

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**ANDRÉIA DA SILVA POMPERMAYER**

**MODELAGEM GEOLÓGICA E PROJEÇÃO DE AVANÇO DE LAVRA A PARTIR  
DA COMPARAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE CÁLCULO DE PN PARA  
UMA MINA DE CALCÁRIO DOLOMÍTICO, EM CAÇAPAVA DO SUL - RS**

**Caçapava do Sul  
2025**

**ANDRÉIA DA SILVA POMPERMAYER**

**MODELAGEM GEOLÓGICA E PROJEÇÃO DE AVANÇO DE LAVRA A PARTIR  
DA COMPARAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE CÁLCULO DE PN PARA  
UMA MINA DE CALCÁRIO DOLOMÍTICO, EM CAÇAPAVA DO SUL – RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Luciana Arnt Abichequer

**Caçapava do Sul  
2025**

P788m Pompermayer, Andréia da Silva

Modelagem geológica e projeção de avanço de lavra a partir da comparação de diferentes métodos de cálculo de PN para uma mina de calcário dolomítico, em Caçapava do Sul - RS / Andréia da Silva

Pompermayer.

111 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2025.

"Orientação: Luciana Arnt Abichequer".

1. Modelagem geológica. 2. Mineração. 3. Calcário. I. Título.

**ANDREIA DA SILVA POMPERMAYER**

**MODELAGEM GEOLÓGICA E PROJEÇÃO DE AVANÇO DE LAVRA A PARTIR DA  
COMPARAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE CÁLCULO DE PN PARA UMA MINA DE  
CALCÁRIO DOLOMÍTICO, EM CAÇAPAVA DO SUL – RS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Geologia da  
Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do  
Título de Bacharel em Geologia.

Dissertação defendida e aprovada em: 12 de dezembro de 2025

Banca examinadora:

---

Profa. Dra. Luciana Arnt Abichequer (Orientadora)  
unipampa

---

Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza  
unipampa

---

Eng. de Minas Paulo Sérgio Oberto

---



Assinado eletronicamente por **LUCIANA ARNT ABICHEQUER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/12/2025, às 11:30, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **Paulo Sergio Oberto, Usuário Externo**, em 24/12/2025, às 16:48, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/12/2025, às 21:05, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1938035** e o código CRC **CC934722**.

---

## **AGRADECIMENTO**

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, que me guia, me protege e me abençoa em todos os meus passos, e a Nossa Senhora que está sempre ao meu lado.

Agradeço aos meus pais e ao meu irmão que mesmo de longe sempre me apoiam em minhas conquistas, e torcem pelo meu sucesso.

E aqui vai o meu agradecimento especial ao meu companheiro de vida, ao meu marido Norton que sempre esteve ao meu lado em momentos bons e ruins, que me incentiva a crescer pessoal e profissionalmente, que me anima em momentos em que queria desistir. Se hoje estou finalizando o curso de Geologia, e me tornando uma profissional ainda mais qualificada, é graças ao seu apoio. Ainda trabalharemos muito juntos, e cresceremos ainda mais. Te amo!

Também, não menos importante gostaria de agradecer a Profa. Luciana. Uma professora que sempre acreditou em mim e no meu potencial, até às vezes mais do que eu mesma, e topou orientar uma aluna da geologia que decidiu cursar algumas disciplinas da mineração, e se apaixonou. Obrigada por fazer parte da minha formação acadêmica, obrigada por sempre me fazer buscar por mais, obrigada por acreditar em mim e me mostrar quão maravilhoso é o mundo da mineração!

E por fim, gostaria de agradecer a empresa que me cedeu os dados, confiou no meu trabalho, e me abriu as portas em todos os seus setores. Muito obrigada!

“Na Natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”

Antoine-Laurent de Lavoisier.

## RESUMO

A exploração de calcário dolomítico desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico de Caçapava do Sul, RS, destacando-se pela produção de corretivos agrícolas de alta qualidade. No entanto, por se tratar de um produto com baixo valor agregado, é essencial desenvolver métodos que otimizem o aproveitamento do depósito mineral e assegurem a qualidade do produto final. Nesse contexto, este trabalho buscou avaliar o impacto de diferentes métodos de obtenção e formas de cálculo do Poder de Neutralização (PN) no processo de avaliação do depósito e no planejamento do avanço de lavra de uma mina local. Para isso, foram utilizados dados de sondagens rotopneumáticas, análises laboratoriais e levantamento aerofotogramétrico para gerar modelos tridimensionais do corpo mineral. O PN foi determinado pelo método titulométrico, e o PN ácido, por meio de análises complexométricas com EDTA. Os teores de CaO e MgO também foram obtidos pelo método complexométrico EDTA e serviram de base para o cálculo de duas formas derivadas do PN: o PN calculado (pré-estimativa) e o PN (CaO+MgO) (pós-estimativa). Os modelos de blocos foram estimados pelo método do Inverso do Quadrado da Distância (IQD) e validados estatisticamente. Os resultados mostraram que as diferenças entre os métodos e formas de cálculo do PN foram pequenas, com variações inferiores a 1% nas médias e boa preservação dos padrões estatísticos e espaciais. A modelagem geológica explícita gerou um sólido coerente com a geometria observada nos dados de sondagem, permitindo a elaboração de modelos de blocos consistentes. As projeções do avanço de lavra apresentaram relações estéril/minério (REM) entre 0,329 e 0,331 m<sup>3</sup>/t, indicando que a escolha do método ou forma de cálculo do PN não altera de forma significativa a estimativa dos valores em locais não amostrados. Além disso, foram identificadas áreas com PN superior a 100%, especialmente ao sul da cava sul, apontando setores com potencial para a produção de cal e para ampliar o valor agregado do produto.

**Palavras-Chave:** Mineração, modelagem geológica, avanço de lavra.

## ABSTRACT

The extraction of dolomitic limestone plays a fundamental role in the economic development of Caçapava do Sul, RS, particularly due to the production of high-quality agricultural lime. However, as it is a product with low added value, it is essential to develop methods that optimize the use of the mineral deposit and ensure the quality of the final product. In this context, this study aimed to evaluate the impact of different methods of obtaining and calculating the Neutralization Power (PN) on deposit evaluation and on the pushback planning of a local mine. For this purpose, data from rotary-percussion drilling, laboratory analyses, and aerophotogrammetric surveying were integrated to generate three-dimensional models of the ore body. PN was determined through the titrimetric method, and the acidic PN by means of complexometric analyses with EDTA. CaO and MgO grades were also determined by the EDTA complexometric method and were used to calculate two derived forms of PN: the calculated PN (pre-estimation) and PN (CaO+MgO) (post-estimation). Block models were estimated using the Inverse Distance Squared (ID<sup>2</sup>) method and validated statistically. The results showed that differences among the methods and calculation approaches for PN were small, with variations of less than 1% in mean values and good preservation of statistical and spatial patterns. The explicit geological modeling generated a solid consistent with the geometry observed in the drilling data, allowing the development of coherent block models. The pushback projections resulted in waste-to-ore ratios (WOR) ranging from 0.329 to 0.331 m<sup>3</sup>/t, indicating that the choice of method or form for calculating PN does not significantly alter the estimation of values in unsampled locations. Additionally, areas with PN greater than 100% were identified, especially south of the southern pit, highlighting zones with potential for lime production and increasing product value.

**Keywords:** Mining, geological modeling, pushback.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das atividades propostas.....	25
Figura 2 - a) Modelagem geológica realizada através de modelagem explícita, b) Modelo de blocos gerado.....	35
Figura 3 - Mapa de localização da área de estudo.....	39
Figura 4 - Províncias geológicas do estado do Rio Grande do Sul.....	40
Figura 5 - Mapa geológico simplificado com as principais unidades geotectônicas do Escudo Sul-Rio-Grandense. ....	41
Figura 6 - Cava Norte com os taludes aparentes utilizados para descrição de litologias.....	44
Figura 7 - Cava Sul com os taludes aparentes utilizados para descrição de litologias. ....	45
Figura 8 - Mapa geológico contemplando a área de estudo. ....	46
Figura 9 - Aerofotos sobrepostas para posterior processamento no <i>software Agisoft Metashape</i> .....	47
Figura 10 - Ortofotomosaico gerado a partir da aerofotogrametria.....	48
Figura 11 - Sondagem rotopneumática para fins exploratórios e prospectivos da jazida. ....	49
Figura 12 - Locação espacial dos furos de sondagem. Os furos azuis foram classificados como positivos e os vermelhos, negativos.....	51
Figura 13 - MDT transformado em malha triangulada DTM para utilização no <i>software Micromine</i> . A seta vermelha indica a cava Norte e a seta azul indica a cava Sul. As setas amarelas indicam os locais de avanço, além do rebaixamento de ambas as cavas. ....	55
Figura 14 - Histograma dos furos – PN. ....	57
Figura 15 - Histograma dos furos - PN ácido.....	57
Figura 16 - Histograma dos furos – CaO. ....	58
Figura 17 - Histograma dos furos – MgO.....	58
Figura 18 - Histograma dos furos - PN calculado.....	59
Figura 19 - Furos de sondagem importados para o <i>software Micromine</i> .....	60
Figura 20 - Seções e <i>strings</i> traçadas através dos furos de sondagem. ....	61
Figura 21 - Modelo geológico, gerado através da modelagem explícita.....	61
Figura 22 - Modelo geológico recortado pela topografia. ....	62

Figura 23 - Modelo de blocos em branco. ....	63
Figura 24 - Modelo de blocos estimado através do PN. ....	65
Figura 25 - Modelo de blocos estimado através do PN ácido. ....	65
Figura 26 - Modelo de blocos estimado através do CaO. ....	66
Figura 27 - Modelo de blocos estimado através do MgO. ....	66
Figura 28 - Modelo de blocos estimado através do PN calculado. ....	67
Figura 29 - Modelo de blocos estimado através do PN (CaO+MgO). ....	67
Figura 30 - Histograma do modelo de blocos - PN. ....	71
Figura 31 - Histograma do modelo de blocos - PN ácido. ....	71
Figura 32 - Histograma do modelo de blocos - CaO. ....	72
Figura 33 - Histograma do modelo de blocos - MgO. ....	72
Figura 34 - Histograma do modelo de blocos - PN calculado. ....	73
Figura 35 - Histograma do modelo de blocos - PN (CaO+MgO). ....	73
Figura 36 - Gráfico de dispersão correlacionando os modelos de blocos - PN calculado x PN (CaO+MgO). ....	75
Figura 37 - Médias locais em X - PN. ....	81
Figura 38 - Médias locais em X - PN ácido. ....	82
Figura 39 - Médias locais em X - CaO. ....	82
Figura 40 - Médias locais em X - MgO. ....	83
Figura 41 - Médias locais em X - PN calculado. ....	83
Figura 42 - Médias locais em X - PN (CaO+MgO). ....	84
Figura 43 - Médias locais em Y - PN. ....	85
Figura 44 - Médias locais em Y - PN ácido. ....	85
Figura 45 - Médias locais em Y - CaO. ....	86
Figura 46 - Médias locais em Y - MgO. ....	86
Figura 47 - Médias locais em Y - PN calculado. ....	87
Figura 48 - Médias locais em Y - PN (CaO+MgO). ....	87
Figura 49 - Médias locais em Z - PN. ....	88
Figura 50 - Médias locais em Z - PN ácido. ....	89
Figura 51 - Médias locais em Z - CaO. ....	89
Figura 52 - Médias locais em Z - MgO. ....	90
Figura 53 - Médias locais em Z - PN calculado. ....	90
Figura 54 - Médias locais em Z - PN (CaO+MgO). ....	91

Figura 55 - Cava dinâmica em processo de construção, juntamente com o modelo de blocos e poligonal de extração (linha amarela). As linhas azul/lilás são as cristas dos taludes. As linhas em verde representam o pé dos taludes e em rosa os acessos projetados.....	92
Figura 56 - Cava projetada para o avanço da lavra. ....	93
Figura 57 - Avanço projetado juntamente com a topografia atual.....	93
Figura 58 - Sobreposição da poligonal de extração licenciada, para a cava projetada. ....	94
Figura 59 - Modelo de blocos recortado - PN.....	95
Figura 60 - Modelo de blocos recortado - PN ácido. ....	96
Figura 61 - Modelo de blocos recortado - PN calculado.....	97
Figura 62 - Modelo de blocos recortado - PN (CaO+MgO). ....	98
Figura 63 - Sólido da cava do avanço e topografia atual. ....	100
Figura 64 - Áreas para cal - PN. ....	103
Figura 65 - Áreas para cal - PN ácido.....	104
Figura 66 - Áreas para cal - PN calculado.....	104
Figura 67 - Áreas para cal - PN (CaO+MgO).....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade de neutralização dos diferentes constituintes neutralizantes em relação ao $\text{CaCO}_3$ .....	26
Tabela 2 - Valores do poder de neutralização (PN), soma dos óxidos (%CaO + %MgO) e PRNT para diferentes produtos. ....	30
Tabela 3 - Relação de furos de sondagem com as informações sobre furos positivos e negativos. ....	50
Tabela 4 - Sumário estatístico dos dados dos furos.....	56
Tabela 5 - Matriz de correlação linear das variáveis – furos. ....	60
Tabela 6 - Resultados de volumes, tonelagens e médias do modelo geológico. ....	62
Tabela 7 - Parâmetros utilizados para estimativa utilizando o método IQD.....	64
Tabela 8 - Volumes, massas e teores dos modelos de blocos. ....	68
Tabela 9 - Comparação entre o volume e tonelagem do modelo geológico e do modelo de blocos. ....	68
Tabela 10 - Comparação entre os teores do modelo geológico e do modelo de blocos. ....	69
Tabela 11 - Sumário estatístico das variáveis - modelos de blocos.....	69
Tabela 12 - Matriz de correlação linear das variáveis - modelos de blocos.....	74
Tabela 13 - Comparação das médias dos furos e dos modelos de blocos.....	76
Tabela 14 - Análise dos quartis - PN dos furos e do modelo de blocos.....	78
Tabela 15 - Análise dos quartis - PN ácido dos furos e do modelo de blocos. ....	78
Tabela 16 - Análise dos quartis - CaO dos furos e do modelo de blocos. ....	79
Tabela 17 - Análise dos quartis - MgO dos furos e do modelo de blocos.....	79
Tabela 18 - Análise dos quartis - PN calculado dos furos e do modelo de blocos. ...	79
Tabela 19 - Análise dos quartis - PN calculado dos furos e do modelo de blocos do PN (CaO+MgO).....	80
Tabela 20 - Parâmetros utilizados para design da cava operacional.....	92
Tabela 21 - Modelo de blocos recortado – volumes e médias. ....	99
Tabela 22 - Modelo de blocos recortado – volumes e médias para teores (PN) acima de 67 (%). ....	100
Tabela 23 - REM conforme variáveis > 67%. ....	102
Tabela 24 - Volumes e médias para teores (PN) maiores do que 100 (%). ....	102

## LISTA DE SIGLAS

Ca – Cálcio

CaO – Óxido de cálcio

CGCS - Complexo Granítico de Caçapava do Sul

CMPF - Complexo Metamórfico Passo Feio

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DJI – *Dà-Jiāng Innovations*

EDTA - ácido etilenodiaminotetracético

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDW - *Inverse Distance Weighting*

IQD - Inverso do Quadrado da Distância

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDT – Modelo Digital do Terreno

Mg – Magnésio

MgO – Óxido de magnésio

N – Norte

NE – Nordeste

NNW – Nor-Noroeste

NW – Noroeste

PN – Poder de Neutralização

PRNT - Poder Relativo de Neutralização Total

RBFs - *Radial Basis Functions* (Funções de Base Radial)

RE – Reatividade das partículas

REM – Relação Estéril/Minério

S – Sul

SE – Sudeste

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SSE – Sul-Sudeste

SW - Sudoeste

SW – Sudoeste

VANTS – Veículo Aéreo Não Tripulado

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
1.1 Justificativa.....	20
1.2 Caracterização do problema e hipóteses .....	21
1.3 Estado da arte.....	22
1.3.1 Aerofotogrametria para modelagem geológica .....	22
1.3.2 Modelagem geológica e planejamento de lavra .....	23
1.4 Objetivos .....	24
1.4.1 Objetivo geral .....	24
1.4.2 Objetivos específicos .....	24
1.5 Metodologia .....	24
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>26</b>
2.1 Poder de neutralização .....	26
2.1.1 Métodos de determinação do PN .....	27
2.1.1.1 Titulometria.....	27
2.1.1.2 Método complexométrico EDTA.....	27
2.1.2 Correlação do PN com o PRNT e padrões reguladores .....	29
2.2 Aerofotogrametria com veículos aéreos não tripulados (VANTs).....	30
2.3 Análise estatística .....	31
2.3.1 Análise estatística univariada.....	31
2.3.2 Análise estatística bivariada .....	32
2.4 Modelagem geológica.....	33
2.4.1 Modelagem geológica explícita e implícita .....	33
2.5 Modelo de blocos .....	34
2.5.1 IQD – Inverso do quadrado da distância .....	35
2.6 Validação do modelo de blocos .....	36
2.6.1 Análise das médias e quartis.....	36
2.6.2 Análise de deriva.....	36
2.7 Planejamento de lavra .....	37
2.7.1 Avanço de lavra.....	37
2.7.2 Relação estéril/minério (REM) .....	38
<b>3 ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>38</b>
3.1 Geologia .....	39

3.1.1 Geologia regional .....	39
3.1.1.1 Escudo Sul Rio-Grandense .....	40
3.1.1.2 Complexo Metamórfico Passo Feio .....	42
3.1.1.3 Complexo Granítico Caçapava do Sul .....	42
3.1.2 Geologia estrutural .....	43
3.1.3 Geologia local .....	44
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	47
4.1 Aerofotogrametria .....	47
4.2 Dados das sondagens .....	48
4.3 Poder de neutralização .....	52
4.4 Análise estatística univariada do banco de dados .....	53
4.5 Modelagem geológica .....	53
4.6 Método de estimativa e geração dos modelos de blocos .....	53
4.7 Validação dos modelos de blocos .....	54
4.8 Planejamento de lavra .....	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	54
5.1 Aerofotogrametria .....	54
5.2 Análise estatística do banco de dados .....	55
5.3 Modelagem geológica .....	60
5.4 Modelo de blocos .....	62
5.4.1 Modelo de blocos em branco .....	62
5.4.2 Modelo de blocos - IQD .....	64
5.4.2.1 Análise estatística dos modelos de blocos .....	69
5.5 Validação do modelo de blocos .....	76
5.5.1 Análise das médias e quartis .....	76
5.5.1.1 Análise das médias .....	76
5.5.1.2 Análise dos quartis .....	77
5.5.2 Análise de deriva (médias locais) .....	80
5.5.2.1 Análise das médias locais em X .....	80
5.5.2.2 Análise das médias locais em Y .....	84
5.5.2.3 Análise das médias locais em Z .....	88
5.6 Planejamento do avanço de lavra .....	91
5.6.1 Modelo de blocos recortado .....	94
5.7 REM – Relação estéril/minério .....	100

<b>5.7.1 REM de todo o avanço de lavra.....</b>	<b>101</b>
<b>5.7.2 REM conforme as variáveis de estudo para PN &gt;67%.....</b>	<b>101</b>
<b>5.8 Identificação de áreas para cal.....</b>	<b>102</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>105</b>
<b>6.1 Recomendações para trabalhos futuros.....</b>	<b>106</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>108</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A compreensão das características geológicas e estruturais de um corpo de minério, assim como a sua modelagem, é imprescindível para o melhor aproveitamento dos recursos e para a definição do plano de lavra, tanto para um projeto inicial, quanto para futuros avanços.

Inicialmente, ao se conhecer o tipo de depósito e definir as propriedades relativas a serem estudadas, é feito o inventário mineral. Um inventário mineral é uma avaliação sistemática das ocorrências minerais, que envolve a identificação, quantificação e estimativa da qualidade de um recurso em uma área específica (Sinclair & Blackwell, 2002). Esse processo é essencial para determinar a viabilidade econômica e técnica da extração mineral, uma vez que envolve uma pesquisa geológica, amostragens e métodos de estimativa para avaliar a quantidade e qualidade do minério presente, determinando a parcela que será considerada como recurso mineral em diferentes níveis de confiabilidade (Sinclair & Blackwell, 2002).

Segundo Rossi & Deutsch (2014), o processo para a modelagem e estimativa de recursos minerais envolve coleta e gestão de dados, interpretação geológica, atribuição de teores e a avaliação de incertezas geológicas. A modelagem propicia a visualização 3D do corpo de minério em relação às variáveis específicas do tipo de depósito mineral estudado.

As etapas citadas anteriormente são realizadas antes do início das atividades extrativas e são subsídios para um planejamento de lavra bem-sucedido. No entanto, é primordial que ao longo dos anos as informações referentes à jazida sejam atualizadas, assim como as tecnologias de lavra e beneficiamento, e as variações do mercado econômico que, conseqüentemente, influenciarão as etapas extrativas. Desta forma, o planejamento da lavra também precisa ser atualizado de forma concomitante ao avanço das operações. Todos os processos de inventário, modelagem e planejamento de lavra são dependentes das características das rochas encaixantes e do minério a ser comercializado.

Em um depósito de calcário, o principal parâmetro a ser avaliado é o Poder de Neutralização (PN), que indica a capacidade potencial total de bases neutralizantes contidas na rocha, e deve ser de no mínimo 67% para garantir a eficácia do produto quando aplicado ao seu propósito (Brasil, 2006).

Outra propriedade importante para atestar o poder de neutralização do produto oriundo da lavra de calcário, é o Poder Relativo de Neutralização Total

(PRNT). O PRNT é uma medida que avalia a eficiência dos calcários ao combinar seu Poder de Neutralização com a eficiência relativa das partículas de diferentes tamanhos, para atestar uma reação mais rápida e duradoura na atuação de correção do solo (Raij, 1977). Com isso, ao avaliar em conjunto os valores do PN, que é uma propriedade intrínseca da rocha, juntamente com o PRNT, que se utiliza da granulometria oriunda do processo de beneficiamento, as indústrias extrativas podem oferecer um produto de melhor qualidade ao mercado consumidor.

O Poder de Neutralização (PN) pode ser obtido através de diferentes metodologias, destacando-se entre elas, a titulometria e o método complexométrico EDTA que determina, tanto uma leitura direta do PN, como os valores dos componentes %CaO e %MgO para posterior inserção em uma equação que também indica o PN. A escolha do método analítico pode influenciar nos resultados obtidos, o que levanta questionamentos sobre a existência de diferenças significativas entre essas abordagens. Diante disso, o presente estudo tem como objetivo avaliar se há variações relevantes entre os resultados gerados por essas três formas de cálculo, utilizando como estudo de caso os dados encontrados em uma mina de Caçapava do Sul.

A mina deste estudo consiste em duas cavas a céu aberto de calcário dolomítico que atingiram o limite extrativo licenciado e inicia-se o processo de avanço de lavra. Com o intuito de planejar o referido avanço, se propõe a modelagem do prolongamento do corpo de minério, e se objetiva avaliar se há impacto gerado pelas diferentes formas de cálculo do PN para os modelos de blocos, e conseqüente projeção dos avanços, visando unificar ambas as cavas.

### **1.1 Justificativa**

Conhecida como a Capital Gaúcha do Calcário, Caçapava do Sul tem nas Caieiras seu principal distrito extrativo. Nessa localidade concentra-se a maioria das indústrias do setor que são as principais geradoras de empregos no município (Prefeitura de Caçapava do Sul, 2021). O município responde por mais de 85% da produção de calcário do Rio Grande do Sul, contando com mais de 200 milhões de toneladas de calcário dolomítico no subsolo, reconhecido por sua qualidade, que está entre as melhores do Estado (Rangel *et. al*, 2014).

Um dos setores que mais reúne trabalhadores de forma direta é o da extração e produção de calcário dolomítico (SEBRAE, 2022), no entanto, de forma indireta, a

ligação com tais empresas é ainda mais forte, levando a um sistema de dependência econômica do município, visto que as empresas do comércio, restaurantes, postos de combustíveis, setor imobiliário e arrecadação de impostos se utilizam do fornecimento de bens e mão de obra para as indústrias da região.

Devido à importância dessa atividade para o município, a busca pelo desenvolvimento de novas tecnologias e otimização dos processos, tanto na fase de prospecção, desenvolvimento mineiro, lavra até a fase de beneficiamento se faz necessária, e estudos voltados para melhor compreender as jazidas e determinar um avanço com o melhor aproveitamento econômico, podem auxiliar em uma maior vida útil das minas.

Atualmente, nas diversas empresas atuantes deste ramo, os planos de lavra são realizados de forma inicial, e não continuados ao longo da lavra, o que pode levar a um não aproveitamento da jazida de forma sustentável e lucrativa. Portanto, a aplicação e conhecimento dos PNs de todo o corpo de minério, ainda na etapa de modelagem, poderá subsidiar a empresa com informações para otimização das operações unitárias (desmonte, carregamento e transporte), incluindo também as etapas posteriores, como blendagem do material e o beneficiamento do minério.

## **1.2 Caracterização do problema e hipóteses**

O calcário é um recurso amplamente disponível no Brasil, com ocorrências registradas em praticamente todos os estados brasileiros. Essa ampla distribuição geográfica contribui para o baixo valor agregado do produto, visto que a abundância de jazidas reduz a exclusividade e a competitividade no mercado (Martins Jr, 2013). Assim, embora as ocorrências locais sejam de grande importância para o desenvolvimento econômico regional, elas não possuem a mesma relevância em termos nacionais.

Uma questão fundamental relacionada ao cálculo é a necessidade de minimizar a relação Estéril/Minério (REM), devido à baixa margem de lucro do produto. Nesse contexto, é essencial não apenas otimizar a REM, mas também reduzir ao máximo os custos em todas as etapas das operações de lavra. Isso não implica na ausência de investimentos, mas sim na aplicação criteriosa de recursos. Tal aplicação deve basear-se no conhecimento aprofundado da jazida, das operações envolvidas, dos custos associados e das tecnologias disponíveis, procurando sempre o melhor custo-benefício. Um planejamento de lavra detalhado

aliado a uma análise criteriosa dos métodos de aproveitamento do depósito pode contribuir significativamente para a eficiência e a sustentabilidade econômica durante toda a vida útil da mina.

No contexto do estudo, é relevante verificar se há diferenças significativas entre os métodos de cálculo do Poder de Neutralização, uma das propriedades intrínsecas da rocha calcárea. A identificação de diferenças significativas entre as diferentes metodologias de cálculo pode trazer luz ao problema, e entender qual o nível dessas diferenças.

Além disso, compreender as variações do PN do calcário pode abrir novas possibilidades de uso industrial, como a produção de cal, um subproduto de maior valor agregado. Através do mapeamento das áreas de maior potencial para essa produção, seria possível identificar oportunidades de diversificação econômica e aumento da competitividade do setor, agregando valor ao material gerado e promovendo o desenvolvimento sustentável das operações.

Essa abordagem, portanto, busca não apenas otimizar o aproveitamento do depósito de calcário, mas também explorar alternativas que contribuam para aumentar o valor agregado do produto e a relevância das operações locais no contexto nacional.

### **1.3 Estado da arte**

#### **1.3.1 Aerofotogrametria para modelagem geológica**

O uso da aerofotogrametria na elaboração de trabalhos científicos se tornou cada vez mais frequente devido à evolução tecnológica de veículos aéreos não tripulados – VANTs (comumente chamados de “drones”) e *softwares* que permitem gerar produtos digitais tridimensionais com maior facilidade e precisão.

Considerando a possibilidade de produção de materiais digitais 3D, o uso dessa tecnologia para modelagem geológica, modelos digitais de afloramento e uso na mineração, se tornou uma metodologia eficiente.

Estudo como os de Santos (2017), Pasetto (2018) e Goudinho (2021) evidenciaram a eficácia do uso da fotogrametria tanto para a modelagem geológica de corpos de mármore, como para identificação e extração de estruturas e lineamentos que podem auxiliar na modelagem do prolongamento da jazida e delimitação de falhas e estruturas no modelo. Nos trabalhos citados foram apresentados os modelos bidimensionais e tridimensionais gerados, assim como as

delimitações de estéril, minério e seus respectivos volumes, viabilizando um posterior planejamento de lavra para os avanços.

### **1.3.2 Modelagem geológica e planejamento de lavra**

Diversos autores utilizaram a modelagem geológica 3D como forma de delimitar o corpo de minério. Budke (2012) abordou a modelagem geológica juntamente com o método IQD para estimar teores de uma mina de Fosfato. No trabalho foi apresentada uma representação tridimensional do depósito, com validação estatística e visual que apresentou diferenças inferiores a 10% entre valores estimados e dados amostrais, demonstrando boa aderência entre o modelo e os furos de sondagem.

