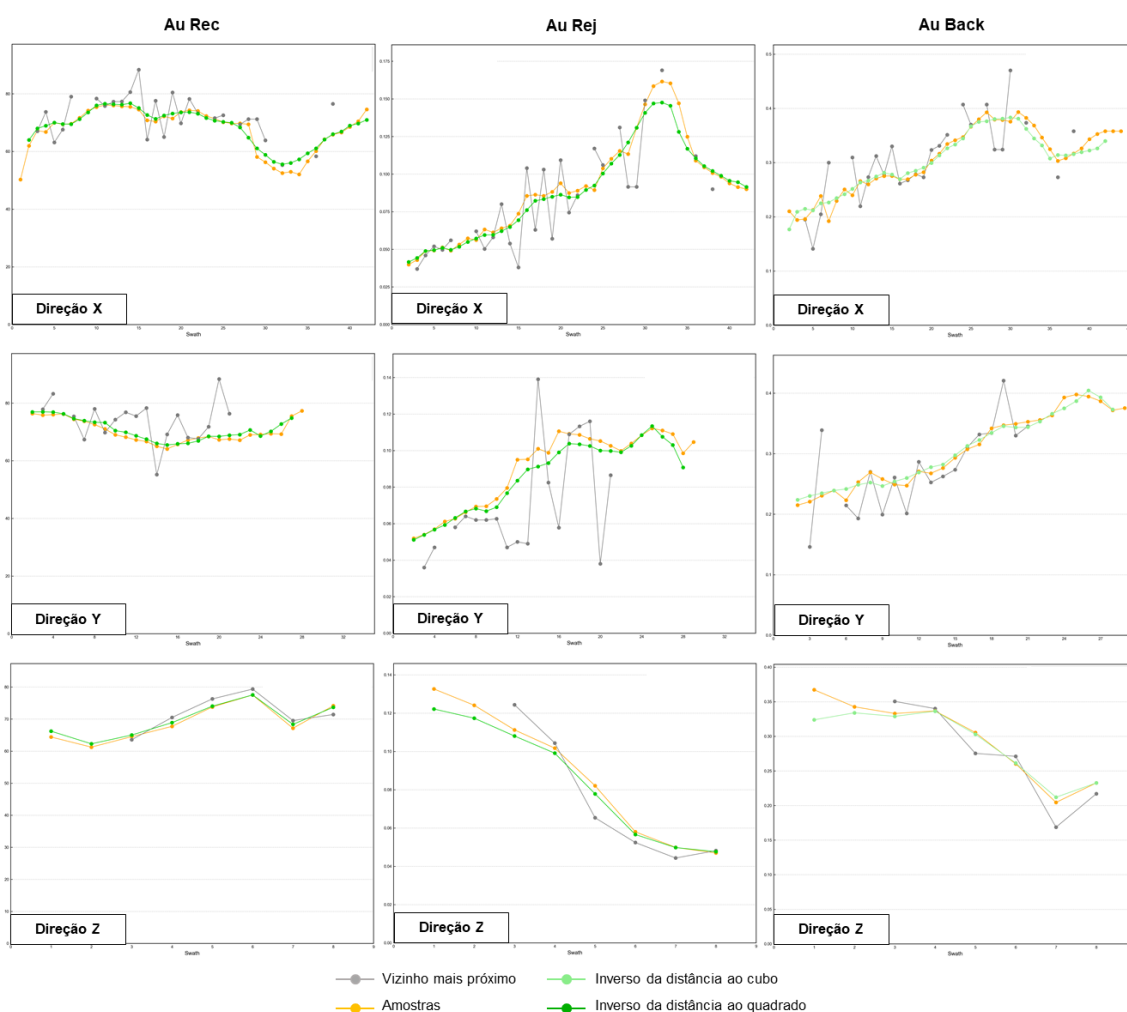


Figura 6.24 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de ouro (Au Rec), teor de ouro no rejeito (Au Rej) e teor de ouro retrocalculado estimados por NN, ID e KO para o oxidado da Área 1.

O número de amostras inseridas dentro do domínio de oxidado é menor devido espessura limitada do perfil e maior dificuldade na recuperação do material no momento da sondagem (nas porções superiores, pode ser mais friável), o que pode resultar em

estimativas menos acuradas (principalmente na região nordeste da Área 1). Na porção oeste, o maior número de amostras disponíveis e baixa variância dos dados resulta em estimativas muito próximas por ambos interpoladores para a recuperação de ouro.

Os valores estimados para teor de ouro no rejeito e teor de ouro retrocalculado aumentam ao longo da direção X, apesar da baixa confiabilidade na porção leste. Ao longo da direção Y, os valores de teor de ouro no rejeito parecem superestimados devido amostras pontuais com valores altos muito discrepantes. As estimativas ao longo da direção Z parecem estar mais fidedignas aos valores das amostras.

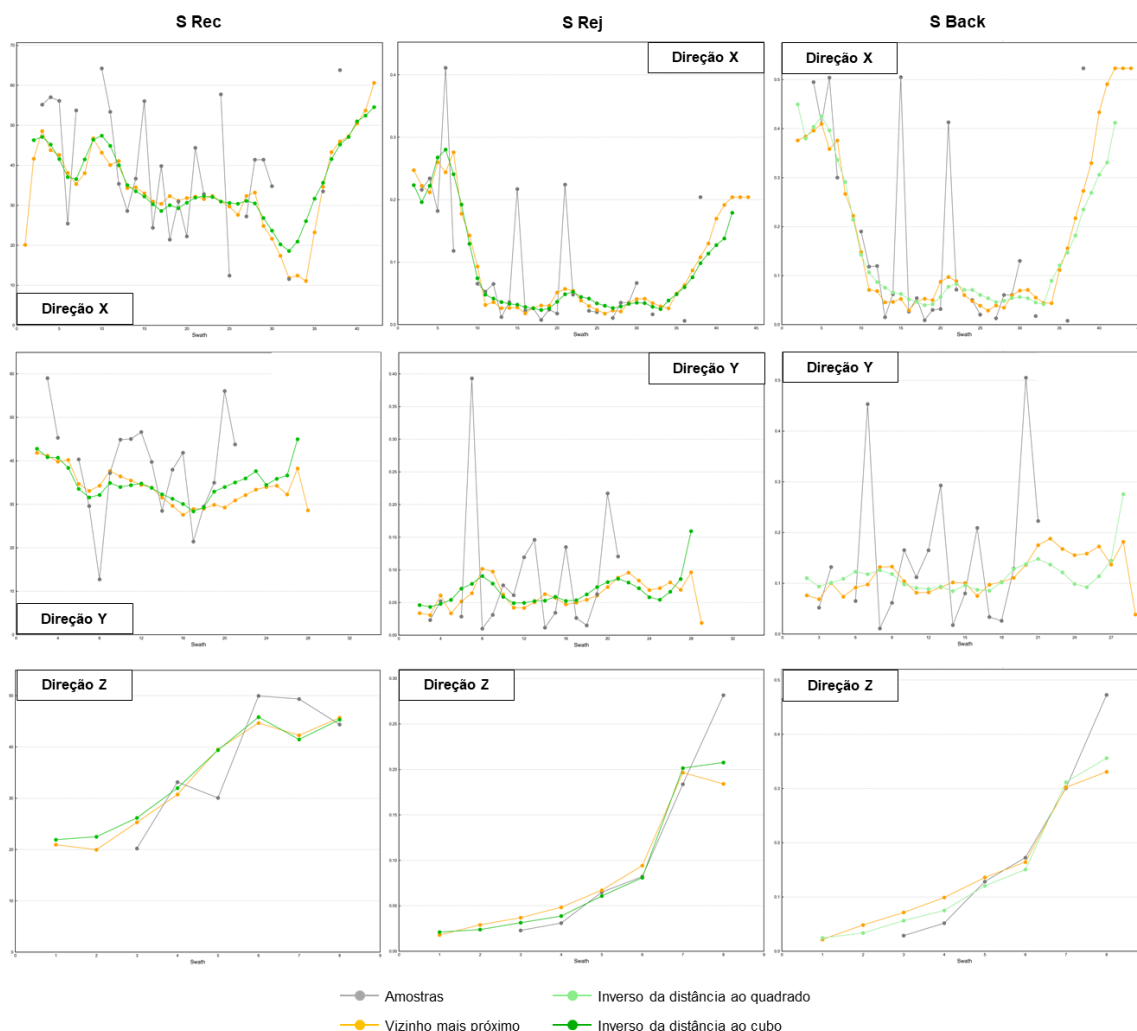


Figura 6.25 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de enxofre (S Rec), teor de enxofre no rejeito (S Rej) e teor de enxofre retrocalculado estimados por NN, ID e KO para o oxidado da Área 1.

Para as variáveis relacionadas ao enxofre, os valores médios das amostras variam muito de um ponto para outro. De modo geral, a recuperação de enxofre parece

subestimada ao longo das direções X e Y. Para o teor de enxofre no rejeito e teor retrocalculado, a presença de poucos valores discrepantes ao longo da direção X resultou em curvas muito próximas dos valores das amostras e alguns valores anômalos que não puderam ser representados na estimativa. Ao longo da direção Y, é observada uma maior variação dos valores das amostras que também foram mascarados na estimativa. As estimativas ao longo da direção Z também parecem estar mais fidedignas aos valores das amostras para as variáveis relacionadas ao enxofre.

