



ISMAEL LONGO

**ANÁLISE DA INCERTEZA NA MODELAGEM
GEOLÓGICA EM DEPÓSITOS MINERAIS DE FERRO**

Porto Alegre, 2023

ISMAEL LONGO

**ANÁLISE DA INCERTEZA NA MODELAGEM
GEOLÓGICA EM DEPÓSITOS MINERAIS DE FERRO**

Trabalho de conclusão de curso de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, apresentado na forma de monografia como requisito para obtenção do título de bacharelado em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Diego Machado Marques

Porto Alegre, 2023

CIP - Catalogação na Publicação

Longo, Ismael
Análise da incerteza na modelagem geológica em
depósitos minerais de ferro / Ismael Longo. -- 2023.
61 f.
Orientador: Diego Machado Marques.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,
BR-RS, 2023.

1. Geoestatística. 2. Simulação. 3. SIS. 4.
Depósito de ferro. 5. geologia econômica. I. Marques,
Diego Machado, orient. II. Título.

Ismael Longo

ANÁLISE DA INCERTEZA NA MODELAGEM GEOLÓGICA EM DEPÓSITOS MINERAIS DE FERRO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Geólogo e aprovado em sua forma final pelo Curso de Geologia.

Porto Alegre, 17 de julho de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Enrique Munaretti (UFRGS)

Prof. Dr. Giovani Matte Cioccarri (UFPEL)

Prof. Dr. Rommulo Vieira Conceição (UFRGS)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todos aqueles que estiveram ao meu lado durante esta trajetória, pelo apoio, carinho e parceria que recebi. Agradeço primeiramente aos meus pais, Isabel e Luiz, por todo o apoio, carinho e amor dado ao longo dessa jornada. Sem vocês, nada disso seria possível. Da mesma forma agradeço ao meu Tio Alessio por todo carinho e atenção prestados.

À minha irmã Aline, por ser essa fiel amiga e que sempre esteve ao meu lado nos momentos felizes e difíceis. Ao meu cunhado Marcelo, por todas as risadas e apoio dado aos meus pais.

Aos meus eternos amigos de infância, Fab, Juca, Nani, Pedro, Zeni e Line, mesmo que estejamos distantes em alguns momentos, vocês são parte importante de todo esse processo.

A todos os amigos que a geologia me trouxe, em especial ao João Pedro, Jean, Will, Andrey, Leo e Misa, obrigado por todas as memórias que construímos juntos. Não tenho dúvidas de que a graduação não teria a mesma leveza e alegria sem vocês.

Ao meu amigo e orientador Diego, por toda a paciência e ajuda prestadas durante a realização desse trabalho. Aos meus professores de curso e futuros colegas de profissão, em especial ao Clovis, Frank, Amanda e Brose, pelos ensinamentos e apoio oferecidos.

Às amizades feitas ao longo desse curso, em especial ao pessoal do "gbbk" e faixa 5, pelo convívio nos campos e pelas diversas discussões pertinentes e risadas compartilhadas ao longo e depois da pandemia.

Aos amigos que fiz na Ufpel e que sempre me apoiaram ao longo desse novo caminho, em especial ao Felipe, Ary, Vinicius, Conrado, Rita e João Pedro.

Aos funcionários da UFRGS pelo auxílio prestado, principalmente durante os trabalhos de campo, em especial ao Marcelo e ao Shida.

Por fim, à sociedade brasileira, que contribui para a existência da universidade pública de qualidade.

*“Quando a gente acha que tem
todas as respostas, vem a vida e
muda todas as perguntas.”
Luis Fernando Veríssimo*

RESUMO

A exploração de recursos minerais é uma atividade de alto risco, sendo um dos maiores desafios enfrentados pelas empresas a distribuição espacial do material que se deseja extrair. Por esse motivo, o modelamento geológico do depósito mineral é uma etapa crucial na determinação da viabilidade econômica do projeto. Apesar de inicial, esta fase é amplamente conhecida pela sua complexidade. Atualmente existem ferramentas avançadas capazes de criar modelos geoestatísticos que possam auxiliar nesta etapa, permitindo análises e interpretações dos dados espacialmente, facilitando assim a compreensão do fenômeno. Através disso, é possível determinar a viabilidade econômica de um depósito mineral, otimizar o planejamento de lavra, identificar áreas com maior potencial de exploração, entre outras aplicações. No presente trabalho foi proposta a utilização de simulação geoestatística como ferramenta auxiliar na tomada de decisão na etapa de modelagem geológica. Simulações são técnicas estocásticas, ou seja, as quais permitem a incorporação de um modelo probabilístico em diferentes áreas na análise de risco e incerteza. A técnica abordada se refere a Simulação Sequencial dos Indicadores, popularmente conhecida pela sigla SSI, a qual permite a geração de diferentes possíveis cenários equiprováveis da realidade do depósito mineral. Esta técnica traz benefícios para a etapa de modelagem pois é capaz de dimensionar a incerteza associada ao fenômeno devido ao seu comportamento estocástico, ou seja, probabilístico através das diferentes realizações equiprováveis da realidade que é capaz de gerar. As simulações condicionais, amplamente utilizadas em geoestatística, buscam honrar a realidade e as estatísticas da distribuição (depósito) alvo, buscando reproduzir a continuidade espacial deste fenômeno através dos variograma e a própria distribuição e estatística original dos dados. Através dessas premissas, esta técnica busca dimensionar a incerteza e fazer análises de risco dentro da cadeia de predição de recursos. O banco de dados presente refere-se a um depósito de ferrífero situado no Quadrilátero Ferrífero, onde foi possível através de simulações gerar diferentes cenários equiprováveis para o domínio IBS, tipologia predominante na reserva. Através dos resultados foi possível quantificar a incerteza na modelagem, auxiliando na tomada de decisão como a interpretação geológica. Também foi quantificado os possíveis volumes dos cenários equiprováveis e comparados posteriormente ao modelo krigado.

Palavras-Chave: Geoestatística; Simulação; Simulação Sequencial do Indicadores; SSI; Minério de ferro;

ABSTRACT

The exploration of mineral resources is a high-risk activity, being the spatial distribution of the desired material for extraction one of the greatest challenges faced by companies. For this reason, geological modeling of the mineral deposit is a crucial step in determining the economic feasibility of the project. Although preliminary, this phase is widely known for its complexity. Currently, there are advanced tools capable of creating geostatistical models that can assist in this stage, allowing for spatial data analysis and interpretation, thereby facilitating the understanding of the phenomenon. Through this, it is possible to determine the economic viability of a mineral deposit, optimize mining planning, identify areas with greater exploration potential, among other applications. In the present study, the use of geostatistical simulation was proposed as an auxiliary tool in decision-making during the geological modeling stage. Simulations are stochastic techniques, that is, they allow for the incorporation of a probabilistic model in different areas in the analysis of risk and uncertainty. The technique discussed here refers to Sequential Simulation of Indicators, commonly known by the acronym SSI, which allows for the generation of different and possible equiprobable scenarios of the mineral deposit's reality. This technique brings benefits to the modeling stage as it is capable of measuring the uncertainty associated with the phenomenon due to its stochastic, that is, probabilistic behavior through the different equiprobable realizations it can generate. Conditional simulations, widely used in geostatistics, seek to be faithful to the reality and statistics of the target distribution (deposit), aiming to reproduce the spatial continuity of this phenomenon through the variograms and the original distribution and statistics of the data itself. Based on these premises, this technique seeks to measure uncertainty and conduct risk analyses within the resource prediction chain. The present database refers to an iron ore deposit located in the "Cuadrilátero Ferrífero", where it was possible to generate different simulation scenarios through simulations for IBS, predominant typology in reserve. The results will allow for the quantification of uncertainty in the modeling process, assisting in decision-making, such as geological interpretation. The possible volumes of the equiprobable scenarios will also be quantified and subsequently compared to the kriged model.

Keywords: Geostatistics, Simulation, Sequential Indicator Simulation; SIS; Iron ore;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero - MG simplificado, com a localização das principais minas e municípios (adaptado de Azevedo & Machado 2013 e Dorr 1969).....	14
Figura 2: Principais depósitos de minério de ferro no mundo. Adaptado de Hagemann <i>et al.</i> , (2015).....	17
Figura 3: Principais formações ferríferas distribuídas segundo tempo geológico (modificado de Klein, 2005).....	20
Figura 4: Tipos de ambientes de deposição das formações ferríferas bandadas, modificado de Biondi (2015).....	22
Figura 5: Em A itabirito silicoso em detalhe, em B testemunho de sondagem do itabirito silicoso compacto da Formação Cauê, e em C rocha intrusiva do depósito em contato com a Formação Bandada Ferrífera enriquecida.....	24
Figura 6: Modelo para evolução geológica do Quadrilátero Ferrífero de Oriovaldo Ferreira & Augusto José Pedreira. Adaptado de Alkmin & Marshak (1998).....	26
Figura 7: Coluna estratigráfica mostrando em vermelho a localização do minério de Ferro do QF (Grupo Itabira), Modificado de Rosière e Chemale Jr (2000).....	27
Figura 8: Exemplo de uma seção vertical de modelo geológico estimado e simulado. Adaptado de Chiles & Delfiner.....	35
Figura 9: Histograma dos minerais de minério encontradas no banco de dados.....	36
Figura 10: Mapa de distribuição espacial dos furos de sondagem e suas profundidades	37
Figura 11: Perfil vertical dos furos de sondagem no sentido Oeste.....	38
Figura 12: Perfil vertical dos furos de sondagem no sentido Leste.....	39
Figura 13: Características de um variograma (adaptado de Matheron 1971).....	40
Figura 14: Variogramas de maior (A), intermediária (B) e menor continuidade (C) para o domínio IBS.....	42
Figura 15: Diferença entre o modelo krigado e o simulado (Modificado de Rossi & Deutsch (2013).....	43
Figura 16: Mapa acumulado em planta dos três ensaios realizados para SIS.....	45
Figura 17: Mapa da Krigagem dos Indicadores para o IBS, vista em planta/acumulada.	46
Figura 18: Mapas das distribuições de probabilidade obtidas pela Krigagem dos indicadores para: 50%, 60%, 70%, 80% e 90% de IBS.....	47

Figura 19: Mapa 2D acumulado das Simulações Sequenciais de número #15, #42, #79 e #90.....	49
Figura 20: Mapas das distribuições de probabilidade obtidas pela SIS para: 50%, 60%, 70%, 80% e 90% de IBS.....	50
Figura 21: Histograma do comparativo entre massas das simulações.....	51
Figura 22: Histograma do comparativo entre massas da krigagem.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais minerais de ferro e suas respectivas classes (modificado de Poveromo <i>et al.</i> , 1999).....	18
Tabela 2: Parâmetros variográficos utilizados na krigagem e simulação.....	41
Tabela 3: Parâmetros e dimensões do <i>grid</i>	41
Tabela 4: Pâmetros utilizados para Simulação Sequencial dos Indicadores....	48

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	13
1.1 Área de Estudo.....	15
2.OBJETIVOS E METAS	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivo Específico.....	16
3.JUSTIFICATIVA	17
4.ESTADO DA ARTE / REFERENCIAL TEÓRICO	18
4.1.Contextualização Geológica.....	18
4.1.1 Minério de Ferro	18
4.1.2 Geologia dos Depósitos de Ferro.....	21
4.1.3 Quadrilátero Ferrífero	26
4.1.4 Diluição.....	30
4.2 Simulação Geostatística.....	31
4.2.1 Variografia	33
4.2.2 Krigagem dos Indicadores.....	34
4.2.3 Simulação Estocástica	34
4.2.4 Simulação Sequencial dos Indicadores (SSI).....	35
5.BANCO DE DADOS	37
6.METODOLOGIA	38
6.1 Revisão Bibliográfica.....	38
6.2 Abordagem dos Indicadores.....	38
6.2.1 Análise Exploratória dos Dados (AED).....	38
6.2.2 Análise de Continuidade Espacial	40
6.2.3 Krigagem dos Indicadores.....	44
6.2.4 Simulação Sequencial dos Indicadores.....	45
7.RESULTADOS	47
7.1 Krigagem dos Indicadores.....	47
7.2 Simulação Sequencial dos Indicadores (SSI).....	49
8. CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	57

1. INTRODUÇÃO

O minério de ferro é um dos recursos minerais mais importantes para a sociedade, fundamental para a indústria siderúrgica, construção civil, automotiva, gerando empregos diretos e indiretos, além de movimentar diversos setores da indústria. O Brasil possui 6,4% (21 bilhões de toneladas) das reservas mundiais e ocupa a quinta posição entre os países com as maiores quantidades desse recurso. Reconhecido pelas reservas contendo minérios com altos teores de ferro (60% a 67% nas hematitas e 50% a 60% nos itabiritos e jaspilitos, em termos de ferro contido no minério), o nosso país conquista um lugar de destaque no cenário mundial (Chemale Jr, *et al.*, 2013).

O contexto atual dos depósitos ferríferos se caracteriza pela escassez de fontes de minério de alto teor, que são compostos principalmente por hematita, e pela necessidade de explorar economicamente áreas que contenham itabiritos, e que apresentam menores teores de ferro. Por esse motivo, grandes empresas têm investido em pesquisas e estudos buscando alternativas viáveis que otimizem todo o processo de avaliação de seus recursos. No entanto, o ciclo de exploração de recursos minerais se trata de um compromisso de longo prazo, podendo levar anos desde o início da pesquisa com o descobrimento de um potencial alvo até o fim da cadeia produtiva, com a comercialização e beneficiamento do recurso explorado.

Durante esses processos, o geólogo é um dos profissionais capacitados a participar de todas as etapas do ciclo da mineração, sendo de sua responsabilidade adaptar-se a novas tecnologias e ferramentas capazes de aprimorar toda a cadeia de produção. Com base nessa premissa, a simulação geoestatística surge como uma técnica avançada em estatística espacial, permitindo modelar e prever fenômenos geológicos, geográficos, ambientais ou outros que exibem variabilidade espacial. Sua abordagem tem suas raízes na geoestatística, que se trata de uma ramificação da estatística aplicada ao estudo de fenômenos georreferenciados.

A geoestatística como disciplina científica foi desenvolvida na década de 60, pelo matemático e geólogo francês Georges Matheron. Matheron aplicou princípios estatísticos e matemáticos para defender sua tese aplicada em uma mina de ouro na África do Sul, mais especificamente na avaliação de sua

reserva mineral usando conceitos estimativos. A partir de então, a geoestatística vem sendo amplamente utilizada em diversas áreas, como engenharia, geologia, agronomia de precisão, geografia, entre outras, como uma ferramenta para análise e interpretação de dados espaciais e para tomada de decisões.

O presente trabalho tem como objetivo a utilização de simulação geoestatística como ferramenta auxiliar na quantificação das incertezas, como por exemplo a diluição. Elevadas taxas de diluição podem acarretar sérios problemas a um projeto de mineração, ocasionando reduções significativas nos teores médios encontrados e consequentemente perdas financeiras ao empreendimento. Diante desse problema, a simulação geoestatística surge como um interessante recurso, pois ela é capaz de gerar múltiplas realizações estocásticas do campo de interesse, o que permite quantificar a incerteza associada às estimativas de teores e volumes de minério do depósito mineral.

Esta condição é particularmente importante considerando o fator diluição, onde segundo (Scoble & Moss,1994) representa a eficiência de mineração, medida pela proporção de resíduos introduzidos como parte do processo de lavra, em síntese refere-se a inclusão involuntária de material sem valor econômico durante a extração do minério. O método traz benefícios pois é capaz de dimensionar as incertezas relativas à diluição, fornecendo informações preciosas aos tomadores de decisão, que podem avaliar os riscos associados ao projeto e desenvolver estratégias de mitigação.

A escolha da técnica de simulação apropriada depende das características do fenômeno estudado e dos objetivos específicos da análise. O base de dados utilizado neste trabalho pertence a um projeto localizado no sudoeste de Minas Gerais, mais especificamente no Quadrilátero Ferrífero. De acordo com dados de 2022 do DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), somente o estado de MG foi responsável pela comercialização de 220 milhões de toneladas de minério de ferro bruto e beneficiado, sendo a região do Quadrilátero a principal fonte desse recurso.

2. OBJETIVOS E METAS

2.1 Objetivo Geral

O propósito principal deste estudo é adquirir uma compreensão detalhada do entendimento geológico do principal domínio presente no depósito mineral em questão e fornecer explicações de sua distribuição com base nas técnicas de geoestatística empregadas durante a pesquisa. O objetivo é quantificar a variabilidade o corpo de minério (IBS) presente na área, com o intuito de gerar informações que contribuam para diferentes etapas de um projeto de exploração.