Já o trabalho de Freitas (2015), Pereira (2017), Faé (2021) e Silveira (2022) utilizaram o método de interpolação IQD para estimar continuações de jazidas de calcários. Freitas (2015) propôs o avanço da lavra na Mina Dom Feliciano, empregando modelagem geológica manual e interpolação pelo método IQD para estimar o Poder de Neutralização. Com base nos dados econômicos, gerou-se um modelo de blocos e uma cava ótima utilizando o algoritmo Lerchs-Grossmann, maximizando o valor presente líquido do projeto. A diferença entre os valores amostrais e estimados foi inferior a 10%, garantindo a precisão do modelo em seu trabalho.

Já Pereira (2017) propôs um plano para retomar e expandir uma cava de calcário, considerando a análise quantitativa e qualitativa do minério e volumes de estéril. Dados topográficos, geológicos e geoquímicos foram utilizados para modelagem tridimensional do depósito e cálculo de volumes, apresentando resultados eficientes para subsidiar decisões estratégicas da empresa, como a retirada ou não de uma pilha de estéril.

O estudo de Faé (2021) utilizou a modelagem geológica implícita e estimou o Poder de Neutralização através do uso do método IQD. O modelo geológico gerado no trabalho respeitou os contatos litológicos e demonstrou alta representatividade da área estudada. Já a validação da estimativa de PN apresentou uma diferença percentual global de apenas 0,39%, com valores locais predominantemente inferiores a 2%. O estudo classificou o calcário em três faixas de qualidade (A, B, C), representando 30,26%, 64,79% e 4,95% do total avaliado, respectivamente. O

trabalho evidenciou a eficiência do IQD e a capacidade de atualizações futuras do modelo, fornecendo uma base sólida para o planejamento mineiro.

E por fim, Silveira (2022) comparou duas metodologias de cálculo do poder relativo de neutralização total em uma mina de calcário, sendo uma baseada no poder de neutralização e outra nos teores de óxidos de cálcio e magnésio (CaO% e MgO%). Utilizando o método IQD para interpolação e geração de modelos de blocos, verificou-se que ambas as metodologias produziram resultados semelhantes em termos de volumes de calcário e valores de PRNT. Assim, concluiu-se que ambas as abordagens são viáveis e adequadas para o planejamento de lavra. O trabalho reforça a importância de métodos consistentes e comparativos para embasar decisões técnicas e econômicas na mineração.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo geral**

Dando continuidade na metodologia proposta no trabalho de Silveira (2022), o objetivo geral deste estudo é verificar se existem variações significativas entre as formas conhecidas para a obtenção do PN, para a projeção no avanço de lavra de uma mina de calcário dolomítico em Caçapava do Sul.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

Com o intuito de atingir o objetivo geral, apresentam-se a seguir os objetivos específicos:

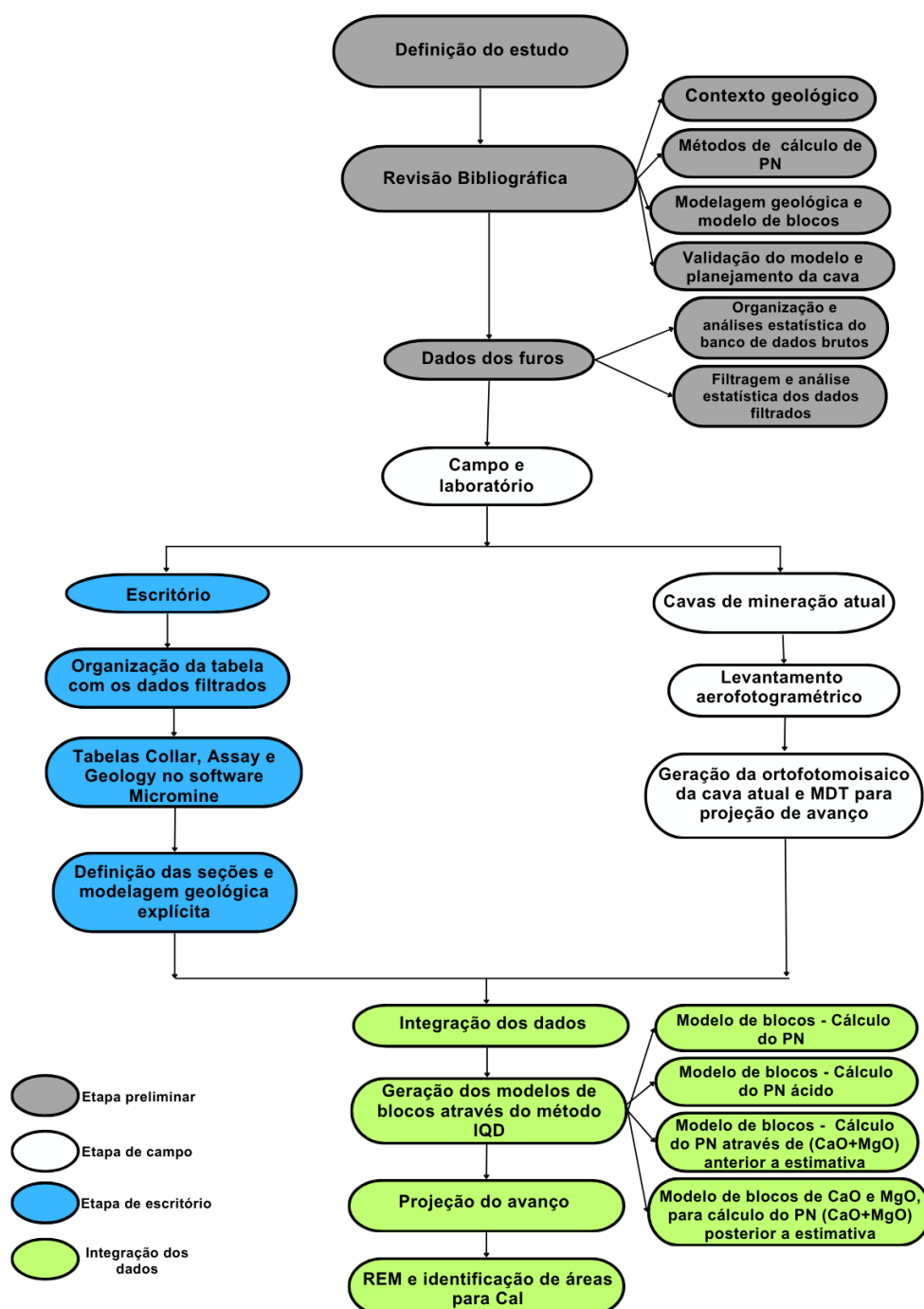
1. realizar análises químicas com resultados coerentes e consistentes;
2. obter um modelo geológico e de blocos do corpo de minério coerente com as litologias observadas nas frentes já lavradas e nos furos de sondagem;
3. projetar o avanço da lavra;
4. determinar corretamente a REM da cava com os quatro modelos de blocos dos PNs para determinar o melhor aproveitamento do avanço projetado para a jazida; e
5. identificar zonas de PN para cal.

## **1.5 Metodologia**

A seguir serão listadas as atividades desenvolvidas no decorrer deste trabalho de conclusão de curso, assim como o fluxograma das atividades (figura 1). Para a realização do estudo foram divididas as atividades em três etapas:

1. etapa preliminar - levantamento de dados presentes na bibliografia, análise de dados de base cartográfica e preparação de mapas;
2. etapa de campo/laboratório – organização dos dados de sondagens e análises químicas, reconhecimento da área e aerofotogrametria;
3. etapa pós-campo - os dados passaram por uma análise e processamento para a geração dos modelos geológicos, de blocos e projeção do avanço de lavra.

Figura 1 - Fluxograma das atividades propostas.



Fonte: autora.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Poder de neutralização

O poder de neutralização é um parâmetro essencial na avaliação da eficiência dos corretivos agrícolas, indicando a capacidade potencial de neutralizar a acidez do solo. Esse valor é expresso como uma porcentagem equivalente de carbonato de cálcio puro (%  $\text{ECaCO}_3$ ), que é considerado o padrão de referência para comparação entre diferentes materiais corretivos (Primavesi, A & Primavesi, O., 2004).

O PN reflete a quantidade de bases neutralizantes presentes em um corretivo agrícola, como carbonatos, óxidos, hidróxidos ou silicatos de cálcio e magnésio. Esses compostos atuam neutralizando o hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) presente no solo, um dos principais responsáveis pela sua acidez. A determinação do PN é crucial para selecionar materiais adequados ao manejo da fertilidade do solo e garantir a eficiência na aplicação de corretivos (Primavesi, A & Primavesi, O., 2004).

A capacidade de neutralização de um corretivo depende tanto do teor quanto da natureza química dos compostos neutralizantes que ele contém. Cada substância neutralizante possui uma eficiência específica, que é avaliada em comparação com a capacidade de neutralização do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

Tabela 1 - Capacidade de neutralização dos diferentes constituintes neutralizantes em relação ao  $\text{CaCO}_3$ .

Constituintes	Capacidade de neutralização relativa de $\text{CaCO}_3$ ( $\text{ECaCO}_3$ )
Carbonato de cálcio	1,00
Carbonato de magnésio	1,19
Hidróxido de cálcio	1,35
Hidróxido de magnésio	1,72
Óxido de cálcio	1,79
Óxido de magnésio	2,48
Silicato de cálcio	0,86
Silicato de magnésio	1,00

Fonte: retirado de Primavesi, A & Primavesi, O (2004).

Portanto, para o cálculo do PN por meio da composição química (determinados através do método complexométrico EDTA - ácido etilenodiaminotetracético), se utilizam os coeficientes apresentados na tabela 1, para que as capacidades de neutralização relativa dos óxidos estejam padronizadas.

### **2.1.1 Métodos de determinação do PN**

O PN pode ser aferido por diversos métodos de análise, que envolvem desde métodos mais elaborados como espectrometria de raios-X e análise térmica, a métodos mais simplificados como titulação e cálculo a partir da composição química (método complexométrico EDTA).

#### **2.1.1.1 Titulometria**

O método de cálculo por meio de titulação envolve a reação do corretivo com ácido clorídrico em excesso e a quente. Esse procedimento fornece uma estimativa do conteúdo neutralizante do material, que é expresso em termos de carbonato de cálcio equivalente. A seguir são listadas as etapas para análise por titulometria:

1. a amostra do corretivo é dissolvida em solução de HCl com concentração conhecida;
2. o ácido não neutralizado é titulado com uma solução padrão de hidróxido de sódio (NaOH) para determinar a quantidade consumida; e
3. o resultado é expresso em equivalente de carbonato de cálcio.

#### **2.1.1.2 Método complexométrico EDTA**

O método complexométrico EDTA é classicamente utilizado para determinar o valor do PN e os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no calcário, sendo precedido por etapas de preparação e filtragem da amostra. Inicialmente, pesa-se uma quantidade conhecida de calcário triturado e seco, e dissolve-se em excesso de ácido clorídrico (HCl) diluído, até a reação cessar, indicando a completa dissolução dos carbonatos. O desprendimento de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é visível na forma de bolhas. Após a reação, a solução é filtrada para remover impurezas e resíduos insolúveis, como silicatos, e então diluída para um volume conhecido (Alcarde & Hanasiro, 2016).

A partir dessa solução preparada, se tem a determinação do PN e posterior determinação do cálcio e magnésio que é realizada em duas etapas de titulação usando EDTA, que formam complexos estáveis com os íons metálicos. Primeiro, separa-se uma alíquota da solução para determinar o cálcio isoladamente. Para isso, adiciona-se hidróxido de sódio (NaOH) à amostra, o que precipita o magnésio como hidróxido de magnésio ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ). O cálcio restante na solução é titulado com

EDTA, utilizando o indicador Murexida, que muda de cor ao atingir o ponto final da titulação (Alcarde & Hanasiro, 2016).

Na segunda etapa, utiliza-se outra alíquota da solução sem a adição de NaOH para determinar o teor combinado de cálcio e magnésio. Nessa titulação, emprega-se o indicador Negro de eriocromo T, que sinaliza o ponto final. A concentração de magnésio é obtida subtraindo-se o teor de cálcio isolado do valor total (Ca + Mg) (Alcarde & Hanasiro, 2016).

O PN calculado pode ser determinado com base nos teores de óxido de cálcio (CaO%) e óxido de magnésio (MgO%) presentes no corretivo. A equação utilizada é:

$$PN(\%ECaCO_3) = (\%CaO \times 1,79) + (\%MgO \times 2,48) \quad (1)$$

Os coeficientes 1,79 e 2,48 correspondem às capacidades de neutralização relativa dos óxidos em relação ao carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), que é tomado como padrão.

Segundo Alcarde (2005) comparando-se o ECaCO<sub>3</sub> calculado, com o PN determinado pelo método químico, na grande maioria dos casos os resultados serão semelhantes, no entanto, em algumas situações o resultado do PN pode ser superior ao do calculado. Essa diferença é justificada pelo fato de que a determinação do PN quantifica toda a capacidade de neutralização do material frente ao ácido, enquanto a determinação subsequente de CaO e MgO, embora também seja realizada por complexometria, pode não captar completamente todo o cálcio e magnésio efetivamente reativos. Durante as etapas seletivas de titulação, parte do Ca ou Mg pode não ser totalmente solubilizada ou complexada, especialmente na presença de minerais menos reativos, o que leva à subestimação dos teores de CaO e MgO e, conseqüentemente, a um PN calculado menor.

Além dos carbonatos e óxidos de cálcio e magnésio presentes no mármore, o material pode conter fases minerais como silicatos, fosfatos, margas, xistos, quartzitos e minerais associados à rocha granítica intrusiva, que contribuem de maneira distinta na reação com ácido ou na complexação com EDTA. Tais minerais podem interferir seletivamente na determinação de CaO e MgO, reduzindo sua leitura, enquanto continuam contribuindo para o consumo de ácido no PN, resultando na divergência observada.

### 2.1.2 Correlação do PN com o PRNT e padrões reguladores

O Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) combina o PN com a reatividade das partículas do corretivo, indicando o percentual do material que reagirá no solo em um período de três meses (Alcarde, 2005).

Segundo Brasil (2006) o PRNT é calculado pela equação 2:

$$PRNT(\%) = \frac{(PN \times RE)}{100} \quad (2)$$

Onde:

PN é o Poder de Neutralização (PN), obtido conforme o método escolhido.

RE é a Reatividade das partículas, que é determinada com base nos seguintes critérios:

1. fração retida na peneira ABNT nº 10: reatividade igual a 0%;
2. fração que passa pela peneira ABNT nº 10 e é retida na peneira ABNT nº 20: reatividade de 20%;
3. fração que passa pela peneira ABNT nº 20 e é retida na peneira ABNT nº 50: reatividade de 60%; e
4. fração que passa pela peneira ABNT nº 50: reatividade de 100%.

A reatividade das partículas é diretamente ligada à natureza química do corretivo e ao tamanho de suas partículas, com bases fortes e partículas mais finas apresentando maior eficiência. A eficiência dos corretivos agrícolas depende da granulometria, uma vez que partículas menores aumentam o contato com o solo e aceleram sua reação. A reação do corretivo no solo também é influenciada por sua solubilidade limitada, pela umidade, pelo grau de mistura com o solo e pelas condições ambientais, como temperatura e acidez, sendo mais rápida em climas tropicais (Alcarde, 2005).

De acordo com a Instrução Normativa SDA Nº 35 da Secretaria da Defesa Agropecuária (Brasil, 2006), os corretivos devem apresentar os seguintes valores mínimos de PN e PRNT (tabela 2) para cada tipo de produto:

Tabela 2 - Valores do poder de neutralização (PN), soma dos óxidos (%CaO + %MgO) e PRNT para diferentes produtos.

MATERIAL CORRETIVO DE ACIDEZ	PN (%ECaCO <sub>3</sub> ) Mínimo	SOMA %CaO + %MgO Mínimo	PRNT Mínimo
Calcário agrícola	67	38	45
Calcário calcinado agrícola	80	43	54
Cal hidratada agrícola	94	50	90
Cal virgem agrícola	125	68	120
Parâmetros de referência para outros corretivos de acidez	67	38	45

Fonte: Brasil (2006).

## 2.2 Aerofotogrametria com veículos aéreos não tripulados (VANTs)

O levantamento aerofotogramétrico é um método amplamente utilizado para o mapeamento da superfície terrestre. Esse processo pode ser realizado por meio de voos conduzidos por aeronaves tripuladas ou não, dependendo da extensão e das características da área a ser mapeada. No caso de veículos não tripulados, são acopladas uma ou mais câmeras nos VANTs, também conhecidos como drones, que registram imagens da área de interesse (IBGE, 2024).

O método baseia-se na detecção e registro de radiação eletromagnética refletida ou emitida por objetos, empregando sistemas de coordenadas calibrados e processamento estereoscópico para gerar modelos tridimensionais. Sua importância está na eficiência em levantamentos, reduzindo o trabalho de campo e permitindo a coleta de dados de áreas extensas ou de difícil acesso. Com aplicações em engenharia, cartografia, monitoramento ambiental, agricultura de precisão e mineração, a fotogrametria gera produtos cartográficos como mapas, modelos digitais de elevação (MDE) e ortoimagens com alta precisão (Coelho Filho & Brito, 2007).

Neste trabalho o uso de drones foi necessário para a geração de um modelo digital de terreno (MDT) e curvas de nível para auxiliar na modelagem geológica e geração dos produtos finais.

## 2.3 Análise estatística

### 2.3.1 Análise estatística univariada

A validação do banco de dados inicia-se por uma análise estatística univariada que consiste em descrever a distribuição de uma característica através de uma única variável. A análise univariada permite fornecer resumos simples e úteis do banco de dados escolhido para estudo (Isaaks & Srivastava, 1989). A seguir, serão apresentadas as medidas de localização, de espalhamento e de forma, conforme as definições de Isaaks & Srivastava (1989).

#### 2.3.1.1 Medidas de localização

**Valor máximo:** o maior valor no conjunto de dados.

**Valor mínimo:** o menor valor no conjunto de dados.

**Mediana:** é o ponto médio dos valores observados se eles estão dispostos em ordem crescente. Metade dos valores está abaixo da mediana e metade dos valores estão acima da mediana. Tanto a média quanto a mediana são medidas da localização do centro da distribuição.

**Quantis:** quantis são pontos da distribuição que indicam a posição relativa de um valor dentro do conjunto de dados ordenados. Eles correspondem à fração acumulada de observações abaixo de um determinado valor.

**Quartis:** quartis são quantis que dividem os dados ordenados em quatro partes iguais. O quartil inferior (Q1) é o valor abaixo do qual se encontra 25% dos dados; o segundo quartil (Q2) corresponde à mediana, com 50% dos dados abaixo; e o quartil superior (Q3) marca o ponto onde 75% dos valores já foram acumulados.

**Média:** a média aritmética é uma medida de tendência central dos dados, a qual surge do resultado da soma dos números escolhidos, dividido pela quantidade dos números somados. A média é sensível a altos valores erráticos, o que influencia no valor final levando a erros importantes.

#### 2.3.1.2 Medidas de espalhamento

**Intervalo Interquartil (IQR):** corresponde à diferença entre o quartil superior (Q3) e o quartil inferior (Q1). O IQR não é afetado por valores extremos erráticos, como é o caso do desvio padrão e da variância. Se o IQR é alto, significa que a distribuição é mais dispersa; se o IQR é baixo, significa que a distribuição é menos dispersa.

**Variância:** é a diferença média quadrada dos valores observados. Como envolve diferenças ao quadrado, a variância é sensível a valores altos erráticos.

**Desvio padrão:** é a raiz quadrada da variância, e é mais utilizado em vez da variância, pois as suas unidades são as mesmas da variável que está sendo descrita. Tanto a variância como o desvio padrão, são medidas de espalhamento.

### 2.3.1.3 Medidas de forma

**Coeficiente de variação (CV):** o Coeficiente de Variação (CV) é definido como a divisão entre o desvio padrão e a média. O Coeficiente de Variação (CV) é definido como a divisão entre o desvio padrão e a média e, em geral, é utilizado como uma alternativa ao Coeficiente de Assimetria para descrever a forma da distribuição.

Um coeficiente de variação maior do que 1 indica a presença de valores de amostra altos e erráticos que podem ter um impacto significativo nas estimativas finais.

### 2.3.2 Análise estatística bivariada

A análise estatística bivariada envolve o uso de técnicas voltadas para avaliar a relação entre duas variáveis. Por meio dessas ferramentas, é possível verificar tanto a correlação quanto o padrão de distribuição conjunta, permitindo identificar informações relevantes que são compartilhadas entre elas.

Um dos elementos centrais dessa análise é o coeficiente de correlação, conhecido como Coeficiente de Pearson ( $\rho$ ). De forma geral, duas variáveis podem apresentar correlação positiva, negativa ou ausência de correlação. A correlação positiva ocorre quando valores altos de uma variável tendem a estar associados a valores altos da outra, e o mesmo comportamento se repete para valores baixos. A correlação negativa, por sua vez, se caracteriza quando valores altos de uma variável estão associados a valores baixos da outra. Já a ausência de correlação indica que a variação de uma variável não produz nenhum padrão claro ou efeito aparente sobre a outra (Isaaks & Srivastava, 1989).

O índice de correlação de Pearson apresenta valores entre +1 e -1, sendo +1 o índice de maior correlação positiva, e -1 o índice de maior correlação negativa. Para análise do coeficiente de Pearson ( $\rho$ ), são considerados os valores que apresentarem, no mínimo  $\rho > |0.6|$ , desde que a correlação seja também visível

graficamente. Valores nessa faixa, sejam positivos ou negativos, indicam uma correlação considerada aceitável.

## **2.4 Modelagem geológica**

A modelagem geológica é o processo de representar quantitativamente e visualmente características geológicas no espaço tridimensional, com o objetivo de compreender e prever a distribuição espacial de informações como litologia, mineralização ou estrutura. Essa representação é baseada em dados obtidos por sondagens, amostras de campo, mapeamento e dados geofísicos, sendo um componente essencial para tomadas de decisão em mineração, exploração de recursos e estudos ambientais (Cowan *et al.*, 2003).

Segundo Isaaks & Srivastava (1989), a modelagem geológica depende de ferramentas estatísticas e geoestatísticas para determinar a continuidade espacial dos corpos geológicos, assim como determinar as zonas de minério. As variáveis analisadas são processadas para estimar distribuições, médias e padrões que auxiliem na interpretação geológica. Além disso, a modelagem é customizada para atender problemas específicos, destacando a importância da escolha adequada do método analítico para cada contexto.

### **2.4.1 Modelagem geológica explícita e implícita**

Conforme discutido por Cowan *et al.* (2003), a modelagem geológica pode ser subdividida em métodos explícitos e implícitos.

Conforme Houlding (1994) e Cowan *et al.* (2003), o método explícito consiste na definição manual e direta de superfícies tridimensionais baseadas em dados, como sondagens e mapeamentos. Essa abordagem envolve a interpretação geológica para a construção de contornos em seções bidimensionais, que são posteriormente conectados para formar superfícies que delimitam os corpos geológicos. Embora Houlding (1994) não utilize o mesmo termo apresentado por Cowan *et al.* (2003), ambos descrevem o mesmo princípio de modelagem, no qual a geometria das unidades é definida por superfícies interpretadas diretamente pelo geólogo, com controle total sobre sua forma e continuidade.

Já o método implícito se utiliza de funções volumétricas contínuas para modelar superfícies geológicas. Em vez de construir superfícies diretamente, este método cria uma função contínua que representa a distribuição espacial de dados geológicos. As superfícies são extraídas como isosuperfícies dessa função,

permitindo maior automação, reduzindo significativamente o tempo necessário para criar modelos geológicos complexos (Cowan *et al.*, 2003).

No entanto, por mais que haja automação nesse tipo de abordagem, em casos nos quais há poucos dados disponíveis, espaçamentos muito variados ou distribuição aleatória de furos de sondagem, o método explícito tende a ser mais recomendado. Nessas situações, a função volumétrica utilizada na modelagem implícita pode suavizar excessivamente as superfícies ou gerar contatos artificiais devido à forte dependência da interpolação. Estudos comparativos, como o de Carboni (2022), indicam que a vantagem da modelagem implícita diminui à medida que a densidade de dados reduz, reforçando que, em cenários de informação limitada, a interpretação direta do geólogo oferece maior controle sobre a geometria e resulta em modelos estruturalmente mais consistentes.

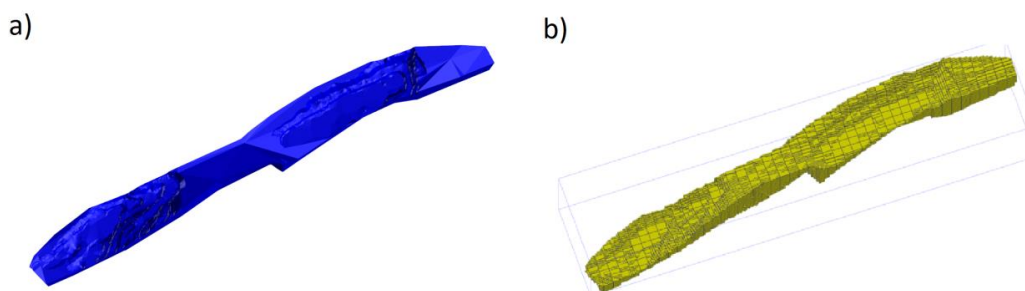
## **2.5 Modelo de blocos**

A representação do depósito mineral modelado em blocos é um elemento fundamental para estruturar dados geológicos e econômicos em modelos computacionais (figura 2). Johnson (1968) descreve que dividir o maciço em blocos individuais permite atribuir valores específicos a cada unidade, organizando informações de forma sistemática para análise e planejamento.

Com o avanço das ferramentas computacionais, o modelo de blocos passou a atuar também como base da modelagem geológica tridimensional. Conforme Houlding (1994), essa abordagem possibilita transformar dados pontuais de sondagens e mapeamentos em uma representação volumétrica contínua, facilitando a interpretação da geometria e da distribuição espacial dos atributos do depósito.

No contexto do planejamento mineiro, o modelo de blocos torna-se essencial para estimativas e avaliações econômicas. De acordo com Hustrulid; Kuchta; Martin (2013), a discretização do depósito em blocos regulares fornece a base para o cálculo de teores, toneladas e valores econômicos, além de sustentar métodos de estimativa como krigagem e IDW (*Inverse Distance Weighting*) e para a definição da cava ótima.

Figura 2 - a) Modelagem geológica realizada através de modelagem explícita, b) Modelo de blocos gerado.



Fonte: autora.

No entanto, a definição do tamanho do bloco deve ser compatível com a resolução dos dados disponíveis. Conforme David (1977) recomenda-se que suas dimensões não sejam menores do que 1/4 do espaçamento médio entre furos, evitando o aumento da incerteza na estimativa e custos computacionais adicionais sem ganhos reais na representação do depósito.

### 2.5.1 IQD – Inverso do quadrado da distância

Os métodos de interpolação para estimativa de uma ou mais variáveis são utilizados para avaliação de depósitos minerais, ou em caso de um avanço de lavra, de uma jazida mineral. Os métodos permitem estimar valores de variáveis em pontos não amostrados, utilizando informações obtidas em uma mesma área. O processo de estimativa estende-se por toda a vida útil da mina, visto que as informações sobre o corpo de minério são continuamente atualizadas.

O método do inverso da potência da distância (IDW - *Inverse Distance Weighting*) é um método de interpolação utilizado para estimar valores desconhecidos em um ponto baseado em valores conhecidos em pontos próximos. A premissa é que a influência de um ponto amostral diminui à medida que aumenta a distância do ponto de estimativa (Isaaks & Srivastava, 1989). A equação básica do método se dá conforme descrita na equação 3:

$$\hat{v} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{v_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^p}} \quad (3)$$

Onde:

$\hat{v}$  é o valor estimado no ponto de interesse;

$v_i$  são os valores conhecidos nos pontos amostrais;

$d_i$  é a distância entre o ponto a ser estimado e o ponto com valor conhecido;  
 $p$  é o expoente de potência que controla a influência da distância. Um valor maior de  $p$  reduz a influência de pontos mais distantes.

O método IQD (Inverso do Quadrado da Distância) é uma variação do método IDW onde a influência de cada ponto amostral é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o ponto conhecido e o ponto de interesse. Essa abordagem dá maior peso aos pontos mais próximos, reduzindo significativamente a influência dos mais distantes (Li & Heap, 2008).

## **2.6 Validação do modelo de blocos**

A validação do modelo de blocos é fundamental para verificar se as estimativas representam de forma consistente os dados amostrais e o comportamento geológico da área estudada. Essa etapa, por meio de diferentes métodos de comparação entre dados e estimativas, permite identificar possíveis vieses, ajustes inadequados ou efeitos de suavização que possam ter ocorrido durante o processo de interpolação.