A Tabela 6.6 apresenta a comparação da estatística das médias das amostras x estatística dos blocos estimados por vizinho mais próximo, inverso da distância e krigagem ordinária para a Área 1.

		Amostras							Blocos NN								
		Média	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Quartil Inferior	Mediana	Quartil Superior	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Quartil Inferior	Mediana	Quartil Superior	Máximo
OX, Ore	Au Back	0.296	0.102	0.010	0.085	0.231	0.300	0.363	0.582	0.311	0.101	0.010	0.085	0.269	0.312	0.358	0.582
	Au Rec	72.62	9.87	97.39	42.21	67.02	74.07	80.06	88.33	68.83	11.28	127.20	42.21	61.58	71.55	77.30	88.33
	Au Rej	0.080	0.040	0.002	0.036	0.050	0.069	0.101	0.220	0.094	0.041	0.002	0.036	0.062	0.087	0.114	0.220
	S Back	0.14	0.20	0.04	0.01	0.02	0.05	0.17	0.84	0.11	0.18	0.03	0.01	0.01	0.02	0.12	0.84
	S Rec	36.54	17.43	303.90	9.58	21.22	34.77	53.72	69.52	33.05	17.48	305.57	9.58	20.10	28.60	45.30	69.52
	S Rej	0.08	0.13	0.02	0.01	0.01	0.03	0.10	0.75	0.06	0.11	0.012	0.006	0.011	0.02	0.05	0.75
RF, Ore	Au Back	0.381	0.194	0.038	0.044	0.251	0.342	0.474	1.630	0.382	0.198	0.039	0.044	0.256	0.346	0.473	1.630
	Au Rec	80.08	11.93	142.40	15.88	77.67	83.79	87.18	93.03	79.41	11.87	140.82	15.88	76.16	83.48	86.48	93.03
	Au Rej	0.065	0.053	0.003	0.015	0.041	0.053	0.068	0.566	0.065	0.047	0.002	0.015	0.040	0.054	0.072	0.566
	S Back	0.98	0.40	0.16	0.25	0.65	0.91	1.31	2.18	1.01	0.37	0.13	0.25	0.72	0.95	1.30	2.18
	S Rec	51.08	14.21	202.01	16.21	39.12	51.67	61.95	87.75	53.30	14.49	210.04	16.21	41.54	52.98	64.39	87.75
	S Rej	0.49	0.28	0.08	0.04	0.27	0.44	0.68	1.34	0.50	0.25	0.064	0.25	0.28	0.41	0.68	1.34
		Blocos ID							Blocos OK								
		Média	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Quartil Inferior	Mediana	Quartil Superior	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Quartil Inferior	Mediana	Quartil Superior	Máximo
OX, Ore	Au Back	0.304	0.073	0.005	0.091	0.253	0.306	0.349	0.582	-	-	-	-	-	-	-	-
	Au Rec	69.51	8.51	72.46	43.98	64.40	71.27	75.25	87.79	-	-	-	-	-	-	-	-
	Au Rej	0.090	0.033	0.001	0.036	0.062	0.088	0.111	0.204	-	-	-	-	-	-	-	-
	S Back	0.11	0.12	0.02	0.01	0.02	0.06	0.15	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-
	S Rec	33.93	12.63	159.44	9.82	22.97	32.22	43.81	68.24	-	-	-	-	-	-	-	-
	S Rej	0.06	0.08	0.01	0.01	0.02	0.03	0.07	0.72	-	-	-	-	-	-	-	-
RF, Ore	Au Back	0.383	0.148	0.022	0.049	0.283	0.361	0.470	1.328	0.388	0.144	0.021	0.080	0.287	0.372	0.475	1.246
	Au Rec	79.37	8.63	74.50	22.10	77.00	81.95	84.80	92.95	79.71	7.34	53.95	36.84	77.12	81.96	84.60	92.15
	Au Rej	0.067	0.036	0.013	0.018	0.046	0.057	0.074	0.551	0.067	0.030	0.001	0.028	0.048	0.059	0.075	0.339
	S Back	1.01	0.32	0.10	0.25	0.75	1.00	1.28	2.14	1.01	0.31	0.10	0.29	0.75	1.02	1.28	2.03
	S Rec	53.21	11.95	142.89	19.74	44.06	53.58	62.84	87.59	53.27	11.09	123.02	24.80	44.64	53.65	62.34	80.79
	S Rej	0.51	0.21	0.04	0.25	0.32	0.47	0.65	1.28	0.51	0.20	0.041	0.25	0.33	0.48	0.65	1.12

Tabela 6-6 - Comparação dos dados estatísticos das amostras x krigado para Área 1.

Apesar da comparação das médias entre amostras x blocos estimados não ser o melhor método para comprovar a qualidade da estimativa de variáveis não-aditivas, essa prática foi aqui adotada para verificação de tendências de subestimativa/superestimativa e para obter uma dimensão dos efeitos dos métodos adotados.

Para o domínio de rocha fresca, cuja malha de amostragem é mais adensada, a diferença relativa entre a média das amostras e a média dos blocos estimados por todos os métodos é menor que 5% para todas as variáveis. As menores diferenças possíveis para as variáveis Au Back, Au Rej, S Back e S Rej foram obtidos pela estimativa via NN. Apesar dos resultados serem muito semelhantes, a estimativa por KO resultou na menor diferença entre média blocos e amostras para a variável Au Rec e a estimativa por ID para a variável de S Rec. De modo geral, os valores médios obtidos para o ID e KO são muito próximos, mas o primeiro apresenta os melhores resultados para o conjunto de variáveis.

As baixas diferenças entre os valores médios das amostras e os estimados podem ser explicadas pela maior quantidade de dados disponíveis no domínio de rocha fresca e/ou menor variabilidade entre os valores das amostras. Quanto menor a variabilidade de valores das variáveis metalúrgicas entre um local e outro, a estimativa pelos métodos lineares é a mais próxima possível do valor das amostras.

Com exceção da recuperação de enxofre, os valores interpolados por NN são os mais próximos dos valores das amostras para rocha fresca. Para recuperação de ouro, a diferença relativa entre os valores médios estimados por todos os métodos e o das amostras são todos menores que 1%, com leve tendência de subestimativa. A estimativa das variáveis de enxofre apresentou as maiores diferenças relativas quando comparadas às amostras, mas todas abaixo de 5% para rocha fresca. As diferenças obtidas por KO são maiores para as variáveis Au Back, Au Rej e S Rej. O estimado por ID aproximou mais do valor das amostras, mas não tanto quanto o NN para a maioria das variáveis.

Com exceção da variável Au Rec, que apresentou valores estimados médios levemente maiores quando comparados às amostras para todos os métodos, todas as variáveis apresentaram valores estimados com leve tendência de sobrestimativa para todos os métodos. Assim sendo, não foi observado uma correlação clara entre subestimativa ou superestimativa e os métodos utilizados na estimativa.

Para o domínio de oxidado, os resultados deixam um pouco a desejar. Para as variáveis Au Back e Au Rec, as diferenças são menores que 5% para ambos os métodos de interpolação. Para Au Rec, em particular, a subestimativa em torno de 4% deixa o modelo mais conservador e não configura grandes problemas. Para Au Rej, a diferença é de 12% para o estimado por ID e 18% para o estimado por NN quando comparado às amostras, com ambos métodos sobrestimando os teores. Esse cenário também é conservador, uma vez que é esperado que esses resultados estejam todos abaixo de determinado limite. Atualmente, o teor de ouro no rejeito limite para o material ser considerado como “não problemático” é abaixo de 0.011 g/ton.

As diferenças para as variáveis de enxofre são maiores - principalmente para a estimativa via ID - e refletem baixa confiabilidade na estimativa, possivelmente reflexo da baixa densidade amostral. Para a recuperação de enxofre, a diferença foi em torno de 7% quando comparado o valor médio estimado por ID com o valor médio das amostras; para o teor no rejeito e teor retrocalculado de enxofre, em torno de 20%.

Quando considerado as camadas de quantidade de argila modeladas (pouca, média e muita) no domínio de oxidado para a Área 1 observa-se que quanto maior a quantidade de argila, menor a recuperação e ligeiramente maior o teor de Au no rejeito (Figura 6.26).

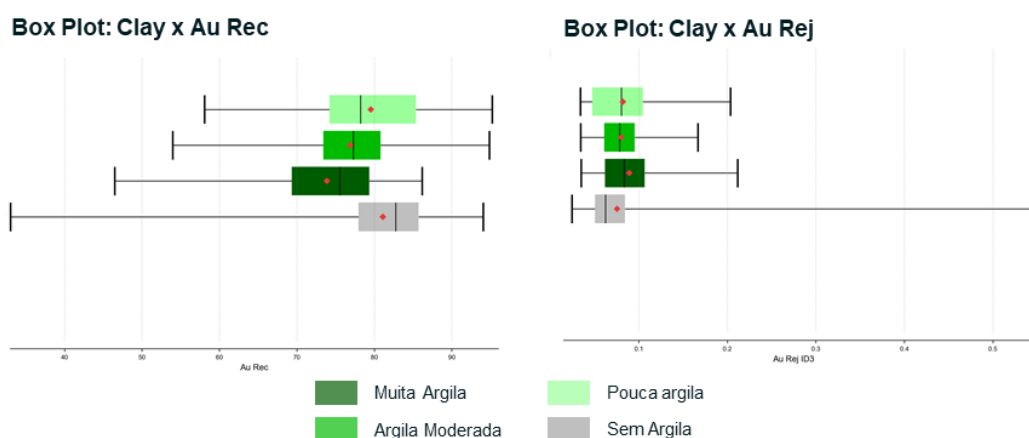


Figura 6.26 - Box Plot das variáveis Au Rec e Au Rej pela quantidade de argila modelada para a Área 1.