2.2 Objetivo Específico

- Compreensão geológica das litologias presentes no depósito ferrífero em estudo;
- Avaliação da krigagem dos indicadores visando a geração de um mapa com probabilidades;
- Avaliação da Simulação Sequencial dos Indicadores (SIS) como técnica para gerar um mapa de estimativas de probabilidade;
- Quantificar a incerteza geológica e mapear as maiores zonas de risco;

3. JUSTIFICATIVA

A razão que justifica a realização deste estudo é combinar a aplicação de técnicas e métodos modernos geoestatísticos com a interpretação de dados adquiridos durante a rotina de trabalho do geólogo de exploração, visando a otimização dos processos de prospecção mineral de depósitos de ferro. Como a utilização da simulação geoestatística, que desempenha um papel fundamental na mineração de minério de ferro, proporcionando informações valiosas para a caracterização de recursos e reservas, a quantificação de incertezas e diluição, bem como a otimização do planejamento da mina e a integração com investigações geológicas e processamento mineral.

A justificativa para o uso da simulação geoestatística nesse contexto é que a estimativa precisa da distribuição de um corpo de minério é crucial para otimizar a operação de mineração e processamento mineral, com base nos dados amostrais disponíveis. No caso desse estudo, foi utilizado a interpretação de testemunhos de sondagem disponibilizados pela empresa parceira do trabalho. A simulação pode gerar múltiplas realizações de modelos de distribuição do domínio geológico a ser estudado, que podem ser utilizados para estimar a variabilidade da distribuição desse atributo e a probabilidade de sua ocorrência. A sua prática permite localizar zonas de maior incerteza geológica, auxiliando assim a compreensão geológica do depósito e minimizando riscos associados ao projeto, contribuindo para o sucesso econômico e ambiental sustentável da mineração do minério de ferro.

4. ESTADO DA ARTE / REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. Contextualização Geológica

4.1.1 Minério de Ferro

O minério de ferro é um recurso mineral de suma importância para a economia global, tendo em vista sua ampla utilização. Sua aplicação é vasta e diversificada, sendo indispensável na indústria siderúrgica e metalúrgica, onde é peça-chave na produção de aço e ligas metálicas. No entanto, seu uso não se restringe apenas à indústria metalmeccânica, estando presente em diversas áreas, desde a construção civil até a fabricação de máquinas e equipamentos de alta tecnologia, ingrediente em fertilizantes, na produção de tintas e corantes, entre outras aplicações. O Ferro é um elemento bastante comum na crosta terrestre sendo o quarto com maior ocorrência, como resultado o elemento é um constituinte majoritário de muitas classes minerais. Encontrado em mais de 400 tipos de minerais, o ferro está disponível em quantidades mensuráveis variando de 1 a 70% em sua composição (Ortiz, 2014).

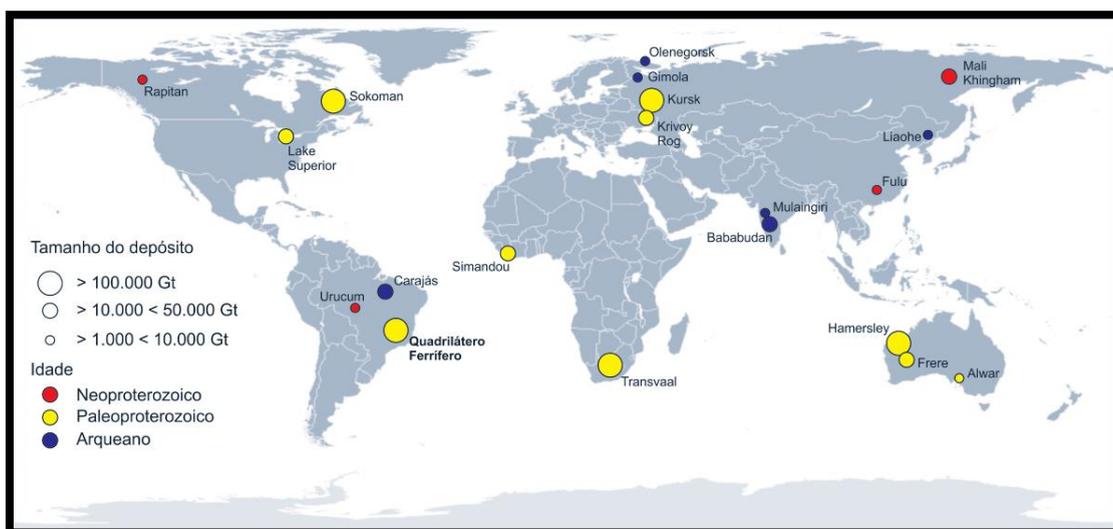


Figura 2: Principais depósitos de minério de ferro no mundo. Adaptado de Hagemann *et al.*, (2015).

O Ferro Nativo (fora da estrutura de algum mineral) é considerado raro na natureza, representando menos de 1% da ocorrência desse metal. O minério de ferro com potencial econômico consiste principalmente de óxidos, cujas formas primárias são a Magnetita (Fe_3O_4) e a Hematita (Fe_2O_3), substâncias que quando aquecidas na presença de um agente redutor como Monóxido de Carbono (CO) ou Hidrogênio (H_2) liberam o Ferro na sua forma metálica (Fe).

Além dos óxidos, o ferro ocorre ainda na forma de Hidróxidos (Goethita e Limonita), Carbonatos (Siderita e Ankerita), Sulfetos (Pirita, Calcopirita e Pirrotita) e Silicatos. Essas principais classes de minérios de ferro estão classificadas com base em sua composição química, teor e classe, e são apresentadas na Tabela 1. Atualmente, a exploração comercial de outros tipos de minério (não listados na tabela) não é lucrativa devido aos altos custos de sua extração e a atual instabilidade do valor desse recurso mineral. A oscilação do preço do minério no mercado é influenciada por diversos fatores econômicos e políticos, podendo mudar rapidamente conforme novos investimentos e projetos são implementados e desenvolvidos para o commodity.

Tabela 1: Principais minerais de ferro e suas respectivas classes (modificado de Poveromo *et al.*, 1999).

Classe	Mineral	Composição Química do mineral puro	Teor de Fe (%)
Óxido	Magnetita	Fe_3O_4	72,4
Óxido	Hematita	Fe_2O_3	69,9
Óxido	Goethita	$FeO(OH)$	62,8
Carbonato	Siderita	$FeCO_3$	49,2
Sulfeto	Pirrotita	FeS	63,6
Sulfeto	Pirita	FeS_2	46,5

As reservas mundiais de minério de ferro, segundo dados da USGS em 2017, são estimadas em aproximadamente 800 bilhões de toneladas, com cerca de 230 bilhões de toneladas consideradas economicamente viáveis para exploração. A produção global desse minério concentra-se principalmente em países como: Brasil, Austrália, China, Índia, Rússia e Estados Unidos, onde estão localizadas as maiores jazidas (Figura 2). Dentre esses países, o Brasil se destaca como um importante detentor de reservas de minério de ferro, com diversos projetos importantes em andamento. Com um total de 21 bilhões de toneladas, o país representa aproximadamente 6,4% das reservas globais, ocupando a 5ª posição no ranking dos principais detentores desse recurso. O Brasil também é reconhecido pela alta qualidade do minério extraído, apresentando teores de ferro entre 60% e 67% nas hematitas e 50% a 60% nos itabiritos e jaspilitos.

Essas condições têm colocado o Brasil em uma posição privilegiada no cenário mundial de mineração, despertando o interesse de grandes investidores internacionais (Chemale Jr., *et al.*, 2013). Dada a importância do país no setor da mineração, cabe ressaltar que o Ferro representa o mineral de minério mais explorado, assim como o mais exportado pelo Brasil. Com principais destinos sendo a China e o Japão, impulsionados pela grande produção de aço em suas indústrias siderúrgicas, a comercialização do minério de ferro representa a mais importante atividade mineral do país, sendo um dos mais importantes pilares da nossa economia.

Quanto à localização dos principais depósitos de minério de ferro brasileiros, destacam-se o Quadrilátero Ferrífero (MG), a região da Serra Carajás (PA) e o Maciço de Urucum (MS). Segundo classificação de Laznicka (2006), os depósitos de minério de ferro são considerados "grandes" quando possuem uma quantidade acima de 430 milhões de toneladas, enquanto aqueles com valor superior a 4,3 bilhões de toneladas são classificados como "gigantes". As áreas dos três principais depósitos brasileiros estão classificadas na classe dos maiores do planeta.

A descoberta da Serra dos Carajás, na década de 60, pela *United States Steel* (USS), então a maior empresa siderúrgica do mundo, é um marco na história brasileira. Localizada no sudeste do estado do Pará, Carajás abriga os depósitos de ferro com maior teor encontrados na Terra e teve sua descoberta ocorrida por acaso, após um helicóptero transportando um geólogo precisar realizar um pouso de emergência em uma das enormes clareiras da região. O alto teor encontrado em suas reservas confere a região um papel de extrema importância para a indústria, contribuindo significativamente para a produção mineral nacional. Já o Quadrilátero Ferrífero encontra-se no centro-sul de Minas Gerais, onde está localizada a maior produção de ferro bruto do Brasil. Ele abriga cidades históricas como Mariana, Ouro Preto, Congonhas, Santa Bárbara, Belo Horizonte, Itabira, Brumadinho e Casa Branca. A região foi de extrema importância no final do século XVII, que com a descoberta de ouro e sua exploração aliada ao processo de colonização realizado principalmente por portugueses, tornando o Quadrilátero Ferrífero em um importante Centro Histórico.

O QF continua sendo a região de maior concentração urbana do estado de Minas, além de representar uma área de fundamental importância para o desenvolvimento econômico estadual, impulsionando, inclusive, o setor industrial, sobretudo o segmento siderúrgico. Além de ser responsável por aproximadamente 60% de toda a produção brasileira de ferro, o Quadrilátero contempla também importantes depósitos de ouro, manganês, alumínio e topázio.

4.1.2 Geologia dos Depósitos de Ferro

Os depósitos de minério de ferro presentes na crosta terrestre foram formados em diferentes ambientes geológicos e cenários tectônicos ao longo de um vasto período geológico. Essas ocorrências minerais podem ser agrupadas em cinco grandes grupos sendo eles: depósitos sedimentares acamadados ou formações ferríferas bandadas (do tipo Algoma, Lago Superior e Rapitan); vulcano-sedimentares e magmáticos (Kiruna e Lahn-Dill); depósitos formados por metamorfismo de contato do tipo *Skarn*; do tipo oolíticos e pisolíticos (tipo Clinton-Minette) e depósitos de alteração e acúmulo em superfície (Chemale Jr., *et al.*, 2013). As mais antigas formações ferríferas conhecidas estão localizadas na Groelândia e datam de aproximadamente 3,8 Ga, estando relacionadas a processos de cratonização durante o Arqueano (Dymek & Klein, 1988). No entanto, é durante o Éon Proterozoico que destaca a formação dos principais depósitos de ferro encontrados no mundo.

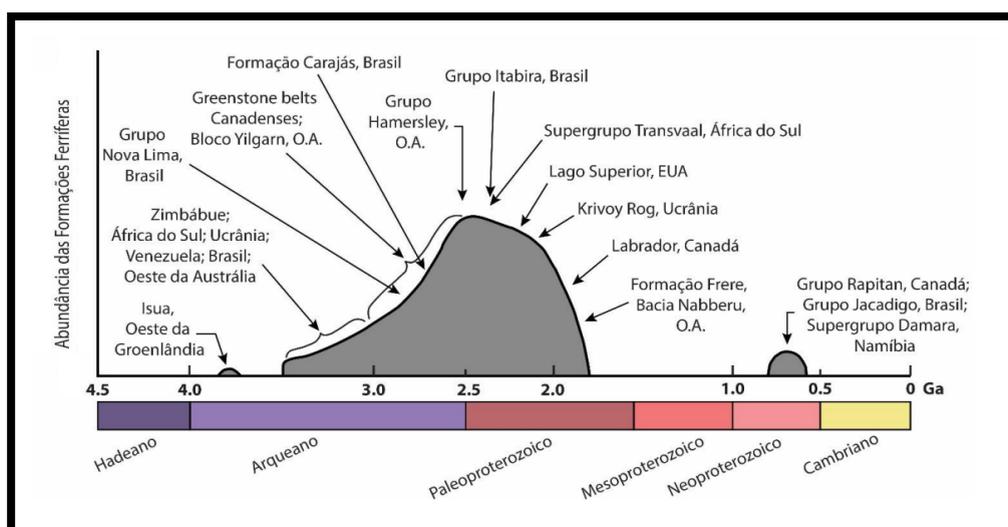


Figura 3: Principais formações ferríferas distribuídas segundo tempo geológico (modificado de Klein, 2005).

Durante esse período, houve uma grande evolução na composição da atmosfera terrestre, que se tornou mais rica em oxigênio. Esse aumento de oxigênio permitiu a oxidação do ferro presente na crosta terrestre, o que resultou por exemplo, no surgimento das formações ferríferas bandadas, que são a fonte das principais jazidas de ferro. As escassezes dos depósitos ocorrem durante o “*Boring Billion*” (1,8 – 0,8 Ga), período que compreende o fim do Paleoproterozoico até o início da Era Neoproterozoico. Esse intervalo é caracterizado por ser um período geologicamente estável e monótono.

As formações ferríferas bandadas, geralmente encontradas na bibliografia como *Banded Iron Formation* (BIF), são conhecidas por serem rochas ricas em ferro, cujas características texturais, mineralógicas e estruturais permitem inferir as condições ambientais e tectônicas atuantes durante sua gênese. São consideradas como a mais importante fonte de minério de ferro no mundo e devido à sua quantidade. Existem diversos tipos de depósitos de ferro estudados, cada um deles relacionados a processos tectonomagmáticos, vulcanossedimentares, biológicos, hidrotermais ou de alteração intempéricas.

As BIFs geralmente são formadas na zona de transição entre as porções mais profundas de um ambiente deposicional, onde ocorre a liberação de ferro, sílica e enxofre em grandes volumes a partir de atividade exalativa subaquosa, e as regiões mais rasas, caracterizadas por ser um ambiente oxidante (rico em O₂) e de alta atividade bacteriana. Esses locais de interação entre essas duas condições são propícios para a precipitação desse ferro de origem bioquímica, onde a sua deposição é controlada por fatores como temperatura, pressão e pH. Essas zonas costumam ser gradativas e apresentando diferentes fácies. No caso do ambiente plataformal, temos a porção mais profunda próxima ao ambiente redutor e rica em Fe⁺², iniciando com a fácies carbonática. Essa alternância de fácies progride de forma gradual à medida que a concentração de carbonato diminui e a quantidade de óxidos aumenta.

Inicialmente esse óxido é a magnetita e conforme nos aproximamos das porções mais rasas e oxidantes, temos a presença da hematita, indicando a transição de um ambiente redutor para um oxidante, marcando assim a última fácies. Inicialmente esses tipos de depósito foi dividido em: tipo Algoma, formados em ambiente de *greenstone belts* e cadeias oceânicas e tipo Lago

Superior, formado em ambiente plataformal (Gross, 1980). Posteriormente, depósitos do Neoproterozoico foram encontrados em meio a sequências glaciais e próximo a regiões extensionais com formações de *graben*, os quais são comumente classificados como do tipo Rapitan (Figura 4).

As BIFs do tipo Lago Superior que compõem os maiores depósitos, são de ambiente plataformal e de margem de bacias, onde não temos a presença de atividade tectônica significativa, exceto pequenos *sills* e diques responsáveis por eventos hidrotermais e a presença de fumarolas, que juntas são responsáveis pela liberação do ferro. Apresentam como características a gradação das fácies anteriormente citada, além de apresentar grande distribuição lateral em seus depósitos.