### **2.6.1 Análise das médias e quartis**

Segundo Rubio (2018) a análise estatística básica constitui uma etapa inicial indispensável na caracterização de dados de teor, envolvendo o cálculo e interpretação de médias, quartis, histogramas e medidas de dispersão. Esses elementos são empregados para compreender a forma da distribuição, identificar assimetrias, caudas alongadas, valores extremos e padrões que influenciam diretamente na definição de domínios e a seleção de parâmetros para estimativas subsequentes.

Sinclair & Blackwell (2002) reforçam essa abordagem ao tratar médias, quartis e distribuições como instrumentos fundamentais na avaliação da natureza da mineralização, na identificação de limites naturais entre populações e na decisão sobre transformações ou segmentações necessárias.

### **2.6.2 Análise de deriva**

A análise de deriva é um procedimento de validação destinado a comparar a variação média dos dados amostrais e dos valores estimados ao longo de uma direção específica do modelo, geralmente X, Y ou Z. O método consiste em dividir o

depósito em intervalos equidistantes e calcular, para cada intervalo, as respectivas médias dos dados e das estimativas. Essa comparação permite avaliar a capacidade do modelo de reproduzir tendências espaciais reais, identificar suavização excessiva, reconhecer vieses sistemáticos e verificar se o comportamento global da mineralização foi preservado durante a interpolação (Rubio, 2018).

## **2.7 Planejamento de lavra**

O planejamento de uma mina envolve diversos fatores e etapas a serem seguidas até chegar ao momento da lavra propriamente dito. Desde o requerimento de pesquisa e prospecção da área, até o fechamento da mina, o planejamento e desenvolvimento das atividades precisam ser organizados para que a receita sobressaia aos custos de forma mais rápida possível. Em novas áreas, sem operações prévias, uma das etapas mais importantes desse processo é a definição dos limites da cava, pois essa decisão influencia diretamente a vida útil da mina e a lucratividade do empreendimento.

Por esse motivo, mesmo antes do início das atividades, os limites da cava precisam ser definidos para permitir a avaliação dos principais elementos do projeto: custos operacionais, quantidade de mão de obra necessária, tipos e número de equipamentos, planejamento do beneficiamento, posicionamento dos acessos, localização das pilhas de estéril, solo e minério temporário, além das restrições relacionadas ao licenciamento ambiental. Dessa forma, a definição desses limites pode ser realizada por meio da determinação da cava ótima, utilizando algoritmos de otimização, como o método do cone flutuante ou o algoritmo de Lerchs-Grossmann (Hustrulid, Kuchta e Martin, 2013).

### **2.7.1 Avanço de lavra**

Conforme apresentado no item anterior, o planejamento de lavra é imprescindível para o desenvolvimento de uma mina, especialmente quando se trata de uma operação que ainda não foi iniciada. Entretanto, para definir o avanço de lavra, é necessário considerar fatores que condicionam a progressão da cava.

Entre esses fatores, destacam-se a relação estéril/minério, os limites físicos e geotécnicos da cava, as restrições das poligonais licenciadas e os condicionantes ambientais, sociais e econômicos que influenciam tanto o ritmo quanto a direção do avanço. Hustrulid; Kuchta; Martin (2013) ressaltam que esses aspectos são

fundamentais para garantir que a sequência de lavra seja tecnicamente viável, segura e compatível com a continuidade operacional da mina.

### 2.7.2 Relação estéril/minério (REM)

A Relação Estéril/Minério (REM) é um dos principais indicadores econômicos no planejamento de lavra a céu aberto. Ela expressa a proporção entre o estéril que deve ser removido para cada unidade de minério recuperado. A REM pode ser expressa conforme descrito na equação 4:

$$REM = \frac{\text{Estéril}(m^3 \text{ ou } t)}{\text{Minério}(t \text{ ou } m^3)} \quad (4)$$

Segundo Hustrulid; Kuchta; Martin (2013) a relação estéril/minério pode ser expressa em massa, volume ou outras unidades geométricas, conforme a necessidade de projeto.

Uma REM menor indica maior aproveitamento econômico, enquanto valores elevados tendem a aumentar os custos operacionais e podem comprometer a viabilidade do empreendimento (Hustrulid; Kuchta; Martin, 2013).

No planejamento de curto e médio prazo, a REM é utilizada como uma das restrições operacionais, servindo para orientar o ritmo de remoção de estéril e a seleção das áreas prioritárias de lavra.

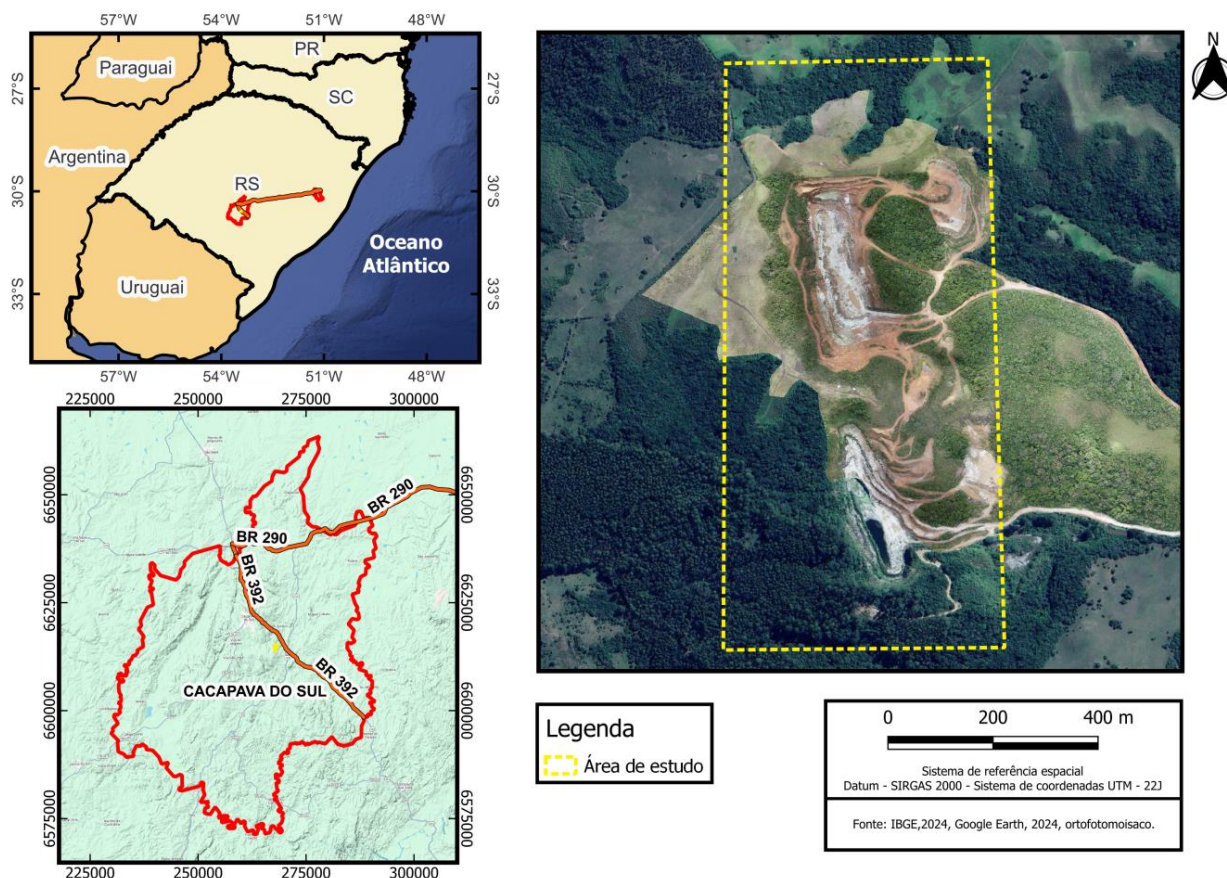
Para os casos de avanço de lavra, podem ser calculadas as REM por fases, ou o cálculo para todo o avanço. Neste trabalho, serão apresentados os cálculos de REM para todo o avanço projetado.

## 3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na região central do estado do Rio Grande do Sul, no município de Caçapava do Sul, mais especificamente na localidade denominada como Caieiras.

O município de Caçapava do Sul fica localizado a aproximadamente 252 km da cidade de Porto Alegre e tem como acesso principal a BR-290, até o entroncamento com a BR-392, seguindo pelo sentido sul. Na região das Caieiras, onde se concentram as indústrias extrativas do município, encontra-se a área onde se pretende realizar a projeção do avanço de lavra, conforme observado na figura 3.

Figura 3 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: autora.

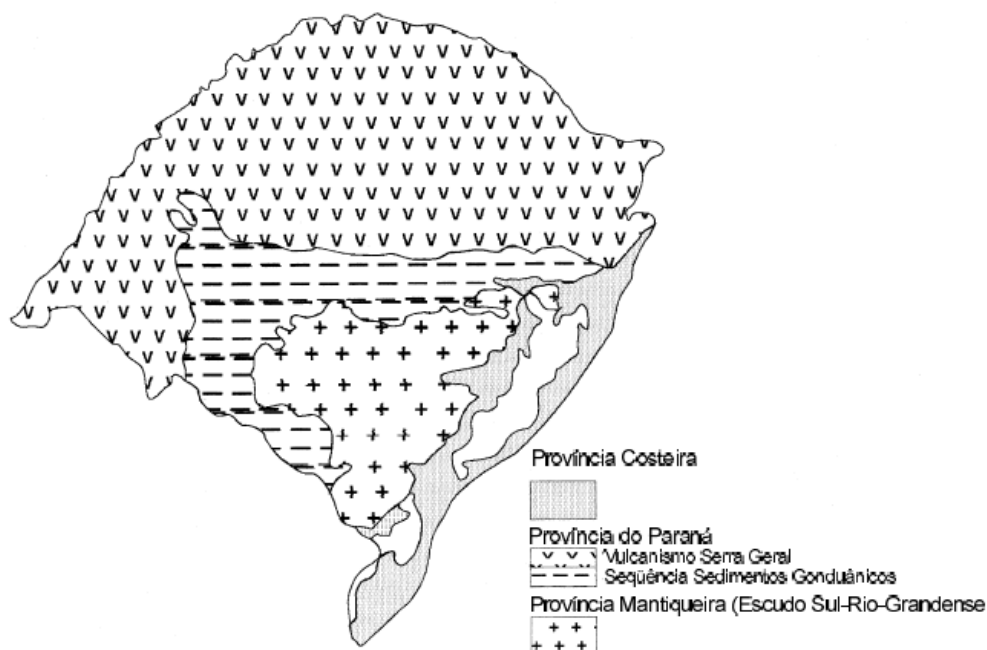
### 3.1 Geologia

#### 3.1.1 Geologia regional

A porção centro-norte do Escudo Sul Rio-Grandense está inserida no segmento sul da Província Mantiqueira (Almeida; Hasui; Brito Neves, 1976), que se limita a leste com a Província Costeira, composta por sedimentos cenozóicos, e a norte e oeste com a Província Paraná, que congrega formações sedimentares gonduânicas, conforme observado na figura 4 (Porcher *et al.*, 2000).

Distribuído em um complexo arranjo tectono-estratigráfico, o Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG) compreende uma associação de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares de diversas origens e evoluções. A segmentação desse escudo se deu devido ao controle por lineamentos regionais NE-SW e NW-SE (Porcher *et al.*, 2000).

Figura 4 - Províncias geológicas do estado do Rio Grande do Sul.



Fonte: retirado de CPRM, folha Cachoeira do Sul (2000).

### 3.1.1.1 Escudo Sul Rio-Grandense

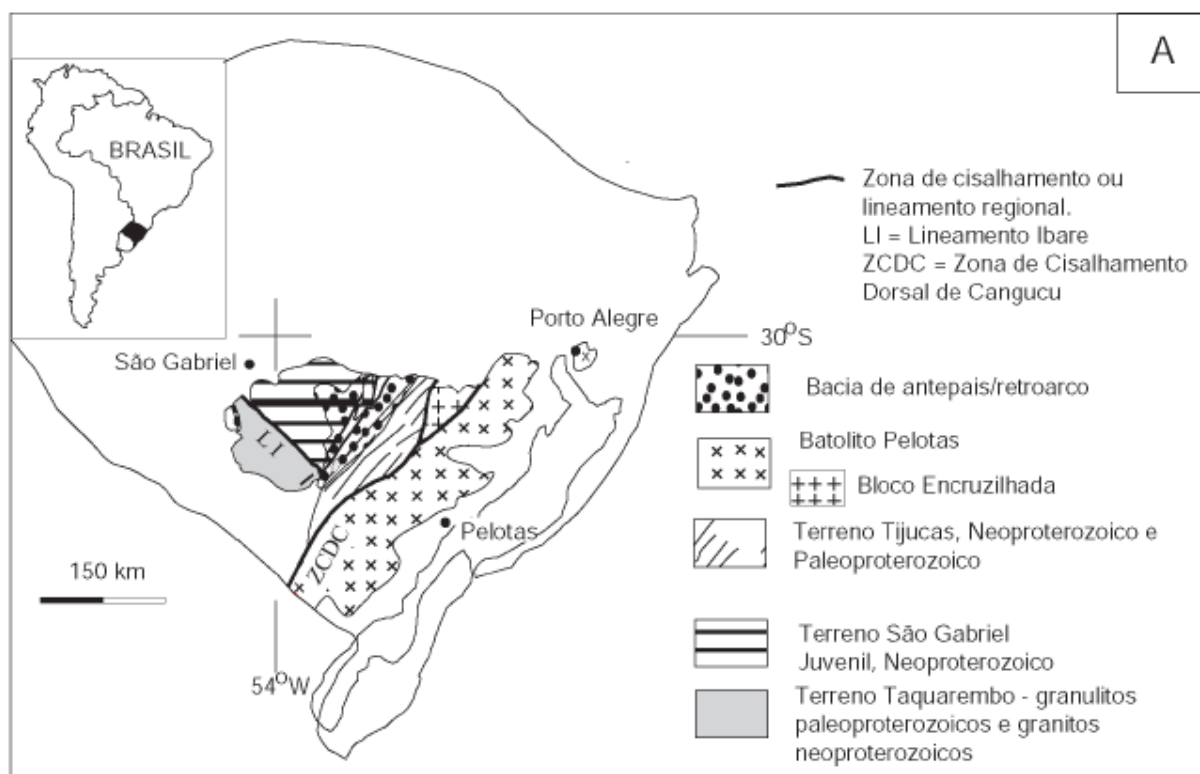
O escudo é formado por processos de criação e deformação da crosta continental, predominantemente associado a dois grandes eventos orogênicos: o Transamazônico (2,26–2,00 Ga) e o Brasileiro (900–535 Ma). Durante esses ciclos, ocorreram atividades como a extração de magmas e, possivelmente, de material sólido do manto, resultando na formação de crosta oceânica, composta por planícies basálticas, sedimentos abissais, platôs oceânicos e ilhas vulcânicas. Essas estruturas oceânicas e microcontinentes colidiram sucessivamente, contribuindo para a expansão da porção meridional do continente sul-americano (Hartmann; Chemale Jr; Philipp, 2007).

Embora os registros do anteparo arqueano de colisão do primeiro ciclo orogênico não estejam presentes no estado, os processos tectônicos do Neoproterozoico foram orientados por um continente antigo, cujos fragmentos remanescentes constituem o atual Cráton La Plata. Essa dinâmica permite dividir a análise geotectônica do estado em conjuntos de rochas inter-relacionados (Hartmann; Chemale Jr; Philipp, 2007).

Segundo Hartmann; Chemale Jr; Philipp (2007) o Escudo é descrito por três principais unidades: o Terreno São Gabriel, caracterizado por uma crosta juvenil

com idades-modelo Nd semelhantes as dos zircões ígneos; o Terreno Tijucas, composto por rochas metavulcânicas com idades-modelo Nd mais antigas do que as dos zircões ígneos; e o Batólito Pelotas, que apresenta um intenso retrabalhamento crustal, com idades-modelo Nd muito mais antigas em relação aos zircões ígneos. Essas unidades integram o Cinturão Dom Feliciano, cuja formação se deu durante o Neoproterozoico, refletindo uma evolução geotectônica relacionada às interações de placas tectônicas ao longo desse período. Fragmentos remanescentes do Cráton La Plata estão expostos na porção sudoeste e oeste do Rio Grande do Sul e são representados pelo Terreno Taquarembó (figura 5).

Figura 5 - Mapa geológico simplificado com as principais unidades geotectônicas do Escudo Sul-Rio-Grandense.



Fonte: Hartmann; Chemale Jr; Philipp (2007).

O Terreno São Gabriel, também nomeado como Cinturão Vila Nova por autores como Chemale Jr (2000) e Porcher *et al.* (2000), ocorre a Nordeste do Lineamento Ibaré, conforme observado na figura 5. O Terreno São Gabriel constitui-se em um prisma acrescionário formado durante o Neoproterozoico. Ele consiste em associações petrotectônicas de ambientes de margem passiva, retro-arco (*back-arc*), ofiolitos, arcos magmáticos vulcanossedimentares e plutônicos.

O Terreno São Gabriel é composto por rochas juvenis (1,3 – 0,6 Ga) (meso- a neoproterozóicas) que incluem rochas plutônicas, cálcico-alcálicas baixo a médio K de arco, como gnaisses cálcico-alcálicos, meta-dioritos, meta-tonalitos e meta-trondhjemitos (Complexo Cambaí) e também rochas metavulcânicas máficas e ultramáficas, intercaladas com xistos e paragneisses (Complexo Palma) e rochas vulcânicas andesíticas a dacíticas e tufos metamorfizados, representando a parte vulcânica principal do arco (Complexo Bossoroca), associadas (Hartmann; Chemale Jr; Philipp, 2007).

### **3.1.1.2 Complexo Metamórfico Passo Feio**

O Complexo Metamórfico Passo Feio (CMPF), descrito por Bitencourt (1983), também nomeado de Sequência Metamórfica Vacacaí por alguns autores como Chemale Jr; Hartmann; Silva (1995) e Porcher *et al.* (2000), está localizado na porção leste do Terreno São Gabriel e é formado por uma sequência espessa de rochas para- e ortometamórficas, apresentando uma disposição alongada N-S.

As litologias incluem xistos pelíticos, anfibolitos, filitos, mármore, rochas metavulcanoclásticas, quartzitos e rochas calcossilicatadas. Os mármore encontrados em corpos lenticulares são classificados como dolomíticos impuros, com dolomita como mineral principal (Bitencourt, 1983).

Este complexo apresenta dois eventos metamórficos (M1 e M2), relacionados a condições de fácies anfibolito e xisto verde, respectivamente, e três eventos deformacionais (D1, D2 e D3), que influenciaram sua estruturação tectônica. As características gerais sugerem um paleoambiente deposicional estuarino-transicional, com forte influência de sedimentos siliciclásticos (Bitencourt, 1983).

### **3.1.1.3 Complexo Granítico Caçapava do Sul**

O Complexo Granítico de Caçapava do Sul (CGCS) compreende um batólito com aproximadamente 250 km<sup>2</sup> de extensão aflorante, orientado na direção norte-sul e intrusivo em metamorfitos de baixo grau do Complexo Metamórfico Passo Feio (Nardi & Bitencourt, 1989). As rochas graníticas apresentam composições que variam de sienogranitos a granodioritos, com ocorrências raras de tonalitos.

Este batólito é composto por três fácies principais: biotita granitoides, predominantemente cinzas ou róseas quando intemperizados; leucogranitoides, que se destacam pela cor rósea e baixa quantidade de minerais máficos; e granitoides transicionais, com características intermediárias (Bitencourt, 1983). Os estudos

geoquímicos indicam afinidade cálcio-alcalina e ambiente de formação orogênico. A idade do CGCS é estimada em aproximadamente 562 Ma (Remus *et al.*, 2000), com evidências de caráter metaluminoso.

### 3.1.2 Geologia estrutural

Dois eventos metamórficos são reconhecidos para o CMPF, denominados M1 e M2 por Bitencourt (1983). No evento M1, as condições de pressão, temperatura e tempo atingiram a zona da estaurolita, enquanto o evento M2, retrogressivo, indica condições da zona da biotita. A quantificação das idades de tais eventos apresenta limitações e alto erro associado, no entanto, permite estabelecer vínculo temporal entre a intrusão do Complexo Granítico de Caçapava do Sul (562 Ma) com o evento M2. O primeiro evento mostra idade entre 710 e 670 Ma (Remus *et al.*, 2000).

Três eventos deformacionais são estabelecidos para o complexo, nomeados D1, D2 e D3 por Bitencourt (1983). O evento D1 está registrado apenas no Complexo Metamórfico Passo Feio e associado ao evento metamórfico de fácies anfíbolito (M1); o evento D2 está associado a um evento metamórfico de fácies xisto verde (M2), e D3 estão registrados tanto no CMPF como no CGCS.

**Evento D1** – corresponde ao primeiro evento reconhecido na região, com a geração de estruturas planares penetrativas S1 em porfiroblastos de hornblenda, actinolita e mais raramente diopsídio, rotacionais pré-cinemáticos em relação à foliação principal S2. Estruturas planares não penetrativas, como restos de charneiras de microdobras apertadas transpostas também marcam esta fase deformacional.

**Evento D2** – corresponde à principal fase de deformação, que afeta tanto as rochas do CMPF como as rochas do CGCS. No CMPF, a fase D2 caracteriza-se pela geração de estruturas planares penetrativas S2 transpondo a foliação pré-existente e reorientando seus porfiroblastos e matriz. Esta foliação é facilmente observável em todas as rochas do CMPF e é caracterizada principalmente pelo alinhamento de minerais filossilicáticos, e acompanhada por uma lineação de estiramento.

**Evento D3** – pode ser visto como um dobramento tardio, F3, da foliação S2 das rochas do CMPF, com dobras megascópicas suaves e abertas, visíveis a nível de afloramento, com eixo orientado no sentido NNE, e planos axiais com baixo

caimento. O comportamento mais frágil pode ser visto em deslizamentos flexurais e sem desenvolvimento de metamorfismo aparente.

Portanto, conforme Bitencourt (1983), a fase D3 foi responsável pela formação da estrutura antiformal regional, cujo núcleo é ocupado pelo Granito Caçapava.

### 3.1.3 Geologia local

A área de estudo apresenta histórico de exploração de mármore em duas cavas alongadas na direção NNW-SSE, coincidentes com a geometria dos corpos carbonáticos.

A área é composta por duas cavas a céu aberto, uma localizada a Norte (figura 6), e outra a Sul da área de estudo, como é possível observar na figura 7. A geologia da área de estudo pode ser identificada inicialmente pela exposição dos taludes de rocha pertencentes a cava norte e cava sul.

Figura 6 - Cava Norte com os taludes aparentes utilizados para descrição de litologias.



Fonte: autora.

Figura 7 - Cava Sul com os taludes aparentes utilizados para descrição de litologias.

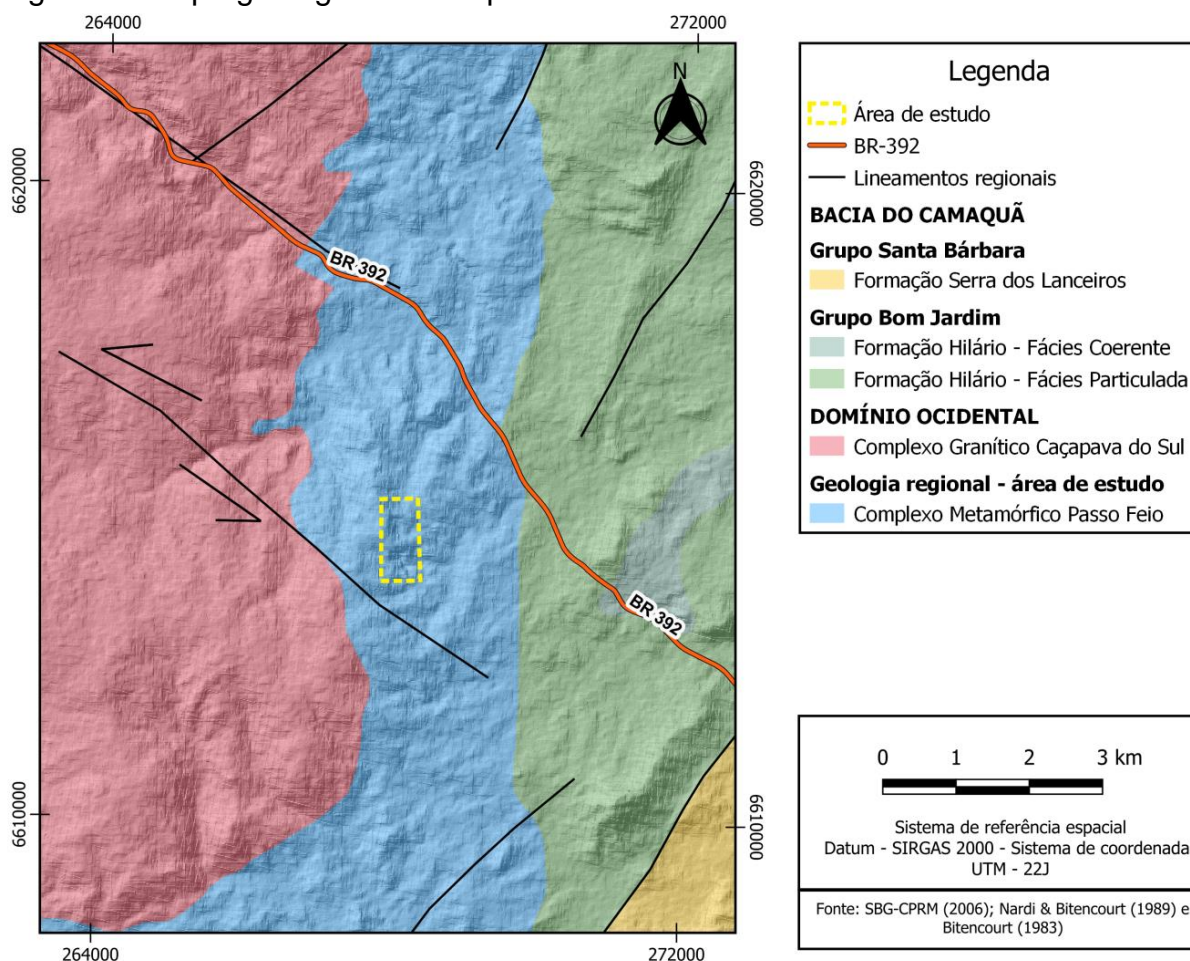


Fonte: autora.

Litologicamente, a área de estudo apresenta uma sequência metassedimentar química, composta por mármore, e clástica, representada por xistos e quartzitos, pertencentes ao CMPF (figura 8). Esses depósitos encontram-se intrudidos por corpos de composição majoritariamente granítica, acompanhados de forma subordinada por intrusões de natureza anfibolítica.

Em alguns taludes da cava norte, identificam-se mármore com coloração avermelhada, devido à presença de óxidos de ferro, além de rochas metassomáticas (escarnitos) formadas pela interação entre o metacalcário e as apófises graníticas intrusivas, que provocam um aumento no gradiente geotérmico local, resultando em transformações mineralógicas nas zonas de contato.

Figura 8 - Mapa geológico contemplando a área de estudo.



Fonte: autora, utilizando os dados de SBG-CPRM (2008) e definições de Nardi & Bitencourt (1969) e Bitencourt (1983).

Assim como observado em outras minas exploradas na região, o corpo mineral é composto por mármore dolomíticos que variam de branco a cinza claro, com tonalidades localizadas em róseo a avermelhado. Apresentam textura predominantemente granoblástica, de fina a média, com arranjo em mosaico e granulação variando entre 0,2 e 2,0 mm.

Também são encontrados mármore finos a microcristalinos, além de níveis siliciclásticos com textura lepidoblástica, intercalados às camadas carbonáticas mais espessas. Esses aspectos indicam uma ciclicidade nas condições deposicionais da bacia sedimentar Passo Feio. Os mármore são compostos predominantemente por carbonatos (dolomita e calcita), cuja distinção é dificultada quando analisados com lupa de mão.