A camada de pouca argila, geralmente inserida nas porções inferiores do perfil (saprólito inferior e zona de transição) apresenta as melhores recuperações, mas teor médio de Au no rejeito muito semelhante à camada com quantidade intermediária de

argila. De modo geral, as diferenças do teor médio de Au no rejeito não variam significativamente com o incremento de argila, mas as recuperações sim.

6.5.2 Área 2

Para Área 2, também foi realizada a expectativa condicional nas direções leste, norte e vertical para os domínios de oxidado e rocha fresca. A Figura 6.27 ilustra os *swath plots* para as variáveis relacionadas ao ouro e a Figura 6.28 para as variáveis relacionadas ao enxofre, ambos para o domínio de rocha fresca. Neles, são apresentadas as curvas de teores médios estimados pelos estimadores de vizinho mais próximo, inverso da distância, krigagem ordinária e o teor médio das amostras.

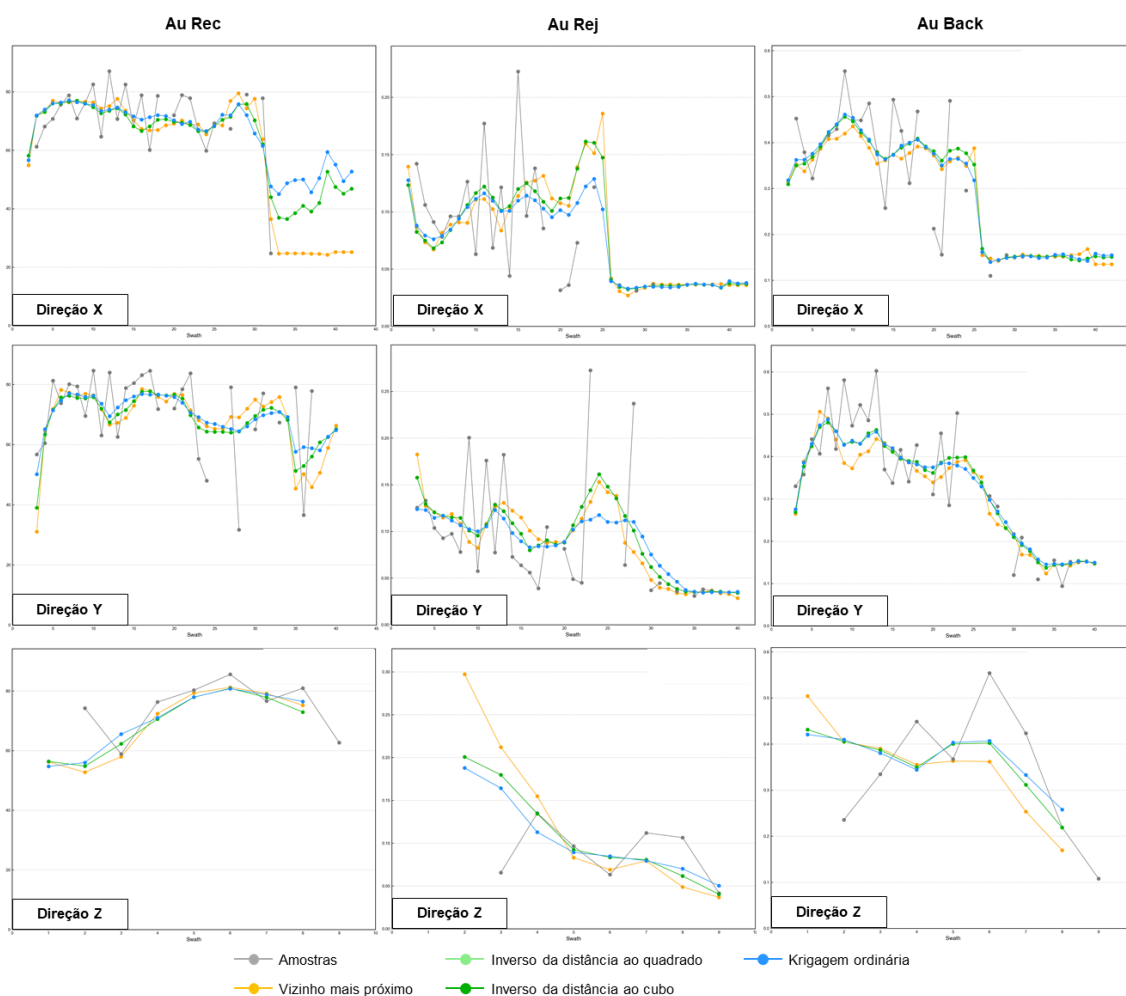


Figura 6.27 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de ouro (Au Rec), teor de ouro no rejeito (Au Rej) e teor de ouro retrocalculado estimado por NN, ID e KO para rocha fresca da Área 2.

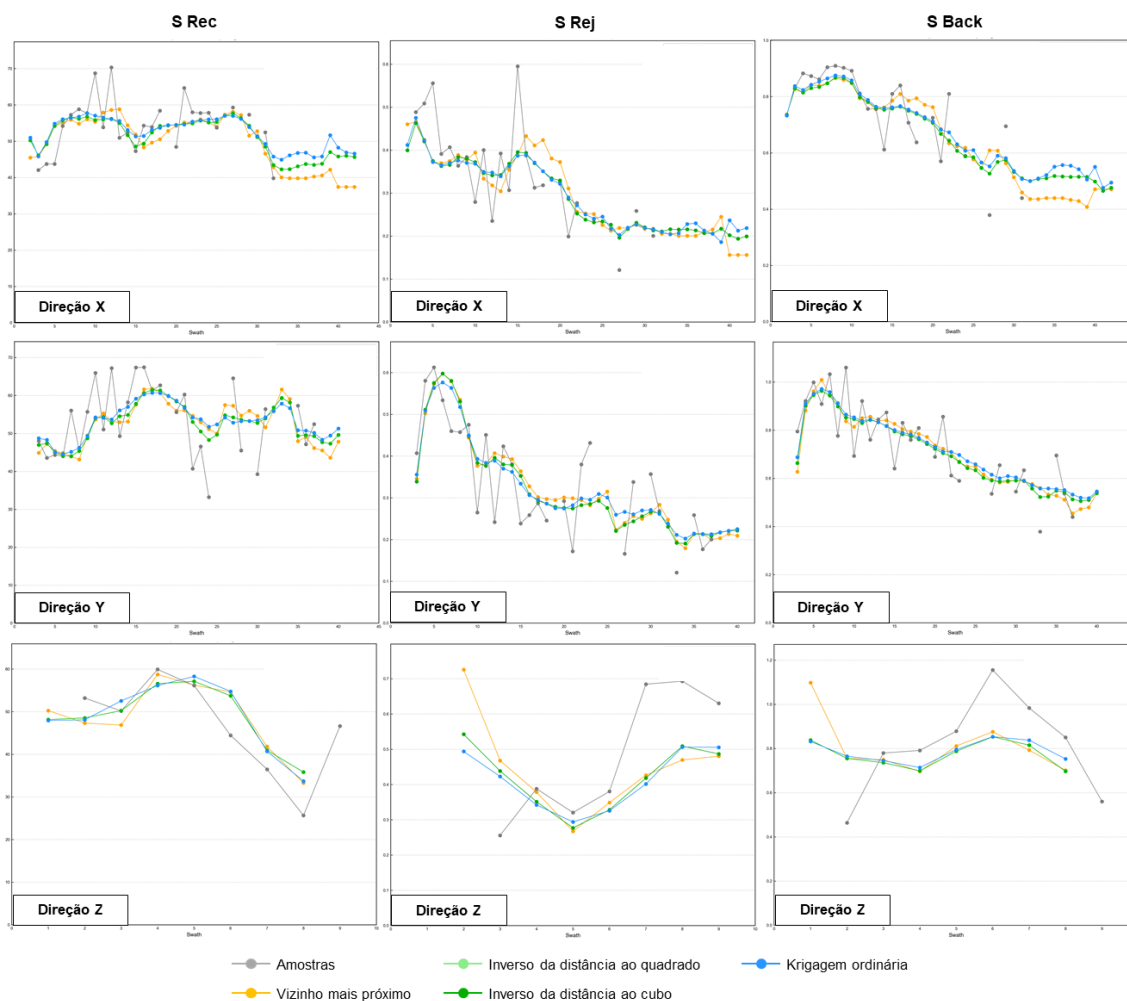


Figura 6.28 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de enxofre (S Rec), teor de enxofre no rejeito (S Rej) e teor de enxofre retrocalculado estimados por NN, ID e KO para rocha fresca da Área 2.