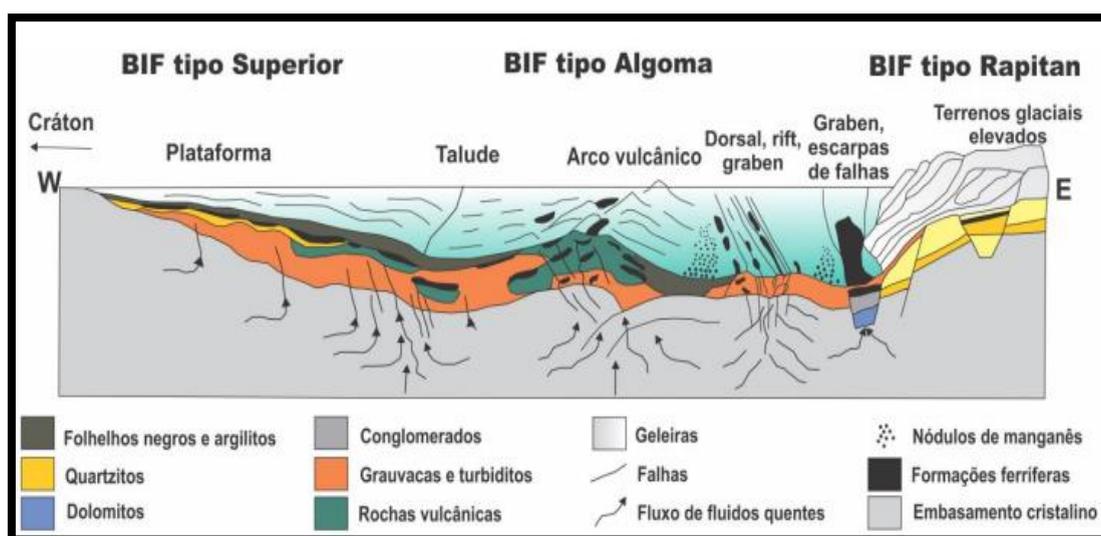


Figura 4: Tipos de ambientes de deposição das formações ferríferas bandadas, modificado de Biondi (2015).

Vinculado diretamente à formação de cadeias mesoceânicas e bacias de *back-arc*, as formações do tipo Algoma têm associação direto com a atividade vulcânica. Estas formações estão presentes em pilhas vulcânicas e comumente datam do Éon Arqueano. Elas apresentam zonalidade diferente das de Lago Superior, onde geralmente contam com a fácies sulfeto bem desenvolvida. E por fim temos as BIFs do tipo Rapitan, que são menos expressivas em termos de quantidade e mais recentes no período geológico. Elas estão normalmente associadas a ambientes extensionais com a presença de *grabens* e *rifts*, onde ocorre grande basculamento de blocos, além de estarem próximas de margens de crátons e ambientes de sedimentação glaciais.

As formações ferríferas bandadas ocorrem distribuídas pelo mundo e foram depositadas em períodos bem definidos do Arqueano entre (3,7 - 3,3 Ga) e (2,9 - 2,6 Ga), no Proterozóico Inferior (2,5 - 1,8 Ga) (Trendall, 2002) e na Era Proterozoico Superior (900 - 650 Ma). As rochas encontradas nesses depósitos são caracterizadas por apresentarem um bandamento bem definido, mesmo aqueles que sofreram um alto metamorfismo retêm os resquícios desse bandamento (Klein, 2005), também é típico a extensa continuidade estratigráfica lateral nesses tipos de formação. Trata-se de sedimentos químicos, finamente estratiformes ou bandados, intercalando bandas avermelhadas ou escuras ricas em óxido de ferro (magnetita e hematita) de origem sedimentar, com bandas claras compostas quase exclusivamente por sílica microcristalina (*chert*).

A espessura dessas bandas pode variar de 0,5 a 3 cm, mas são em geral finamente laminados, possuindo um teor médio entre 20 e 60% de ferro. Conforme Biondi (2003), nos depósitos de minério de ferro originados de formações ferríferas bandadas, é comum encontrar uma sequência mineralizada que compreende uma camada superficial laterítica de alto teor, seguida por uma camada de minério compacto, uma terceira camada com minério friável e, por fim, o jaspilito (ou itabirito), que corresponde à rocha sã. Em relação ao contexto tectônico de formação, os depósitos sedimentares acamados do Arqueano foram desenvolvidos em um ambiente caracterizado pela atuação de processos de cratonização, com predomínio de atividades vulcânicas submarinas. As estreitas bacias geradas durante esse processo foram preenchidas por rochas vulcânicas e sedimentos clásticos (Gross, 1965).

Na Era Proterozoica Inferior a situação é totalmente distinta, ocorrendo em um período de grande estabilidade na crosta com a formação de grandes bacias marginais rasas as quais receberam grandes quantidades de sedimentos clásticos oriundos de processos de erosão e lixiviação da crosta continental aliado a intensa atividade vulcânica que despejaram no mar soluções de ferro e sílica (Mel'nik 1982). Em geral, para que um depósito de ferro seja economicamente viável, é necessário que ocorra a remobilização do ferro nas formações ferríferas bandadas por meio de processos pós-deposicionais, geralmente hidrotermalismo associado a grandes estruturas como falhas e dobras (a exemplo do que acontece na nossa área de estudo).

Durante esses processos hidrotermais, ocorre a lixiviação da sílica (Figura 5-C), resultando na concentração do ferro, que pode se apresentar na forma de minerais neoformados, como a hematita. Por meio desses processos hidrotermais, os depósitos que inicialmente possuem quantidades razoáveis de Fe, variando entre 30% e 35%, podem atingir concentrações superiores a 60% de ferro, caracterizando-os como depósitos de alto teor (Hagemann *et al.*, 2015). A precipitação química contribui para a formação de depósitos em diferentes fácies ao longo de plataformas continentais, variando de acordo com a profundidade da bacia sedimentar. Essas fácies incluem fácies carbonáticas, fácies de óxidos e fácies silicáticas.

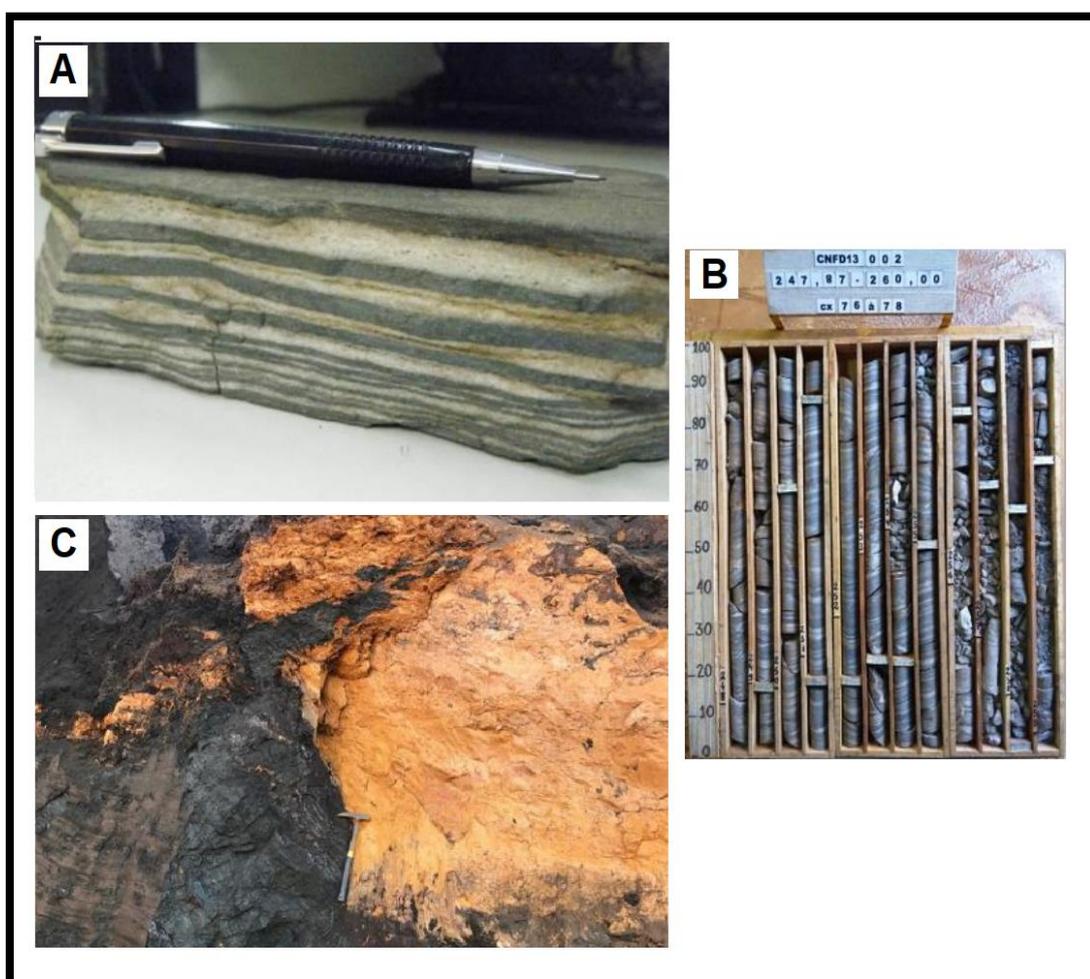


Figura 5: Em A itabirito silicoso em detalhe, em B testemunho de sondagem do itabirito silicoso compacto da Formação Cauê, e em C rocha intrusiva do depósito em contato com a Formação Bandada Ferrífera enriquecida.

Em grande parte, esses depósitos foram enriquecidos posteriormente por meio de processos diagenéticos, metamórficos e metassomáticos, resultando em teores de ferro que podem chegar a 69%, como é o caso da

hematita compacta (Walde, 1986). No Brasil, tanto em Carajás, no Pará, quanto no Quadrilátero Ferrífero, é possível encontrar esse tipo de formação ferrífera, as quais fazem parte dos principais depósitos de minério de ferro encontrados em nosso território.

Atualmente, a *Vale* é a empresa detentora dos maiores investimentos e da produção dessa commodity no país. Segundo dados do DNPM, somente no ano de 2021, as atividades da empresa concentradas principalmente nos estados do Pará e Minas Gerais foram responsáveis por 71% da produção de ferro no Brasil. Os diversos tipos de minérios de ferro encontrados no país possuem teores elevados de ferro e baixas quantidades de elementos indesejáveis nos processos siderúrgicos como enxofre, alumínio, fósforo e carbonatos, o que valoriza ainda mais o nosso produto no mercado internacional.

4.1.3 Quadrilátero Ferrífero

Localizado na porção centro-sul do estado de Minas Gerais e com uma extensão territorial de aproximadamente 7 mil Km², o Quadrilátero Ferrífero (QF) compreende uma área limitada entre as cidades de Belo Horizonte (norte), Congonhas (sudoeste), Santa Bárbara (nordeste) e Ouro Preto e Mariana (sudeste). O QF representa uma região de grande importância econômica e cultural não só para o estado mineiro, mas para todo o Brasil. Em 2022, somente o estado de Minas foi responsável pela comercialização de 220 milhões de toneladas de minério de ferro bruto e beneficiado (DNPM, 2022), sendo a região do Quadrilátero a principal fonte desse recurso.

Situado na borda sul do Cráton do São Francisco, o QF é caracterizado pelo formato quadrangular (Figura 1), gerada pela estruturação em domos e bacias das rochas ferríferas do Supergrupo Minas, região onde afloram esses sedimentos plataformais do Supergrupo Minas, de idade Paleoproterozoica e separados por estruturas antiformais irregulares com terrenos arqueanos do tipo *greenstone belts* do Supergrupo Nova Lima, além de domos de rochas cristalinas Arqueanas e Proterozoicas (Machado *et al.*, 1992, Machado & Carneiro 1992). O Supergrupo Minas inclui quatro Grupos: Caraça (composto por metassedimentos clásticos compostos por metaconglomerados, quartzitos, xistos e filitos), Itabira (onde são encontrados as sequências mais espessas das

formações ferríferas bandadas), Piracicaba (comumente apresentando intercalação de metarenitos e filitos) e Sabará (composto por intercalação de rochas vulcanogênicas e sedimentares) (Chemale & Rosière 2000).

O seu contexto estrutural é resultado da superposição de dois eventos deformacionais principais: a Orogênese Transamazônica (2.1 a 2.0 Ga), associado ao soerguimento de blocos granito-gnáissicos durante um evento extensional e o segundo o evento Brasileiro (0.8 a 0.6 Ga), resultado de uma inversão tectônica, com desenvolvimento de um cinturão dobrado e com presença de cavalgamento (Chemale Jr. *et al.*, 1994). As principais jazidas de ferro pertencem ao Grupo Itabira (Formação Cauê), situadas no Supergrupo Minas, composta de itabiritos, mármore dolomíticos e largos corpos de minério supergênico de alto teor, onde as camadas de itabiritos atingem espessuras superiores a 200 metros.

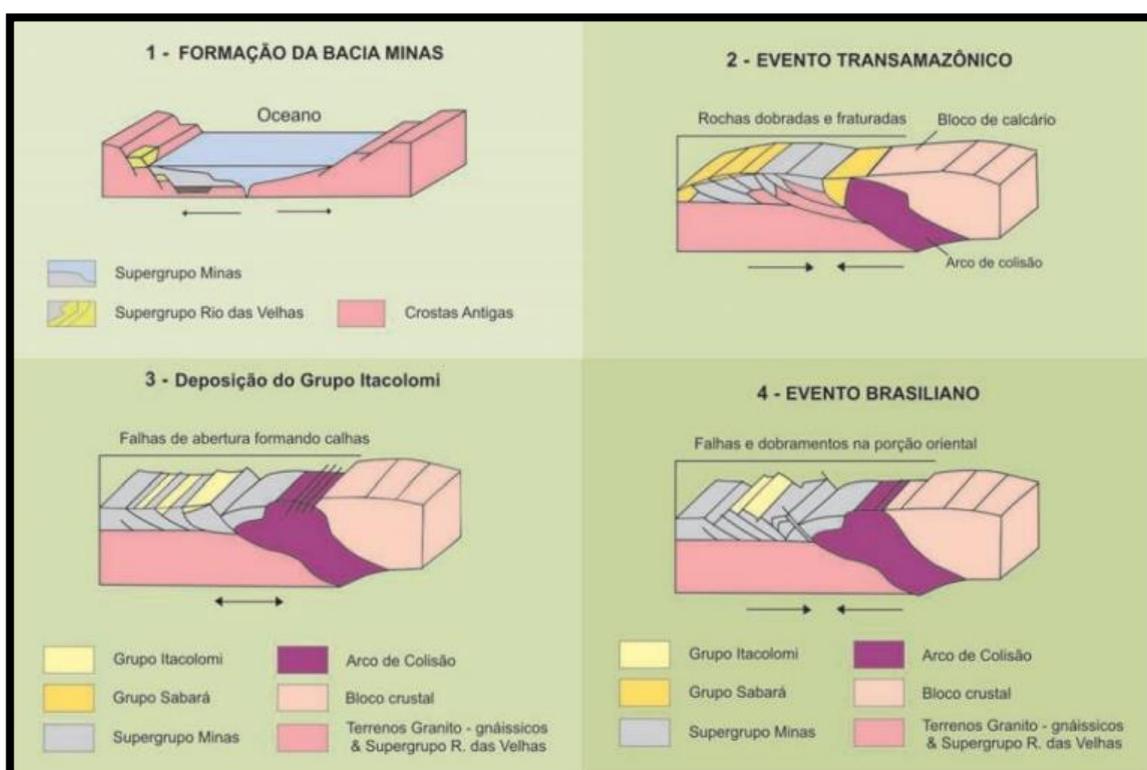


Figura 6: Modelo para evolução geológica do Quadrilátero Ferrífero de Oriovaldo Ferreira & Augusto José Pedreira. Adaptado de Alkmin & Marshak (1998).

O Grupo Itabira, que abriga os itabiritos, trata-se de uma sequência predominantemente marinha de ambiente raso a profundo, depositada sobre a sequência clástica progradante do Grupo Caraça (com idade entre 2600 Ma a 2520 Ma) e que apresenta, da base para o topo, conglomerados, quartzitos e

metapelitos. Dessa maneira o Grupo Itabira é interpretado como sendo constituído por sedimentos de origem química e bioquímica, representando a sequência mais espessa das BIFs encontradas no Quadrilátero. O Grupo possui subdivisão proposta por Dorr (1969), composta pela divisão em duas formações distintas. A primeira denominada de Formação Cauê, que consiste principalmente pelas formações ferríferas, sendo encontrados também itabiritos dolomíticos com pequenas lentes de filitos e margas. E a segunda formação chamada de Formação Gandarela, composta basicamente por rochas carbonáticas, sendo os dolomitos a representação predominante.