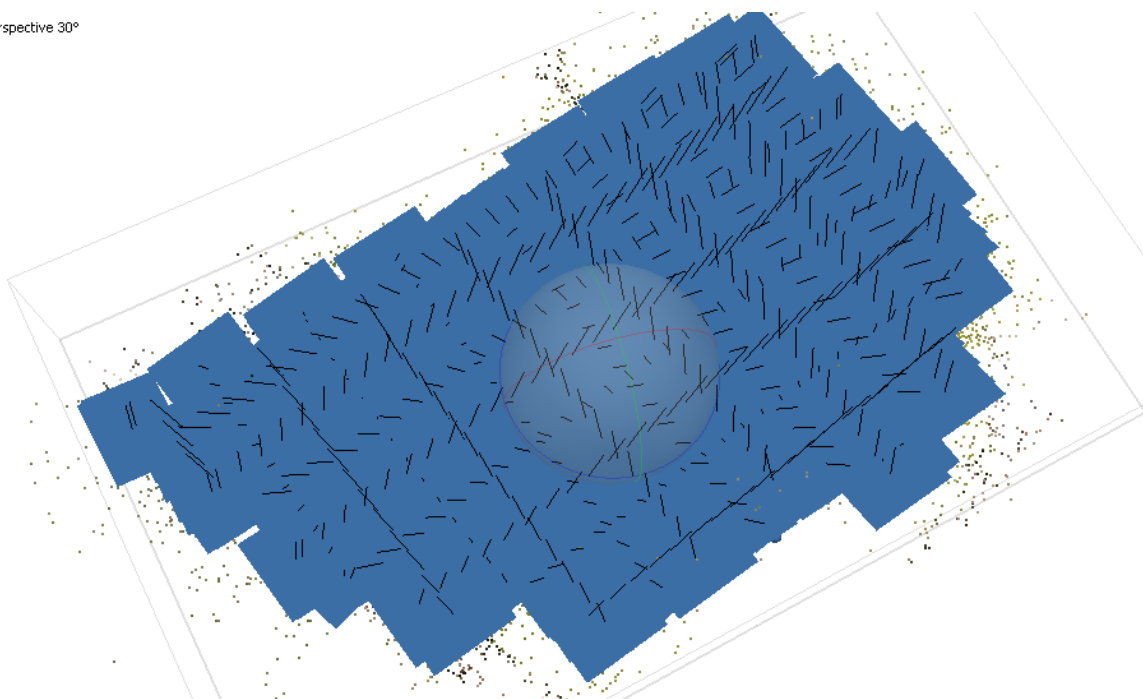
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Aerofotogrametria

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) são amplamente empregados como plataformas de sensoriamento remoto em diversas aplicações, como no ramo da mineração. Neste trabalho foi utilizado o modelo PHANTON 4 PRO da fabricante DJI, para realizar o levantamento aerofotogramétrico das duas cavas a céu aberto em operação. Foi realizado o processamento das imagens através do *software Agisoft Metashape* (figura 9), e gerado tanto o arquivo MDT como o ortofotomosaico para melhor visualização na base SIG da área de estudo, além dos limites visíveis do calcário, como é possível observar na figura 10.

Figura 9 - Aerofotos sobrepostas para posterior processamento no *software Agisoft Metashape*.

Perspective 30°



Fonte: autora.

Figura 10 - Ortofotomosaico gerado a partir da aerofotogrametria.



Fonte: autora.

#### **4.2 Dados das sondagens**

A área de estudo possui 25 furos de sondagem rotopneumática realizados em períodos distintos. Desses, 10 foram executados em 2010 para a determinação de locais de avanço que não chegaram a ocorrer, e os 15 restantes foram realizados em 2023, durante a campanha de sondagem mais recente da área (figura 11), com o objetivo de aprimorar o reconhecimento do prolongamento do corpo e de seus limites, visando à projeção do avanço com a unificação das cavas.

Figura 11 - Sondagem rotopneumática para fins exploratórios e prospectivos da jazida.



Fonte: autora.

As informações dos furos de sondagem, assim como os perfis descritivos das sondagens, foram disponibilizadas pela empresa e foram utilizados para a realização da modelagem geológica do corpo de minério. Na tabela 3, e na figura 12 apresentam-se as nomenclaturas dos furos, o comprimento e a cota, porém, informações como coordenadas e demais informações serão ocultados.

Os furos ditos como negativos são os que, ou não interceptaram o corpo de minério, ou os intervalos de minério eram muito pequenos, o que tornava a lavra desses locais inviável. Já os furos ditos como positivos, são os que interceptaram o corpo de minérios em limites viáveis para a lavra.

Como os furos foram realizados em períodos diferentes e com suportes amostrais distintos, foi realizada a composição através do comprimento das amostras de 5 m.

Tabela 3 - Relação de furos de sondagem com as informações sobre furos positivos e negativos.

FURO	COMPRIMENTO	COTA	POSITIVO/NEGATIVO
F-32-S	100	338	NEGATIVO
F-33-S	27	326	NEGATIVO
F-34-S	48	324	NEGATIVO
F-35-S	102	323	NEGATIVO
F-36-S	138	319	POSITIVO
F-37-S	40	318	NEGATIVO
F-38-S	84	342	NEGATIVO
F-40-S	120	316	POSITIVO
F-41-S	60	263	NEGATIVO
F-43-S	80	302	POSITIVO
F-47-S	102	321	NEGATIVO
F-48-S	110	309	POSITIVO
F-49-S	102	296	NEGATIVO
F-50-S	102	334	NEGATIVO
F-51-S	102	333	NEGATIVO
P-F-01	61,35	248	POSITIVO
P-F-02	28,15	214	POSITIVO
P-F-03	35,60	253	POSITIVO
P-F-04	65	296	POSITIVO
P-F-05	23,30	216	NEGATIVO
P-F-06	25,20	278	POSITIVO
P-F-07	74,80	277	POSITIVO
P-F-08	75	265	POSITIVO
P-F-09	40,25	272	POSITIVO
P-F-10	81,70	280	POSITIVO

Fonte: disponibilizado pela empresa.

Figura 12 - Localização espacial dos furos de sondagem. Os furos azuis foram classificados como positivos e os vermelhos, negativos.



Fonte: autora, com os dados disponibilizados pela empresa.

Para furos de sondagem em lavra de calcário, as principais variáveis correspondentes ao minério são o PN e os valores de CaO e MgO, todos em porcentagem. No entanto, a forma de cálculo e o método de análise do PN podem alterar de acordo com a empresa ou o laboratório de análise.

Como o objetivo deste estudo é avaliar justamente essas diferenças entre métodos de cálculo, foram considerados três tipos de PN, cada um calculado de

uma forma. Esses valores, juntamente com os teores isolados e estimados de CaO e MgO, onde o cálculo do PN se dá no modelo estimado, constituem as variáveis analisadas e correlacionadas aos furos de sondagem, apresentados na tabela 3.

Como forma de padronizar a terminologia ao longo deste trabalho, as variáveis analisadas serão referidas pela seguinte nomenclatura:

1. PN: Valores de PN obtidos por meio do método da titulação.
2. PN ácido: Valores de PN determinados pelo método complexométrico EDTA.
3. CaO: Valores de óxido de cálcio determinados pelo método complexométrico EDTA.
4. MgO: Valores de óxido de magnésio determinados pelo método complexométrico EDTA.
5. PN calculado: Valores de Poder de Neutralização obtidos pela aplicação da equação 1 diretamente sobre os teores de CaO e MgO analisados nas amostras dos furos de sondagem. Nesta variável, o cálculo é realizado exclusivamente com base nos dados dos furos.
6. PN (CaO+MgO): Valores de PN calculados pela equação 1, porém utilizando os teores de CaO e MgO provenientes dos modelos de blocos estimados. Nesse caso, o PN é derivado da geração e unificação dos modelos de blocos das variáveis CaO e MgO. Portanto, não é uma variável inicial dos dados dos furos, como as demais.

#### **4.3 Poder de neutralização**

O cálculo do Poder de Neutralização é uma etapa de grande relevância no trabalho, pois determina três das cinco variáveis analisadas neste estudo.

Foram utilizados três métodos de cálculo de PN, o método de titulação ácido/base (PN), o método complexométrico do EDTA direto (PN ácido) e o mesmo método para determinação da composição química (%CaO e %MgO), todos foram analisados no laboratório da própria empresa detentora da área.

Depois das análises, foram calculadas as variáveis PN calculado e PN (CaO+MgO). O PN calculado corresponde ao PN obtido pela aplicação da equação 1 diretamente sobre os teores de CaO e MgO dos furos de sondagem. Já o PN (CaO+MgO) é o PN gerado a partir dos teores de CaO e MgO dos modelos de blocos, ou seja, depois das estimativas. Dessa forma, o trabalho considera tanto os valores originais dos furos quanto aqueles obtidos após as estimativas.

#### **4.4 Análise estatística univariada do banco de dados**

A análise estatística univariada do banco de dados foi realizada utilizando os *softwares* Excel e *Micromine*. Para todas as variáveis foram gerados histogramas e um sumário estatístico contendo média, mediana, desvio padrão, quartis, coeficiente de variação e demais parâmetros descritivos. Também foram avaliados os valores mínimos e máximos para compará-los com os do modelo posteriormente.

#### **4.5 Modelagem geológica**

Neste estudo, foi empregada a modelagem geológica explícita no *software Micromine* para delimitar as superfícies superior e inferior do corpo de calcário. Essas superfícies foram posteriormente utilizadas para gerar o volume de minério a partir de uma malha triangulada. Além dos dados dos furos de sondagem, também foram considerados o ortofotomosaico da área e o conhecimento da geologia local, o que contribuiu para definir os limites do corpo mineralizado e garantir coerência na interpretação geológica.

#### **4.6 Método de estimativa e geração dos modelos de blocos**

Para a etapa de estimativa, utilizou-se o método do Inverso do Quadrado da Distância (IQD) como técnica de interpolação, aplicado para estimar os valores nas regiões onde não há amostragem direta dos furos de sondagem. Após a modelagem do prolongamento do corpo de minério, foram gerados seis modelos de blocos distintos, cada um representando uma das variáveis analisadas neste estudo:

1. modelo de blocos para PN, utilizando os valores obtidos através do método de titulação;
2. modelo de blocos para PN ácido, utilizando os valores determinados pelo método complexométrico EDTA;
3. modelo de blocos para CaO, utilizando os valores de óxido de cálcio obtidos pelo método complexométrico EDTA;
4. modelo de blocos para MgO, utilizando os valores de óxido de magnésio determinados pelo método complexométrico EDTA;
5. modelo de blocos para PN calculado, utilizando os valores obtidos a partir dos teores de CaO e MgO determinados pelo método complexométrico EDTA nos furos de sondagem (aplicação da equação 1);

6. modelo de blocos para PN (CaO+MgO), gerado a partir da equação 1, utilizando diretamente os modelos de blocos já estimados de CaO e MgO no *software Micromine*.

#### **4.7 Validação dos modelos de blocos**

A validação do modelo de blocos é uma etapa importante para avaliar o quanto à estimativa dos blocos se aproxima dos dados reais dos furos de sondagem, que são à base da estimativa.

Neste trabalho serão utilizadas duas abordagens principais: a validação pela análise das médias e quartis, comparando o banco de dados dos furos com os modelos estimados e a análise de deriva, que compara médias locais em X, Y e Z em intervalos iguais entre os valores dos furos e dos blocos, permitindo identificar possíveis suavizações e a manutenção ou não das tendências espaciais. As validações foram realizadas utilizando o Excel e o *software Micromine*, assim como as etapas anteriores e subsequentes.

#### **4.8 Planejamento de lavra**

Na fase de planejamento de lavra, assim como na etapa anterior, realizou-se a projeção do avanço a partir de duas cavas já existentes e em operação, com o objetivo de unificar as cavas, e para tanto, realizar comparativos entre os valores e médias de PN, volume de estéril, tonelagem de minério, e os cálculos de REM (Relação Estéril/Minério) da mina.

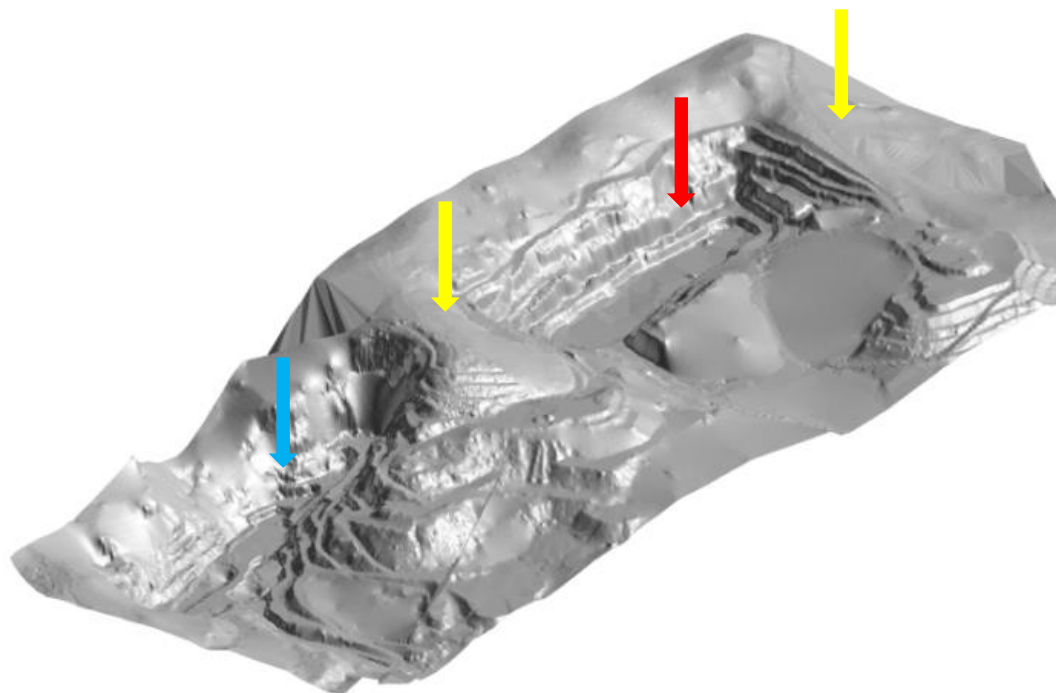
Todas as etapas desde a validação do método de estimativa, assim como modelagem geológica, geração dos modelos de blocos e etapas de planejamento de lavra foram realizadas através do *software Micromine*.

### **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **5.1 Aerofotogrametria**

A partir do processamento das aerofotos, foram gerados o MDT e o ortofotomosaico. Esses produtos foram repassados ao *software Micromine*, para que fosse gerada uma malha triangulada (DTM) da área, e assim pudesse ser recortado os posteriores modelos para se ter os volumes corretos do avanço projetado. A figura 13 a seguir, apresenta a malha triangulada que representa a topografia atual da área de estudo.

Figura 13 - MDT transformado em malha triangulada DTM para utilização no software *Micromine*. A seta vermelha indica a cava Norte e a seta azul indica a cava Sul. As setas amarelas indicam os locais de avanço, além do rebaixamento de ambas as cavas.



Fonte: autora.

## 5.2 Análise estatística do banco de dados

O banco de dados foi organizado considerando apenas as amostras cujos intervalos apresentavam calcário reconhecido e nos quais foram realizadas as análises químicas. Ao final, obtiveram-se 85 amostras, constituindo um banco de dados isotrópico.

Foram realizadas análises estatísticas univariadas e bivariadas para avaliar a dispersão dos dados e a correlação entre as variáveis estudadas.

Conforme apresentado na tabela 4, todos os métodos de obtenção dos PNs apresentam valores relativamente próximos e coerentes entre si. Entretanto, observa-se que o método de titulação (PN) apresenta a maior média, assim como os menores valores mínimos e os maiores valores máximos, comportamento que se repete nos demais parâmetros estatísticos. Em contrapartida, o PN calculado a partir de CaO e MgO apresenta a menor média, bem como maior mínimo e menor máximo. Já o PN ácido apresenta valores intermediários entre os dois métodos.

Essas diferenças são consistentes com o que descreve Alcarde (2005): mesmo quando PN ácido, CaO e MgO são determinados pelo método

complexométrico EDTA, o PN total (PN ácido) normalmente tende a ser maior porque mede a capacidade total de neutralização do material frente ao ácido, incluindo bases que reagem com HCl, mas que não serão posteriormente quantificadas como  $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$ . Por outro lado, as etapas seletivas de determinação de CaO e MgO podem sofrer interferências, solubilização incompleta e perdas, especialmente para MgO, resultando em teores subestimados e, conseqüentemente, em um PN calculado menor.

Assim, as diferenças observadas entre os métodos são esperadas e refletem tanto o comportamento químico dos minerais quanto as particularidades analíticas de cada procedimento.

Tabela 4 - Sumário estatístico dos dados dos furos.

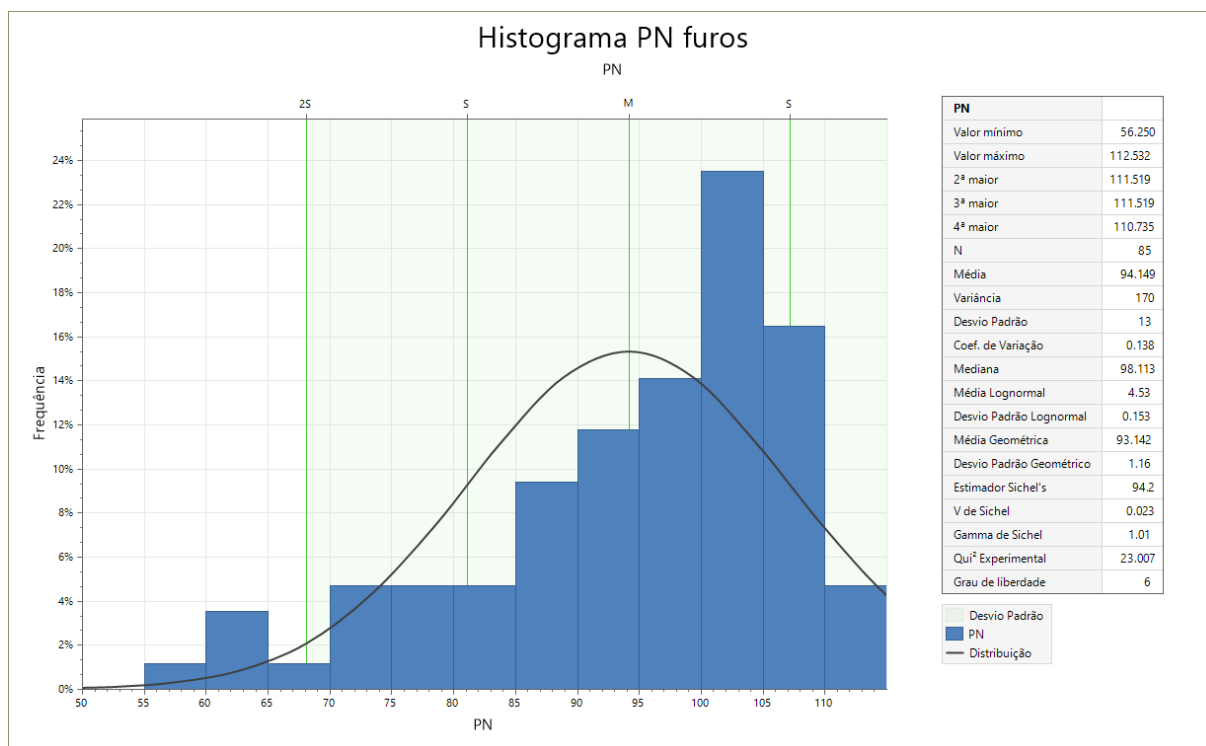
	PN	PN ácido	CaO	MgO	PN calculado
Média aritmética	94,149	93,632	27,420	17,284	91,946
Mínimo	56,250	57,000	18,180	8,460	58,601
Máximo	112,532	111,407	43,740	22,880	109,179
Desvio padrão	12,952	12,664	3,898	2,825	12,000
Variância	167,760	160,365	15,192	7,982	143,995
CV	0,138	0,135	0,142	0,163	0,131
Mediana	98,113	98,144	28,320	18,040	96,560
Quartil inferior	86,000	85,789	26,020	15,740	84,073
Quartil superior	103,500	103,000	29,970	19,350	100,920
IQR	17,500	17,211	3,950	3,610	16,847

Fonte: autora.

Como se observa nas figuras 14, 15, 16, 17 e 18, os histogramas apresentam características semelhantes, destacando-se a assimetria negativa em todas as variáveis. Os histogramas dos PNs mostram um comportamento coerente com o que foi verificado previamente nos sumários estatísticos, reforçando a consistência da distribuição desses dados.

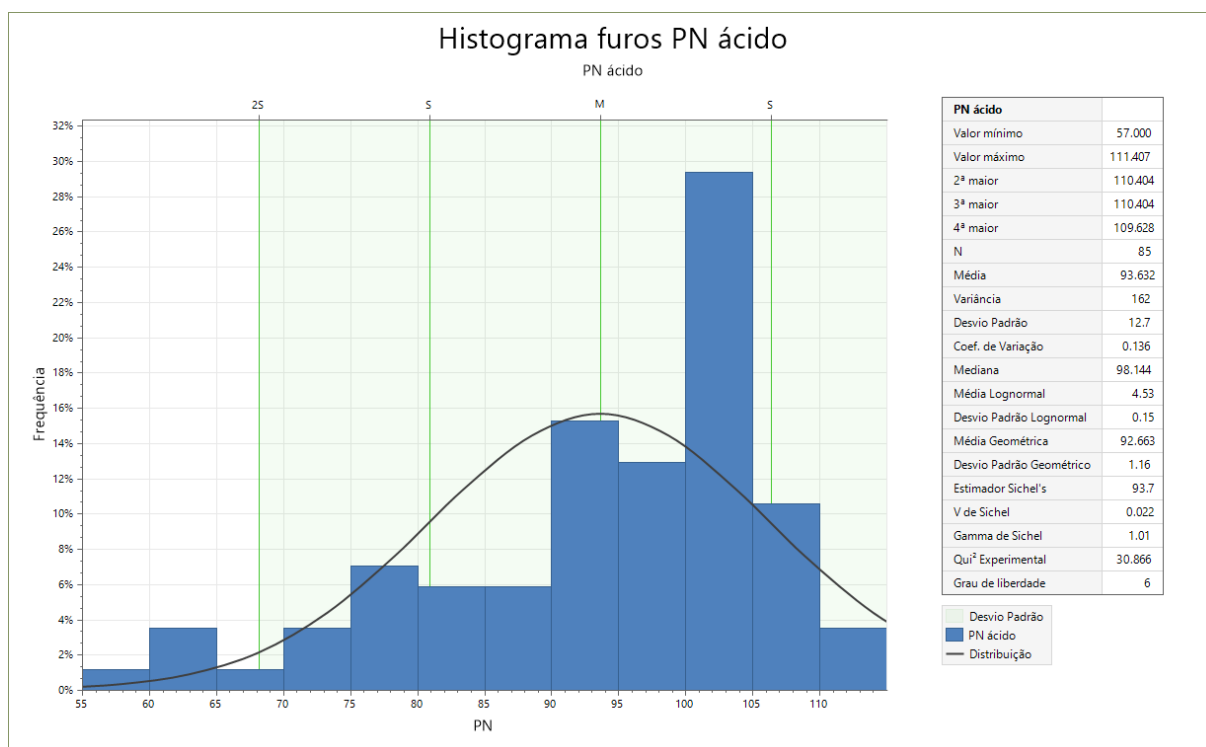
De maneira geral, os histogramas indicam uma distribuição regular entre as variáveis. Contudo, no caso do CaO (figura 16), identifica-se um valor que se afasta da tendência predominante do conjunto, caracterizando um extremo do banco de dados. Optou-se por mantê-lo na análise, uma vez que representa uma amostra real, possivelmente vinculada a uma variação mais calcítica dentro do depósito. Essa diferença pode refletir heterogeneidades originadas durante a gênese do corpo carbonático, em que zonas com maior enriquecimento em cálcio podem ocorrer devido a processos deposicionais ou diagenéticos específicos.

Figura 14 - Histograma dos furos – PN.



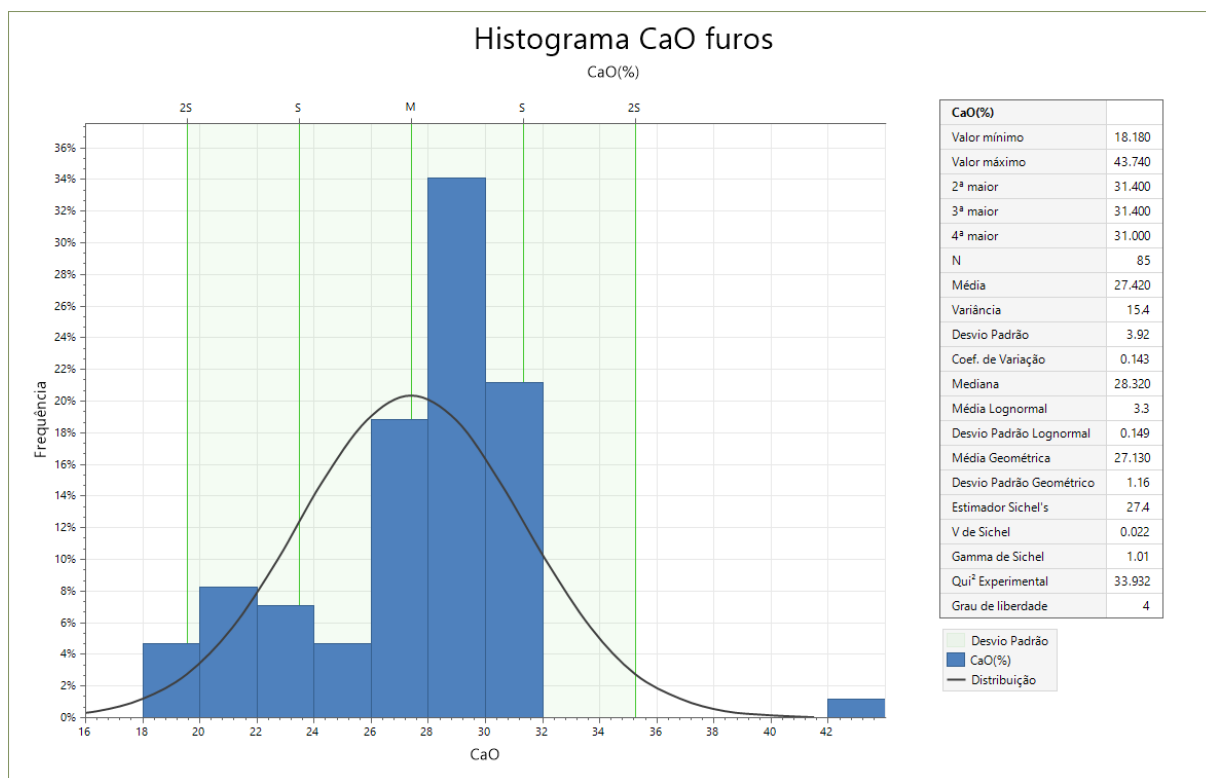
Fonte: autora.

Figura 15 - Histograma dos furos - PN ácido.



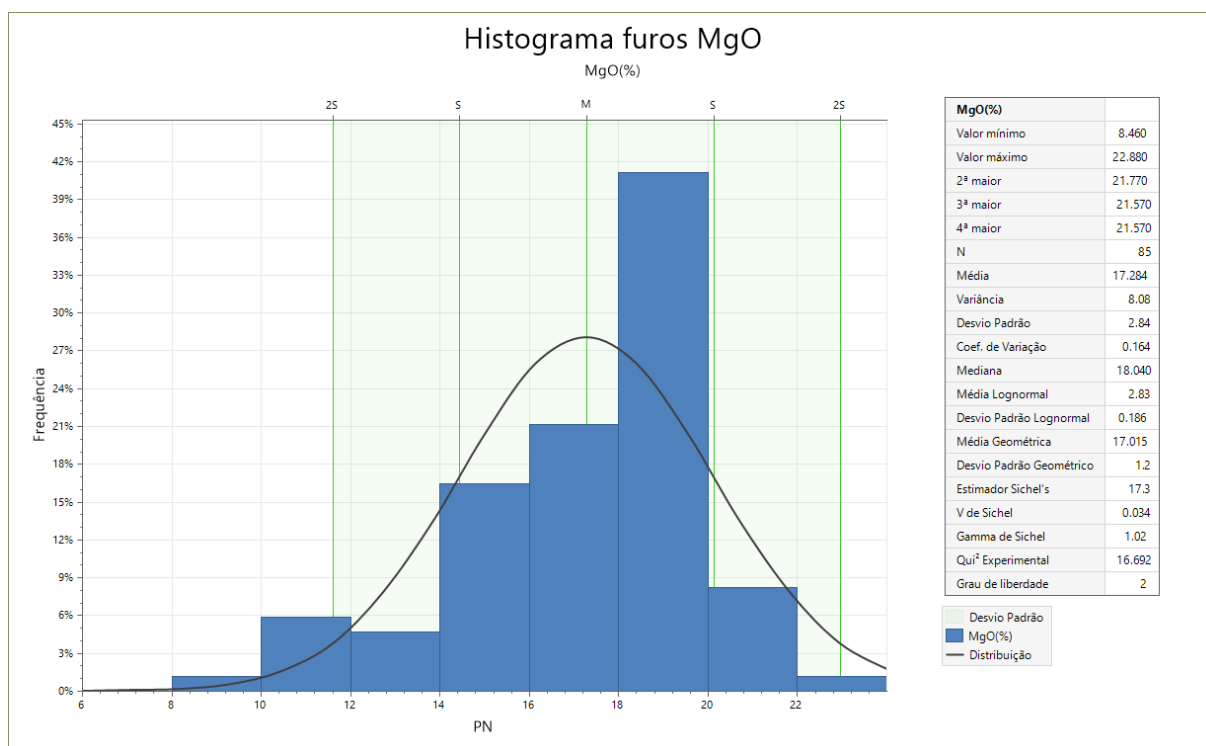
Fonte: autora.