Assim como observado para a Área 1, a suavização observada é consequência da utilização de um método de estimativa linear. A variabilidade dos valores das amostras para a Área 2 é, de modo geral, maior do que aquela observada para a Área 1, o que pode resultar em uma estimativa menos acurada pelos métodos lineares (principalmente para os teores no rejeito e teores retrocalculados). Isso pode ser consequência da menor quantidade de amostras disponíveis para a estimativa da Área 2 e da malha de amostragem mais espaçada do que o padrão (70m x 70m). O extremo leste e norte da Área 2 tem a estimativa comprometida devido ausência ou pouca presença de amostras.

Para a recuperação de ouro, apesar das curvas serem muito próximas, é observada uma leve tendência de sobrestimativa da krigagem em relação ao inverso da distância nas direções X e Y em regiões com alta discrepância de valores. Os valores estimados para recuperação de Au parecem ser melhores representados na direção vertical.

Assim como discutido anteriormente, a krigagem tende a suavizar mais do que o ID, que por sua vez busca uma estimativa mais localizada. A estimativa por vizinho mais próximo é distante das demais quando a variabilidade de valores é muito alta, pois é o método que melhor representa os valores extremos. Para o teor de ouro no rejeito são observados diversos *outliers* e, por este motivo, a curva da estimativa por NN pode se distanciar bastante das demais. Em regiões com baixa densidade amostral, as curvas do estimado por ID e NN são próximas.

Os teores retrocalculados de ouro e enxofre tendem a serem menores na porção leste e norte da Área 2 (devido a mineralização menos expressiva e/ou efeito da baixa densidade amostral), o que parece refletir em menores teores obtidos no rejeito. Para o enxofre, a configuração das curvas é mantida: quanto maior a discrepância de valores entre amostras adjacentes, mais estas se separam por cada método tratar esses *outliers* de maneiras distintas. A krigagem é o que mais suaviza, seguido do ID3 e, finalmente, o NN. Regiões que contam com maior densidade amostral e amostras adjacentes umas às outras com valores menos discrepantes geram estimativas muito próximas para todos os métodos, principalmente ID3 e KO.

A expectativa condicional para a recuperação de ouro, teor de ouro retrocalculado e teor de ouro no rejeito nas direções leste, norte e vertical realizada para o domínio de oxidado da Área 2 são apresentadas na forma de *swath plots* ilustrados na Figura 6.29 e, para as variáveis de recuperação de enxofre, teor de enxofre no rejeito e teor de enxofre retrocalculado, na Figura 6.30. Neles, são apresentadas as curvas de teores médios estimados por vizinho mais próximo, inverso da distância e o teor médio das amostras.

Para o oxidado, as curvas da estimativa de recuperação por ID3 e por NN para ouro e enxofre são muito próximas principalmente em regiões com um maior número de amostras, como a porção sudoeste. Na porção central, o ID3 tende a sobrestimar em relação ao NN e na porção mais à leste (onde praticamente não há amostras) tende a subestimar. A porção norte também conta com pouquíssimas amostras. Na direção vertical, ambos os métodos de interpolação tendem a sobrestimar.

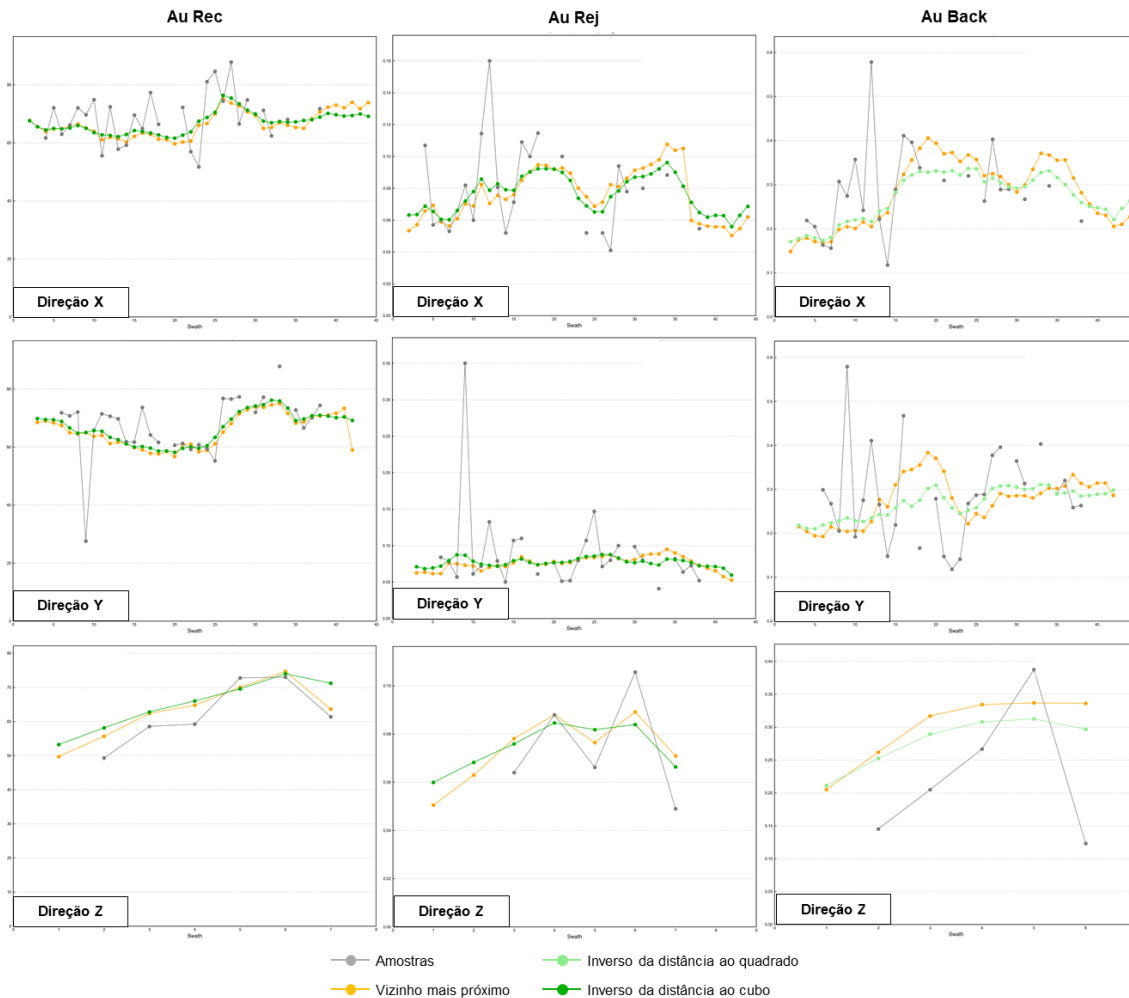


Figura 6.29 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de ouro (Au Rec), teor de ouro no rejeito (Au Rej) e teor de ouro retrocalculado estimado por NN, ID e KO para o oxidado da Área 2.

São observados diversos valores *outliers* que parecem ser bem representadas pelo ID3 - uma vez que esse método valoriza mais uma estimativa local – mas que ainda são mascarados pela suavização intrínseca do processo de interpolação linear. Como as curvas dos interpoladores tendem a buscar uma média entre os valores extremos das amostras, a suavização dos valores de recuperação podem ser um problema quando da sobrestimativa em regiões com amostras de menores recuperações.

As curvas de estimativa de teor de Au no rejeito para o domínio de oxidado revelam uma leve tendência de sobrestimativa do ID3 em relação ao NN à oeste (que conta com maior número de amostras) e de subestimativa mais à leste. Cabe ressaltar que na borda do extremo leste do modelo, ambas estimativas não são confiáveis devido à rara presença de amostras. Na direção Y, as curvas de ambos métodos são muito próximas com uma leve tendência de sobrestimativa do ID3 em relação ao NN. Como esperado, a

recuperação e o teor de Au no rejeito das amostras varia muito na direção vertical devido aprofundamento do perfil intempérico.