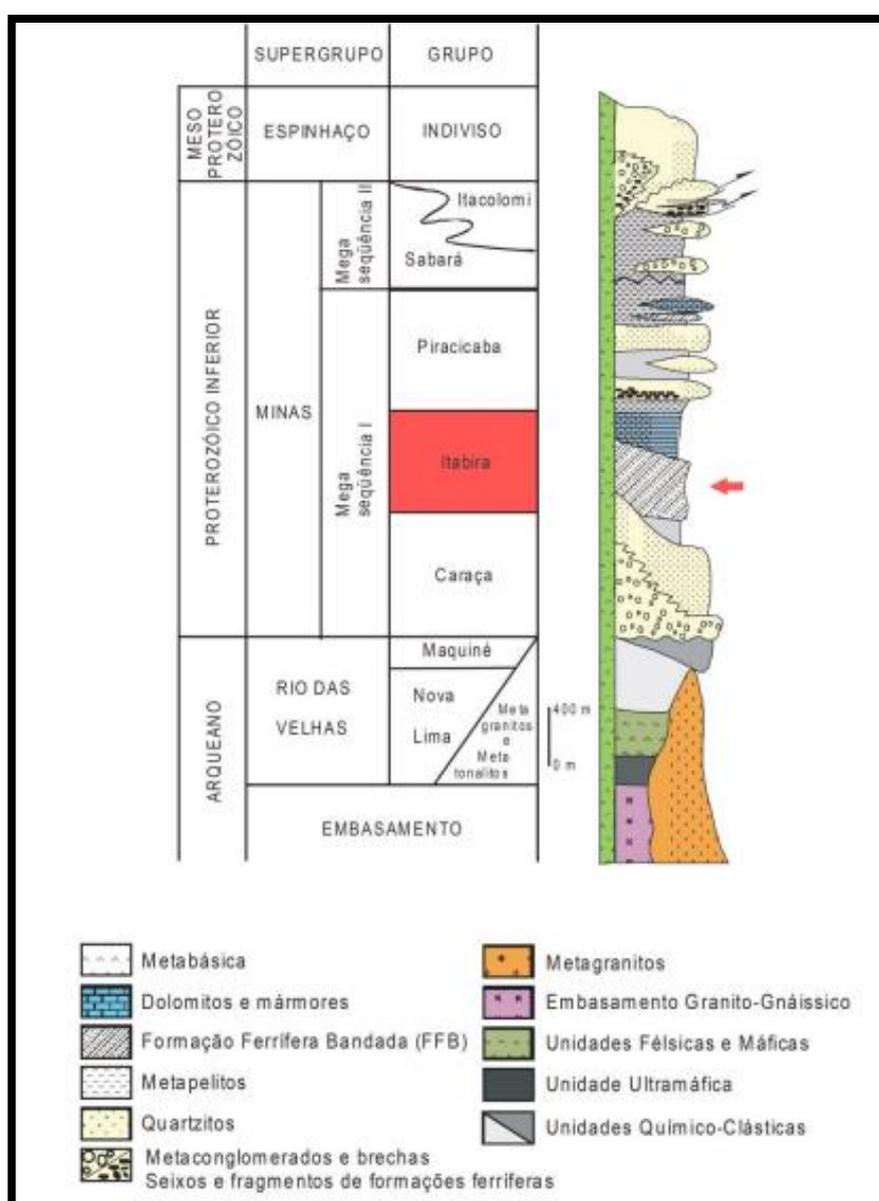


Figura 7: Coluna estratigráfica mostrando em vermelho a localização do minério de Ferro do QF (Grupo Itabira), Modificado de Rosière e Chemale Jr (2000).

A Formação Cauê é composta da base para o topo por itabiritos impuros com contribuição carbonática ou siliciclástica, itabiritos silicosos, itabiritos dolomíticos e itabiritos anfibolíticos. Essa formação está inserida na porção inferior do Grupo Itabira e é conhecida por deter importantes depósitos de minério de ferro hospedados no QF, os quais sofreram grande enriquecimento gerando depósitos com elevado teor e valor econômico. Na Fm. Cauê encontramos as BIFs do Tipo Lago Superior, com metamorfismo de baixo a médio grau, onde formam-se itabiritos, hematita-filitos, filitos dolomíticos e mármores.

Segundo Amorim & Alkmim (2011), há quatro tipos de itabiritos hospedados na Formação Cauê são eles: silicoso, dolomítico, anfibolítico e magnetítico. Essa formação sobrepõe a Formação Batatal e é sobreposta pela Formação Gandarela, ambos em contato de natureza transicional (Dorr, 1969). Devido ao comportamento plástico das BIFs da Formação Cauê durante o processo de deformação que afetou o QF, a espessura dessa unidade em diversas partes do quadrilátero pode exceder 1500 m (Amorim & Alkmim, 2011).

O conceito de Itabirito é definido por (Dorr, 1969 e Chemale & Rosière 2013) como uma rocha ferrífera que se caracteriza pela sua textura laminada e presença de óxidos, onde as bandas de *chert* ou jaspe, que eram originalmente presentes, foram recristalizadas em quartzo granular durante o processo de metamorfismo. Os itabiritos podem ser agrupados em três tipos: itabirito comum ou quartzo (silicoso), itabirito anfibolítico e itabirito dolomítico, já os itabiritos manganíferos e filíticos são encontrados localmente nas interfaces entre os carbonatos estratificamente superiores e os filitos inferiores (Rosière *et al.*, 1993).

Segundo as definições propostas pela equipe de geologia de curto prazo da CSN, a distinção entre os tipologia branda (friável) e compacto é estabelecida pelo percentual de material que permanece retido na peneira de 50mm. No caso dos itabiritos brandos menos de 50% do material fica retido, enquanto os compactos são necessários que mais de 50% da substancial mineral seja retida na peneira (Soares, 2020). O itabirito brando possui uma densidade de 2,68 g/cm³, com baixos teores de ferro (aproximadamente 47%) e é constituído principalmente por especularita e quartzo de origem supergênica dos itabiritos compactos.

Já o itabirito compacto apresenta teores de próximos a 40% e possui densidade de $3,1\text{g/cm}^3$ e ocorrendo na base das formações ferríferas, no contato dos xistos e quartzitos (Almeida, 2011). De acordo com Rosière *et al.*, (2000), diferentemente do que ocorre nas outras bacias, a sequência de itabiritos no QF é relativamente monótona, com seus óxidos formados em diferentes gerações e com clara relação com o grau de metamorfismo e deformação. O quartzo é o mineral de ganga predominante, além de dolomita e anfibólios. Também são encontrados na mineralogia dos itabiritos brandos silicosos (IBS) da região em estudo, hematita do tipo granular e especular, magnetita e goethita em menor proporção (Soares, 2020).

Devido às condições climáticas da área, o intemperismo desempenha um papel fundamental na formação dos depósitos de minério de ferro de alta teor, graças à lixiviação de SiO_2 e, sobretudo, dos carbonatos por meio da ação de águas superficiais. Os processos intempéricos próximo à superfície são responsáveis também pela oxidação e hidratação da magnetita e, em menor proporção, da hematita, formando uma espessa crosta laterítica conhecida como canga, essa camada protege as formações ferríferas subjacentes da oxidação e hidratação possibilitando uma maior efetividade da lixiviação da SiO_2 . (Chemale & Rosière 2000).

A região do nosso estudo, por motivos de confidencialidade, não pode ter a divulgação da localização precisa do depósito, mas o complexo está próximo da Sinclinal da Moeda. A área é caracterizada pela presença de itabiritos em toda a sua extensão, juntamente com uma variedade de tipologias resultantes dos processos de metamorfismo. As rochas aflorantes do depósito estudado possuem direção predominantemente para NW e com mergulho para Nordeste.

4.1.4 Diluição

Dentre os diversos desafios enfrentados pela mineração, a diluição pode ser considerada uma das mais antigas e do ponto de vista operacional mais problemático para um projeto (Crawford, 2004). Na estimativa de teores para quantificação de reservas minerais, é essencial levar em consideração a diluição e a perda para se obter sucesso em um planejamento de lavra.

A diluição trata-se da adição de material estéril ao minério durante a sua extração, o qual é enviado para o beneficiamento provocando assim a redução dos teores previamente estimados. Quanto à perda refere-se ao material com valor econômico que deixa de ser lavrado ou acaba sendo misturado ao material estéril, e posteriormente descartado. Estes fatores são interdependentes e estão associados a vários aspectos do depósito mineral, como a complexidade geológica, a geometria do corpo mineralizado, a dureza da rocha e as características operacionais como: equipamentos, geometria da cava, habilidade dos operadores, entre outros (Câmara, 2013).

De acordo com (Crawford, 2004), é preciso assumir que o operador tenha um conhecimento preciso do local, tamanho e teores do bloco mineral a ser extraído, e que os equipamentos de operação sejam capazes de minerar nessas condições, para que a diluição seja definida apenas como estéril incorporado ao minério durante o processo de extração. Visto isso a diluição pode afetar a rentabilidade de um projeto, uma vez que ocasiona o aumento nos custos de extração e de processamento para obter a mesma quantidade de metal contido no minério. Dessa maneira a simulação geoestatística desponta como uma ferramenta importante, proporcionando informações valiosas para a caracterização de recursos e reservas quantificando incertezas relacionadas ao depósito, tal como a diluição afim de otimizar o planejamento de mina e a integração com investigações geológicas e processamento mineral.

4.2 Simulação Geoestatística

Depósitos minerais complexos, originados de diferentes processos de mineralização e apresentando uma ampla gama de litologias, representam um grande desafio para os profissionais encarregados de sua avaliação. Os métodos de simulação geoestatística empregam técnicas matemáticas que, quando utilizadas em *softwares* específicos, permitem a geração de múltiplos cenários (realizações) diferentes e equiprováveis de um atributo dentro de um depósito ou área de estudo. A utilização das técnicas de simulação de geoestatística na construção de mapas, ao contrário de algoritmos de interpolação que provocam suavização, reproduz as características globais, a continuidade espacial e as estatísticas da amostra (Deutsch & Journel, 1998).

Com um determinado número de realizações é possível avaliar o grau de incerteza associada ao depósito, permitindo aos profissionais compreenderem melhor a natureza do corpo de minério e assim otimizar etapas do seu processo de produção e beneficiamento.

Tal como mencionado por Armstrong (1998), os principais passos da rotina de um trabalho de geoestatística, como a produção de simulações incluem: 1) coleta e validação dos dados; 2) análise da estatística básica; 3) cálculo dos semi-variogramas experimentais; 4) modelagem dos modelos variográficos e 5) realização de krigagem e/ou simulação.

A prática das simulações é baseada no conceito de função randômica, que define um conjunto de valores não amostrados pertencentes a um domínio que se pretende estudar, como variáveis aleatórias com dependência espacial (Chiles & Delfiner, 1999). A simulação geoestatística tem se tornado uma ferramenta essencial no gerenciamento e planejamento de projetos de mineração de minério de ferro. A exploração e exploração de depósitos desse recurso envolvem várias etapas de investigação geológica e processamento mineral devido à sua produção em grande escala, e cada uma delas pode se beneficiar do uso dessa técnica. Entre os objetivos e aplicação do método de simulação temos:

- Quantificação da incerteza: a simulação ajuda na quantificação da incerteza associada às estimativas espaciais, fornecendo várias realizações estocásticas (simuladas) do campo de interesse. Isso permite avaliar a variabilidade e o risco associados às estimativas;

- Otimização de estratégias de amostragem: a simulação geoestatística pode ser usada para projetar e otimizar estratégias de amostragem, identificando locais onde a coleta de dados adicionais pode reduzir a incerteza;

Em razão desses fatores e outros, essa técnica pode estar presente em diferentes momentos do ciclo de mineração, desde o início de um projeto otimizando a amostragem ou permitindo avaliar riscos de longo prazo. Existem vários métodos de geoestatística como: Simulação sequencial de Gauss, Simulação multipontos, Simulação por métodos de transformação, Simulação Sequencial dos Indicadores (SSI) entre outros.

4.2.1 Variografia

Na aplicação de técnicas geoestatística, como a simulação, o ponto de partida é a análise da continuidade espacial dos dados estudados. O objetivo é compreender o comportamento espacial do fenômeno em questão, o qual pode ser expresso por meio de funções matemáticas que reproduzem a correlação entre os pares de amostras. Dentre essas funções temos o semi-variograma ou apenas variograma, como é usualmente utilizado (Matheron, 1963).

O variograma é uma ferramenta matemática que representa a continuidade espacial dos dados, estando diretamente conectado ao fenômeno geológico que pretende ser modelado. A orientação geológica regional ou local fornece as direções principais para o cálculo dos variogramas experimentais. Para o estudo da análise de continuidade espacial é necessária a definição de domínios com características estatísticas similares e quantidade de informação suficiente para modelagem de variografia dentro dos seus limites

Essencialmente o variograma deve refletir as características espaciais do fenômeno em estudo, onde a orientação geológica regional fornece direções principais, para o seu cálculo. A função variograma (ou semi-variograma) é empregada para avaliar o grau de semelhança das amostras afastadas de um vetor h , pertencentes à função randômica estacionária expressa a seguir:

$$\gamma(h) = \frac{\sum_1^n \{v(i+h) - v(i)\}^2}{2n}$$

Onde temos:

$\gamma(h)$ = variância dos pares dados separados pela distância h .

h = distância entre os dados que formam um par.

$v(i)$ = valor do dado na posição i .

n = número de pares encontrados para cada distância h .

4.2.2 Krigagem dos Indicadores

A krigagem dos indicadores é uma técnica geoestatística bem aceita na estimativa de dados com presença de valores extremos ou com forte assimetria na sua distribuição de probabilidades assim como para a interpolação de variáveis categóricas, onde o método é capaz de estimar valores extremos a partir de amostras coletadas em pontos espacialmente distribuídos (Braga, 2015).

O método gera uma distribuição acumulada de probabilidade, por meio de transformações não lineares onde pode-se definir áreas ou volumes com maior ou menor probabilidade de um determinado evento ocorrer (Oliveira, 2008). Na krigagem dos Indicadores uma variável categórica indica a probabilidade da presença ou ausência de um determinado fenômeno natural através de uma codificação binária contínua entre 0 e 1, ou seja, regiões com valor zero (0) indicam a ausência da tipologia, já o valor um (1) representa a presença do atributo estudado. Dentro da rotina da exploração de um depósito mineral ela é utilizada para indicar as litologias de cada região e assim poder delinear os contatos geológicos do depósito (Sinclair & Blackwell, 2004).

Para variáveis contínuas é comum ocorre a divisão dos valores em intervalos, onde cada intervalo é definido por tantos teores de corte quanto for as categorias que se deseja estudar, já em variáveis categorias cada categoria assume um valor indicador. No presente trabalho será utilizado variáveis categorias, onde ao final do processo cada categoria estimada receberá o valor zero (representando a probabilidade nula de IBS) ou valor um (probabilidade máxima para o evento ocorrer). O método de interpolação por krigagem dos indicadores é controlado pelos dados modelados e ajustados aos variogramas experimentais.

4.2.3 Simulação Estocástica

A técnica de simulação trata-se de uma importante ferramenta em projetos nas áreas de petróleo e mineração, pois ela é capaz avaliar modelos de incertezas e análises de riscos em diferentes fases do projeto (Olea, 2012). Sua aplicação é utilizada para modelar o comportamento de sistemas complexos que apresentam incertezas ou variações aleatórias em seus processos.

Na geologia esse método pode ser utilizado para modelar incertezas associadas às propriedades geológicas de subsolo como: permeabilidade e porosidade em reservatórios de óleo de gás e na distribuição espacial de depósitos minerais. Ao contrário de uma simulação determinística, que utiliza valores fixos para todas as variáveis do modelo, a simulação estocástica utiliza distribuições de probabilidade para representar a incerteza associada a cada variável.

O Algoritmo de uma simulação estocástica possibilita a realização de diferentes cenários da distribuição dos valores do atributo estudado ao longo de um depósito mineral a exemplo. Cada realização corresponde ao conjunto de n -valores simulados em diferentes posições (u). Vale ressaltar que cada valor simulado deve honrar os dados originais, conseqüentemente apresentar o seu histograma semelhante ao histograma desagrupado e apresentar um modelo com continuidade semelhante ao modelo de continuidade dos dados originais. (Koppe, 2009). Segundo (Goovaerts, 1997), os histogramas e variogramas dos cenários simulados em cada realização raramente são exatamente iguais aos dos modelos obtidos pelos dados originais. Existem diversas técnicas de simulação presentes na bibliografia e empregados na indústria, no presente trabalho será utilizado a Simulação Sequencial dos Indicadores (SSI).

4.2.4 Simulação Sequencial dos Indicadores (SSI)

A Simulação Sequencial dos Indicadores (SSI) é uma técnica geoestatística de simulação utilizada para modelar a incerteza espacial. Os métodos de simulação criam por meio de funções randômicas diferentes cenários e igualmente prováveis de um mesmo atributo dentro de um depósito mineral onde com um determinado número de simulações (realizações) é possível avaliar o grau de incerteza associado à estimativa. (Souza, 2007).

A técnica de SIS proposta por (Alabert, 1987) e (Journel, 1989) utiliza a krigagem simples para simular os indicadores a serem estudados, estimando o valor indicador e conseqüentemente estimar a distribuição da probabilidade local. Com isso teremos um *grid* onde cada ponto receberá valores de zero ou um, não apresentando valores intermediários.