Figura 16 - Histograma dos furos – CaO.



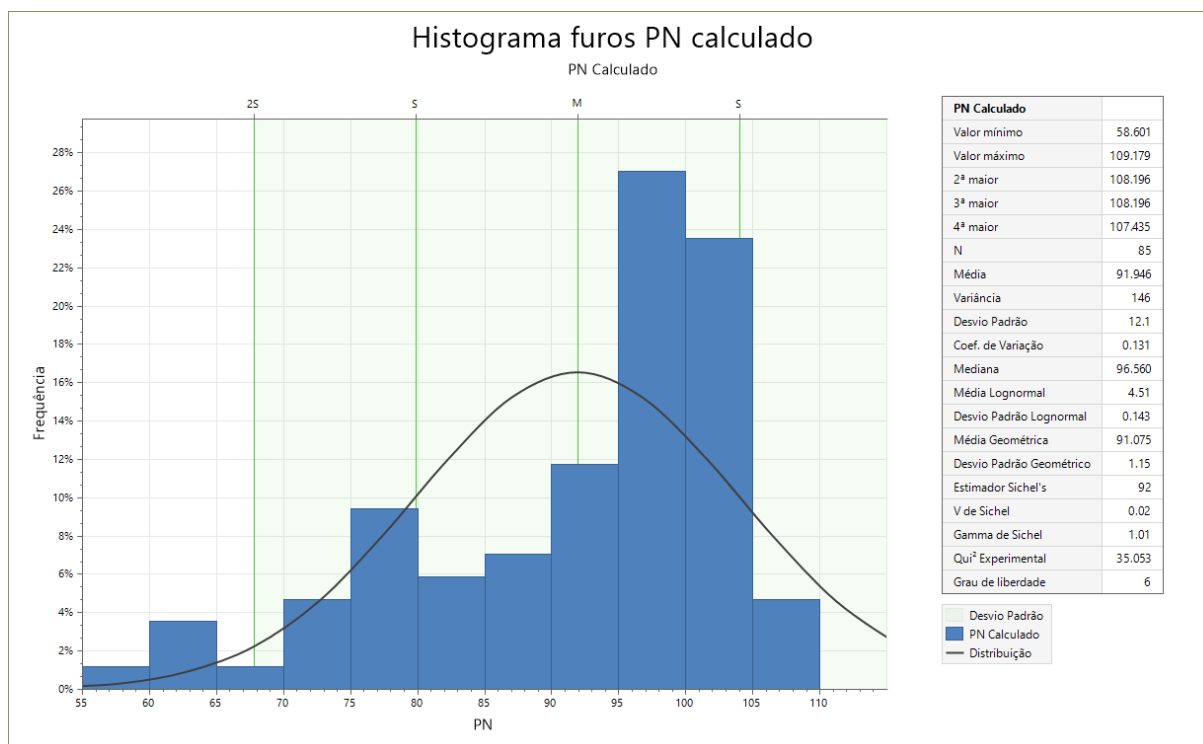
Fonte: autora.

Figura 17 - Histograma dos furos – MgO.



Fonte: autora.

Figura 18 - Histograma dos furos - PN calculado.



Fonte: autora.

Em relação à análise estatística bivariada, apresentada na tabela 5, foi possível observar que todas as variáveis apresentam correlação positiva, com coeficientes de Pearson superiores a 0,6. Esse comportamento já era esperado, uma vez que os diferentes métodos de determinação dos PNs apresentaram distribuições semelhantes, conforme verificado no sumário estatístico.

No caso do CaO e do MgO, a correlação positiva com os PNs também era prevista, pois esses óxidos são propriedades intrínsecas do minério carbonático e constituem a base para o cálculo dos PNs. Observa-se ainda que os PNs apresentam correlação ligeiramente maior com o MgO do que com o CaO, o que é coerente com o caráter dolomítico do depósito.

A correlação entre CaO e MgO, embora positiva, é menor que a observada entre os demais pares de variáveis. Esse comportamento pode estar relacionado ao contexto deposicional e à gênese do depósito, que podem gerar maior variabilidade na distribuição desses elementos ao longo das amostras.

Tabela 5 - Matriz de correlação linear das variáveis – furos.

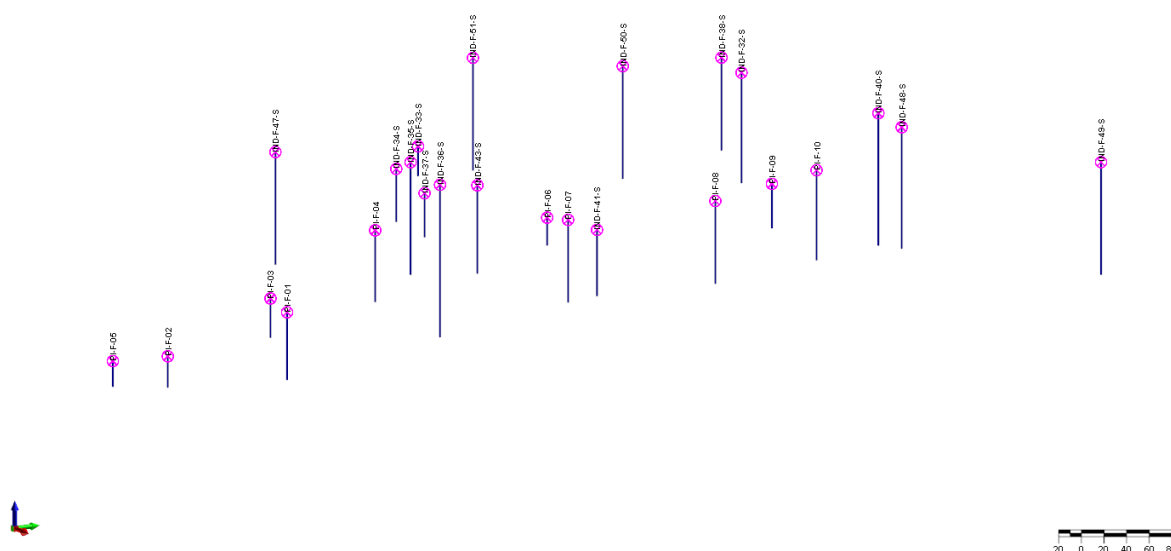
	PN	PN ácido	CaO (%)	MgO (%)	PN Calculado
PN	1				
PN ácido	0,997	1			
CaO (%)	0,839	0,845	1		
MgO (%)	0,861	0,862	0,716	1	
PN Calculado	0,991	0,995	0,857	0,859	1

Fonte: autora.

### 5.3 Modelagem geológica

Para a realização da modelagem geológica, os furos de sondagem foram inseridos no *software Micromine* (figura 19) por meio de três planilhas principais, a *Collar*, contendo as identificações, coordenadas, cotas e profundidades dos furos, *Assay*, com os intervalos amostrados e os valores das variáveis de estudo, e *Geology*, que subdividia as litologias em *Ore* (minério — no caso em estudo, calcário/mármore) e *Waste* (estéril), englobando todas as demais unidades geológicas da área que continham as litologias solo, granito, sericita xisto, sericita quartzito, metamarga, quartzito carbonatado, xisto carbonatado e anfibolito.

Figura 19 - Furos de sondagem importados para o *software Micromine*.

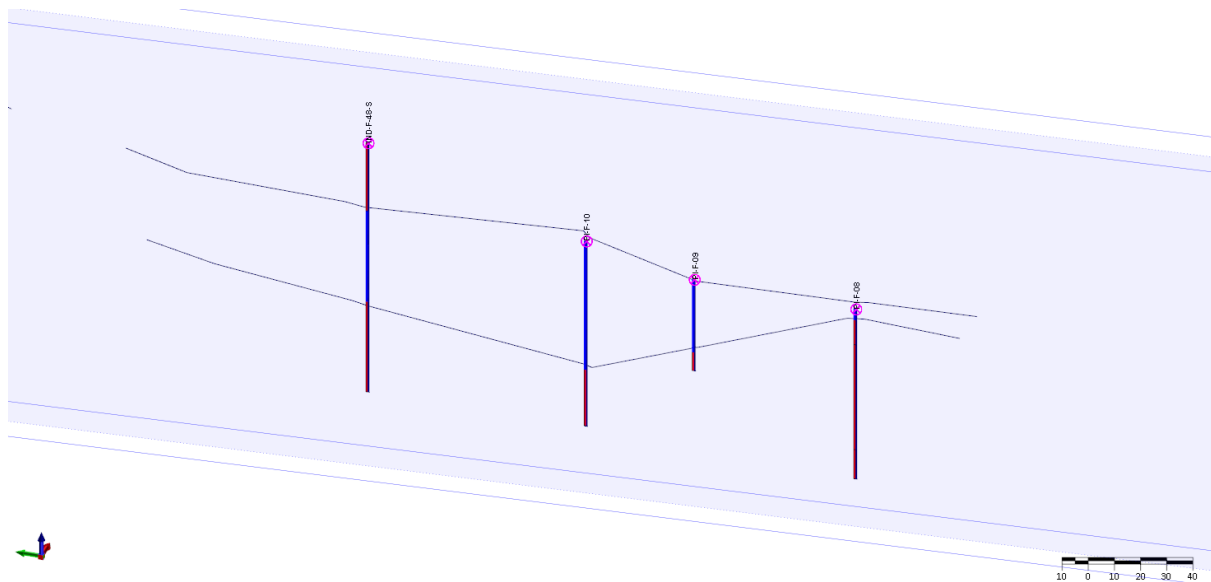


Fonte: autora.

A partir da organização dos furos de sondagem e da sua classificação em *Ore* (representado em azul) e *Waste* (representado em vermelho), bem como da análise do ortofotomosaico para delimitação dos limites visíveis do corpo calcário exposto em ambas às cavas, foi realizada a separação dos furos em seções, conforme

ilustrado na figura 20. Com essas seções definidas, iniciou-se o traçado das *strings* representando as superfícies de topo e base das camadas de calcário/mármore.

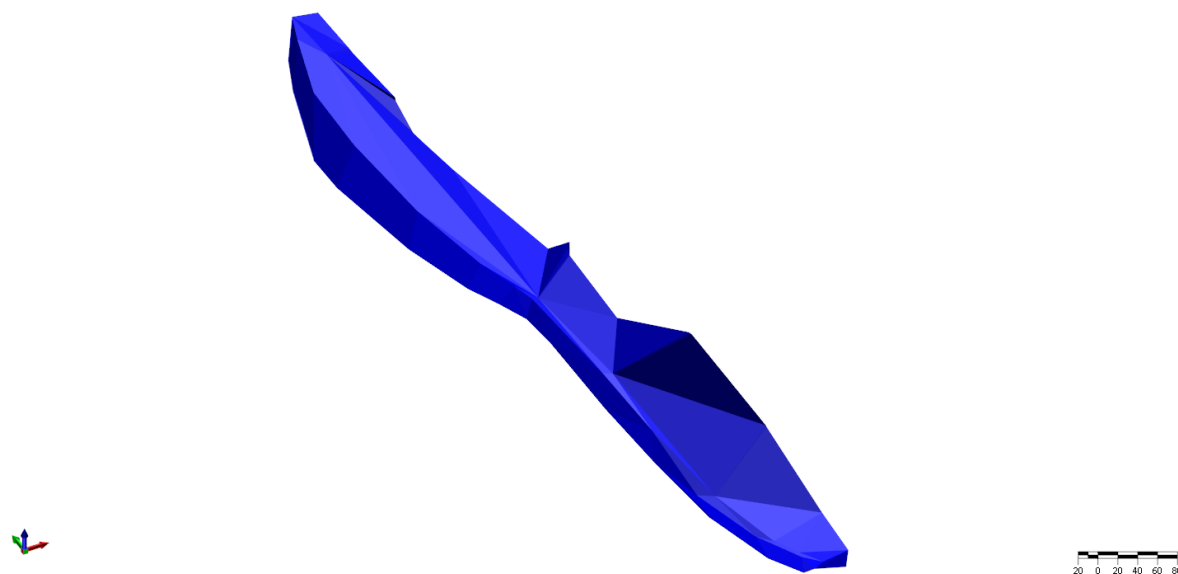
Figura 20 - Seções e *strings* traçadas através dos furos de sondagem.



Fonte: autora.

Com todas as *strings* delimitadas, o volume foi fechado usando malhas trianguladas, que conectaram as linhas geradas em cada seção. Esse processo permitiu construir superfícies contínuas representando o corpo mineralizado. Assim, obteve-se o modelo geológico apresentado na figura 21.

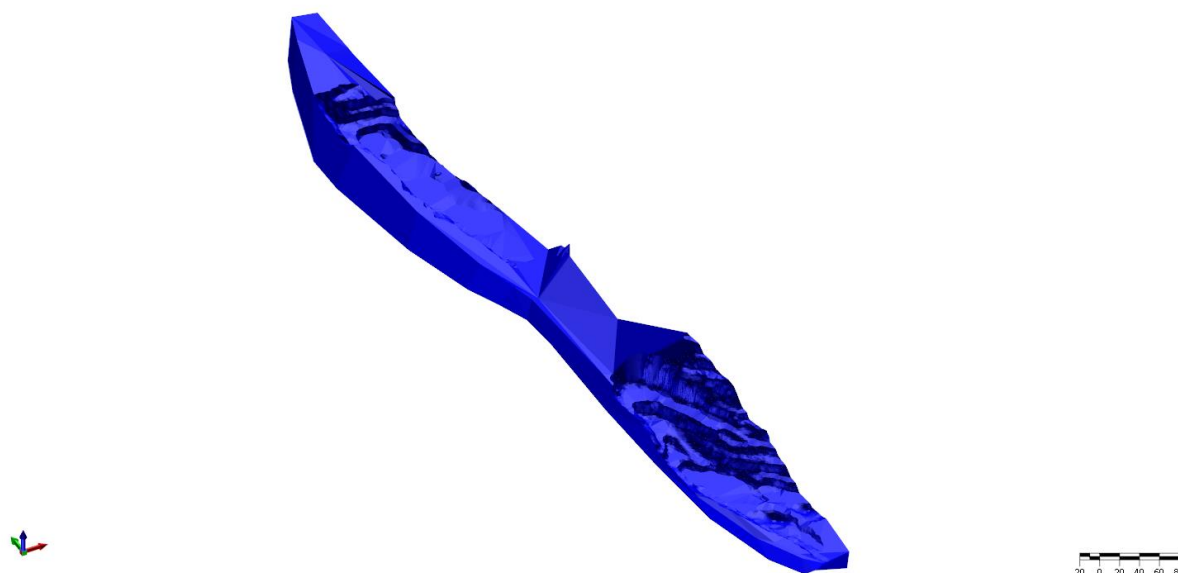
Figura 21 - Modelo geológico, gerado através da modelagem explícita.



Fonte: autora.

Como no caso de estudo se tratava de um avanço de lavra, o corpo de minério foi recortado pela topografia atual, conforme se observa na figura 22, e mostrou-se condizente com os limites visíveis mapeados em campo e pelo ortofotomosaico.

Figura 22 - Modelo geológico recortado pela topografia.



Fonte: autora.

A partir do sólido já fechado e utilizando os valores amostrais dos furos, foram gerados relatórios de volume, tonelagem e médias das variáveis, apresentados na tabela 6. Esses resultados serviram como base para a comparação com os modelos de blocos.

Tabela 6 - Resultados de volumes, tonelagens e médias do modelo geológico.

Variável	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (t/m <sup>3</sup> )	Tonelagem (t)	PN (%)
PN	2.447.704,21	2,7	6.608.801,36	93,313
PN ácido	2.447.704,21	2,7	6.608.801,36	92,857
CaO	2.447.704,21	2,7	6.608.801,36	27,035
MgO	2.447.704,21	2,7	6.608.801,36	17,254
PN calculado	2.447.704,21	2,7	6.608.801,36	91,182

Fonte: autora.

## 5.4 Modelo de blocos

### 5.4.1 Modelo de blocos em branco

Para a construção do modelo de blocos, adotou-se uma configuração compatível com a geometria do corpo mineralizado, previamente definida pelo

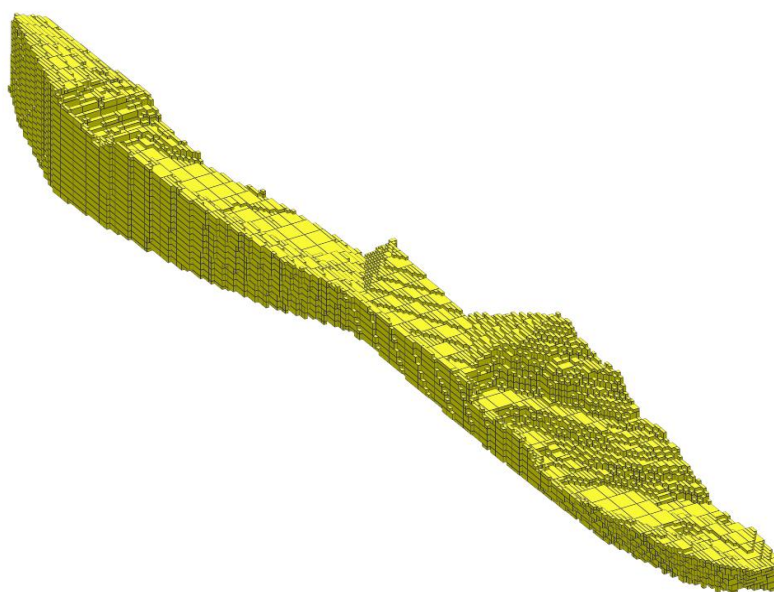
modelo geológico. O modelo abrange aproximadamente 935 m de comprimento, largura variável entre 100 m e 63 m, e 80 m de profundidade.

O dimensionamento dos blocos seguiu critérios baseados tanto na distribuição dos furos quanto nas características físicas do depósito. O espaçamento médio entre os furos é de aproximadamente 60 m, e, considerando a recomendação de David (1977) de utilizar cerca de 1/4 do espaçamento médio como referência para a dimensão máxima do bloco, definiu-se o tamanho de 15 m na direção X.

Como os furos acompanham predominantemente o alongamento do corpo na direção Y, optou-se por um bloco retangular, com 20 m na direção Y, permitindo melhor adaptação à geometria alongada do depósito. Para a dimensão em profundidade em Z, estabeleceu-se 5 m, valor escolhido devido ao comprimento típico das amostras e também por manter coerência com a altura dos taludes atualmente empregados na mina, que variam entre 10 e 12 m. A modelagem permitiu ainda o uso de sub-blocos de 5 m x 5 m x 2 m, por se tratar de uma área com avanços de lavra e geometrias irregulares.

A construção do modelo foi realizada no *software Micromine*, utilizando o mesmo modelo de blocos em branco para todas as estimativas, garantindo uma comparação direta entre os resultados (figura 23).

Figura 23 - Modelo de blocos em branco.



Fonte: autora.

#### 5.4.2 Modelo de blocos - IQD

Com o modelo de blocos em branco finalizado, iniciou-se o processo de estimativa, etapa na qual foram testados os principais parâmetros de interpolação. Foram avaliados diferentes valores de raio de busca, limites de mínimo e máximo de amostras, aplicações de setorização e ajustes no elipsoide de busca, com o objetivo de identificar a configuração que melhor representasse a continuidade espacial das variáveis.

Após a realização dos testes, definiu-se o conjunto de parâmetros mais adequado ao comportamento dos dados, os quais foram utilizados nas estimativas finais de todas as variáveis. Esses parâmetros estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados para estimativa utilizando o método IQD.

Parâmetros utilizados na estimativa - IQD	
Raio de busca	75 m
Mínimo de amostras	4
Máximo de amostras	12
Busca por setores	Octantes
Mínimo de amostras por setor	1
Máximo de amostras por setor	4
Elipsoide de busca	Geológico (plunge)
Eixos (azimute) 1	80,259
Eixos (azimute) 2	155,413
Eixos (azimute) 3	350,16

Fonte: autora.

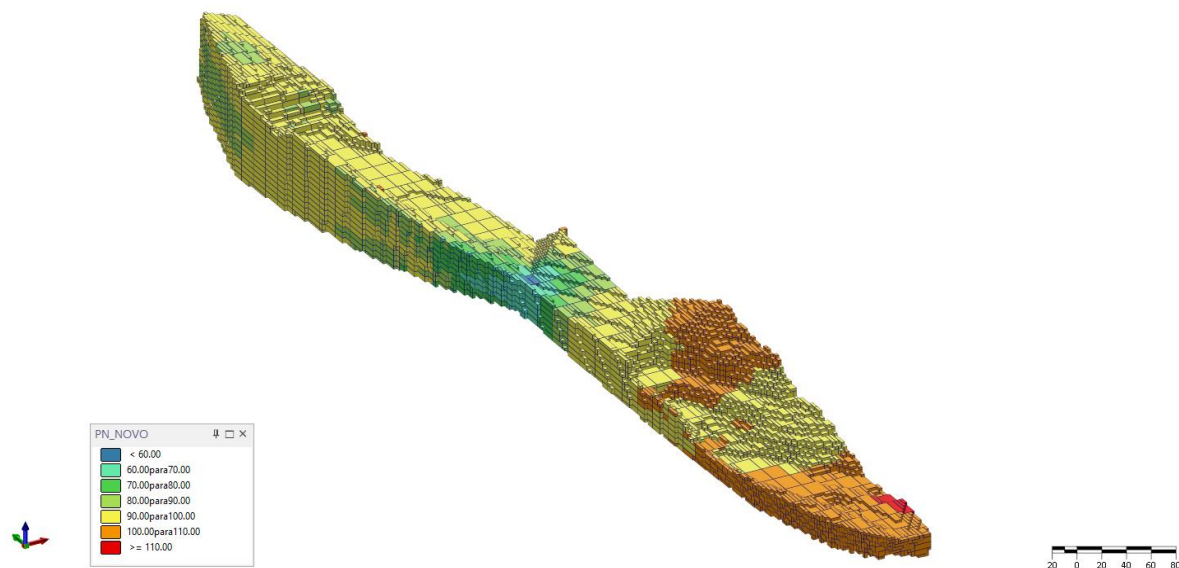
A seguir, nas figuras 24 a 29, são apresentados os modelos de blocos estimados para as variáveis PN, PN ácido, CaO, MgO, PN calculado e PN (CaO + MgO), respectivamente. Esta última variável foi obtida diretamente no *software Micromine*, por meio da ferramenta calcular, utilizando os valores estimados de CaO e MgO provenientes de seus respectivos modelos de blocos.

Para a representação visual, adotou-se a mesma escala de cores para todos os PNs, uma vez que os intervalos dessas variáveis são semelhantes e já estavam contemplados na escala previamente definida. Por outro lado, para CaO e MgO foram utilizadas escalas específicas, devido às diferenças significativas de intervalos e distribuição quando comparadas aos PNs.

Observa-se também que a distribuição espacial do MgO (figura 27) apresenta forte similaridade com a distribuição das variáveis de PN, tanto em termos de continuidade quanto de zonas de maior concentração. Esse comportamento confirma o que já havia sido evidenciado no tratamento estatístico, reforçando que o

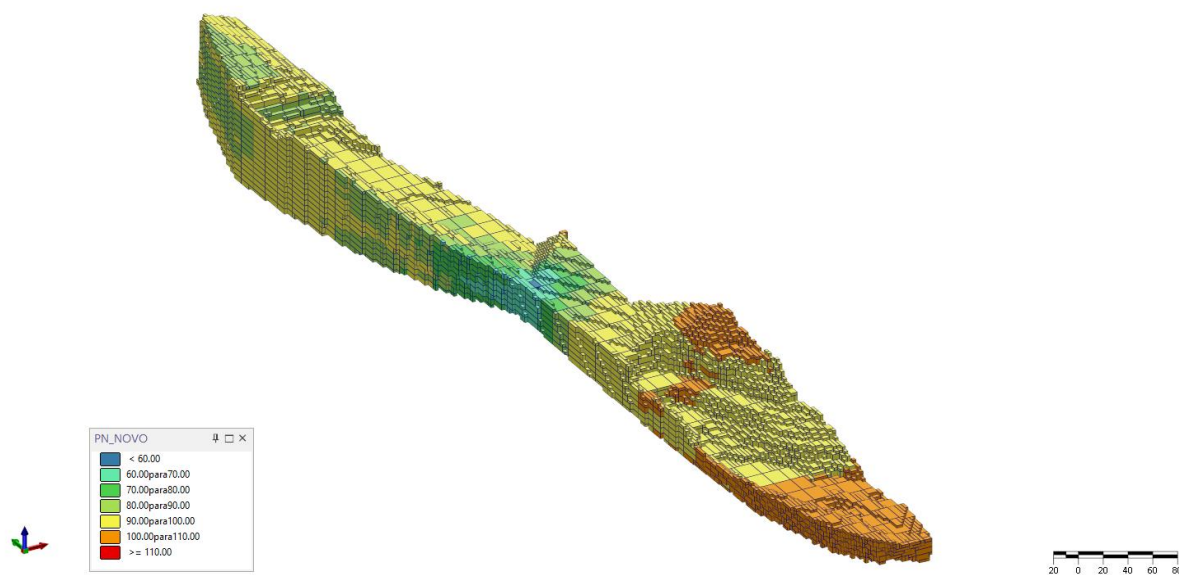
depósito possui caráter predominantemente dolomítico, já que o magnésio exerce influência direta sobre a capacidade neutralizante e, portanto, sobre os valores de PN ao longo do corpo mineralizado.

Figura 24 - Modelo de blocos estimado através do PN.



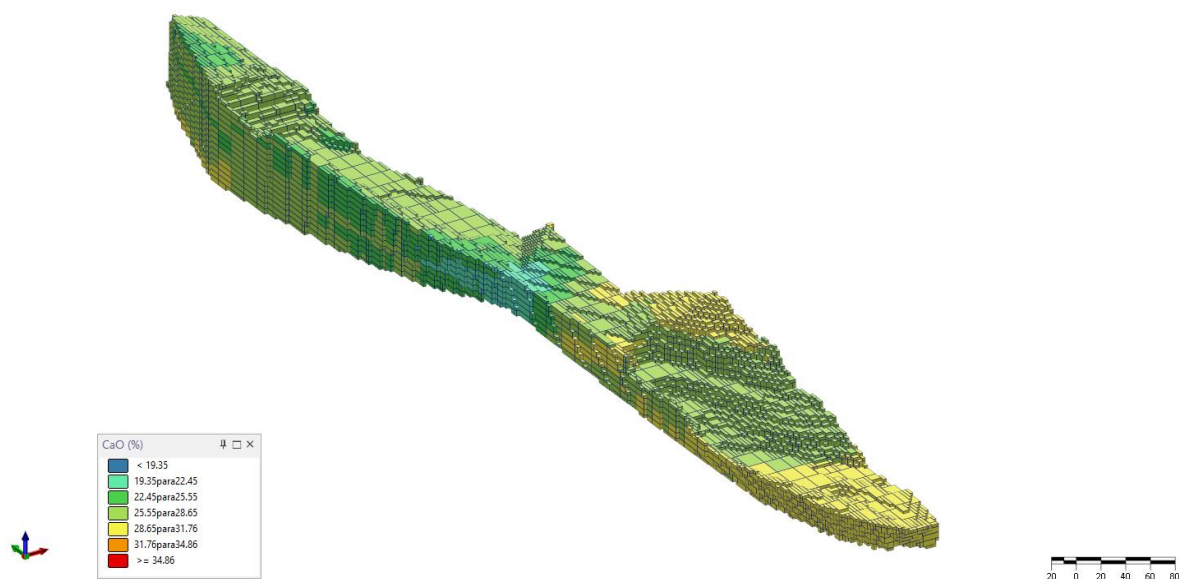
Fonte: autora.

Figura 25 - Modelo de blocos estimado através do PN ácido.