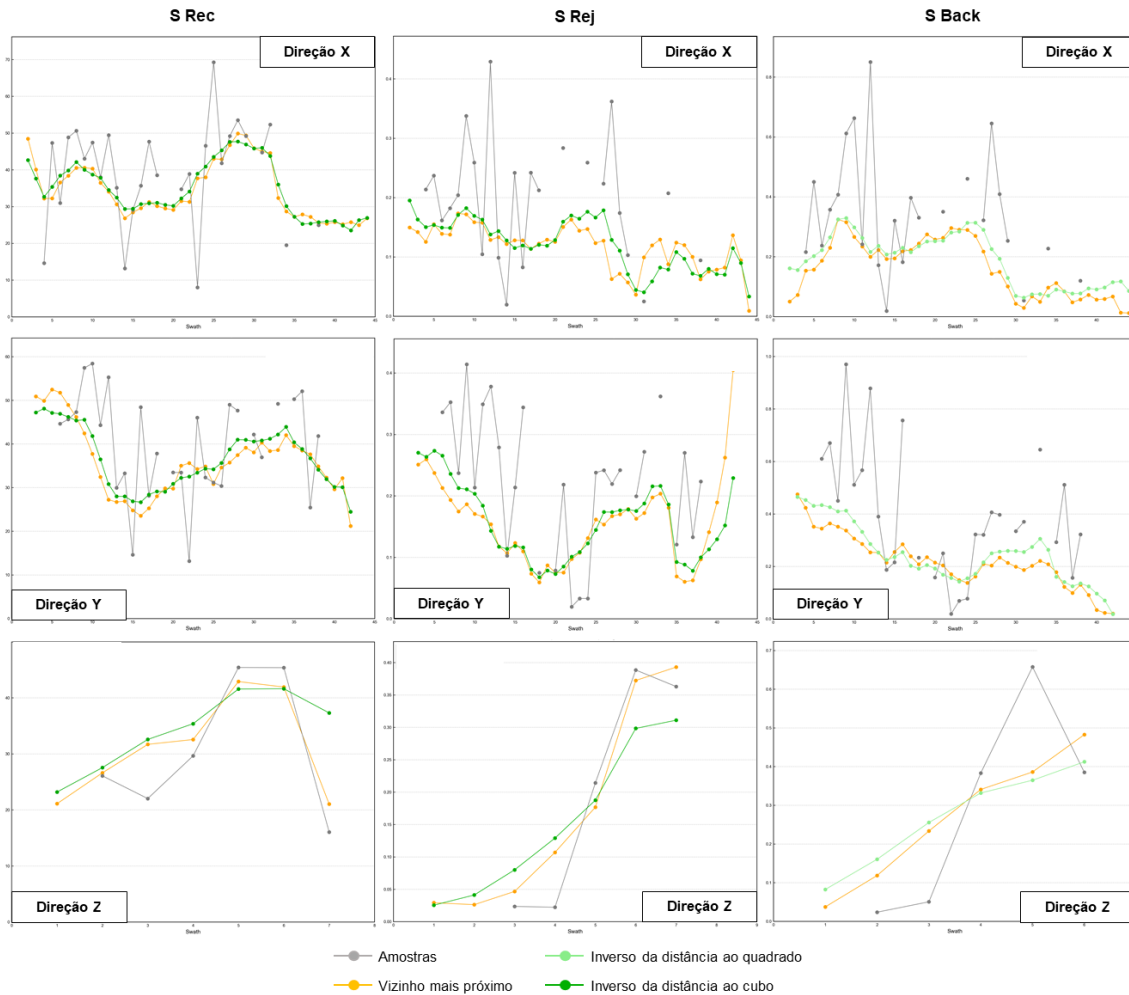


Figura 6.30 - Swath Plot nas direções X, Y e Z da recuperação de enxofre (S Rec), teor de enxofre no rejeito (S Rej) e teor de enxofre retrocalculado estimados por NN, ID e KO para o oxidado da Área 2.

Para o teor retrocalculado de ouro, a estimativa por vizinho mais próximo é pouco acurada na região central do modelo devido baixa densidade amostral. Os extremos oeste e sul contam com um maior número de amostras e tendência de sobrestimativa do ID2 em relação ao NN devido a alta discrepância dos valores de amostras adjacentes. Os *swath plots* das variáveis metalúrgicas relacionadas ao enxofre revelam configuração muito semelhante daqueles do ouro. Os valores entre amostras adjacentes parecem ser ainda mais discrepantes, o que resultou em uma tendência generalizada de sobrestimativa do ID em relação ao NN.

Apesar das limitações intrínsecas da estimativa de variáveis metalúrgicas por estimadores lineares, ainda é possível identificar regiões com tendência de apresentar

baixo e alto desempenho (este representado por alta recuperação de ouro, baixa recuperação de enxofre, baixo teor de ouro no rejeito, alto teor de enxofre no rejeito) no processamento mineral. Além disso, também é possível determinar áreas que necessitam de malha amostral mais fechada para caracterização mais acurada do material (ou devido à alta variabilidade/discrepância de valores ou devido à baixa densidade amostral).

A Tabela 6.7 apresenta a comparação da estatística das amostras x blocos krigados para ambos domínios da Área 2. Com poucas exceções, é observado que os valores médios estimados por todos os métodos tendem a serem menores quando comparados aos valores médios das amostras, para ambos os domínios. Essa diferença pode estar em parte relacionada ao agrupamento das amostras, pois na Área 2 a malha de sondagem é menos adensada. Esse problema é tratado no ID por meio do desagrupamento de amostras e automaticamente pela KO, que por si só é um método que “desclusteriza” amostras.

		Amostras							Blocos NN								
		Média	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Quartil Inferior	Mediana	Quartil Superior	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Quartil Inferior	Mediana	Quartil Superior	Máximo
OX, Ore	Au Back	0.268	0.145	0.021	0.085	0.160	0.248	0.340	0.950	0.285	0.206	0.043	0.085	0.143	0.247	0.340	0.950
	Au Rec	66.70	13.26	175.74	25.57	56.48	67.91	74.97	95.92	64.41	12.81	164.19	27.57	54.73	64.59	72.11	95.92
	Au Rej	0.081	0.049	0.002	0.023	0.049	0.071	0.092	0.350	0.077	0.044	0.002	0.023	0.044	0.064	0.094	0.350
	S Back	0.32	0.31	0.10	0.01	0.02	0.20	0.61	0.99	0.21	0.28	0.08	0.01	0.01	0.02	0.41	0.99
	S Rec	37.43	17.43	303.87	8.00	21.05	35.90	51.64	72.92	34.22	17.46	304.72	8.00	20.64	31.71	47.32	72.92
	S Rej	0.19	0.19	0.040	0.003	0.020	0.11	0.34	0.61	0.13	0.17	0.028	0.003	0.012	0.02	0.25	0.61
RF, Ore	Au Back	0.402	0.194	0.038	0.094	0.274	0.372	0.491	0.950	0.362	0.182	0.033	0.094	0.249	0.323	0.452	0.950
	Au Rec	72.01	18.04	325.36	12.71	62.68	79.07	84.64	94.40	71.13	19.00	360.84	12.71	62.68	79.07	83.76	94.40
	Au Rej	0.103	0.081	0.007	0.018	0.046	0.073	0.134	0.350	0.100	0.094	0.009	0.018	0.039	0.055	0.120	0.350
	S Back	0.82	0.21	0.04	0.36	0.66	0.81	0.96	1.30	0.76	0.19	0.04	0.36	0.63	0.78	0.86	1.30
	S Rec	53.72	14.74	217.29	13.72	41.70	57.86	64.83	77.84	53.61	14.35	206.04	13.72	42.17	56.45	64.55	77.84
	S Rej	0.39	0.20	0.040	0.12	0.25	0.34	0.49	0.92	0.35	0.18	0.034	0.12	0.22	0.30	0.43	0.92
		Blocos ID							Blocos OK								
		Média	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Quartil Inferior	Mediana	Quartil Superior	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Quartil Inferior	Mediana	Quartil Superior	Máximo
OX, Ore	Au Back	0.270	0.114	0.013	0.104	0.176	0.250	0.331	0.863	-	-	-	-	-	-	-	-
	Au Rec	65.05	9.60	92.14	27.82	58.11	65.91	71.79	93.86	-	-	-	-	-	-	-	-
	Au Rej	0.078	0.030	0.001	0.036	0.059	0.070	0.090	0.348	-	-	-	-	-	-	-	-
	S Back	0.23	0.21	0.05	0.01	0.04	0.17	0.37	0.97	-	-	-	-	-	-	-	-
	S Rec	34.46	12.63	159.61	8.10	24.25	35.75	44.62	72.92	-	-	-	-	-	-	-	-
	S Rej	0.14	0.13	0.017	0.009	0.022	0.09	0.24	0.58	-	-	-	-	-	-	-	-
RF, Ore	Au Back	0.375	0.134	0.018	0.100	0.301	0.370	0.449	0.867	0.374	0.124	0.015	0.114	0.316	0.373	0.440	0.776
	Au Rec	71.11	13.82	191.01	17.50	64.37	75.48	81.14	91.82	72.07	10.71	114.67	21.77	65.99	74.57	80.47	87.55
	Au Rej	0.101	0.069	0.005	0.019	0.053	0.075	0.126	0.349	0.095	0.048	0.002	0.029	0.060	0.086	0.120	0.325
	S Back	0.75	0.15	0.02	0.39	0.64	0.76	0.84	1.23	0.76	0.14	0.02	0.44	0.66	0.76	0.84	1.23
	S Rec	53.70	10.50	110.31	14.04	46.75	55.58	61.19	76.97	54.35	8.51	72.43	26.78	49.21	55.21	60.24	74.26
	S Rej	0.34	0.15	0.022	0.12	0.23	0.30	0.39	0.89	0.34	0.13	0.017	0.16	0.25	0.31	0.39	0.83

Tabela 6-7 - Comparação dos dados estatísticos das amostras x krigado para Área 2.

A estimativa da recuperação por todos os métodos aplicados está conservadora em uma margem aceitável para ambos domínios. Já os resultados obtidos para o teor de ouro no rejeito precisam ser tratados com cautela, já que teores subestimados podem mascarar materiais potencialmente problemáticos e levar ao planejamento de blends inadequados.

Os piores resultados da estimativa são das variáveis relacionadas à enxofre, que possui importância secundária. Cabe salientar que o enxofre é quase que inteiramente lixiviado nas porções superiores do perfil intempérico e aumenta em direção à rocha fresca, presente principalmente nos sulfetos. Assim sendo, o resultado da estimativa das variáveis de enxofre no oxidado não possuem grande importância.

Como o minério é do tipo sulfetado, um alto teor de enxofre no rejeito (principalmente da porção inferior da zona de transição e rocha fresca, que é onde estará preservado) indica que as etapas de beneficiamento estão eficientes na expulsão dos minerais de sulfetos do concentrado. Da mesma forma, a baixa recuperação de enxofre do concentrado indica que os sulfetos estão sendo devidamente separados na etapa de flotação.