Para tal resultado é necessário a realização um número suficiente de realizações (Souza, 2007). A simulação sequencial dos indicadores (SSI) tem sido utilizada para estimar as incertezas associadas a diversas propriedades geológicas, como a distribuição de minérios em uma mina ou a permeabilidade de rochas em reservatórios de petróleo. A técnica permite que os profissionais obtenham uma compreensão mais precisa da incerteza espacial, melhorando assim a precisão das previsões.

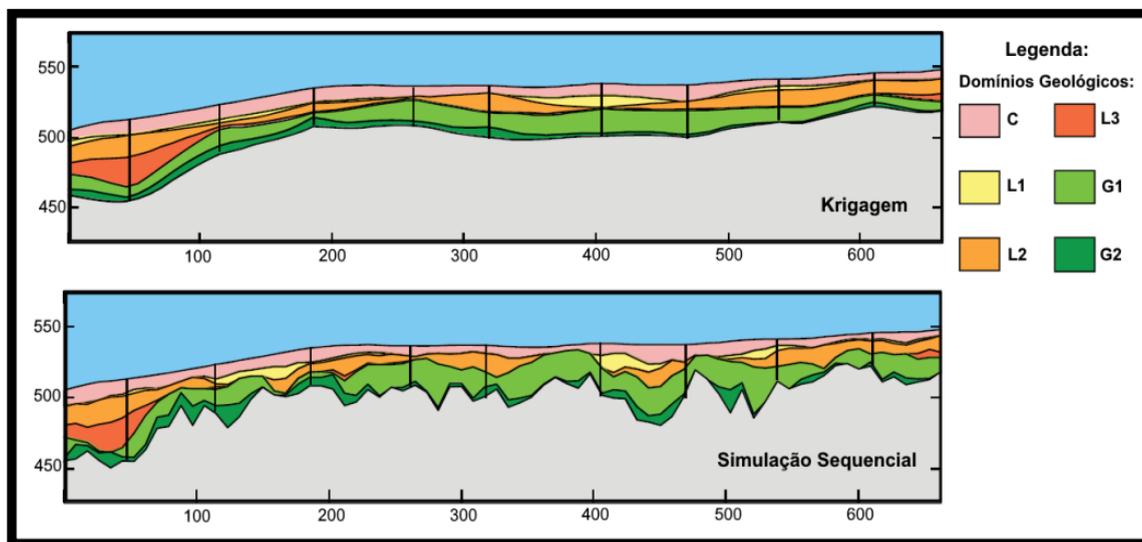


Figura 8: Exemplo de uma seção vertical de modelo geológico estimado e simulado. Adaptado de Chiles & Delfiner.

Quanto às incertezas nas interpretações geológicas e processos de estimativa, empresas do setor mineral vêm tentando minimizar os efeitos através de métodos como krigagem dos indicadores e, em casos mais refinados, simulação sequencial dos indicadores, a fim de auxiliar na geração de modelos de corpos de minérios que serão posteriormente utilizados para a avaliação de recursos e reservas minerais (Pasti, 2012). Além dos exemplos citados também é encontrado na bibliografia a utilização dessa técnica para modelar a distribuição espacial de aquíferos bem como no setor de geotecnias, onde é possível modelar propriedades de solo visando estimar a probabilidade de uma determinada área ser adequada a construção de estradas e edificações.

5. BANCO DE DADOS

Os dados são pertencentes a região do Quadrilátero Ferrífero, sendo gerado a partir de informações de sondagens realizadas ao longo de 60 anos. Este banco de dados tem por característica ser multivariado, ou seja, possui diferentes variáveis de diversos elementos em suas tipologias.

Os dados do projeto, segundo relatórios internos da empresa apresentam 33 tipologias, das quais 19 são denominadas de estéril e 14 minério. Quanto a minério temos as seguintes tipologias: HBA (hematita branda), HCP (hematita compacta), ICR (itabirito compacto rico), IBR (itabirito brando rico), IBS (itabirito brando silicoso), ICS (itabirito compacto silicoso), ICC (itabirito compacto carbonático), IBM (itabirito brando manganésífero), ICM (itabirito compacto manganésífero), IBG (Itabirito brando ghoetítico), ICG (itabirito compacto ghoetítico), CEL (colúvio/elúvio), CGM (canga de minério) e BRS (brecha sedimentar mineralizada). No presente trabalho os procedimentos de simulação serão realizados com o IBS devido ser o minério com maior predominância no depósito.

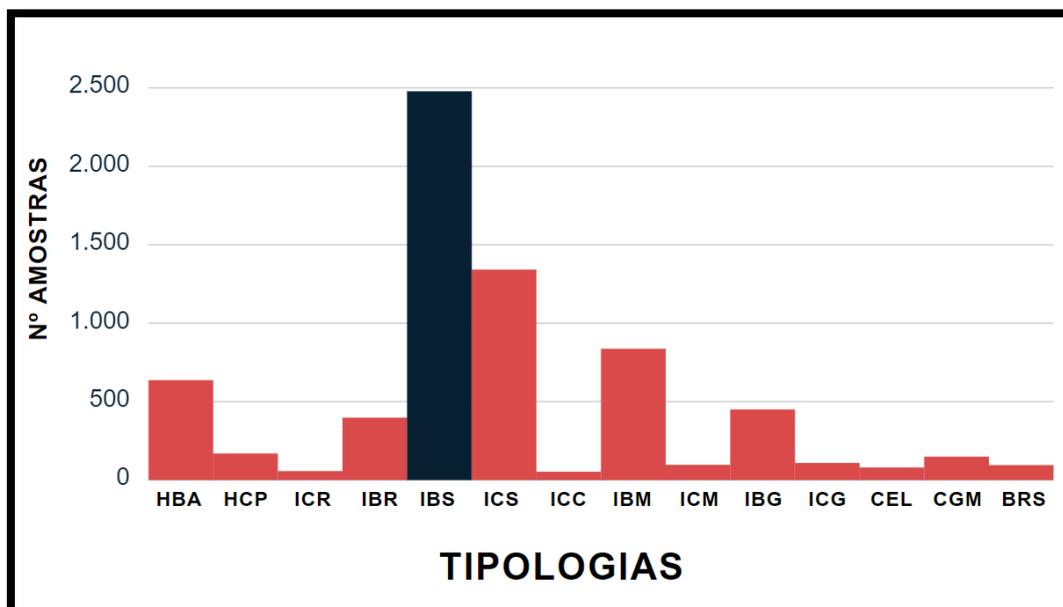


Figura 9: Histograma dos minerais de minério encontradas no banco de

6. METODOLOGIA

6.1 Revisão Bibliográfica

Essa etapa contou com um levantamento bibliográfico da região estudada (Quadrilátero Ferrífero), onde foi possível obter a compreensão do contexto geológico da região a partir de diversos materiais como: artigos, dissertações, teses, mapas e monografias. Para a parte geoestatística foram revistos os conceitos aprendidos nas cadeiras de Princípios de Geoestatística e Modelagem Numérica Geológica além de uma minuciosa revisão bibliográfica sobre simulação geoestatística.

6.2 Abordagem dos Indicadores

6.2.1 Análise Exploratória dos Dados (AED)

Dada a revisão bibliográfica e o entendimento do contexto a ser estudado a próxima etapa trata-se da análise exploratória dos dados. Essa é etapa fundamental no processo de aplicação de métodos geoestatísticos, pois é responsável por investigar a distribuição espacial dos dados, identificar possíveis padrões e anomalias, e compreender a variabilidade deles. A análise exploratória dos dados (AED) é uma etapa essencial no processo de aplicação de técnicas em geoestatística, permitindo uma compreensão detalhada dos dados coletados e a identificação de padrões e tendências em sua distribuição espacial.

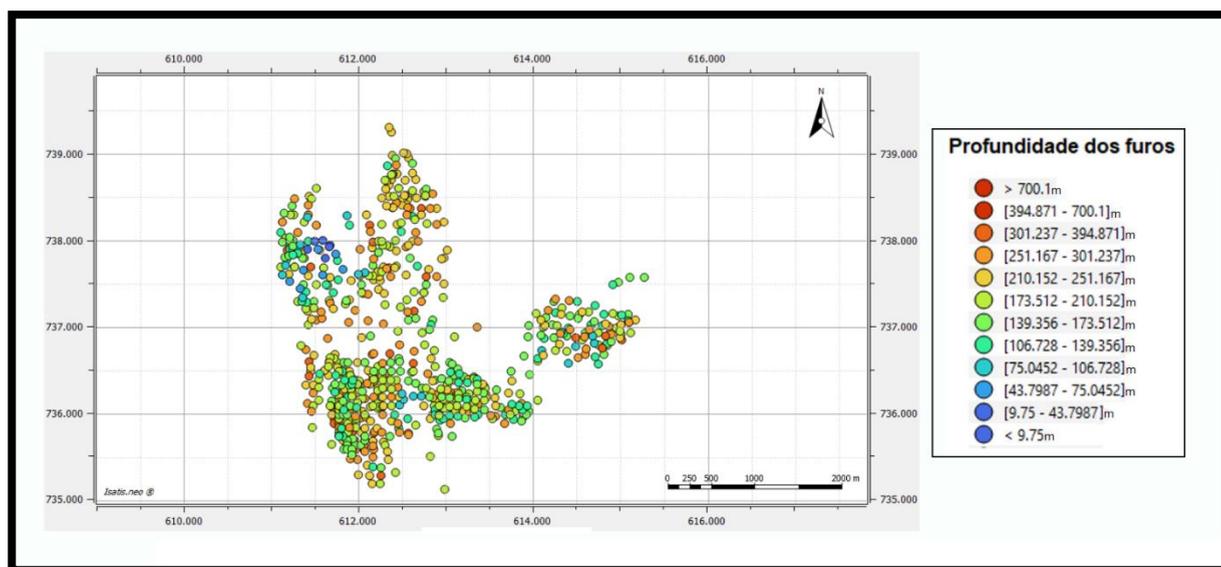


Figura 10: Mapa de distribuição espacial dos furos de sondagem e suas profundidades em metros.

Entre as informações que podem ser obtidas na AED, destacam-se a disposição espacial das amostras, a presença de agrupamento preferencial, os limites máximos e mínimos das variáveis, a presença de erros de digitação e o número total de amostras. A presença de agrupamento preferencial é outra informação importante obtida nessa etapa, ela pode indicar a presença de áreas em que as amostras tendem a se concentrar mais do que em outras, o que pode ser um indicativo da presença de fatores que influenciam a distribuição das variáveis estudadas.

Os limites máximos das variáveis também são informações obtidas nessa etapa, permitindo identificar valores extremos que possam influenciar a interpretação dos resultados. A presença de erros de digitação também deve ser identificada, a fim de garantir a precisão dos dados utilizados. As informações referentes aos furos de sondagem demonstram que, em geral, o banco de dados apresenta uma malha amostral regular, estruturada na direção Norte-Sul, com uma menor concentração de amostras na porção leste do depósito, essa configuração é resultado da disposição das cavas presentes no complexo. Os furos apresentam espaçamento regular em torno de 100 metros entre as amostras, podendo haver regiões com furos mais concentrados, onde esse espaçamento é próximo de 50 metros, principalmente no setor Sul.

Quanto à profundidade, encontramos furos de até 700 metros; entretanto, a maioria dos testemunhos de sondagem apresenta pouco mais de 100 metros de comprimento. O Itabirito Brando Silicoso (IBS), foco desse estudo, mostra-se distribuído em todas as porções do depósito, com uma maior concentração na porção centro-norte, como é possível observar nos mapas de perfil vertical verificados nas figuras 11 e 12.

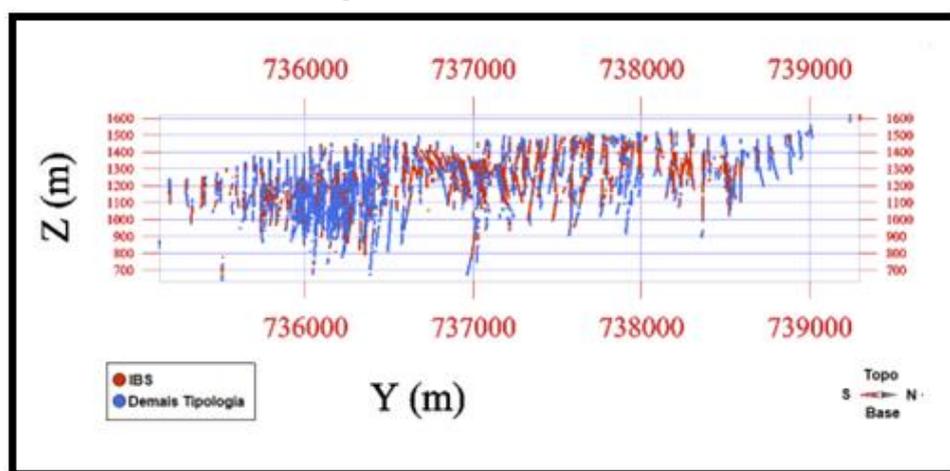


Figura 11: Perfil vertical dos furos de sondagem no sentido Oeste.

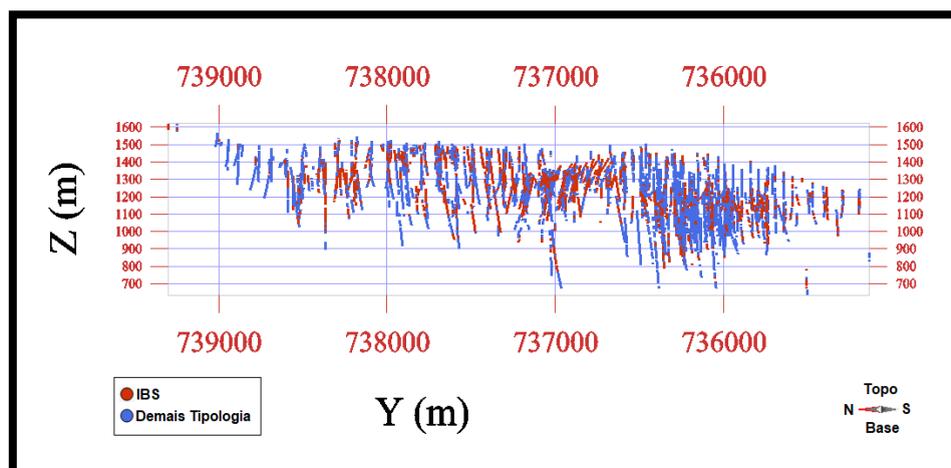


Figura 12: Perfil vertical dos furos de sondagem no sentido Leste.

6.2.2 Análise de Continuidade Espacial

A etapa de Análise de Continuidade Espacial na geoestatística refere-se à investigação e compreensão da forma como os valores de uma variável se relacionam no espaço. Esse estágio do estudo busca a dependência espacial dos dados, ou seja, como a variabilidade da variável de interesse se comporta em diferentes distâncias e direções no espaço. Para o estudo de análise de continuidade espacial é necessária a definição de domínios com características estatísticas similares e quantidade de informação suficiente para modelagem de variografia dentro dos seus limites.

Essa análise é importante para determinar a extensão e a direção da correlação espacial entre os pontos de amostragem, permitindo modelos geológicos mais precisos. Uma das características que distinguem conjuntos de dados de geociências é seu padrão de continuidade espacial, feição que não é capturada pela estatística univariada. Para sucesso de tal etapa é necessário alcançar dois objetivos principais:

- Quantificar e compreender os principais padrões espaciais do fenômeno físico estudado como: principais direções de continuidade, dispersões e heterogeneidade espacial e comportamento anisotrópico das propriedades internas;
- Construir um modelo de correlação espacial representativo da área de interesse;

Nessa etapa é realizada a confecção dos variogramas experimentais, que se trata de um gráfico confrontando a variâncias versus a distância, qual visa ilustrar a correlação espacial dos dados estudados. Esse processo será realizado através do software Isatis.neo Mining (versão 2022.12). A função matemática cumpre a tarefa de descrever a continuidade e a variabilidade existente nos dados, entre as características do variograma constam:

- **Alcance (range):** distância até onde as amostras apresentam correlação espacial;

- **Efeito pepita:** valor da função do variograma na origem. Pode ser resultado tanto da variabilidade do fenômeno espacial que pretende estudar como erro amostral ou analítico;

- **Sill (platô):** o patamar é alcançado para distâncias maiores ou iguais ao alcance

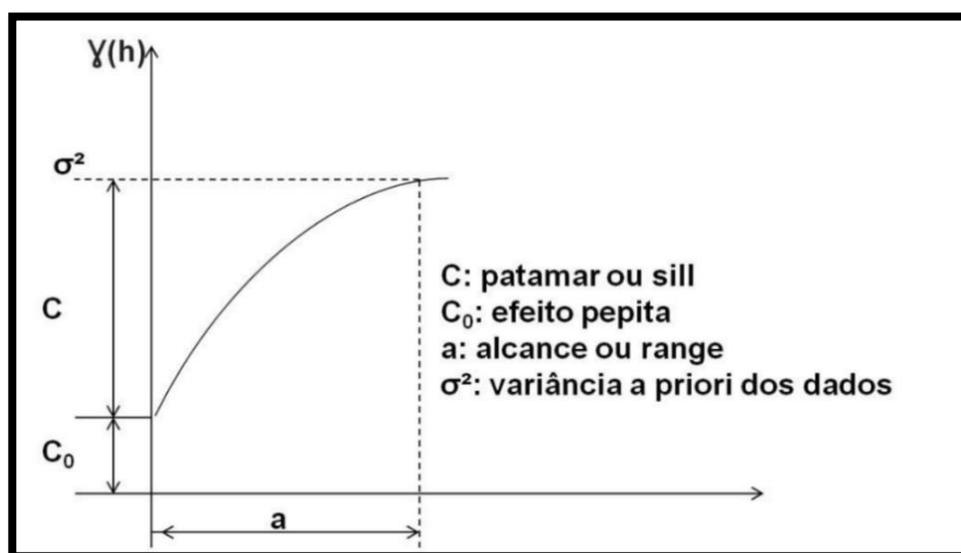


Figura 13: Características de um variograma (adaptado de Matheron 1971).