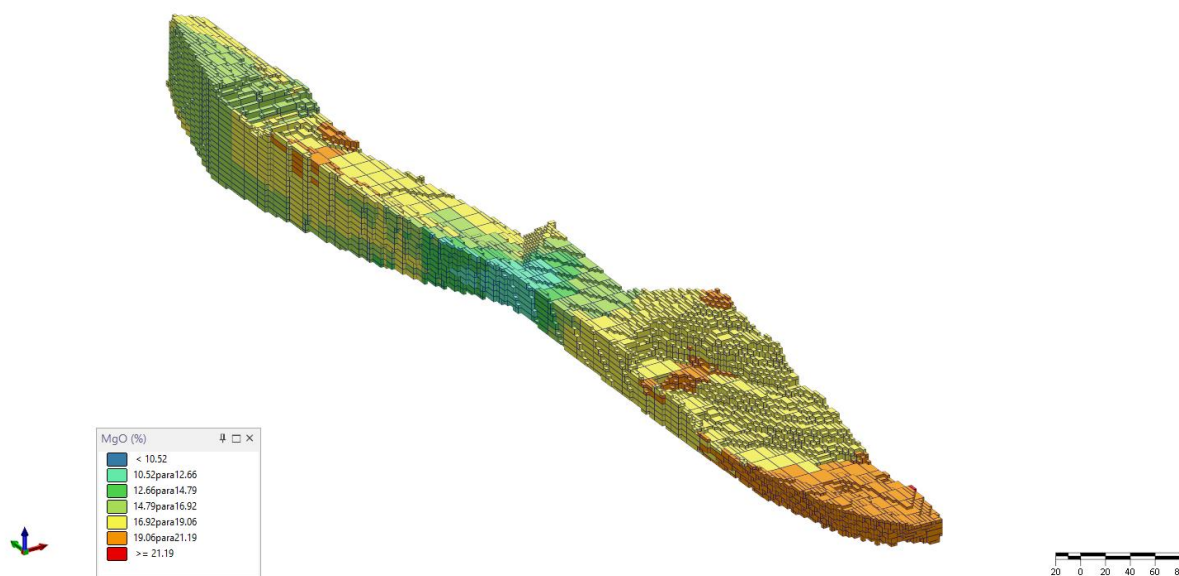
Fonte: autora.

Figura 26 - Modelo de blocos estimado através do CaO.



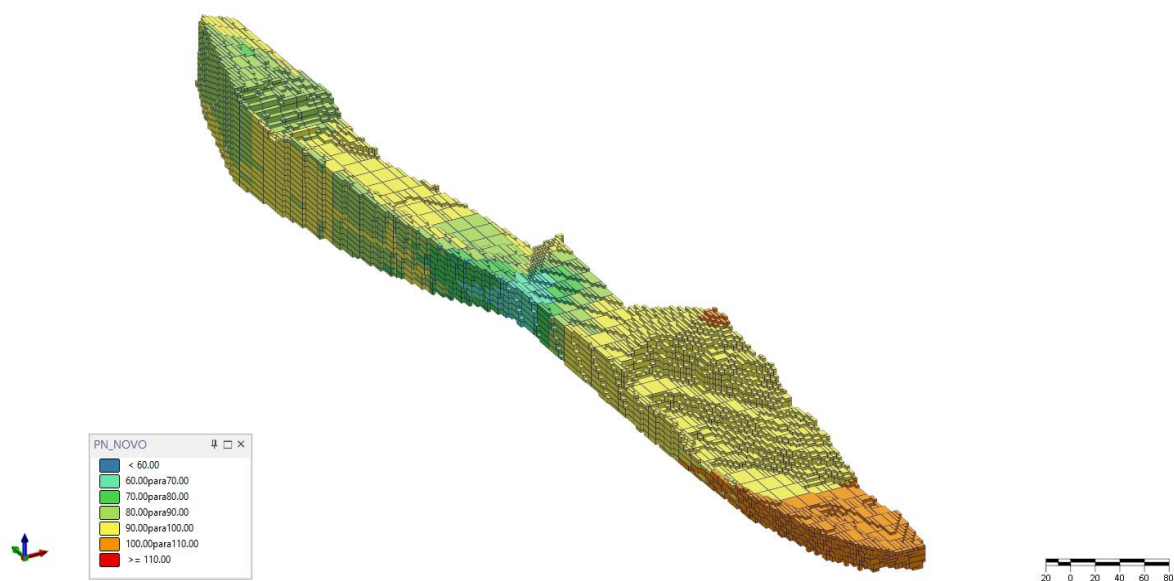
Fonte: autora.

Figura 27 - Modelo de blocos estimado através do MgO.



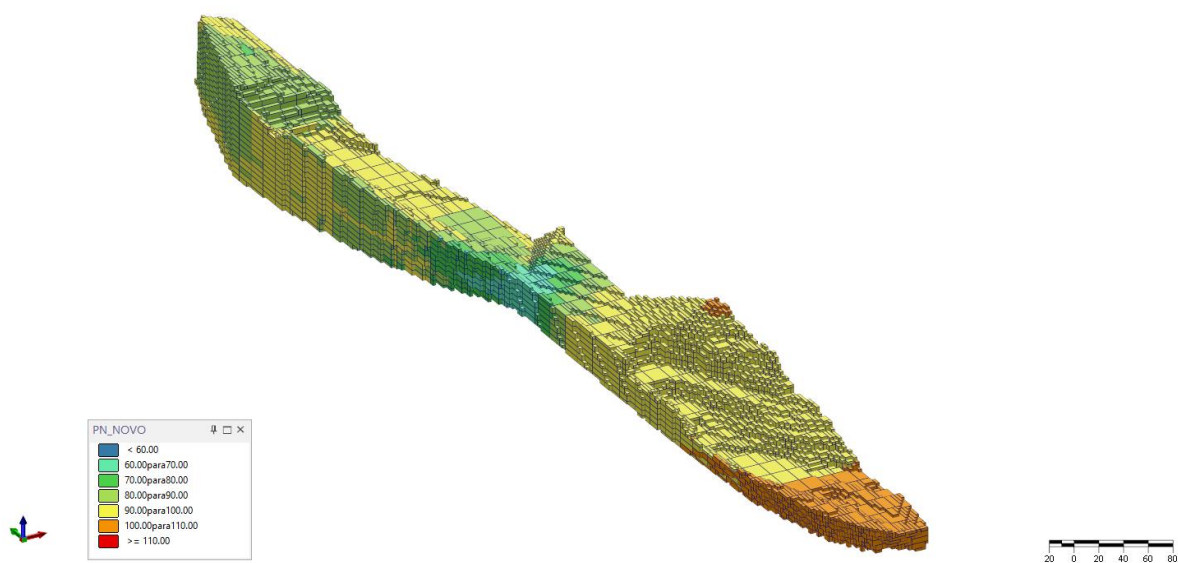
Fonte: autora.

Figura 28 - Modelo de blocos estimado através do PN calculado.



Fonte: autora.

Figura 29 - Modelo de blocos estimado através do PN (CaO+MgO).



Fonte: autora.

A partir das estimativas, foram gerados relatórios de volume, tonelagem e médias das variáveis, apresentados na tabela 8.

Tabela 8 - Volumes, massas e teores dos modelos de blocos.

Variável	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (t/m <sup>3</sup> )	Tonelagem (t)	PN (%)
PN	2.448.750,00	2,7	6.611.625,00	93,481
PN ácido	2.448.750,00	2,7	6.611.625,00	92,960
CaO	2.448.750,00	2,7	6.611.625,00	27,078
MgO	2.448.750,00	2,7	6.611.625,00	17,266
PN calculado	2.448.750,00	2,7	6.611.625,00	91,291
PN (CaO+MgO)	2.448.750,00	2,7	6.611.625,00	91,291

Fonte: autora.

Ao comparar os resultados do modelo geológico, que se utiliza dos dados dos furos de sondagem (tabela 6) com o modelo de blocos (tabela 8), observa-se que os valores de volume, tonelagem e teores médios das variáveis apresentaram diferenças muito pequenas. Essa proximidade entre os dois modelos indica que a estimativa reproduziu bem as características gerais do modelo geológico e dos furos de sondagem, mantendo consistência tanto nos parâmetros físicos (volume e massa) quanto nos parâmetros químicos (PN, PN ácido, CaO, MgO e PN calculado).

Na tabela 9 são apresentadas as diferenças de volume e tonelagem entre os dois modelos. As variações ficaram abaixo de 0,05% para ambos os parâmetros. Isso demonstra que a discretização em blocos não gerou distorções significativas no volume sólido modelado, nem na conversão de massa pela densidade.

Tabela 9 - Comparação entre o volume e tonelagem do modelo geológico e do modelo de blocos.

Parâmetro	Modelo geológico	Modelo de blocos	Diferença	Diferença (%)
Volume (m <sup>3</sup> )	2.447.704,21	2.448.750,00	1.045,79	0,04%
Tonelagem total (t)	6.608.801,36	6.611.625,00	2.823,64	0,04%

Fonte: autora.

Os teores médios também apresentaram boa coerência entre os modelos (tabela 10). As diferenças ficaram sempre abaixo de 0,2% em termos absolutos e menores que 0,3% em termos percentuais. Esses valores reforçam que a estimativa por blocos foi capaz de manter a tendência de teores representada nos furos de sondagem.

Assim, a comparação mostra que o modelo de blocos apresenta comportamento coerente ao modelo geológico e aos furos, com variações mínimas tanto nos parâmetros volumétricos quanto nos teores.

Tabela 10 - Comparação entre os teores do modelo geológico (que utilizou os teores dos furos de sondagem) e do modelo de blocos.

Variável	Modelo geológico	Modelo de blocos	Diferença	Diferença (%)
PN (%)	93,313	93,481	0,168	0,18%
PN ácido (%)	92,857	92,960	0,103	0,11%
CaO (%)	27,035	27,078	0,043	0,16%
MgO (%)	17,254	17,266	0,012	0,07%
PN calculado (%)	91,182	91,291	0,109	0,12%

Fonte: autora.

#### 5.4.2.1 Análise estatística dos modelos de blocos

O modelo de blocos resultou em 5.764 amostras estimadas, formando um banco de dados denso e com distribuição regular ao longo do corpo mineralizado. Assim como nos dados dos furos, foram realizadas análises estatísticas univariadas para avaliar o comportamento dos teores e a consistência geral das estimativas.

Conforme apresentado na tabela 11, observa-se que todas as variáveis apresentam médias próximas entre si quando comparados os diferentes métodos de obtenção do PN, mantendo o padrão já verificado no banco de dados dos furos. Novamente, o PN por titulação (PN) apresenta a maior média entre os métodos, enquanto o PN calculado a partir de CaO e MgO (PN calculado e PN CaO+MgO) permanece como o método com os menores valores médios. O PN ácido se mantém em posição intermediária, repetindo o comportamento observado nos dados amostrais reais.

Tabela 11 - Sumário estatístico das variáveis - modelos de blocos.

	PN	PN ácido	CaO	MgO	PN Calculado	PN (CaO+MgO)
Média aritmética	94,782	94,188	27,335	17,566	92,493	92,493
Mínimo	59,086	59,933	19,346	10,523	61,374	61,374
Máximo	111,043	109,935	34,860	21,190	107,738	107,738
Desvio padrão	8,08	7,87	1,9	1,84	7,46	7,46
Variância	65,28	61,95	3,63	3,38	55,64	55,64
CV	0,99	1	1,02	0,99	1,01	1,01
Mediana	95,789	95,210	27,968	17,934	93,572	93,572
Quartil inferior	91,35	90,78	26,18	16,53	88,92	88,92
Quartil superior	99,4	98,64	28,53	18,75	96,79	96,79
IQR	8,04	7,86	2,35	2,23	7,87	7,87

Fonte: autora.

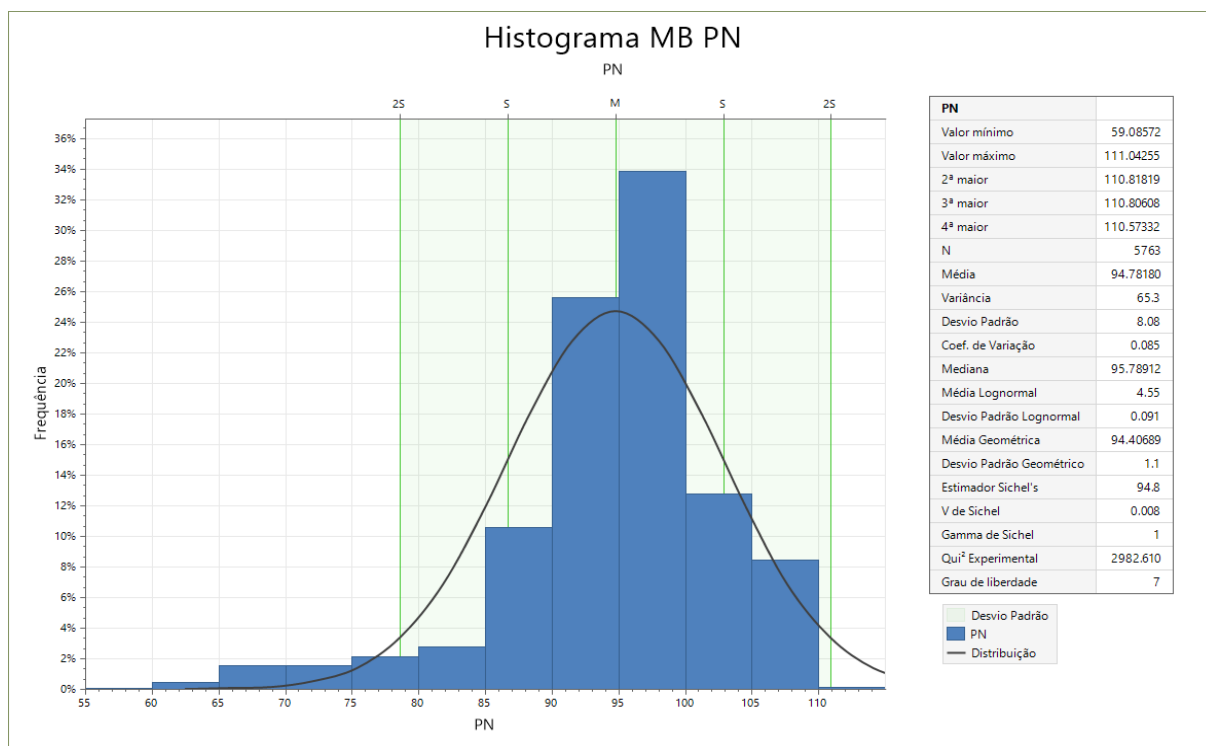
Um ponto importante é o comportamento da distribuição dos dados. Nos furos, todas as variáveis apresentavam assimetria negativa mais evidente, principalmente devido à presença de valores mínimos relativamente mais baixos nos furos do que nos modelos. Já no modelo de blocos, como observado nos histogramas das figuras 31 a 36, essa assimetria torna-se muito mais suave, variando de levemente negativa assimétrica a simétrica.

Essa diferença ocorre porque o processo de estimativa (IQD) tende a suavizar valores mínimos e máximos, aproximando os teores dos blocos estimados da média local dos dados. Assim, valores muito baixos ou muito altos não aparecem com a mesma intensidade que nos dados originais. Isso explica por que a distribuição do modelo se torna mais centralizada, reduzindo a assimetria e diminuindo a amplitude total. Isso é ainda mais evidente no CaO (figura 33), variável que apresentava um extremo no banco de dados original, mas que, no modelo de blocos, já não é mais perceptível no histograma.

O comportamento conjunto do MgO e dos PNs se mantém semelhante ao observado nos furos. A distribuição de MgO acompanha de perto a dos PNs nas figuras 31 a 36, reforçando a característica dolomítica do depósito. Isso indica que o modelo preservou adequadamente a geoquímica e a relação entre CaO, MgO e PN.

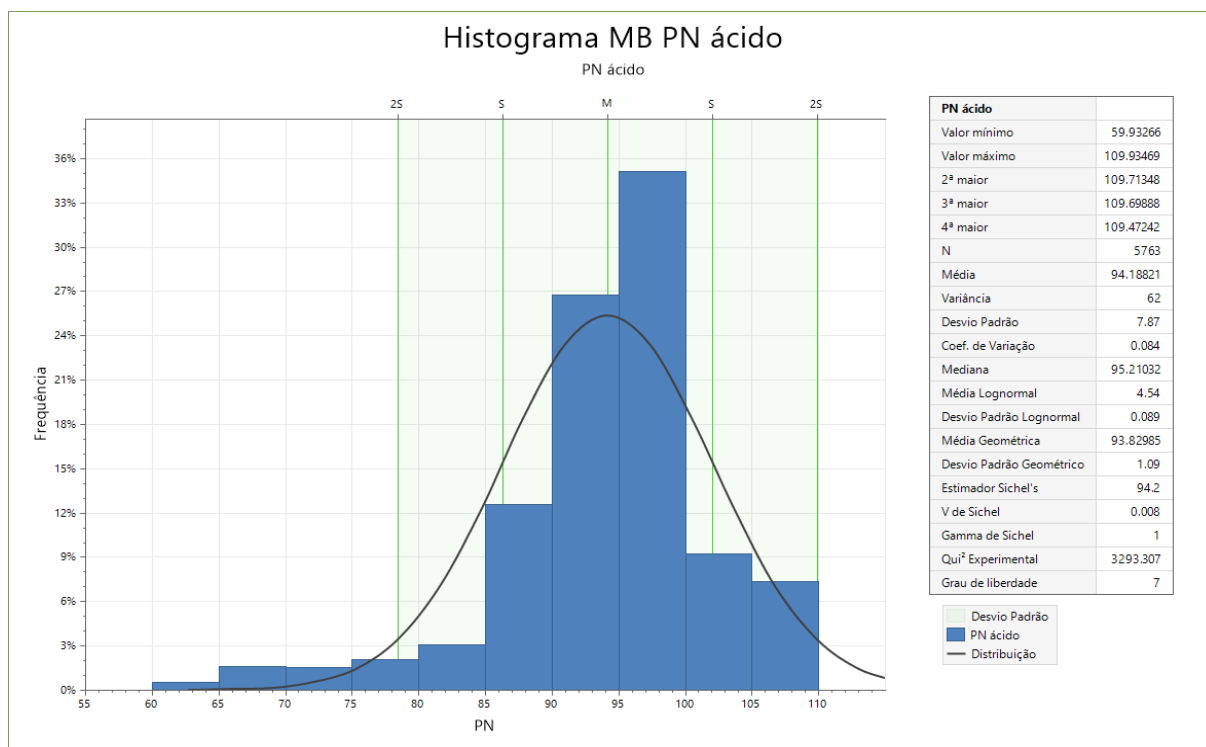
Os quartis e o IQR mostram uma distribuição homogênea e sem valores atípicos evidentes, e a proximidade entre média e mediana confirma a redução da assimetria após a estimativa. No geral, o modelo apresenta uma variabilidade coerente, preserva as tendências gerais do depósito e apresenta uma pequena suavização dos dados.

Figura 30 - Histograma do modelo de blocos - PN.



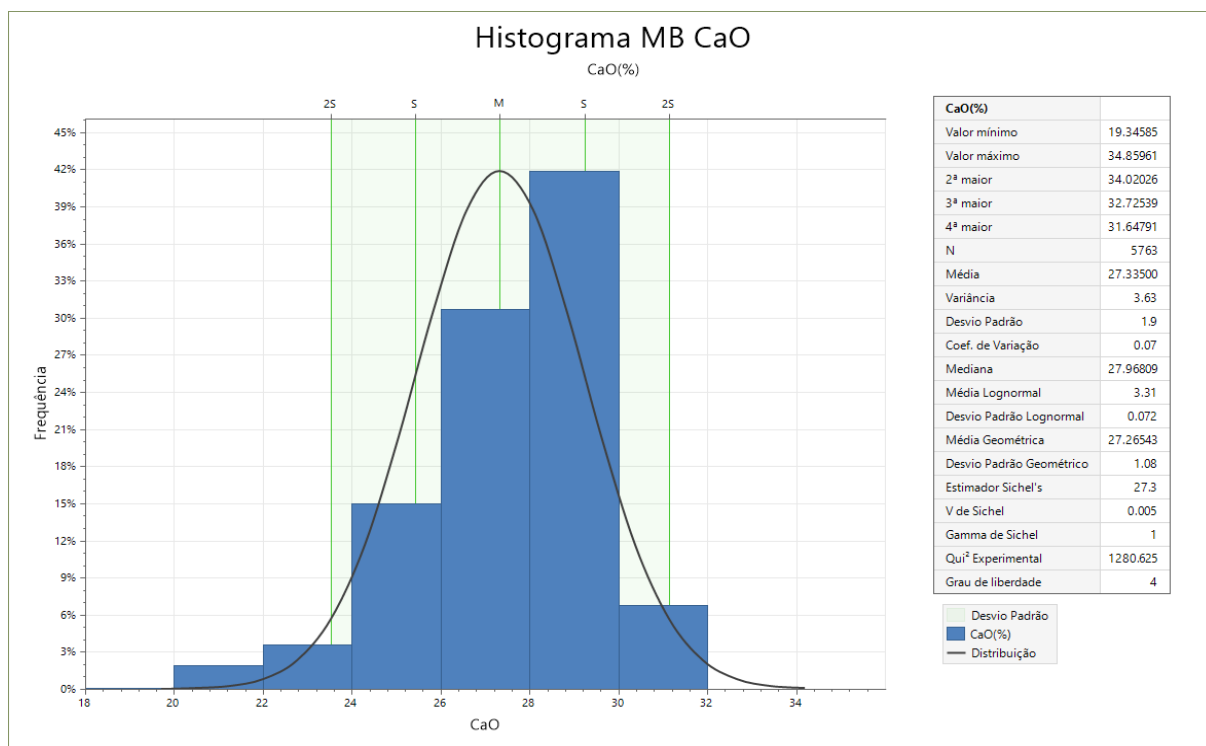
Fonte: autora.

Figura 31 - Histograma do modelo de blocos - PN ácido.



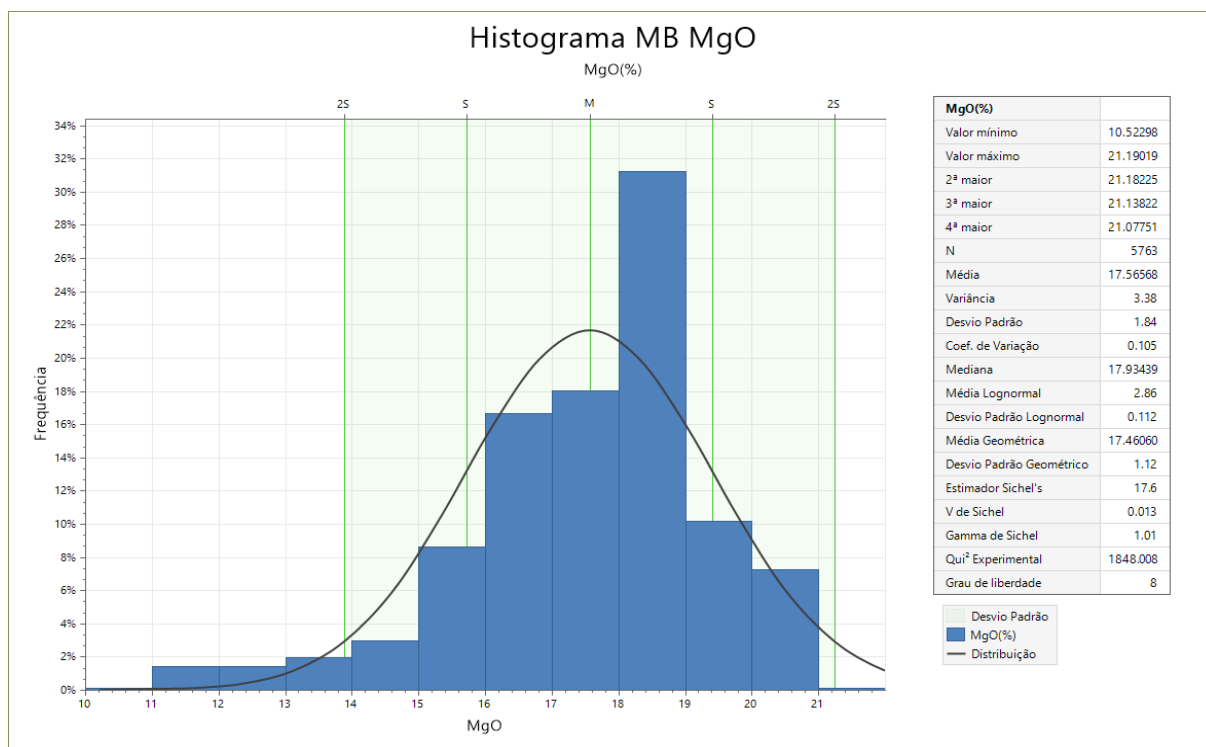
Fonte: autora.

Figura 32 - Histograma do modelo de blocos - CaO.



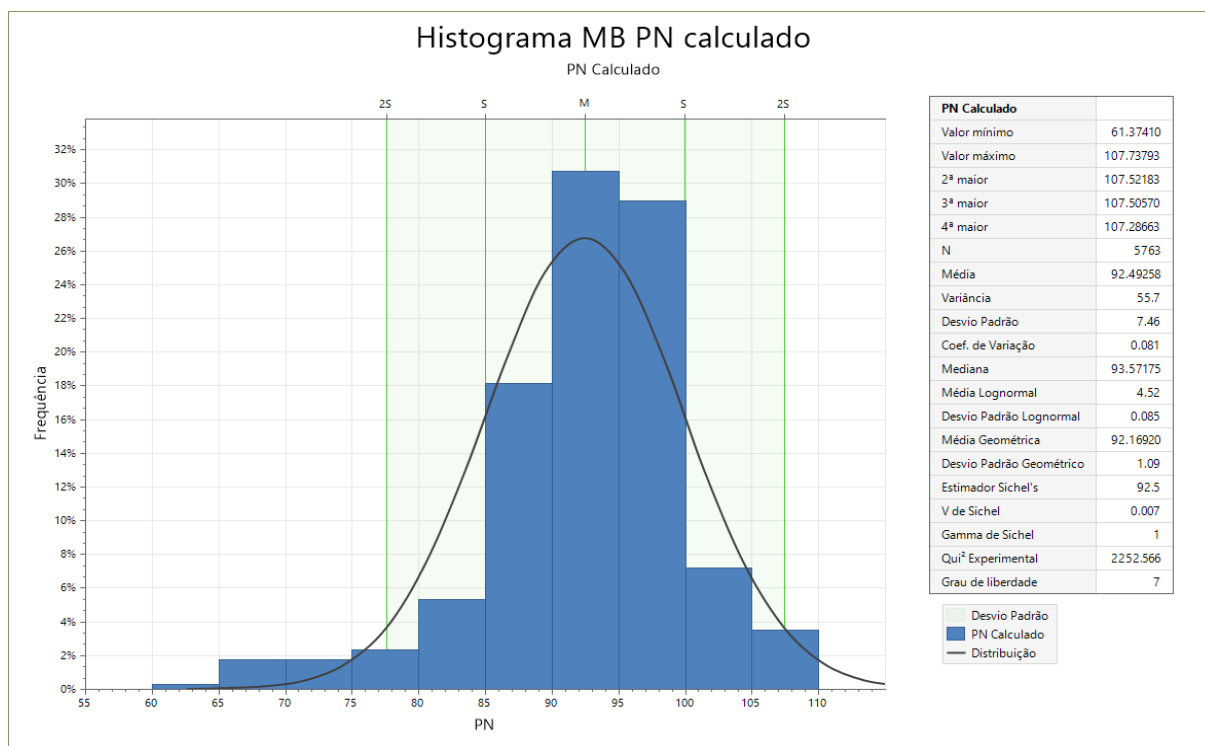
Fonte: autora.

Figura 33 - Histograma do modelo de blocos - MgO.