Para o oxidado, as diferenças relativas entre os valores médios das amostras x blocos são menores com a estimativa via inverso da distância para todas as variáveis. O método de inverso da distância apresentou diferenças relativas médias aceitáveis (abaixo de 5%) para todas as variáveis relacionadas ao ouro. Para a recuperação de enxofre, a diferença foi em torno de 8% para ambos os métodos; para o teor no rejeito e teor retrocalculado de enxofre, superior à 25%.

Para o domínio de rocha fresca, a diferença relativa entre a média das amostras e a média dos blocos estimados por NN é menor que 5% para as variáveis mais importantes: recuperação de ouro, teor de ouro no rejeito e recuperação de enxofre. Para ID e KO, isso foi observado apenas para as variáveis de recuperação. As maiores diferenças (> 10%) foram encontradas na estimativa do teor de enxofre no rejeito para todos os métodos. Os valores médios obtidos para o ID e KO são muito próximos, mas o último parece apresentar os melhores resultados para o conjunto de variáveis.

Quando as camadas de quantidade de argila modeladas (pouca, média e muita) no oxidado para a Área 2 (Figura 6.31) são consideradas, é observado que quanto mais argila, menor a recuperação. A variabilidade de teores de Au no rejeito é semelhante para as camadas com pouca e média argila, mas a média e mediana do teor é consideravelmente maior para pouca argila. Isso significa que, apesar de existir a tendência de a recuperação ser maior nessa camada, o teor de Au no rejeito também tende a ser mais alto. Isso pode ser devido material argiloso com alto teor cabeça de Au e/ou que é possível estudar mecanismos para otimizar a recuperação. Como esperado, a camada com muita quantidade de argila é a que apresenta os menores teores médios de recuperação, mas com média de teores de Au no rejeito semelhantes à camada com pouca quantidade de argila.

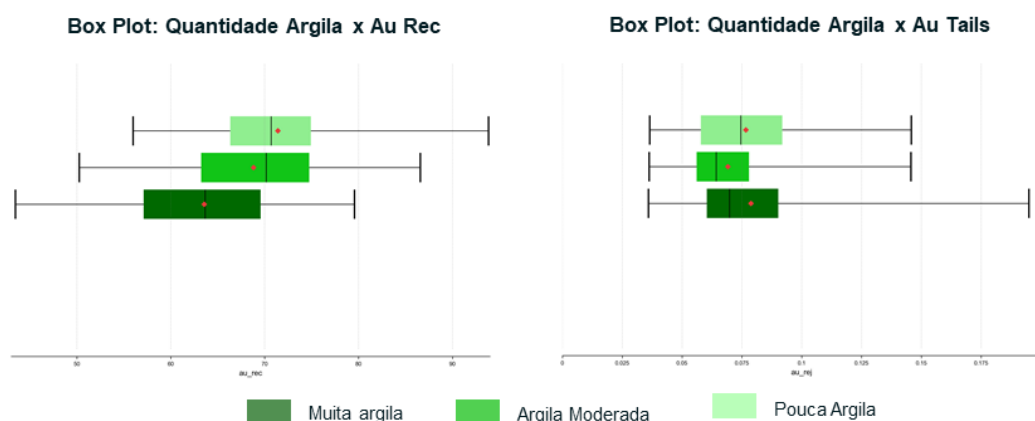


Figura 6.31 - Box Plot das variáveis Au Rec e Au Rej pela quantidade de argila modelada para a Área 2.

6.6 Considerações sobre os métodos de estimativa

A Figura 6.32 ilustra bloxplots das variáveis geometalúrgicas estimadas no domínio de rocha fresca via vizinho mais próximo, inverso da distância e krigagem ordinária para a Área 1 e, a Figura 6.33, para a Área 2.

Para a Área 1, a mediana da recuperação de ouro é maior do que a média para todos os estimadores, o que delineia uma assimetria negativa. Para a recuperação de enxofre, ambas medidas de tendência central são muito similares para todos os métodos. Para as demais variáveis e métodos aplicados, é observado uma leve assimetria positiva (valores da média maiores que a mediana). A estimativa via vizinho mais próximo apresenta a maior variabilidade de valores, seguido do inverso da distância e, finalmente,

krigagem ordinária. De modo geral, as faixas interquartis são muito próximas, mas ligeiramente maiores para NN.

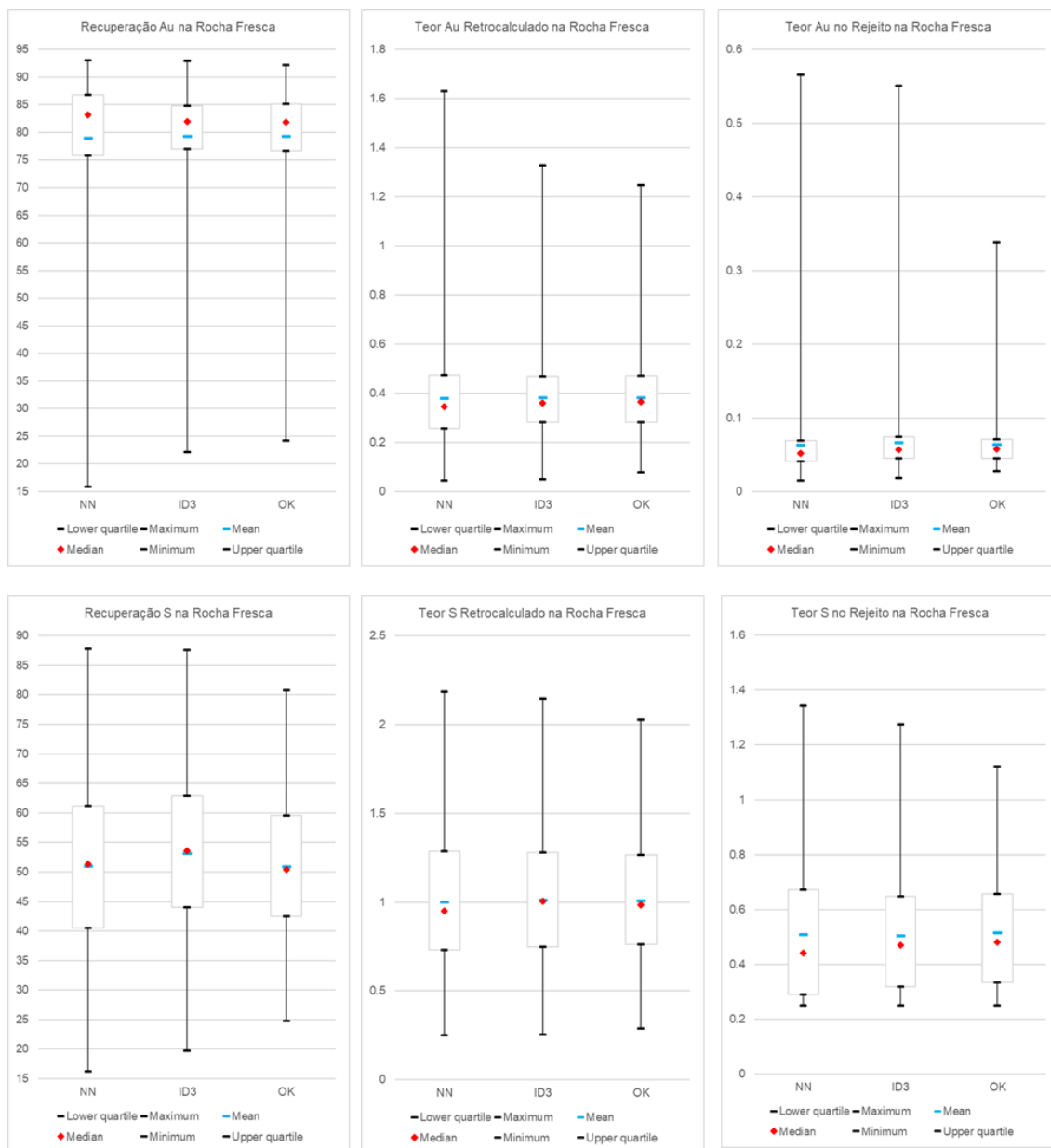


Figura 6.32 - Box Plot comparativo entre métodos de estimativa empregados no trabalho para Área 1.

Para a recuperação de ouro, os valores máximos de todos os estimadores são muito próximos, mas os valores mínimos são distintos (os valores mínimos das amostras são mascarados pelos métodos de ID3 e KO). Para o teor retrocalculado de ouro, a estimativa por ID2 e KO resultou em teores máximos muito mais conservadores quando comparados aos das amostras (e fielmente reproduzido pelo método NN). Para o teor de ouro no

rejeito, o valor mínimo é similar para todos os estimadores e o valor máximo é próximo quando estimado por NN e ID3, mas muito menor para o estimado por KO. Essas suavizações não são desejadas, uma vez que altos teores de ouro no rejeito podem refletir problemas de recuperação e devem ser destacados, não mascarados.

Para a recuperação de enxofre, os valores máximos do estimado por NN e por ID3 são similares e maiores do que o estimado por KO. Em relação ao NN, o valor mínimo é ligeiramente maior para o ID3 e bem distinto para o KO, que suaviza ambos extremos de forma expressiva. Para o teor retrocalculado de enxofre, os valores mínimos e máximos são próximos entre todos os estimadores, com uma leve suavização para o estimado por KO. Para o teor de enxofre no rejeito, os valores máximo e mínimo são próximos para NN e ID3. Para o estimado por KO, o valor máximo é menor do que o estimado pelos outros métodos devido suavização intrínseca da krigagem.