Para a realização das próximas etapas, como a simulação, os modelos variográficos desses indicadores precisam ser calculados e modelados, etapa de extrema importância para o sucesso da krigagem e, conseqüentemente, a simulação. Segundo Deutsch (2002) o variograma deve ser calculado apenas para as direções principais de continuidade de uma variável. Para os itabiritos, grupo predominante no depósito, a direção de maior continuidade é paralela ao alinhamento do *strike* da formação ferrífera, e a de menor continuidade é perpendicular à formação. Seus variogramas são observados na figura 8.

Quanto aos parâmetros obtidos na variografia e necessários para a krigagem, estão ilustrados na tabela 2, onde a direção de maior continuidade é representada pelo vetor U. Também são definidas as direções intermediárias pelo vetor V e a de menor continuidade pelo vetor W, sendo essas duas ortogonais entre si e contidas num plano ortogonal ao vetor de maior continuidade (vetor U).

Para a adequada modelagem dos variogramas foi necessário a utilização de mais de uma estrutura, no caso dos variogramas apresentados nesse trabalho foram necessárias três estruturas sendo elas: a primeira correspondendo ao efeito pepita, e as demais baseadas em modelos esféricos.

Tabela 2: parâmetros variográficos utilizados na krigagem e simulação.

Estrutura	Modelo	Contribuição	Alcance (m)		
			U	V	W
1	Efeito pepita	0.03	U	V	W
2	Esférico	0.14	300m	300m	150m
3	Esférico	0.05	1500m	700m	200m

Os parâmetros adquiridos durante a modelagem dos semi-variogramas são a base do processo de krigagem dos indicadores, uma vez que são estes parâmetros que influenciam no cálculo do peso a ser dado a cada amostra no processo de interpolação (Souza, 2007). Completada a etapa de modelagem dos variogramas, a fim de permitir o andamento dos processos de krigagem e simulação, é necessário a criação de um *grid* que envolva a área de estudo. A confecção do *grid* é necessária para alocar os valores estimados com base nas amostras existentes. O *grid* é utilizado como base para a interpolação dos dados amostrais e a geração de um mapa contínuo das propriedades que se pretende estudar.

Tabela 3: Dimensões e parâmetros do grid utilizados nesse trabalho.

Direção	Origem	Espaçamento (m)	Número de nós
X	611050.00m	12.5m	339
Y	7735137.50m	12.5m	334
Z	7735131.25m	10m	100

A escolha das suas dimensões leva em consideração a malha de amostragem e as estruturas geológicas do corpo de minério. O *grid* é composto por células retangulares ou quadradas que cobrem toda a área de interesse, as dimensões e valores do *grid* utilizados nesse trabalho estão representados na tabela 3. No final do processo, cada ponto de grid estimado receberá uma probabilidade de o local pertencer a domínio IBS ou não, cujos valores interpolados estarão compreendidos entre 0 e 1.

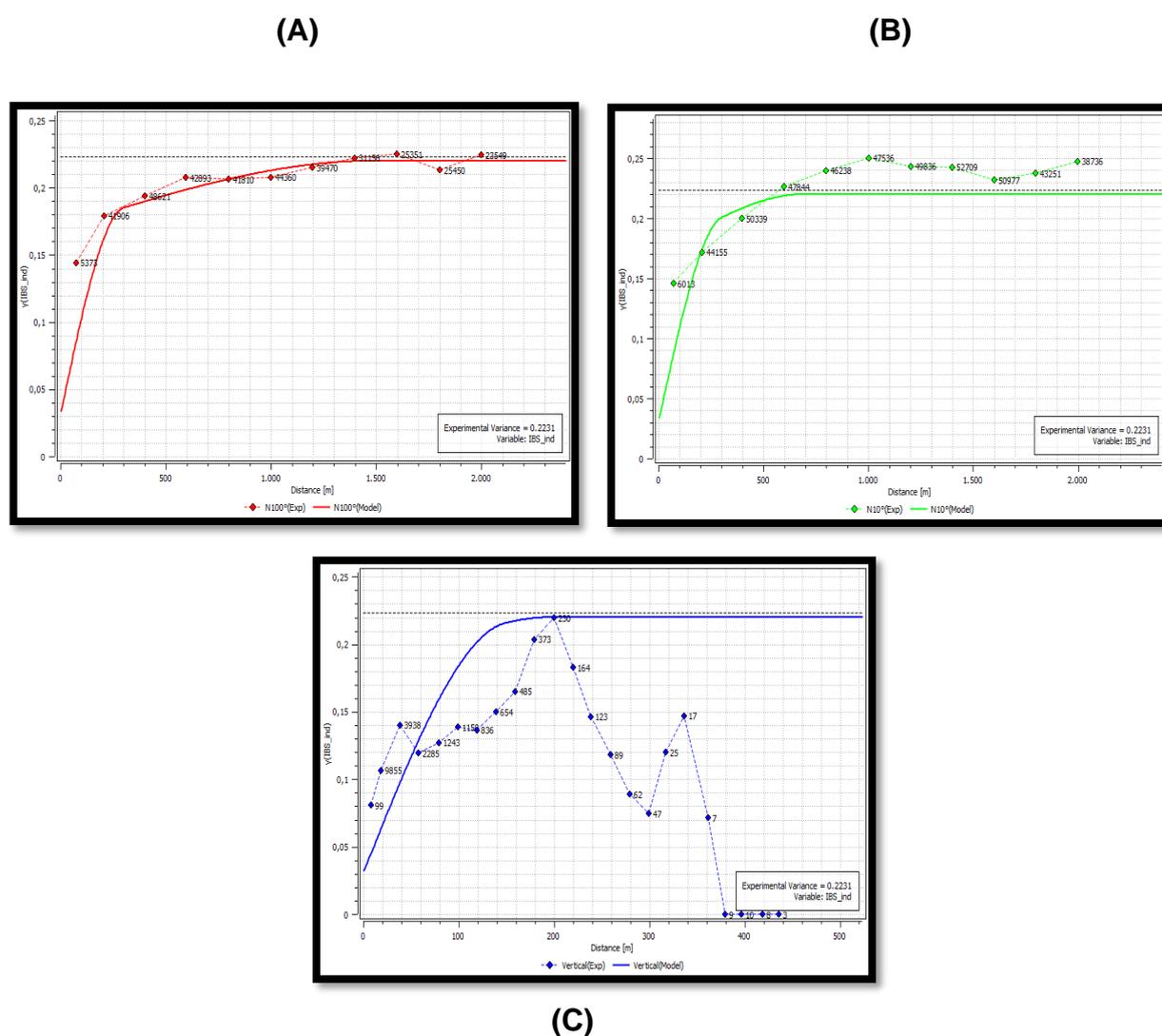


Figura 14: Variogramas de maior (A), intermediária (B) e menor continuidade (C) para o domínio IBS.

6.2.3 Krigagem dos Indicadores

A metodologia da krigagem dos indicadores foi inicialmente utilizada para modelagem das variáveis categóricas, como tipos de minério. Segundo (Journel, 1983) a krigagem indicadora foi idealizada para construir uma função de distribuição de probabilidades acumuladas através de uma transformação não-linear. A interpolação não-linear é uma tentativa de estimar a expectativa condicional de um teor em um ponto específico, ao invés de simplesmente prever o próprio teor (Goovarts, 1997).

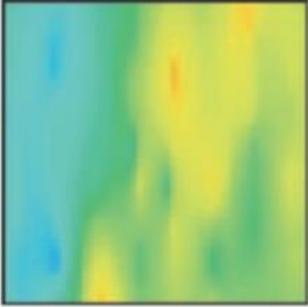
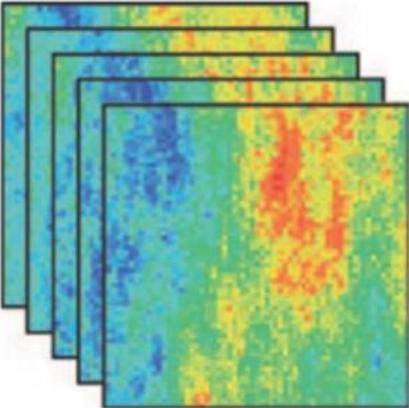
Krigagem	Simulação
	
Versão suavizada da realidade	Imagens equiprováveis de mesma variabilidade espacial dos dados originais
Ruim para modelar valores extremos	Bom para modelar valores extremos

Figura 15: Diferença entre o modelo krigado e o simulado (Modificado de Rossi & Deutsch (2013)).

A krigagem dos Indicadores é uma técnica geoestatística bem aceita na estimativa de dados com presença de valores extremos bem como para interpolação de variáveis categóricas (Braga, 2015). O foco da krigagem indicadora é não calcular exclusivamente o valor do atributo de interesse, como ocorre na krigagem ordinária, mas sim estabelecer a curva de distribuição de probabilidades desse atributo. Com essa abordagem, é possível delinear áreas e volumes com maior ou menor probabilidade de ocorrência de um evento específico (Oliveira, 2008).

Assim, o banco de dados foi categorizado de forma binária, onde locais com a presença da tipologia IBS receberam a codificação um (1) enquanto as demais tipologias receberam o valor zero (0). As informações das interpretações dos testemunhos de sondagem compuseram a base de dados para interpolação dos tipos de minério, sendo utilizado o mesmo *grid* da Simulação Sequencial dos Indicadores (SSI). O modelo dos indicadores gerado pela krigagem para variável IBS foi realizado para um tamanho de blocos de: 12,5m x 12,5m x 10m, no software Isatis.neo 2023.04®.

6.2.4 Simulação Sequencial dos Indicadores

Essa etapa também será realizada por meio do *software* Isatis.neo 2023.04®, onde a aplicação do método de simulação é realizada de maneira similar ao método de krigagem dos indicadores. O método de simulação produzirá através de uma função randômica diferentes cenários (os quais também são chamados de realizações) e igualmente prováveis do atributo estudado, possibilitando assim avaliar a incerteza na modelagem.

Um modelo geológico realizado por simulação possui as mesmas informações que um modelo estimado pelo método de krigagem, porém esse é capaz de reproduzir a variabilidade espacial da variável em estudo, além de tratar de maneira melhor a incerteza, visto que não apresenta as suavizações geradas na krigagem (Cananéia, 2019). Os indicadores são utilizados com o propósito de reduzir os K resultados possíveis de uma variável aleatória categórica, para apenas duas possibilidades de um determinado evento ocorrer ou não (Journel, 1983). O valor k pode ser definido como a presença (ou não) de uma tipologia na localização u .

$$I_k(u) = \begin{cases} 1 & \text{se o evento } k \text{ ocorrer na localização } u \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

As simulações são capazes de gerar, por meio de uma função randômica, vários cenários diferentes e igualmente prováveis do mesmo atributo dentro de uma área de estudo. No entanto, diferentemente da krigagem, a SSI preenche o modelo apenas com os indicadores zero ou um, e não com uma distribuição contínua de probabilidades. Com um determinado número de cenários ou realizações, é possível avaliar-se o grau de incerteza associado à

estimativa. Alguns métodos de simulação amplamente empregados na indústria de mineração podem produzir realizações que exibem ruídos excessivos. Além de avaliar a incerteza dos modelos geológicos, há também a preocupação em garantir que os modelos finais apresentem transições contínuas e realistas entre as diversas litologias do depósito (Rolo, 2021).

Para minimizar a presença de ruídos e facilitar a visualização e análises dos resultados, esse trabalho optou pelo número de 100 realizações. A quantidade de realizações é um fator importante no sucesso das simulações. Embora um número maior de realizações possa ser mais apropriado e podendo gerar melhores resultados, é importante considerar o esforço computacional necessário. Um grande número de simulações pode exigir um tempo maior de processamento, o que pode tornar a realização das simulações um procedimento mais demorado.

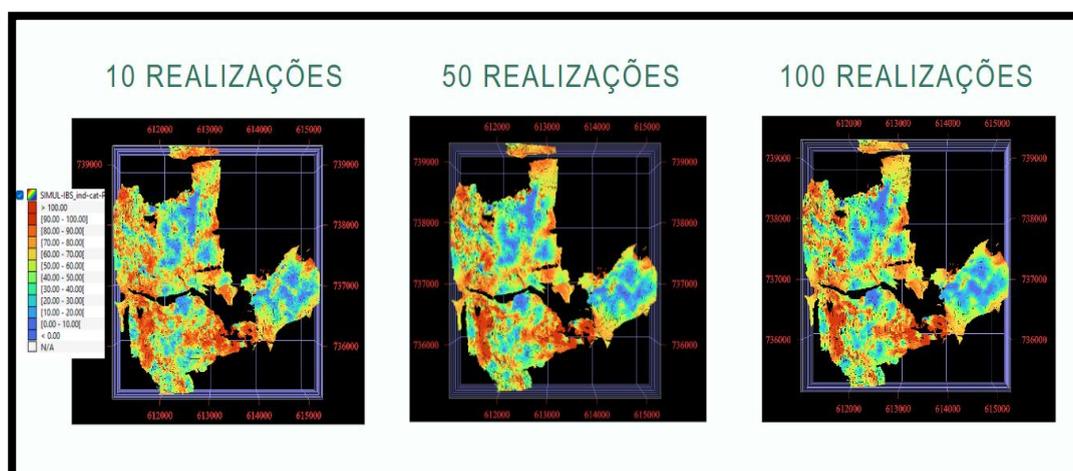


Figura 16: Mapa acumulado em planta dos três ensaios realizados para SIS.

Inicialmente o estudo realizou o processo de simulações com 10 cenários (figura 16), visto que o tempo gasto não foi tão alto, foi realizado um segundo teste com 50 realizações. Por fim, um terceiro ensaio com 100 realizações foi executado, mesmo levando um tempo considerável esse ensaio mostrou uma leve melhora na continuidade espacial e redução de ruídos quando comparado com os ensaios anteriores. Como foram realizadas 100 realizações, o que resulta ao final do processo de simulação dos indicadores, é na verdade um conjunto de 100 grids distintos de pontos, preenchidos com os valores dos indicadores 0 e 1. Para ser possível a comparação entre a krigagem dos indicadores e a simulação os *grids* necessitam ser idênticos (Souza, 2007).

7. RESULTADOS

7.1 Krigagem dos Indicadores

Entre as técnicas geoestatísticas empregadas para realizar a modelagem geológica, encontramos a Krigagem dos indicadores e a SSI, cujos resultados se diferenciam principalmente devido à sua capacidade de reproduzir as variações. A krigagem é uma técnica de interpolação que permite estimar valores em locais não amostrados com base nas informações dos pontos amostrais disponíveis. Nessa situação, a Krigagem dos Indicadores busca uma estimativa com a menor variação possível no erro de estimativa, demonstrando uma suavização nos resultados, enquanto a simulação tem a capacidade de reproduzir a variabilidade espacial dos dados amostrais com valores extremos (Dimitrakopoulos, 1998).

Quanto à etapa de modelagem variográfica, foram adotados os mesmos parâmetros utilizados posteriormente na Simulação Sequencial dos Indicadores (SSI). O procedimento de krigagem foi realizado utilizando o *grid* anteriormente mencionado com uma resolução de 12,5m x 12,5m x 10m, por ser tridimensional o *grid* tem seus diversos níveis acumulados na projeção plana (Figura 17).