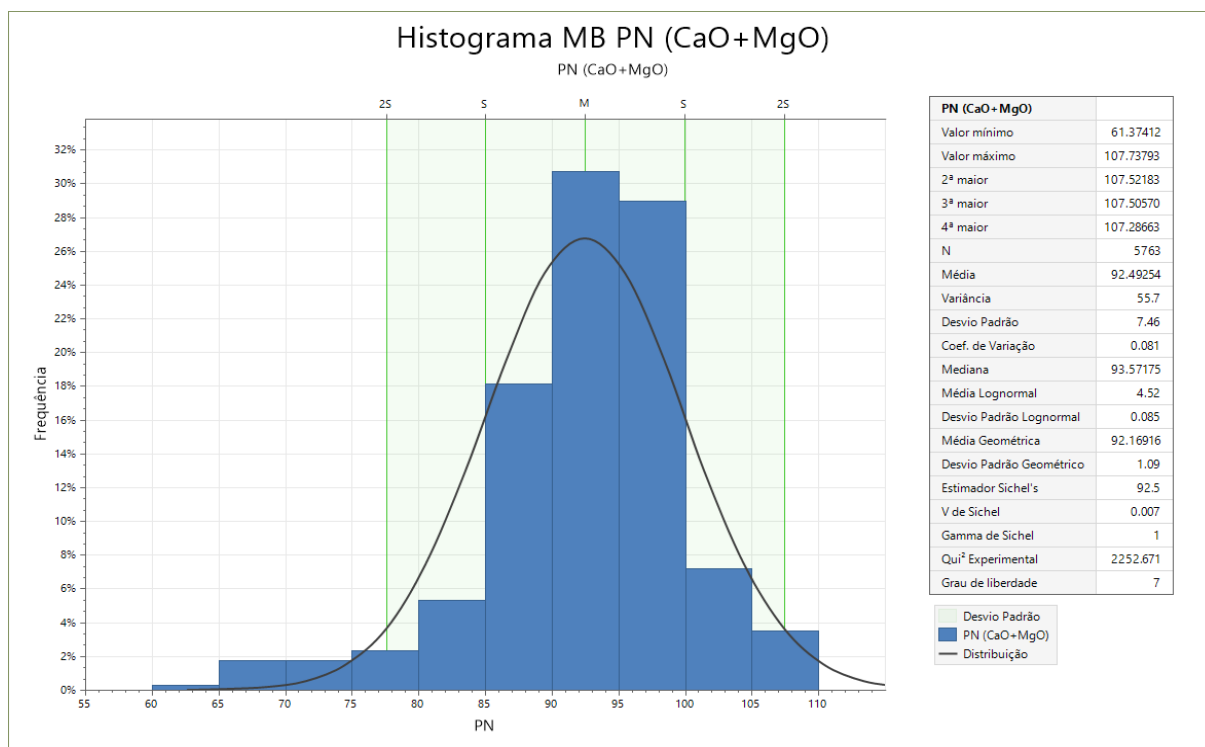
Fonte: autora.

Figura 34 - Histograma do modelo de blocos - PN calculado.



Fonte: autora.

Figura 35 - Histograma do modelo de blocos - PN (CaO+MgO).



Fonte: autora.

Em relação à análise bivariada, a matriz de correlação linear do modelo de blocos (tabela 12) mostra que todas as variáveis apresentam correlações positivas

entre si, com coeficientes de Pearson acima de 0,6. Esse comportamento já era esperado, pois os modelos foram estimados a partir do mesmo conjunto de dados dos furos, o que naturalmente gera relações semelhantes entre as variáveis.

Em comparação com os dados originais dos furos, observa-se que as correlações no modelo de blocos são, de modo geral, ligeiramente mais altas. Isso ocorre porque o processo de estimativa tende a suavizar a variabilidade local. Assim, relações que já eram fortes nos dados de entrada tornam-se ainda mais evidentes nos modelos.

Assim como nos furos, o MgO mantém a maior correlação com os PNs, superando o CaO. Esse comportamento continua coerente com o caráter dolomítico do depósito, no qual a proporção de magnésio exerce forte influência sobre os valores de neutralização. O CaO também apresenta correlação positiva com os PNs, porém em magnitude menor, refletindo sua menor participação relativa na composição da rocha dolomítica.

A correlação entre CaO e MgO, embora positiva, permanece como a mais baixa entre os pares analisados (0,747), repetindo o padrão observado nos furos. Essa menor correlação sugere que Ca e Mg continuam variando de forma relativamente independente dentro do corpo mineralizado, o que é compatível com heterogeneidades típicas de depósitos carbonáticos, onde variações composicionais ocorrem em função de processos deposicionais e diagenéticos.

A forte concordância entre as correlações dos PNs (tanto medidos quanto calculados), todos com coeficientes próximos ou superiores a 0,99, o que reforça a consistência interna do modelo e indica que as estimativas preservaram o comportamento conjunto das variáveis.

Tabela 12 - Matriz de correlação linear das variáveis - modelos de blocos.

	<b>PN</b>	<b>PN ácido</b>	<b>CaO(%)</b>	<b>MgO(%)</b>	<b>PN Calculado</b>	<b>PN (CaO+MgO)</b>
<b>PN</b>	1					
<b>PN ácido</b>	0,998	1				
<b>CaO(%)</b>	0,888	0,902	1			
<b>MgO(%)</b>	0,959	0,955	0,747	1		
<b>PN Calculado</b>	0,992	0,996	0,914	0,953	1	
<b>PN (CaO+MgO)</b>	0,992	0,996	0,914	0,953	1,000	1

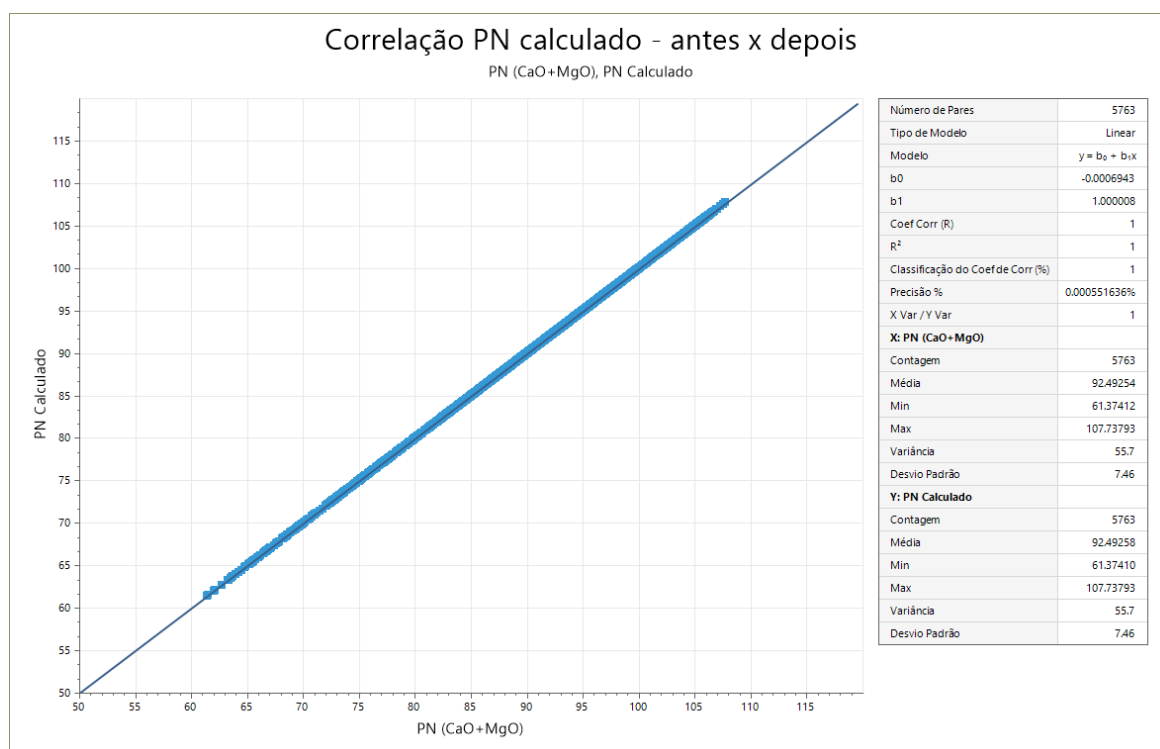
Fonte: autora.

Além das variáveis dos furos, foi incluída no modelo de blocos a variável PN (CaO+MgO), calculada diretamente no *software Micromine* a partir dos modelos estimados de CaO e MgO. Essa variável não aparece na etapa dos furos, pois sua construção depende do resultado da interpolação do CaO e MgO, e, portanto, só pode ser obtida após o cálculo dos respectivos modelos de blocos.

Para verificar a consistência dessa nova variável, a comparação mais adequada é com o PN calculado, que é obtido pela mesma fórmula, porém aplicado diretamente aos valores de CaO e MgO dos furos, antes da estimativa. No modelo de blocos, elaborou-se o gráfico de dispersão entre PN calculado x PN (CaO+MgO) (figura 30), que resultou em um coeficiente de correlação igual a 1, com  $R^2 = 1$ .

Esse comportamento indica que os dois PNs calculados apresentam uma relação perfeitamente linear, o que era esperado, já que ambos seguem exatamente a mesma expressão matemática. A diferença principal entre eles é apenas o momento em que são obtidos, um antes da estimativa (a partir dos dados dos furos) e outro depois (a partir dos modelos de CaO e MgO). Como os modelos de CaO e MgO apresentaram boa coerência com os dados originais, o PN derivado desses modelos também reproduziu integralmente o PN calculado inicial.

Figura 36 - Gráfico de dispersão correlacionando os modelos de blocos - PN calculado x PN (CaO+MgO).



Fonte: autora.

## 5.5 Validação do modelo de blocos

### 5.5.1 Análise das médias e quartis

#### 5.5.1.1 Análise das médias

A análise das médias aritméticas tem como objetivo verificar se o comportamento central dos valores estimados se mantém consistente com aquele observado nos dados amostrais. Esse tipo de comparação é importante para confirmar se o método de interpolação reproduz adequadamente a tendência geral dos teores.

Na comparação entre as médias aritméticas dos furos e as médias estimadas pelo modelo de blocos, apresentados na tabela 13, observa-se que todas as variáveis apresentaram diferenças muito pequenas, tanto em valores absolutos quanto em termos percentuais. Esse comportamento indica que o modelo conseguiu reproduzir de forma coerente a tendência central dos dados dos furos.

Tabela 13 - Comparação das médias dos furos e dos modelos de blocos.

	Média aritmética dos furos	Média aritmética dos modelos	Diferença	Diferença (%)
PN	94,149	94,782	0,63	0,67
PN ácido	93,632	94,188	0,56	0,59
CaO	27,420	27,335	0,09	0,31
MgO	17,284	17,566	0,28	1,63
PN calculado	91,946	92,493	0,55	0,59
PN (CaO+MgO)	91,946	92,493	0,55	0,59

Fonte: autora.

Conforme observado na tabela 13, para o PN, a diferença entre as médias foi de apenas 0,63, o que representa 0,67%. Já no PN ácido, a variação foi ainda menor, com 0,56 de diferença (0,59%). Esses valores demonstram que o método de estimativa manteve a média geral muito próximo da observada nos furos.

As variáveis químicas CaO e MgO também apresentaram comportamento coerente. O CaO mostrou diferença de apenas 0,09 (0,31%), indicando um bom alinhamento entre amostras e estimativas, enquanto o MgO, apesar de apresentar a maior diferença percentual (1,63%), ainda assim se manteve em um limite aceitável, pois o valor absoluto é baixo (0,28) e compatível com o comportamento esperado para o uso do interpolação IQD.

As médias do PN Calculado e do PN (CaO+MgO) apresentaram exatamente a mesma diferença, 0,55, correspondendo a 0,59%, reforçando que o modelo

manteve consistência não apenas nas variáveis individuais, mas também nos modelos estimados.

De forma geral, as diferenças observadas, todas inferiores a 2%, apresentam uma pequena superestimativa dos valores do modelo em comparação com os furos. Cabe salientar que, conforme verificado na análise estatística univariada, não houve extrapolação, os mínimos e máximos do modelo permaneceram totalmente dentro dos intervalos observados nos furos. Assim, mesmo com a pequena elevação das médias, o modelo preservou adequadamente a distribuição dos dados e demonstrou estabilidade na estimativa.

#### **5.5.1.2 Análise dos quartis**

Na validação do modelo de blocos, utilizou-se a análise por quartis, comparando os intervalos de Q1 = 0–25%, Q2 = 25–50%, Q3 = 50–75% e Q4 = 75–100% entre os furos de sondagem e os valores estimados. Esse tipo de validação permite avaliar se o modelo segue o mesmo comportamento estatístico dos dados reais, analisando especialmente as médias, os mínimos e os máximos dentro de cada faixa de percentil. Dessa forma, é possível verificar se o modelo representa corretamente o depósito ou se está produzindo valores fora da realidade.

De maneira geral, observou-se que o modelo apresentou boa coerência em relação aos furos. As médias estimadas ficaram muito próximas das médias dos furos em praticamente todos os intervalos, indicando que o método de interpolação não distorceu a tendência local dos dados. Essa proximidade reforça que o modelo manteve o comportamento natural das variáveis ao longo do depósito.

Esse comportamento apareceu de forma consistente para todas as variáveis analisadas: PN, PN Ácido, CaO, MgO, PN Calculado e PN(CaO+MgO), conforme pode ser observado nas tabelas 14, 15, 16, 17, 18 e 19.

Nos percentis mais baixos (0–25%), o modelo apresentou uma leve suavização dos valores, mesmo assim, os mínimos permanecem dentro dos limites dos furos. Da mesma forma, nos intervalos mais altos (75–100%), os máximos ficaram compatíveis com os valores observados, sem ultrapassar os limites das amostras.

De forma geral, considerando todas as classes de quartis e todas as variáveis, o modelo de blocos mostrou comportamento estável e coerente, respeitando a distribuição estatística dos furos e sem gerar valores artificiais. Assim,

conclui-se que a validação por quartis foi satisfatória, indicando que o modelo representa adequadamente os dados amostrados.

Tabela 14 - Análise dos quartis - PN dos furos e do modelo de blocos.

		Média	Variância	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Contagem	Min	Max
Do percentil	Para percentil	Furos						
0	25	75,63	83,55	9,14	0,12	22	56,25	86,00
25	50	93,76	12,13	3,48	0,04	22	86,49	98,50
50	75	101,66	2,47	1,57	0,02	22	98,75	104,29
75	100	107,34	5,93	2,44	0,02	19	104,31	112,53
		Modelo de blocos						
0	25	84,37	55,66	7,46	0,09	1441	59,09	91,35
25	50	93,73	1,61	1,27	0,01	1441	91,36	95,79
50	75	97,67	1,10	1,05	0,01	1441	95,79	99,40
75	100	103,36	11,31	3,36	0,03	1440	99,40	111,04

Fonte: autora.

Tabela 15 - Análise dos quartis - PN ácido dos furos e do modelo de blocos.

		Média	Variância	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Contagem	Min	Max
Do percentil	Para percentil	Furos						
0	25	75,43	81,05	9,00	0,12	22	57,00	85,79
25	50	93,38	10,23	3,20	0,03	22	86,75	98,75
50	75	101,25	1,82	1,35	0,01	22	99,00	103,25
75	100	106,19	6,28	2,51	0,02	19	103,25	111,41
		Modelo de blocos						
0	25	84,04	54,33	7,37	0,09	1441	59,93	90,77
25	50	93,25	1,65	1,28	0,01	1441	90,79	95,21
50	75	97,02	1,01	1,01	0,01	1441	95,21	98,64
75	100	102,45	10,75	3,28	0,03	1440	98,64	109,93

Fonte: autora.

Tabela 16 - Análise dos quartis - CaO dos furos e do modelo de blocos.

		Média	Variância	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Contagem	Min	Max
Do percentil	Para percentil	Furos						
0	25	22,06	5,26	2,29	0,10	22	18,18	26,02
25	50	27,46	0,39	0,62	0,02	22	26,35	28,32
50	75	29,46	0,26	0,51	0,02	22	28,60	29,99
75	100	31,22	9,38	3,06	0,10	19	30,00	43,74
Modelo de blocos								
0	25	24,85	2,14	1,46	0,06	1441	19,35	26,18
25	50	26,85	0,29	0,54	0,02	1441	26,18	27,97
50	75	28,22	0,02	0,16	0,01	1441	27,97	28,53
75	100	29,42	0,48	0,69	0,02	1440	28,53	34,86

Fonte: autora.

Tabela 17 - Análise dos quartis - MgO dos furos e do modelo de blocos.

		Média	Variância	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Contagem	Min	Max
Do percentil	Para percentil	Furos						
0	25	13,46	4,85	2,20	0,16	22	8,46	15,74
25	50	17,00	0,43	0,66	0,04	22	15,85	18,11
50	75	18,79	0,12	0,35	0,02	22	18,14	19,35
75	100	20,30	1,07	1,03	0,05	19	19,35	22,88
Modelo de blocos								
0	25	15,10	2,08	1,44	0,10	1441	10,52	16,53
25	50	17,23	0,16	0,40	0,02	1441	16,53	17,93
50	75	18,37	0,05	0,23	0,01	1441	17,93	18,75
75	100	19,56	0,46	0,68	0,03	1440	18,75	21,19

Fonte: autora.

Tabela 18 - Análise dos quartis - PN calculado dos furos e do modelo de blocos.

		Média	Variância	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Contagem	Min	Max
Do percentil	Para percentil	Furos						
0	25	74,43	57,59	7,59	0,10	22	58,60	84,07
25	50	91,79	10,54	3,25	0,04	22	85,08	97,07
50	75	99,22	1,38	1,17	0,01	22	97,18	101,18
75	100	103,98	6,30	2,51	0,02	19	101,19	109,18
Modelo de blocos								
0	25	82,74	42,40	6,51	0,08	1441	61,37	88,92
25	50	91,50	1,80	1,34	0,01	1441	88,92	93,57
50	75	95,27	0,89	0,94	0,01	1441	93,57	96,79
75	100	100,47	10,21	3,20	0,03	1440	96,80	107,74

Fonte: autora.

Tabela 19 - Análise dos quartis - PN calculado dos furos e do modelo de blocos do PN (CaO+MgO).

		Média	Variância	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Contagem	Min	Max
		Furos						
Do percentil	Para percentil							
0	25	74,43	57,59	7,59	0,10	22	58,60	84,07
25	50	91,79	10,54	3,25	0,04	22	85,08	97,07
50	75	99,22	1,38	1,17	0,01	22	97,18	101,18
75	100	103,98	6,30	2,51	0,02	19	101,19	109,18
		Modelo de blocos						
0	25	82,74	42,40	6,51	0,08	1441	61,37	88,92
25	50	91,50	1,80	1,34	0,01	1441	88,92	93,57
50	75	95,27	0,89	0,94	0,01	1441	93,57	96,79
75	100	100,47	10,21	3,20	0,03	1440	96,80	107,74

Fonte: autora.

### 5.5.2 Análise de deriva (médias locais)

A análise de deriva, ou análise das médias locais, é usada para verificar se os dados mantêm um comportamento estável ao longo do espaço ou se apresentam alguma tendência local. Ela ajuda a identificar variações sistemáticas que podem influenciar a modelagem. Ao observar como as médias mudam em diferentes intervalos, é possível perceber se existe algum padrão de deriva, ou se as tendências estão sendo mantidas, nos dados analisados neste trabalho.

As análises foram realizadas nas três direções (X, Y e Z), e serão apresentadas de acordo com a comparação de cada variável, em relação aos furos e ao modelo de blocos.

Cabe salientar que o modelo de blocos do PN (CaO+MgO) não tinha dados diretos dos furos, assim como os demais, portanto, foram comparados com os dados dos furos do PN calculado, que possui a mesma forma de cálculo.

#### 5.5.2.1 Análise das médias locais em X

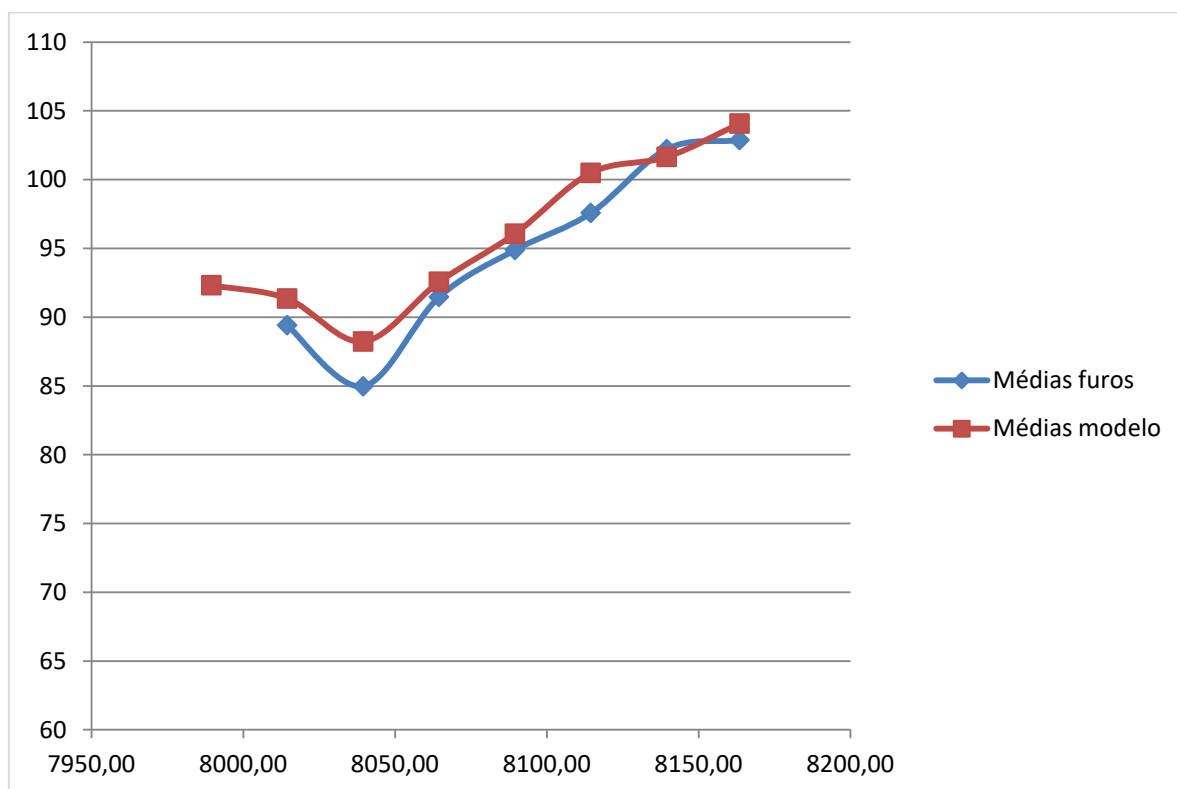
A análise no eixo X foi feita em um intervalo fixo de 25 m. Ao avaliar as médias locais em X, foi possível observar que as médias dos furos e dos modelos apresentaram ampla semelhança, com boa concordância das tendências e pouca suavização, principalmente nas variáveis PN, PN ácido, PN calculado e PN (CaO+MgO), como pode ser visto nas figuras 37, 38, 41 e 42, respectivamente. No entanto, nessas mesmas variáveis ocorreu uma leve superestimação das médias do

modelo em relação aos valores dos furos, o que pode indicar que a influência dos maiores valores de PNs é mais expressiva na direção X.

As variáveis CaO e MgO apresentaram uma concordância um pouco menos estável que as dos PNs, como observado nas figuras 39 e 40, mas ainda assim mantiveram a tendência dos dados dos furos e do modelo de blocos. Como o depósito de calcário é dolomítico, é comum que a análise das médias, ou qualquer outra análise, seja mais semelhante aos PNs do que ao CaO, e isso fica evidente quando comparamos as variáveis.

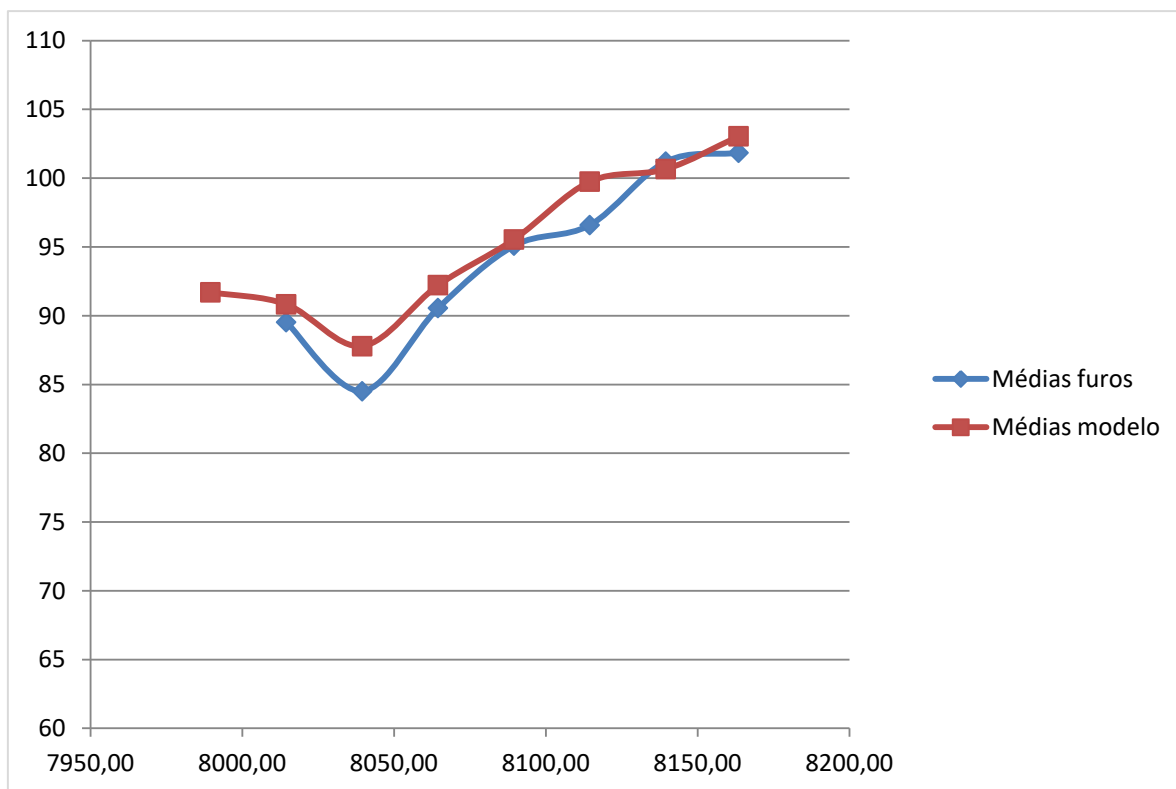
De modo geral, a análise em X foi satisfatória e, mesmo havendo uma leve superestimação, a tendência dos dados foi mantida em todos os intervalos escolhidos.

Figura 37 - Médias locais em X - PN.



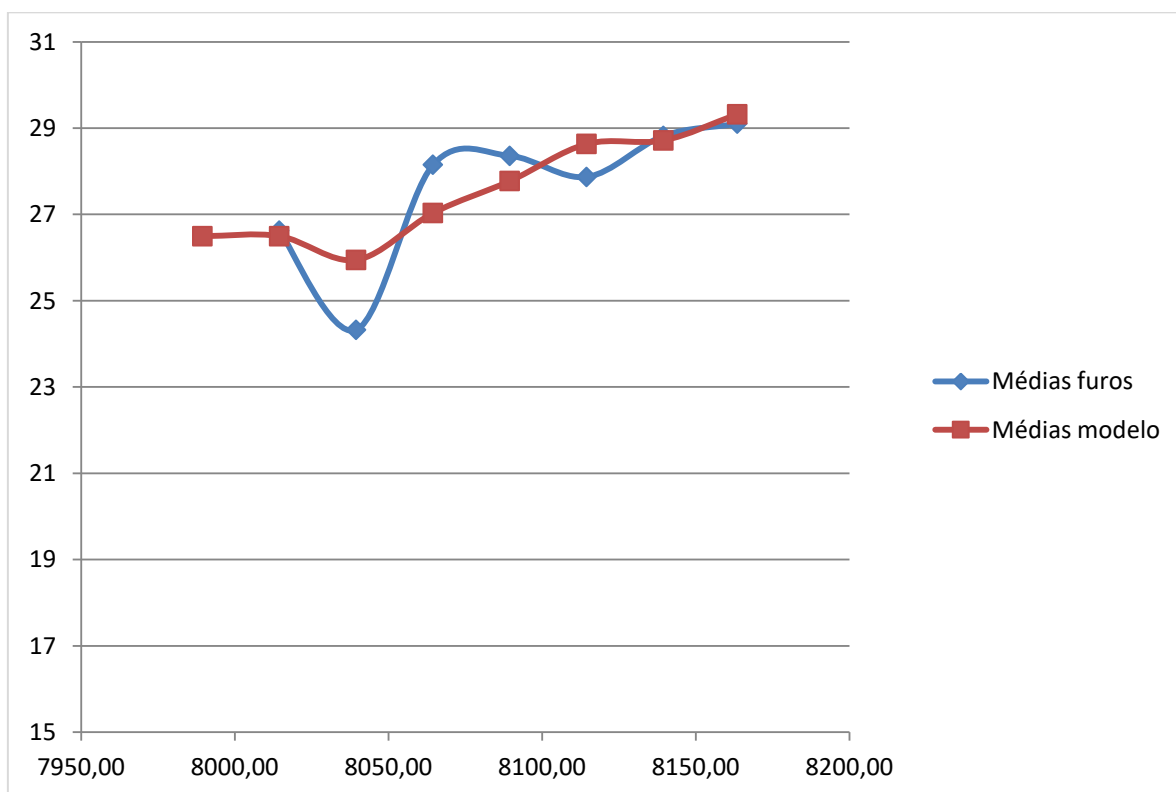
Fonte: autora.