Para a Área 2, a variabilidade dos valores interquartis do estimado por NN é maior em relação aos demais estimadores. Assim como esperado, a variabilidade entre os valores interquartis – assim como entre os valores máximo e mínimo - é muito menor para krigagem quando comparado aos outros métodos. O inverso da distância parece apresentar resultados intermediários entre os métodos, mas mais próximos ao estimado pelo vizinho mais próximo e, portanto, bem menos suavizados que aqueles obtidos pela krigagem.

Para a recuperação de ouro, a média obtida entre os métodos é similar, mas o valor da mediana difere consideravelmente. Os valores de média e mediana são mais distantes no estimado por NN e mais próximos no estimado por KO. A variabilidade entre os valores máximo e mínimo parece diminuir gradualmente do NN até a KO, quando são obtidos os resultados mais suavizados possíveis. O inverso da distância parece produzir resultados intermediários entre o NN e o KO, apesar de mais próximos do primeiro.

Para o teor retrocalculado de ouro, os valores mínimos são similares entre os métodos, mas os máximos são reduzidos entre o NN e o ID e entre o ID e KO. A faixa de valores interquartis, bem como a média e mediana, é muito similar para os métodos de ID e KO e bem distintos quando comparado ao NN. Diferentemente dos outros métodos, o valor da média e da mediana são consideravelmente distintos para o estimado por NN

(mediana menor do que a média). Cabe ressaltar que a estimativa dos teores retrocalculados contou com menos amostras quando comparado às demais variáveis.

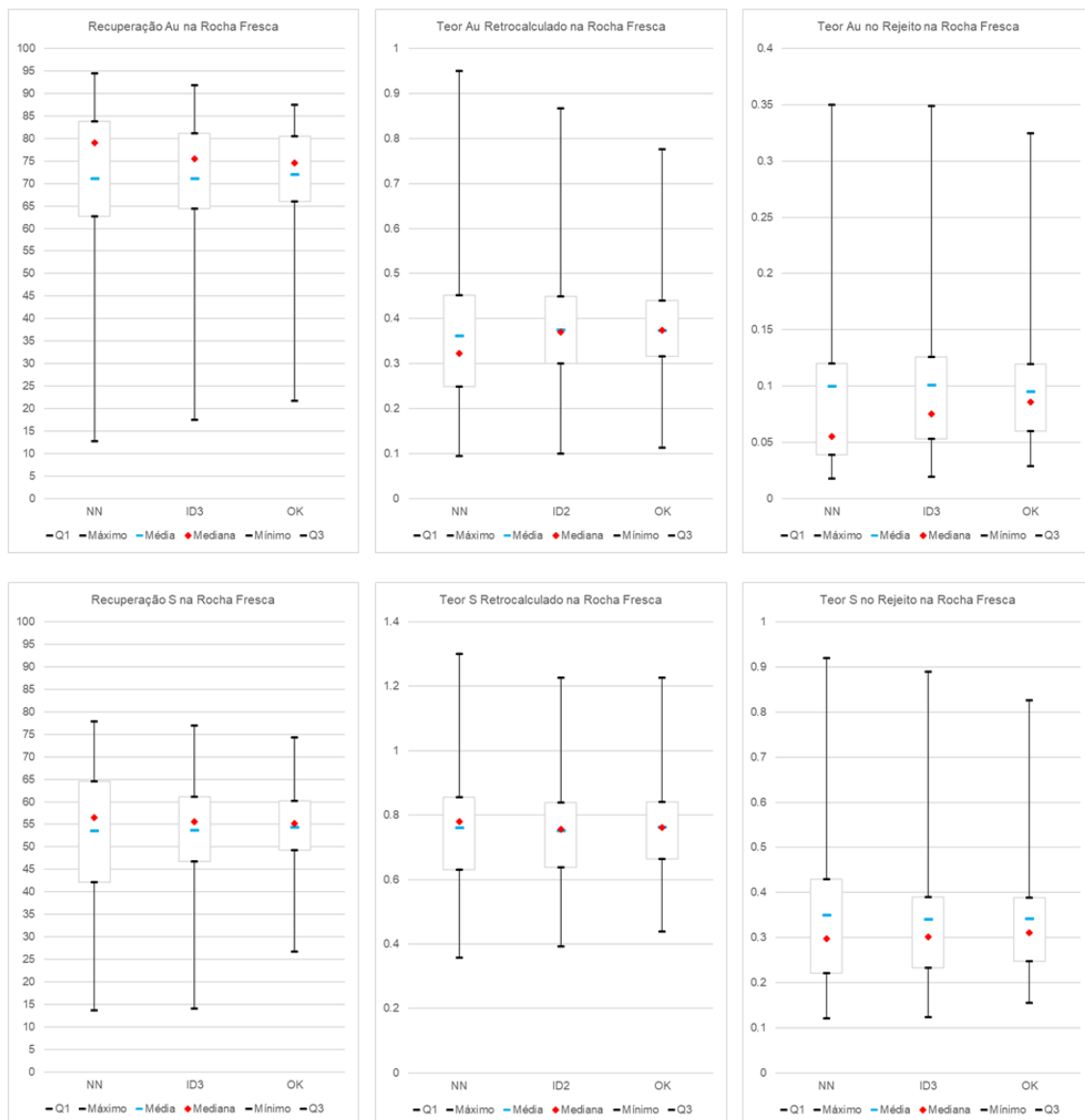


Figura 6.33 - Box Plot comparativo entre métodos de estimativa empregados no trabalho para Área 2.

Para o teor de ouro no rejeito, o estimado por ID3 foi fiel ao representar os valores máximos e mínimos apresentados pelas amostras (e reproduzidos pelo NN). As médias são similares entre todos os métodos, mas a mediana difere com menor valor para o NN, intermediário para o ID3 e maior para KO (neste método, os valores da média e da mediana são mais próximos). Os valores máximo e mínimo da krigagem são mais suavizados, mas não tão distantes aqueles obtidos por NN e ID3.

Para a recuperação de enxofre, os valores mínimo e máximo estimados por NN e ID3 são muito próximos e os valores interquartis variam menos para o segundo, que possui os valores de média e mediana mais próximos. O estimado por KO resultou em valor máximo menor (mas não muito distinto do estimado pelos outros métodos) e um valor mínimo consideravelmente maior, resultado intrínseco ao processo de suavização. A variabilidade dos valores interquartis é menor e os valores de média e mediana são muito próximos, quase os mesmos.

Para o teor retrocalculado de enxofre, o estimado por ID2 e por KO são muito semelhantes quanto aos teores mínimo e máximo, variabilidade dos valores interquartis e média e mediana, que são muito próximas entre si para ambos os métodos. Como esperado, o estimado por NN apresenta uma variabilidade maior entre os valores mínimo e máximo e também para os valores interquartis. A média e mediana são distintos entre si e também quando comparado aos demais métodos.

Para o teor de enxofre no rejeito, os teores mínimos obtidos pela estimativa de todos os métodos não são muito distintos entre si, mas o teor máximo é gradualmente menor do NN à KO, passando pelo ID3. Assim como para as outras variáveis, o estimado pela krigagem apresenta menor variabilidade entre os teores máximo/mínimo e entre os valores interquartis, bem como maior proximidade entre a média e a mediana. As médias obtidas na estimativa de todos os métodos são similares, mas a mediana difere.

7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Apesar da condição de não aditividade, este trabalho propôs o estudo da aplicação de métodos de estimativa lineares na estimativa de variáveis geometalúrgicas devido à alta praticidade e aplicabilidade dentro da indústria, uma vez que são rotineiramente utilizados na construção do modelo de blocos (estimativa de teores). A problemática principal envolveu a comparação entre métodos para análise de qual poderia conduzir a resultados mais acurados e/ou que pudesse melhor representar a distribuição espacial das variáveis geometalúrgicas.

É comum a utilização de *capping* na estimativa de variáveis de teores para minimizar o risco de sobrestimativa. Esses valores “anômalos” podem ser produtos de amostragem e/ou análise não satisfatórias, ou até mesmo da presença pontual de mineralização de alto teor (o que é comumente observado em depósitos auríferos) que geralmente dita um alto efeito pepita.

Ao contrário do que ocorre na estimativa de teores, não é desejado mascarar *outliers* (valores extremos) na estimativa de variáveis geometalúrgicas. Esses valores são importantes e devem ser preservados, uma vez que podem caracterizar regiões que podem ser potencialmente problemáticas ou favoráveis no beneficiamento mineral. Nesse sentido, a suavização intrínseca dos métodos de interpolação lineares é um grande fator limitador e que compromete a acurácia da estimativa de variáveis geometalúrgicas.

As técnicas comparativas entre os métodos de estimativa utilizadas nesse trabalho destacam as características intrínsecas de cada interpolador e devem ser complementadas em estudos futuros pela técnica de validação cruzada. Essa técnica pressupõe a omissão de uma das amostras e estimativa a partir dos valores dos pontos vizinhos. Esse processo é realizado para todos os pontos amostrados e, ao final, cada amostra terá um valor verdadeiro e um valor estimado. De posse do erro da estimativa de cada interpolador, seria possível identificar o melhor método dentre os três aqui estudados.