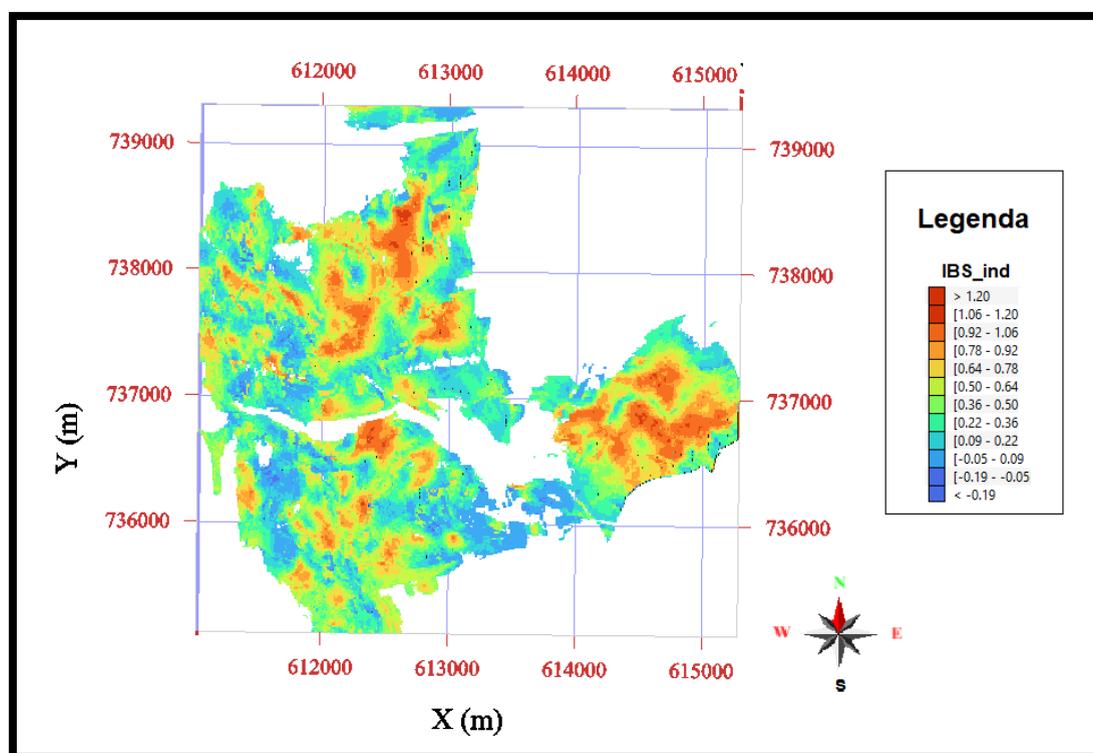


Figura 17: Mapa da Krigagem dos Indicadores para o IBS, vista em planta/acumulada.

Seu resultado é ilustrado na imagem anterior (Figura 17), em que as cores quentes representam uma maior probabilidade de ocorrência do indicador IBS, e se encontram principalmente no setor norte e leste do complexo. Na krigagem dos indicadores, faz-se necessário o uso da krigagem ordinária, ao contrário da SIS, onde utiliza-se a krigagem simples. A krigagem ordinária dos indicadores considera que a média dos indicadores sofre variações, podendo ser diferente para cada domínio local dentro do domínio total onde se estima. Pesos negativos e acima do valor um estão geralmente associados à proximidade das amostras, ou seja, nos casos em que ocorre sobreposição de amostras em relação ao bloco a ser estimado (Braga, 2015). Ao analisar o mapa de krigagem gerado, é possível identificar padrões espaciais e tendências na distribuição dos valores de probabilidade estimados.

Dentro do software Isatis foi possível filtrar as probabilidades acima de 50% a fim de encontrar locais de maior chance de se encontrar o indicador estudado, esses resultados estão apresentados na figura 18. Uma observação importante diz respeito à concentração de valores com estimativas superiores a 0,5 na região norte e leste do mapa. Essa concentração indica uma maior probabilidade de ocorrência do indicador IBS nessas áreas, de acordo com os indicadores utilizados. Essa informação é posteriormente comprovada pelos modelos de probabilidade empregados conforme ilustrado na figura a seguir.

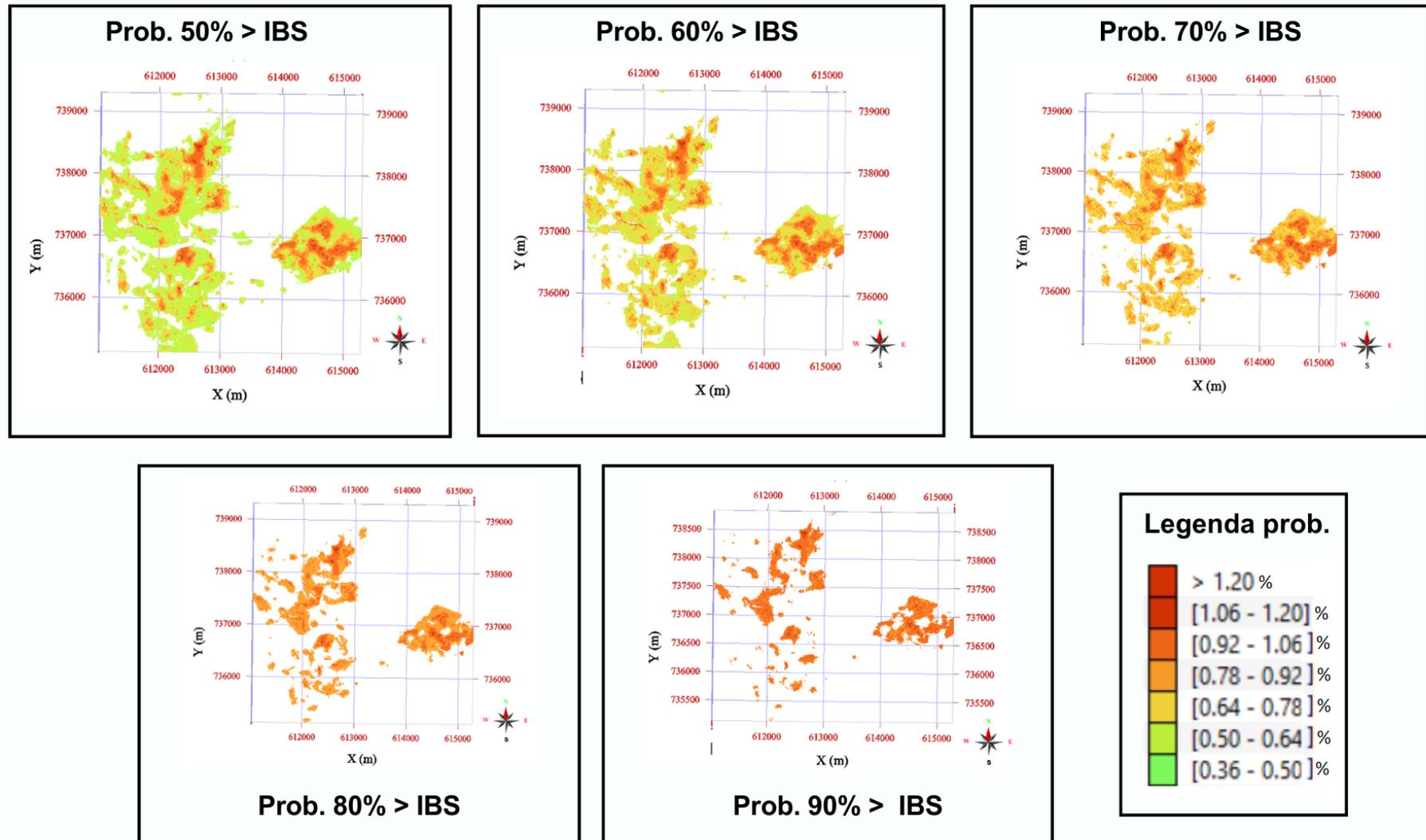


Figura 18: Mapas das distribuições de probabilidade obtidas pela Krigagem dos indicadores para: 50%, 60%, 70%, 80% e 90% de IBS.

7.2 Simulação Sequencial dos Indicadores (SSI)

A Simulação Sequencial dos Indicadores também foi realizada no *software Isatis.neo*, onde foram calculadas 100 realizações (simulações) no mesmo *grid* utilizado pelo método de Krigagem dos Indicadores, a fim de comparar os modelos estimado e simulado. A SSI produz possíveis cenários do depósito mineral, os quais são chamados de realizações, e seus parâmetros de busca estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros utilizados para Simulação Sequencial dos

Parâmetros	Valores
Número de simulações	100
Seed	12345678
Número de pontos simulados previamente	32
Número de setores angulares	8
Número máximo de amostra por setor	4
Orientação	N 100° / 90°
Alcance (U)	800m
Alcance (V)	500m
Alcance (W)	150m
Tipo	SK

Na simulação sequencial, os primeiros pontos do *grid* são simulados apenas com as amostras. À medida que se obtém mais blocos simulados, o processo de SSI utiliza esses nós previamente simulados como uma vizinhança de busca para os próximos blocos. Esse parâmetro trata-se do número de pontos simulados previamente. Os eixos do elipsoide de busca estão representados na tabela pelos vetores de maior (U), intermediário (V) e menor (W) continuidade. Para realizar a simulação, é necessário definir um número chamado de *seed*.

Ajustando uma *seed aleatória fixa*, é possível reproduzir os dados de maneira que inicie as simulações sempre com os mesmos parâmetros. A estratégia de busca baseou-se em octantes (número de setores angulares) com um número máximo de 4 amostras por setor, essa estratégia é utilizada para evitar valores negativos nas matrizes de krigagem. Diferentemente da krigagem dos indicadores que utiliza krigagem ordinária, a SSI utiliza krigagem simples (SK). Na krigagem simples (SK), a média dos indicadores é considerada

conhecida e constante em todo o domínio em que se realiza a estimativa. Já a krigagem ordinária considera que a média dos indicadores sofre variações, sendo diferente para cada subdomínio local dentro do domínio total em que se estima (Souza, 2007).

Diferente do método de krigagem, na simulação o procedimento não é realizado apenas uma vez, e sim várias vezes. Em cada realização desse processo, o *grid* é preenchido de forma diferente, sempre honrando os valores do semi-variograma modelados. Como resultado deste procedimento, obteve-se 100 modelos de blocos preenchidos com os valores 0 para ausência do indicador IBS e 1 para a presença da tipologia, alguns dos 100 resultados foram escolhidos de forma aleatória e estão ilustrados na figura 19.

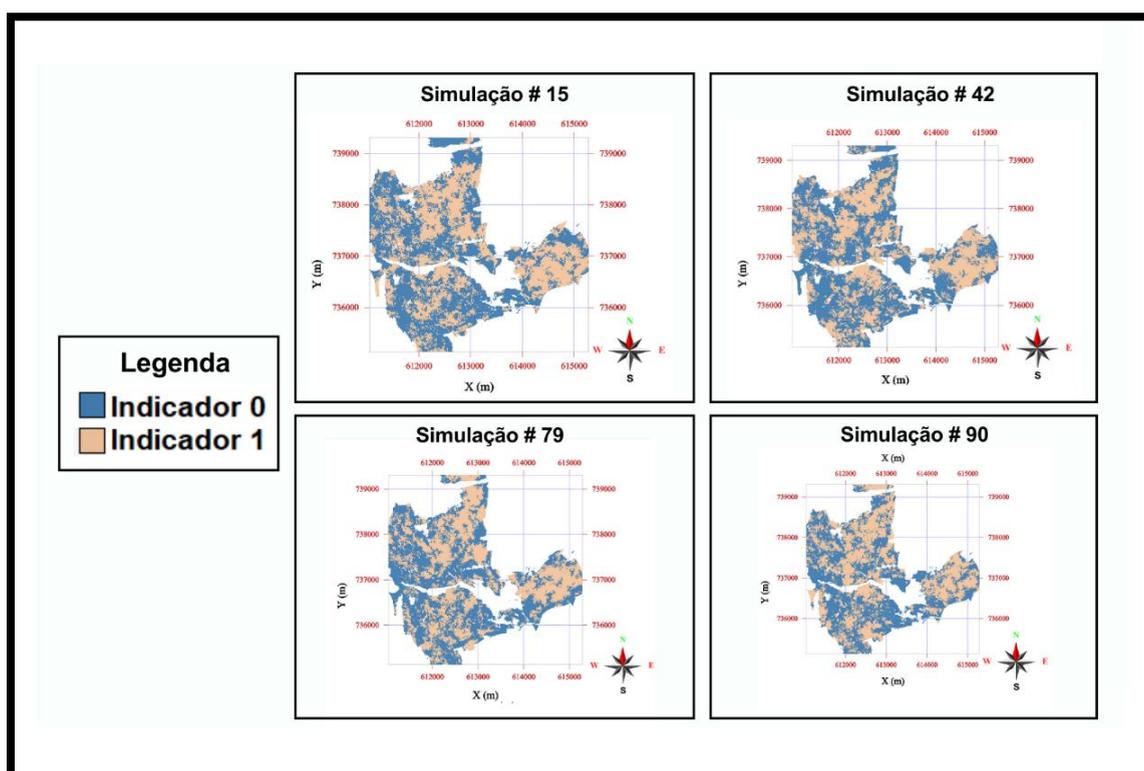


Figura 19: Mapa 2D acumulado das simulações sequenciais de número 15,42,79 e 90.

Os resultados obtidos demonstram que tanto a simulação sequencial dos indicadores (SSI) quanto a krigagem dos indicadores revelaram uma densidade significativa do indicador IBS na porção norte e leste do complexo. No entanto, foi observado que os mapas gerados pela SSI apresentaram um certo nível de ruído em comparação com o mapa produzido pela krigagem, que exibiu uma distribuição mais contínua e suave como é esperado pelo método.

A comparação dos quadros de probabilidades gerados pela krigagem dos indicadores (Figura 18) e pela Simulação Sequencial dos Indicadores (Figura 20) revelou uma discreta diferença na representação espacial do indicador IBS. Mesmo que o método tenha sido executado com os mesmos parâmetros, é importante ressaltar que, devido à sua componente aleatória, cada realização da simulação sequencial dos indicadores (SSI) é única e apresenta pequenas variações em relação às outras realizações.

Ao analisar os métodos com filtro de probabilidades acima de 80%, observa-se que a krigagem dos indicadores resultou em um mapa com continuidade suave e gradualmente conectado, formando uma representação mais contínua e gradual, enquanto a SSI produziu um mapa com uma distribuição mais pontual e concentrada para os mesmos parâmetros. Esse fato comprova a competência da técnica em lidar com valores extremos. Como temos o valor de densidade para o Itabirito Brando Silicoso (IBS) e o tamanho dos blocos (valor do grid com dimensões de 12,5 m x 12,5 m x 10 m), podemos calcular a massa para os cenários de simulação e krigagem.

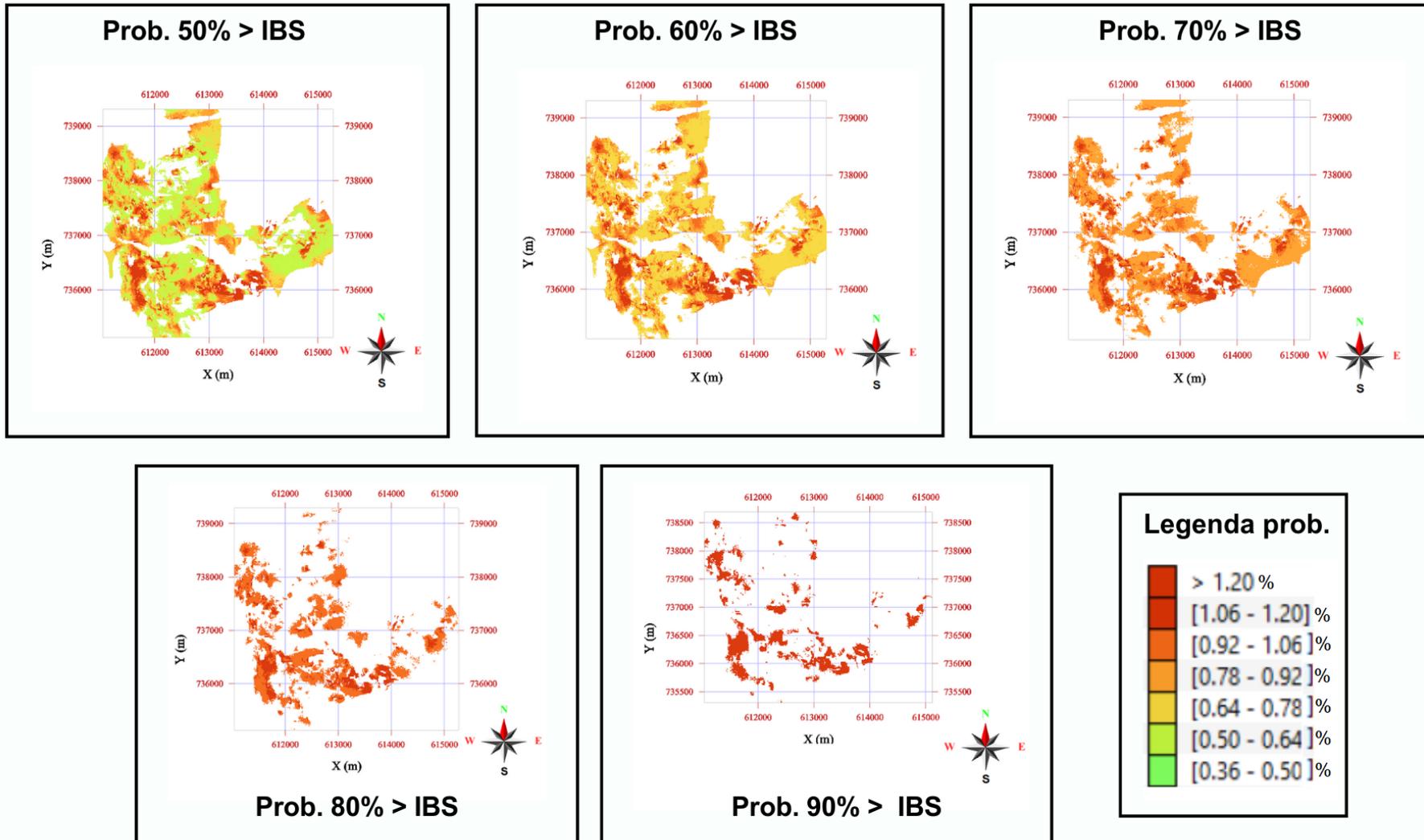


Figura 20: Mapas das distribuições de probabilidade obtidas pela SIS para: 50%, 60%, 70%, 80% e 90% de IBS.

Através do Isatis, temos acesso à quantidade de blocos que foram simulados e krigados. Isto nos possibilita gerar histogramas com as massas, utilizando a fórmula da densidade (definida como a massa dividida pelo volume), para as proporções que desejamos verificar, como ilustrado nas figuras 21 e 22. Pelos histogramas confeccionados, foi possível observar de maneira mais nítida que temos um maior número de blocos simulados do que krigados quando os valores são altos como 80 e 90%, o que vai ao encontro do princípio da krigagem, o qual nos revela resultados mais suaves.

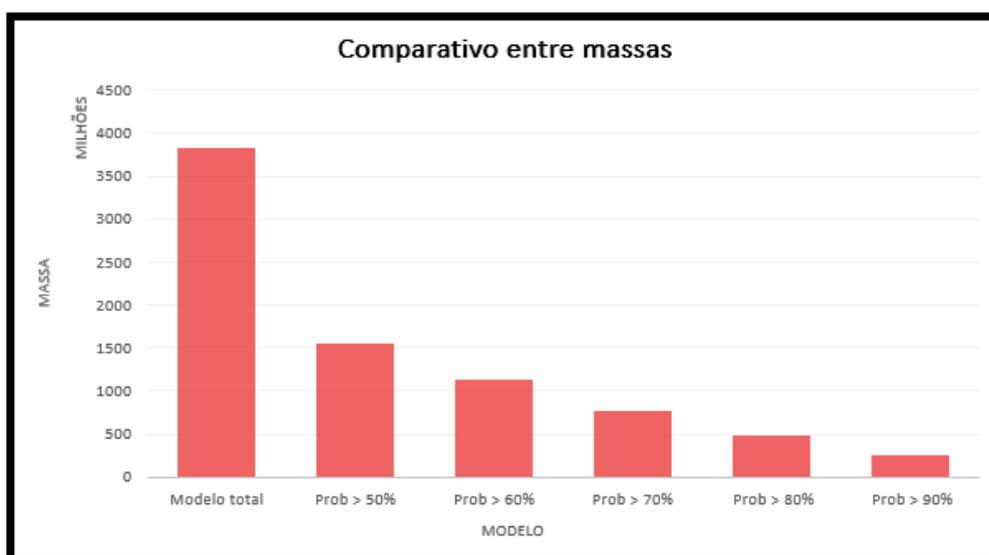


Figura 21: Histograma do comparativo entre massas das simulações.

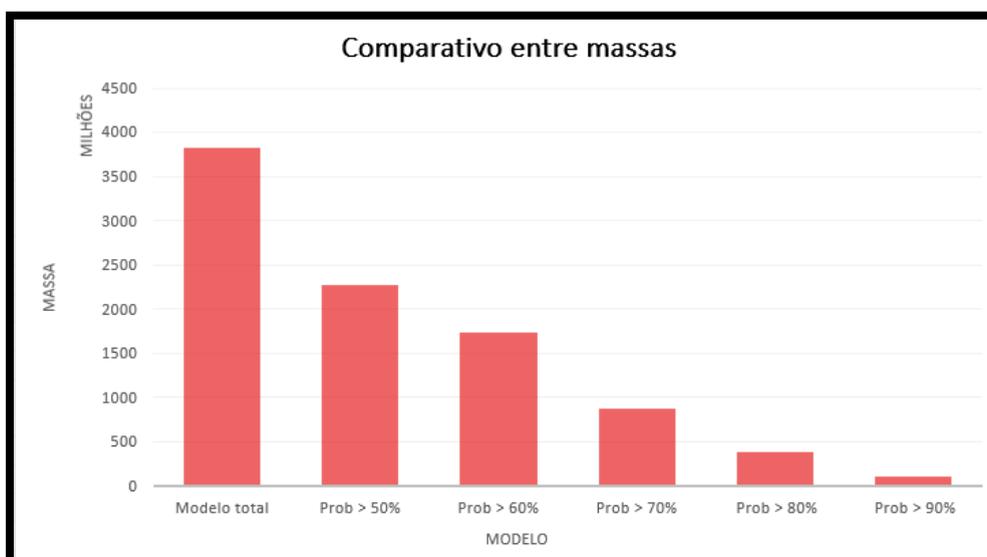


Figura 22: Histograma do comparativo entre massas da krigagem.

8. CONCLUSÃO

A modelagem tem se tornado uma importante ferramenta no entendimento de fenômenos geológicos, sendo aplicada por meio de *softwares* em diversas áreas como na indústria mineral, de gás e petróleo, recursos hídricos, entre outras. A modelagem geológica é um processo complexo dentro do ciclo de mineração, que envolve a interpretação de depósitos minerais, principalmente a partir de dados geoquímicos e geofísicos. No entanto, técnicas manuais e tradicionalmente utilizadas, como a de seções paralelas, podem resultar em baixa aderência entre os dados reais e os estimados pelos geomodeladores, mesmo quando combinadas com métodos de seções verticais. Diante dessa premissa, torna-se essencial implementar técnicas de validação e verificação da aderência dos resultados aos dados originais. Essas técnicas garantem a confiabilidade dos resultados e são especialmente importantes nos setores de avaliação de recursos minerais de um projeto.

Essas práticas podem contribuir para aumentar a precisão e a confiabilidade dos resultados, permitindo uma melhor compreensão espacial do depósito e auxiliando na tomada de decisões. Este trabalho propôs testar duas metodologias para avaliação do depósito, com foco nas análises de incertezas. Entre elas, temos a técnica de Krigagem dos indicadores, que é uma das mais simples de ser realizada e gera modelos mais suavizados. Esse modelo mostrou-se adequado para a verificação dos modelos interpretados pelo geomodelador. Alternativamente, como lidamos com um contexto geológico com baixa densidade de informações, é extremamente importante quantificar as incertezas associadas ao fenômeno.

Dentro da geoestatística, quantificações de incertezas são realizadas por meio de técnicas de simulações. Dadas as características do fenômeno analisado e o tipo de depósito, utilizamos o SIS, que emprega uma abordagem probabilística associada a uma probabilidade estocástica. Com o resultado dessas simulações, foi possível analisar regiões de alta e baixa incerteza em relação à definição dos domínios, e esses resultados podem ser comparados ao modelo original. Problemas na etapa de modelagem podem levar ao entendimento equivocado do fenômeno em questão. Isso foi apontado nesse estudo, no qual verificou-se uma superestimativa do litotipo conhecido como IBS, conseqüentemente subestimativa dos demais litotipos.

Em uma análise mais detalhada, a partir de seções comparando os resultados das simulações com os dados da modelagem original, constatou-se uma elevada diluição interna, ou seja, a mistura de domínios dentro do corpo conhecido como IBS (Itabirito Brando Silicoso) nesse trabalho. Essa elevada diluição pode acarretar sérios problemas nas etapas posteriores do ciclo de mineração, tanto na redução dos teores médios quanto na mistura de mineralogias de domínios diferentes, dificultando ou até mesmo impossibilitando o posterior tratamento do minério e resultando em perdas financeiras para o empreendimento. Portanto, a aplicação dessas técnicas de verificação e análise de incertezas é crucial para aumentar a precisão e confiabilidade dos resultados, permitindo uma melhor compreensão espacial do depósito e auxiliando na tomada de decisões sobre a utilização dos recursos minerais presentes.

REFERÊNCIAS

- Alabert, F. (1987). Stochastic Imaging of Spatial Distributions Using Hard and Soft Information. Thesis - Stanford University, Stanford, California, 1987. 197p.
- Almeida, T. (2011). A Perfilagem geofísica gama-gama em depósitos de ferro do Quadrilátero Ferrífero – Uma ferramenta para medições de densidade de rochas. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 181p.
- Amorim, L.Q. & Alkmim F.F. (2011). New ore types from the Cauê banded iron-formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil - Responses to the growing demand. Iron ore conference. Perth, WA, 1-14.
- Armstrong, M. (1999). Basic Linear Geostatistics. Berlin: Springer, 153p
- Azevedo, U. R.; Machado, M. M. M (2013). Patrimônio geológico e minério do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - Caracterização e iniciativas de uso para Educação e Geoturismo. Boletim Paranaense de Geociências. Dezembro 2013. 18f.
- Baltazar. O. F.; Pedreira. A. J. (2000). Associações litofaciológicas. In: CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Projeto Rio das Velhas: texto explicativo do mapa geológico integrado, escala 1:100.000. Belo Horizonte: Ministério de Minas e Energia; Secretaria de Minas e Metalurgia. p.43-48.
- Biondi, J. C. (2003). Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Biondi, J. C (2015). Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros. 2. ed. rev. e atual. São Paulo: Oficina de Textos.
- Braga. S. A. (2015). Krigagem dos Indicadores Aplicada a Modelagem das Tipologias de Minério de Fosfato na Mina F4. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 134p.
- Câmara, T. R, (2013) Sistematização do cálculo de diluição e perdas operacionais para reconciliação de teores e massas em lavras a céu aberto. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 89 p.

- Cananéia, H. L.M. (2019) Comparação das incertezas entre dois métodos de modelamento geológico: Krigagem Indicadora e Simulação Indicadora. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia de Minas, Universidade Federal de Goiás, Catalão – GO, 72p.
- Chemale Jr. F.; Rosière C. A. (2000). Itabiritos e minério de ferro de alto teor do quadrilátero ferrífero – Uma visão geral e discussão. 17f. *genomos* – v.8 n.2.
- Chemale Jr, F.; Takehara, L. (2013). *Minério de ferro: geologia e geometalurgica*. Editora Blucher.
- Chiles, J.P; Delfiner, P. (1999). *Geoestatics: modeling spatial uncertainty*. Wiles series in probability and statistics. Applied probability and statistics section, Nova York, Wiley, 95p.
- Crawford, G. D. (2004). Dilution and Ore Recovery. *Pincock Perspectives*. Inssue nº 60, 2004, 40.
- Deutsch, C.V. & Journek, A.G. (1998) *Geostatistical Software Library and user's guide*. 2.ed. New York, Oxford University Press, 369p
- Dimitrakopoulos. R. (1998). Conditional simulation algorithms for modelling orebody uncertainty in open pit optimization. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. v. 12. n. 4. p. 173-179.
- DNPM (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL). *Anuário Mineral Brasileiro principais substâncias metálicas*. Brasília, 2022. 35p.
- Dorr, J. V. N. (1969). Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *U. S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 641-A: 110p.
- Dymek, R. F.; Klein, C. (1988). Chemistry, petrology and origin of iron formations lithologies from 3800 Ma Isua supracrustal belt, west Greenland.
- Goovaerts, P. (1997) *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York, 483p.
- Gross, G. A. (1965). Geology of Iron deposits of Canada, V. In: *General Geology and Evaluation of Iron Deposits*. Geological Survey of Canada Economic Geology Report, 22, 181p.

- Hagemann, S. G.; Angerer, T.; Duuring, P.; Rosière, C. A.; Figueiredo e Silva, R. C.; Lobato, L.; Hensler, A. S.; Walde, D. H. G. (2015). BIF-hosted iron mineral system: A review. *Ore Geology Reviews*, 76: 317-359.
- Journel, A.G. (1983). Non parametric estimation of spatial distributions. *Journal of International Association for Mathematical Geology*, v.15, n.3, p. 445-468.
- Journel, A.G.; Alabert, F. (1989) Non-Gaussian Data Expansion in the Earth Sciences. *Terra Nova*, v.1, n.2, p. 123-134, 1989.
- Klein, C. (2005). Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry and origin. *American Mineralogist*, v. 90, n. 10, p. 1473-1499.
- Koppe, V. C. (2009). Metodologia para comparar a eficiência de alternativas para disposição de amostras. 2009. 236 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Laznicka, P. (2006). Giant metallic deposits: future sources of industrial metals. New York: Springer, 736p.
- Machado, N., Noce, C. M., Ladeira, E. A. & Belo de Oliveira, O. A. (1992). U-Pb Geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, 104: 1221-1227.
- Machado, N. & Carneiro, M. A. (1992). U-Pb evidence of the late Archean tectono-thermal activity in the southern São Francisco shield, Brazil. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 29: 2341-2346.
- Matheron, G. (1963) Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, Littleton, v. 58, n. 8, p. 1246-1266.
- Matheron, G. (1971). The theory of regionalized variables and its applications. *Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau*, Paris, 211 p.
- Mel'nick Y, P. (1982). Precambrian banded iron formation. Physicochemical condition of formation Elsevier.

- Olea, R. A. (2012). *Geostatistics for engineers and earth scientists*. [S.l.: s.n.], 324 p.
- Oliveira, S.B., (2008) *Estudos geoestatísticos aplicados a um depósito magmático de Ni-Cu*. Dissertação de mestrado. Instituto de geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 93p.
- Ortiz, C. E. A. (2014). *Caracterização geometalúrgica e modelagem geoestatística da Mina de Brucutu – Quadrilátero Ferrífero (MG)*. 2014. 205 f. Tese Doutorado. Fundação Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- Pastim, H. A (2012). *Geoestatística de múltiplos pontos como ferramenta para a modelagem geológica de depósitos minerais*. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 87 p.
- Poveromo, J. J. (1999). *Ironmaking Volume Pittsburgh: The Association of Iron and Steel Engineers*, Steel Foundation, 547–550.
- Rolo, R.M. (2021) *Modelagem geológica e avaliação de incerteza em modelos geológicos usando funções distância assinaladas*. 2018. 130f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Rosière, C. A; Chemale Jr, F.; Guimarães M.L.V. (1993). *Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte I - estruturas e recristalização*. *Geonomos*.1(1):65-84.
- Rosière, C.A. *et al.*, (2001) *Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite*. *Journal of Structural Geology*, Amsterdam, volume 23, n. 9, p. 1429-1440, set. 2001.
- Rossi, M. E & Deutsch, C. V. (2013). *Mineral resource estimative*. 2013. 332p.
- Scoble, M. J. & Moss A. (1994). *Dilution in underground bulk mining: implications for production management*. Geological Society. London, Special Publications. Volume 79. p. 95-108.
- Sinclair, A.J.; Blackwell, G. H. (2004). *Applied Mineral Inventory Estimation*. Cambridge, Cambridge University Press. 1ª edição.
- Soares, A. A. (2020). *Caracterização e processamento de Itabirito Compacto Silicoso da Mina de Casa de Pedra*. 2020. 149f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Souza, F. S. (2007). *Uso de Métodos Geoestatísticos no Auxílio do Modelamento Geológico*. 2007. 172f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

Trendall, A. F. (2002). The significance of iron-formation in the Precambrian stratigraphic record. *Precambrian sedimentary environments: A modern approach to ancient depositional systems*, p. 33-66.

Walde D. H. G. (1986). *Geologia do Ferro*. In: Schobbenhaus C. & Coelho (eds.) *Principais Depósitos Minerais do Brasil: Ferro e Metais da Indústria do Aço – 2*, Brasília, C. E. S. DNPM-CVRD, p.