O método de vizinho mais próximo é o que mais valoriza a estimativa local e reproduz os valores extremos das amostras. Em uma malha de sondagem ótima, pode ser

o interpolador que melhor consegue reproduzir a característica de não aditividade das variáveis geometalúrgicas e resultar em uma estimativa mais fidedigna, menos suavizada. Apesar disso, a estimativa por vizinho mais próximo pode caracterizar uma região extensa com valores extremos quando a malha de sondagem é muito espaçada, o que pode não caracterizar de forma adequada a distribuição espacial da variável.

Deste modo, para caracterizar corretamente o minério ao longo de todas as direções e cada pequena área com suas particularidades geológicas a partir da estimativa por vizinho mais próximo, a malha de amostragem deve ser a mais fechada possível dentro da característica de cada depósito mineral (um depósito disseminado necessitaria de maior detalhe amostral que um depósito contínuo lateralmente, por exemplo). Para tal, seria necessário um estudo de malha ótima e um maior investimento em sondagem.

Quanto maior a potência utilizada na interpolação por ID, maiores pesos são atribuídos às amostras mais próximas. Foi utilizado a potência ao quadrado na estimativa das variáveis de teores retrocalculados por simularem os teores de cabeça das amostras e a potência ao cubo na estimativa de recuperação e teores no rejeito. O ID3 foi utilizado em uma tentativa de favorecer uma estimativa mais localizada (quando comparado ao ID2) e, portanto, um pouco menos suavizada quando comparado à krigagem ordinária. Para o teor de ouro no rejeito da Área 1, por exemplo, a estimativa por ID3 resultou em valor máximo similar ao carimbado pelo NN, portanto, foi eficiente em dar maior peso à amostra mais próxima e em valorizar uma estimativa local. Ainda assim, a depender da distância entre as amostras e centro do bloco, os valores extremos/*outliers* podem ser mascarados independente da potência utilizada.

Devido ao número reduzido de amostras, não foi possível realizar a análise variográfica para o domínio de oxidado. Por este motivo, o método da krigagem ordinária foi testado apenas para o domínio de rocha fresca. Os resultados são muito similares a aqueles obtidos com o método do inverso da distância, embora a suavização em torno da média seja mais expressiva.

Em regiões em que a variabilidade de teores não é alta, a estimativa por esses métodos é mais acurada e mais próxima do que é obtido pelo vizinho mais próximo. Em regiões com alta variabilidade de teores, a estimativa pelo inverso da distância e krigagem

é pouco representativa por mascarar a presença de valores extremos. Isso pode resultar em áreas superestimadas ou subestimadas. Apesar das limitações, a estimativa de variáveis geometalúrgicas a partir de métodos lineares, sobretudo o inverso da distância e krigagem, pode ser útil para caracterizar visualmente regiões que podem ser problemáticas ou não na etapa de beneficiamento mineral.

Como a krigagem - e praticamente todos os outros métodos de estimativa - pressupõem implicitamente a média linear (o que resulta em uma inevitável suavização em torno da média), o método de simulação condicional surge como uma alternativa à interpolação linear de variáveis geometalúrgicas. Segundo Deutsch (2020), a melhor abordagem seria simular todas as variáveis lineares e não lineares disponíveis de forma multivariada, respeitando as relações espaciais e multivariadas entre elas (não há simulação da média). Segundo o mesmo autor, a krigagem seria usada para inferir distribuições condicionais ou para condicionamento e as realizações dos dados representariam a variabilidade conjunta e a incerteza em todas as variáveis.

Este trabalho também levantou a importância de uma modelagem geológica adequada, realizada a partir de um banco de dados validado e cuja geometria é condizente com os dados de campo. Além de uma boa interpretação por parte do modelador, a qualidade da geometria do modelo também pode ser verificada com o auxílio de variáveis numéricas cujos valores são altamente correlacionáveis com o domínio modelado (por exemplo, BWI e intemperismo). No tópico de modelagem, foi apresentado o quanto que apenas a reinterpretação dos modelos de argila e intemperismo já resultaram em grandes diferenças de volume e teores quando comparados ao modelo anterior. Também cabe ressaltar que a qualidade da estimativa está intimamente ligada à utilização de domínios bem estabelecidos e que respeitem a condição de estacionaridade estatística.

Por fim, este trabalho propõe como próximos passos o estudo de uma malha de amostragem adequada para coleta de amostras de geometalurgia que possam melhor caracterizar espacialmente a distribuição de possíveis domínios geometalúrgicos, bem como a aplicação de simulação condicional para acesso às incertezas das variáveis geometalúrgicas. Apesar da homogeneidade litológica presente no depósito em estudo, a aplicação de um programa de geometalurgia sistemático e a utilização da geoestatística para melhor caracterizá-lo pode auxiliar no mapeamento de materiais deletérios no

beneficiamento mineral (o que vai além do material oxidado argiloso) e basear o estudo de *blends* que poderiam melhor otimizar a produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAIXETA, R.M. Simulação geoestatística utilizando múltiplos passeios aleatórios. 2015. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

CHIEREGATI, A. C. Reconciliação pró-ativa em empreendimentos mineiros. 2007. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

DEUTSCH, J. L., PALMER, K., DEUTSCH, C.V., SZYMANSKI, J., ETSSELL, T. Spatial modeling of geometallurgical properties: techniques and a case study. [S.l.]: Springer, 2016. 161–181 p.

DEUTSCH, C. V. Checking simulated realizations - mining. Em DEUTSCH, C. V., editor, Geostatistics Lessons. 2017. Disponível em: <http://www.geostatisticslessons.com/lessons/checkingmin>

DEUTSCH, C. V. Geostatistics with nonlinear variables. Resource Modeling Solutions Blog. 8 set. 2020. Disponível em: <https://resourcemodelingsolutions.com/geostatistics-with-nonlinear-variables>. Acesso 12 abr. 2022.

DEUTSCH, J.L., SZYMANSKI, J., ETSSELL, T.H. Metallurgical Variable Re-expression for Geostatistics. Em: RAJU, N., editor, Geostatistical and Geospatial Approaches for the Characterization of Natural Resources in the Environment. 2016. Springer, Cham.

DRUMOND, D. A. Estimativa e classificação de variáveis geometalúrgicas a partir de técnicas de aprendizado de máquinas. 2019. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

DUNHAM, S., VANN, J. Geometallurgy, Geostatistics and Project Value — Does Your Block Model Tell You What You Need to Know? Project Evaluation Conference. Melbourne: [s.n.]. 2007. p. 1-8.

FERREIRA, R.G.R. Programa de geometurgia do Minas Rio - Anglo American: Primeiras Análises. 2018. 44 f. TCC (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. R. An introduction to applied geostatitics. New York: Oxford University Press, 1989.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, J. C. H. Mining geostatistics. New York: Academic Press, 1978.

Kinross com expectativa de crescimento. Brasil Mineral, 2021. Disponível em: <<https://www.brasilmineral.com.br/noticias/kinross-com-expectativa-de-crescimento>>. Acesso em: 12/04/2022.

LISHCHUK, V., LAMBERG, P., LUND, C. Classification of geometallurgical programs based on approach and purpose Em: 13th Biennial SGA Meeting. Mineral Resources in Sustainable World. 2015. Volume 4. Nancy, pp. 1431–1434

MORALES, N., SEGUEL, S., CÁCERES, A., JÉLVEZ, E., ALARCÓN, M. Incorporation of Geometallurgical Attributes and Geological Uncertainty into Long-Term Open-Pit Mine Planning. *Minerals*. 2019; 9(2):108.

OLIVEIRA, M.P.R. Impacto do efeito suporte na estimativa de uma reserva mineral. 2018. 56 f. TCC (Graduação em Engenharia de Minas) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, Araxá, 2018.

OLIVER, N.H.S., THOMSON, B., FREITAS-SILVA, F.H., HOLCOMBE, R.J., RUSK, B., ALMEIDA, B.S., FAURE, K., DAVIDSON, G.R., ESPER, E.L., GUIMARÃES, P.J., DARDENNE, M.A. Local and regional mass transfer during thrusting, veining and

boudinage in the genesis of the giant shale-hosted Paracatu gold deposit, Minas Gerais, Brazil. *Econ. Geol.* 2015, 110, 1803–1834.

PEDRO, H.A.C., COSTA, J.F.C.L., KOPPE, V.C., BASSANI, M.A.A. Geometallurgy-oriented mine scheduling considering volume support and non-additivity. *Mining Technology.* 2021, 1–11.

PEREIRA, S. G. Inserção de dados faltantes não aleatórios para estimativa de variável geometalúrgica. 2019. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ROSSI, M.E., DEUTSCH, C.V. Mineral resource estimation. Dordrecht: Springer, 2014. 332p.

TAKAFUJI, E. H. M. Estudo comparativo entre a Simulação Sequencial Gaussiana e a Simulação Baseada em Wavelets aplicado a quantificação de minério de Cu em um depósito sintético. 2015. 106 f. Tese (Doutorado em Geociências: Recursos Minerais e Hidrogeologia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

YAMAMOTO, J. K. Desenvolvimento dos métodos de interpolação para avaliação de jazidas. Tese (Livre docência) – Instituto de Geociências – USP. 1995. 130p.