Figura 38 - Médias locais em X - PN ácido.



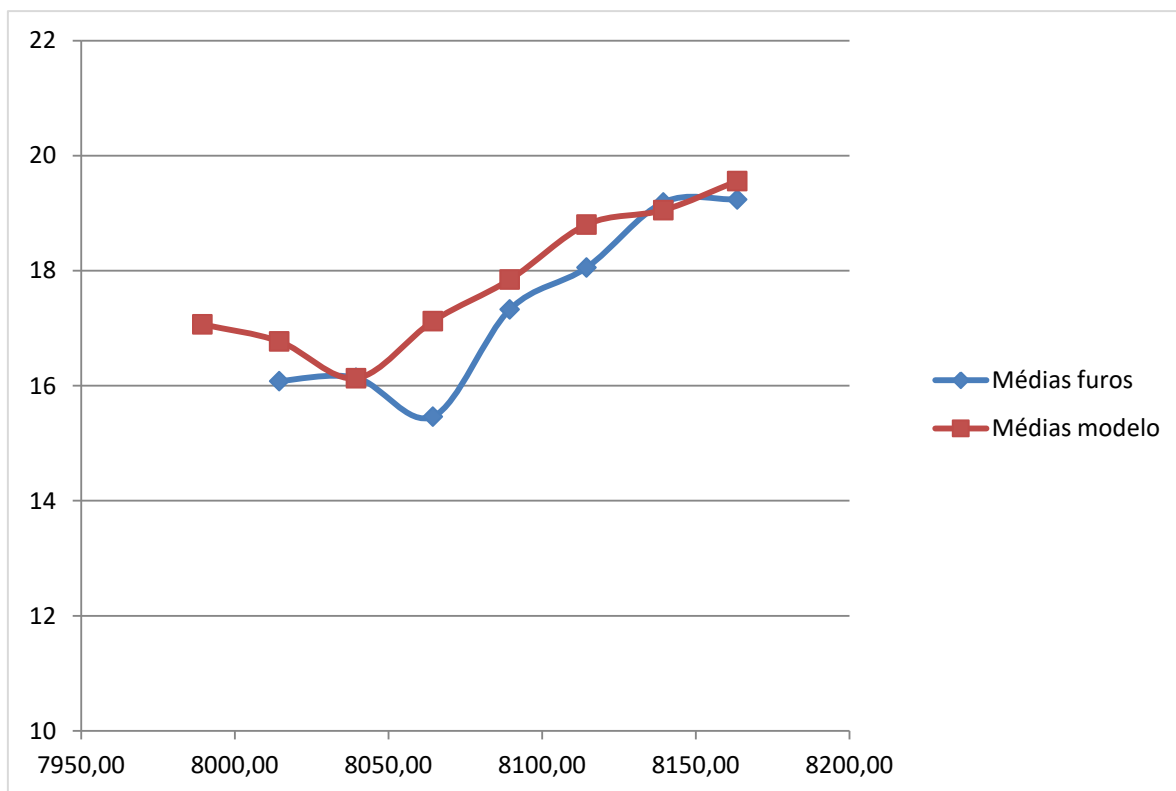
Fonte: autora.

Figura 39 - Médias locais em X - CaO.



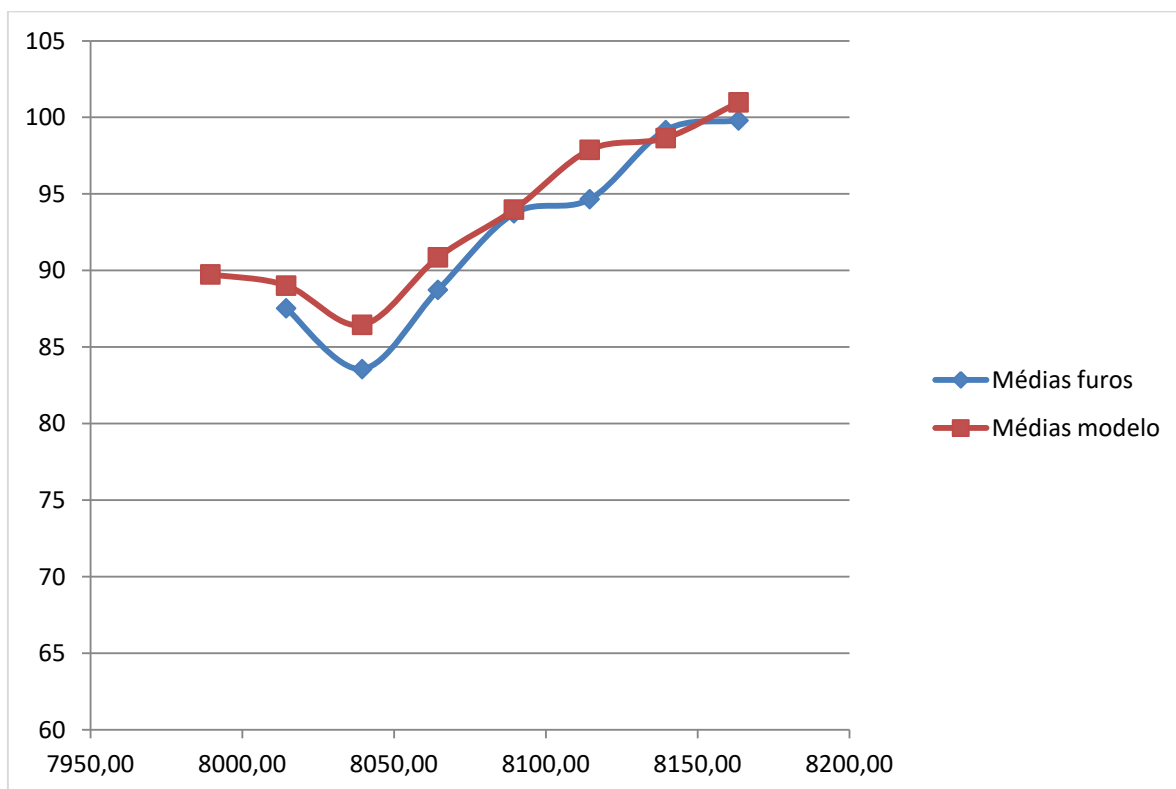
Fonte: autora.

Figura 40 - Médias locais em X – MgO.



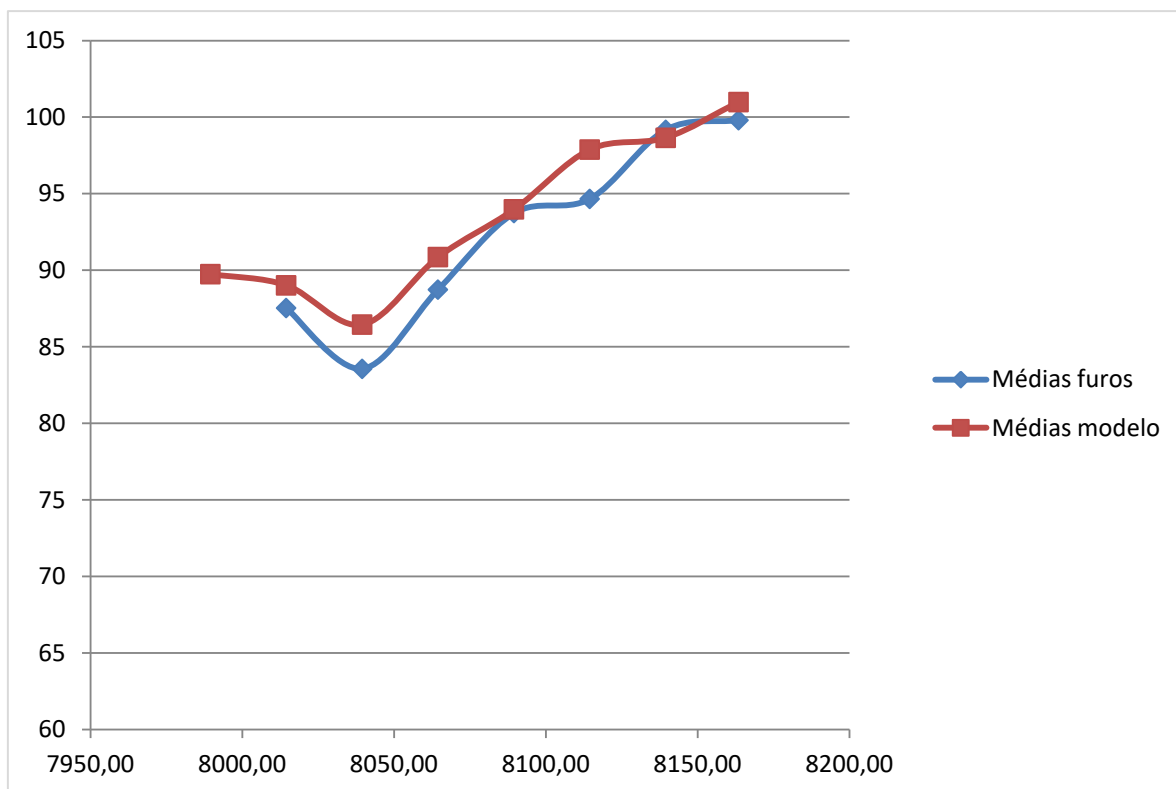
Fonte: autora.

Figura 41 - Médias locais em X - PN calculado.



Fonte: autora.

Figura 42 - Médias locais em X - PN (CaO+MgO).



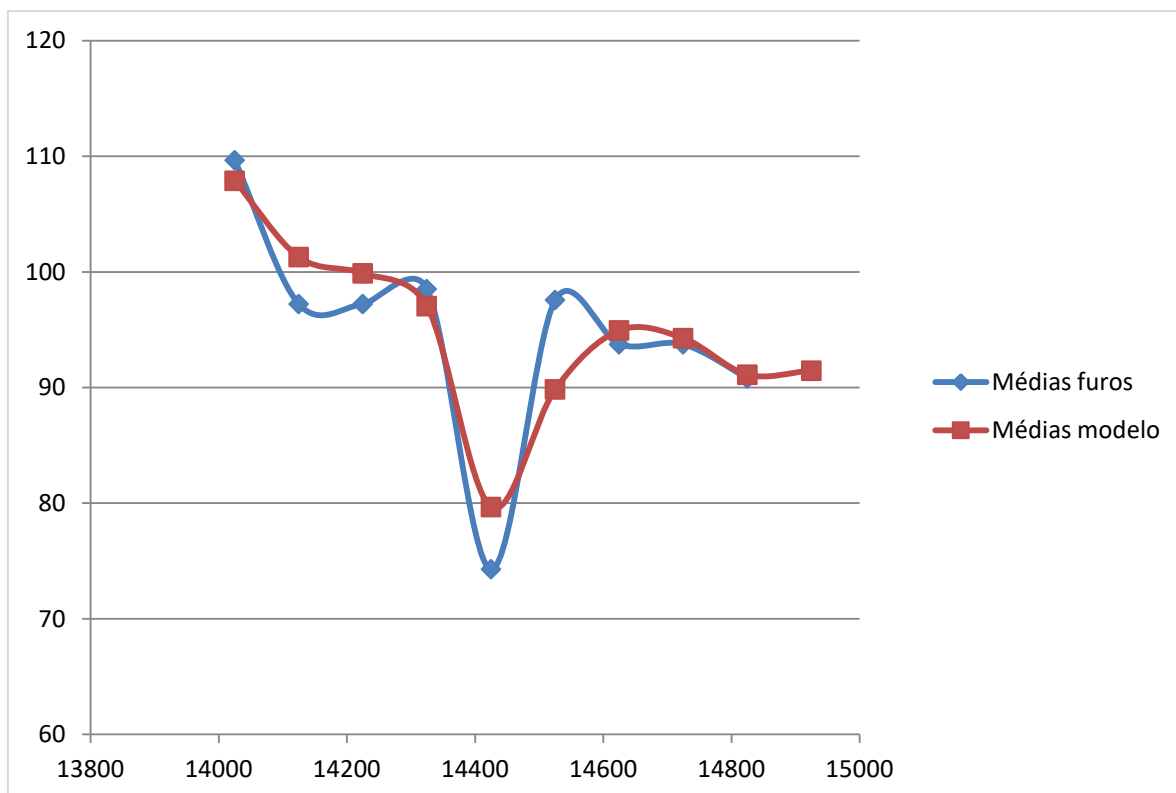
Fonte: autora.

### 5.5.2.2 Análise das médias locais em Y

A análise no eixo Y foi realizada em um intervalo fixo de 100 m, seguindo o mesmo procedimento da direção X. Ao observar as médias locais, ficou evidente que as curvas dos furos e do modelo apresentaram uma boa concordância sendo a direção Y a que mais acompanhou os picos e vales dos dados originais. As variáveis PN (figura 43), PN ácido (figura 44), PN calculado (figura 47) e PN (CaO+MgO) (figura 48) mostraram pouca suavização e responderam muito bem ao comportamento dos dados de furo, reforçando que o método de estimativa conseguiu manter a tendência geral nessa direção.

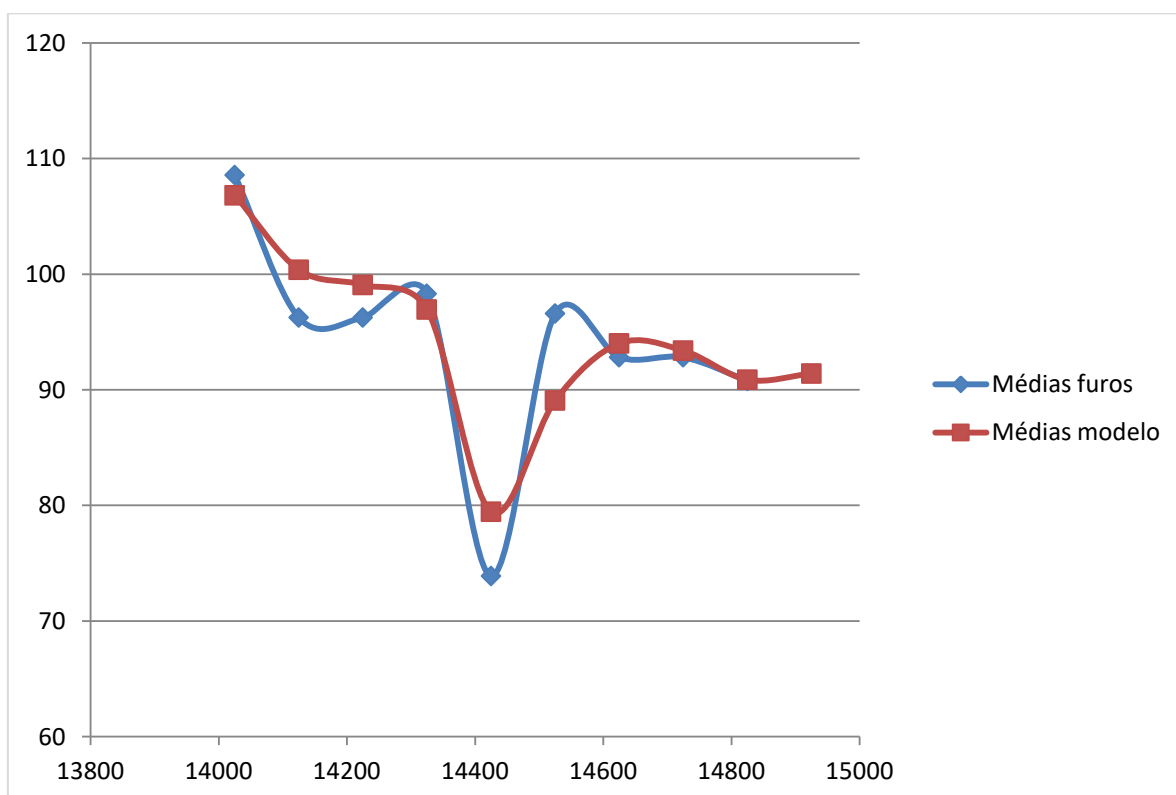
As variáveis CaO (figura 45) e MgO (figura 46) foram as que apresentaram um comportamento um pouco mais instável em Y, com oscilações maiores, quando comparadas aos PNs. Mesmo assim, ambas seguiram a tendência dos furos, e os valores médios do modelo ficaram próximos das médias dos dados originais. No conjunto, não foi possível identificar um padrão evidente de superestimação ou subestimação na direção Y, as curvas ficaram bem distribuídas ao redor dos valores centrais e representaram de forma satisfatória o comportamento real do depósito.

Figura 43 - Médias locais em Y - PN.



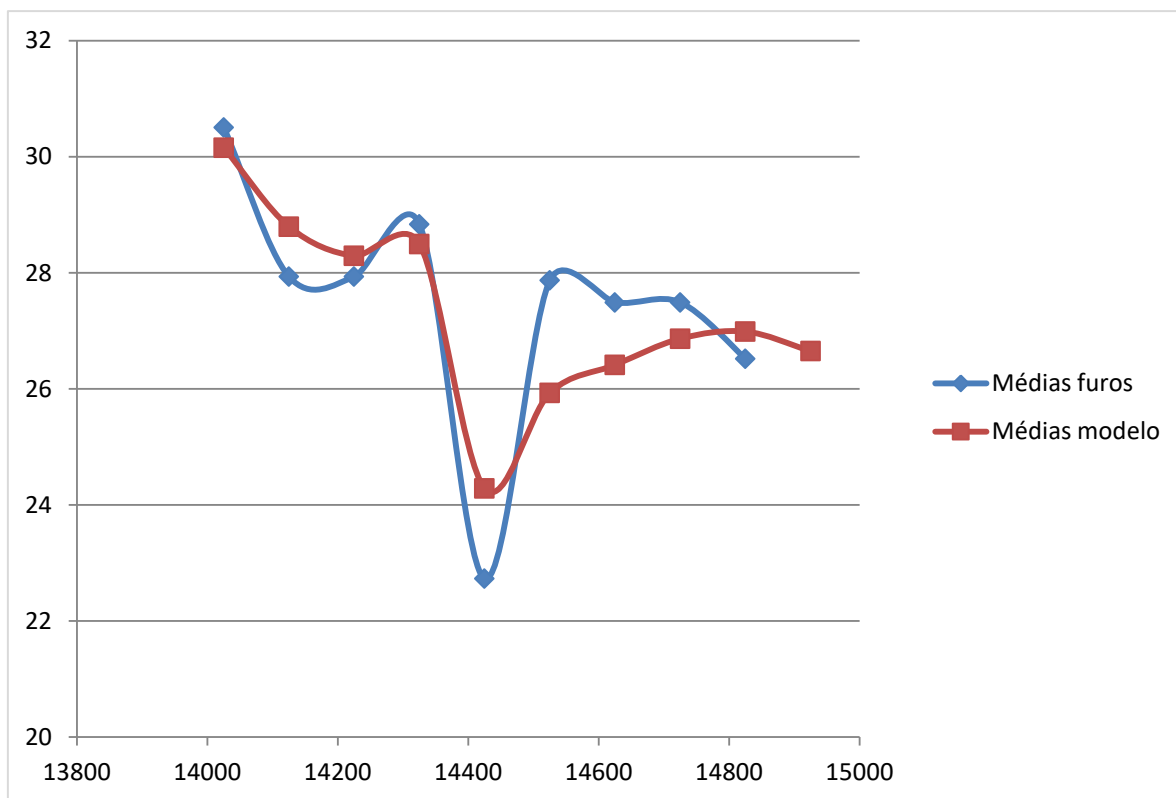
Fonte: autora.

Figura 44 - Médias locais em Y - PN ácido.



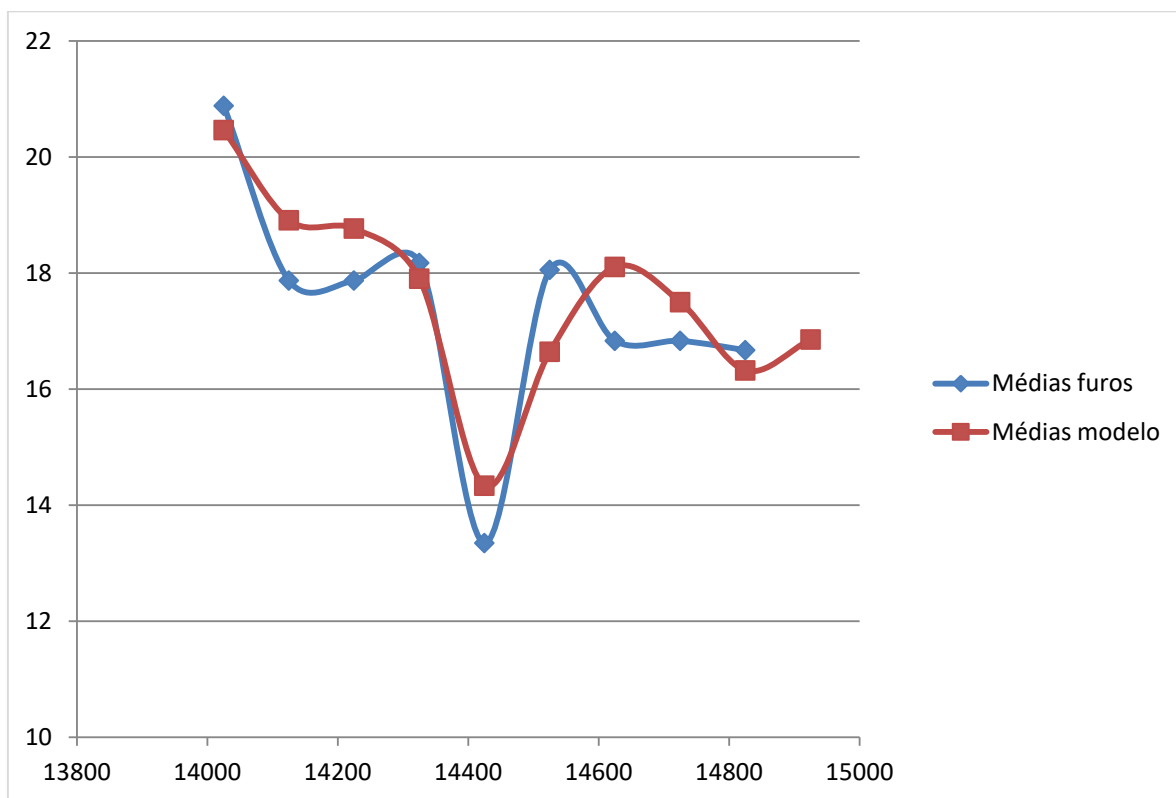
Fonte: autora.

Figura 45 - Médias locais em Y – CaO.



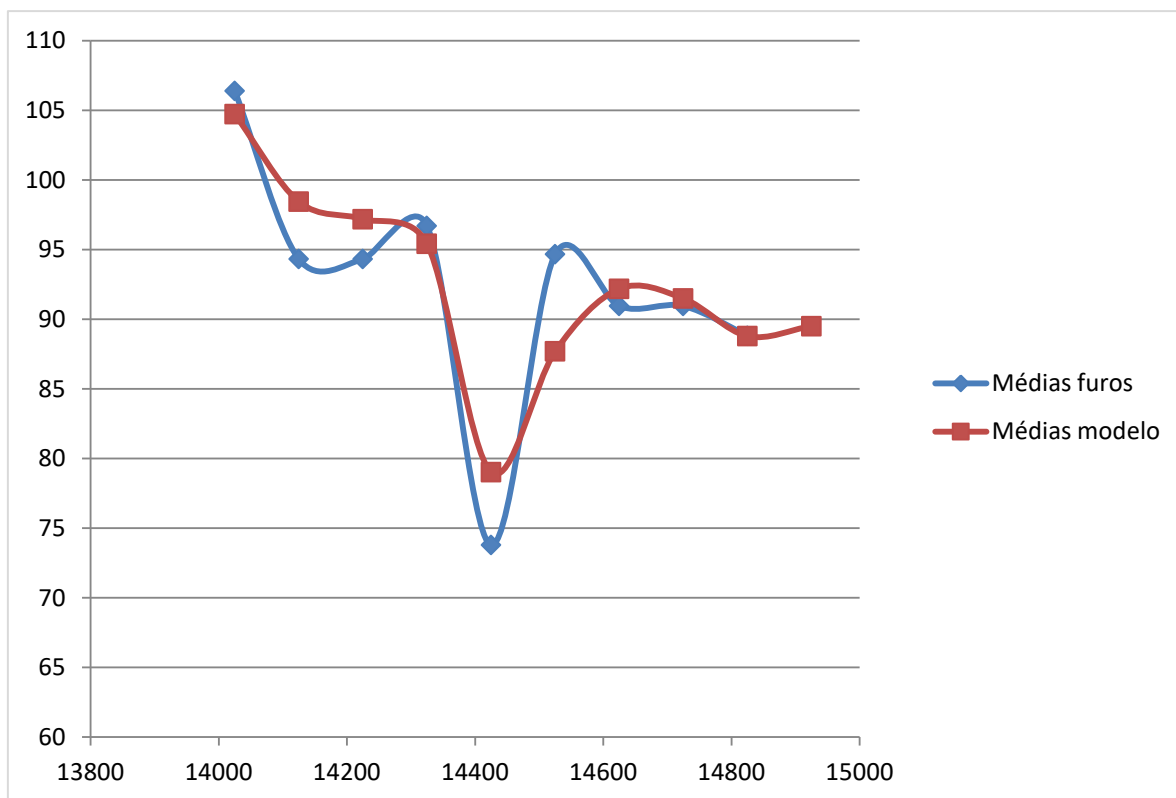
Fonte: autora.

Figura 46 - Médias locais em Y - MgO.



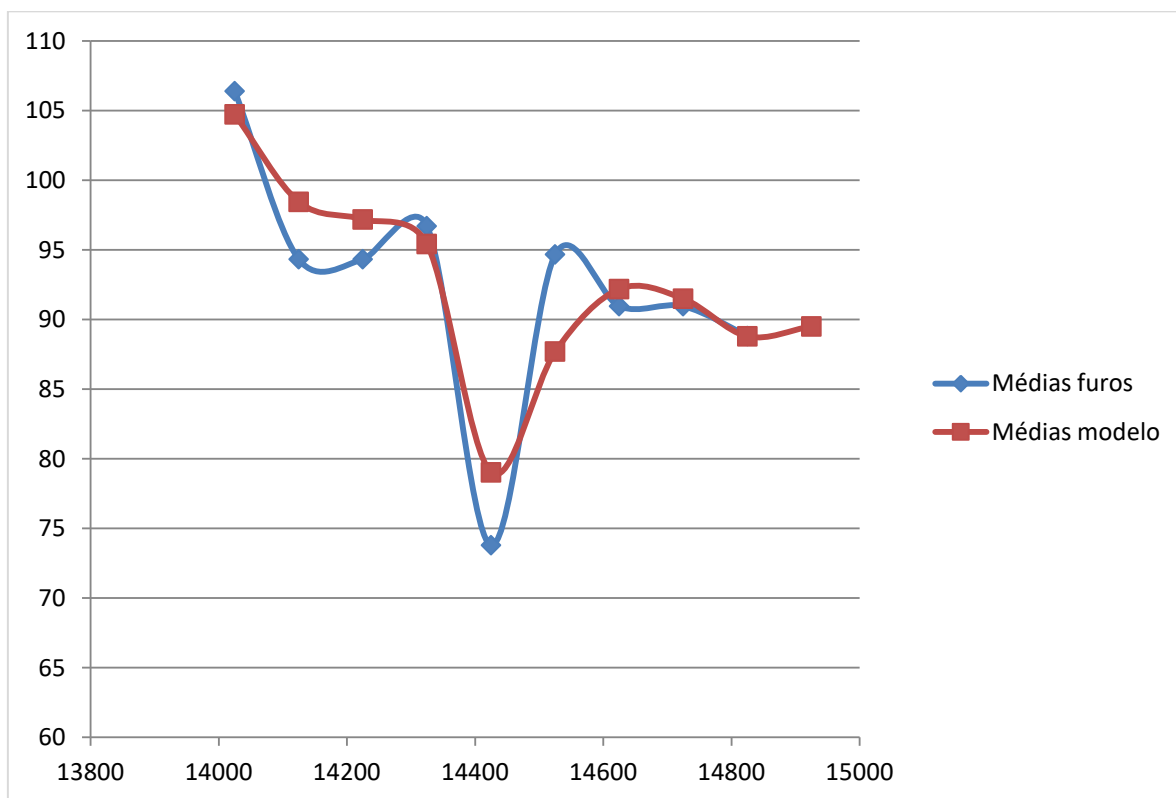
Fonte: autora.

Figura 47 - Médias locais em Y - PN calculado.



Fonte: autora.

Figura 48 - Médias locais em Y - PN (CaO+MgO).



Fonte: autora.

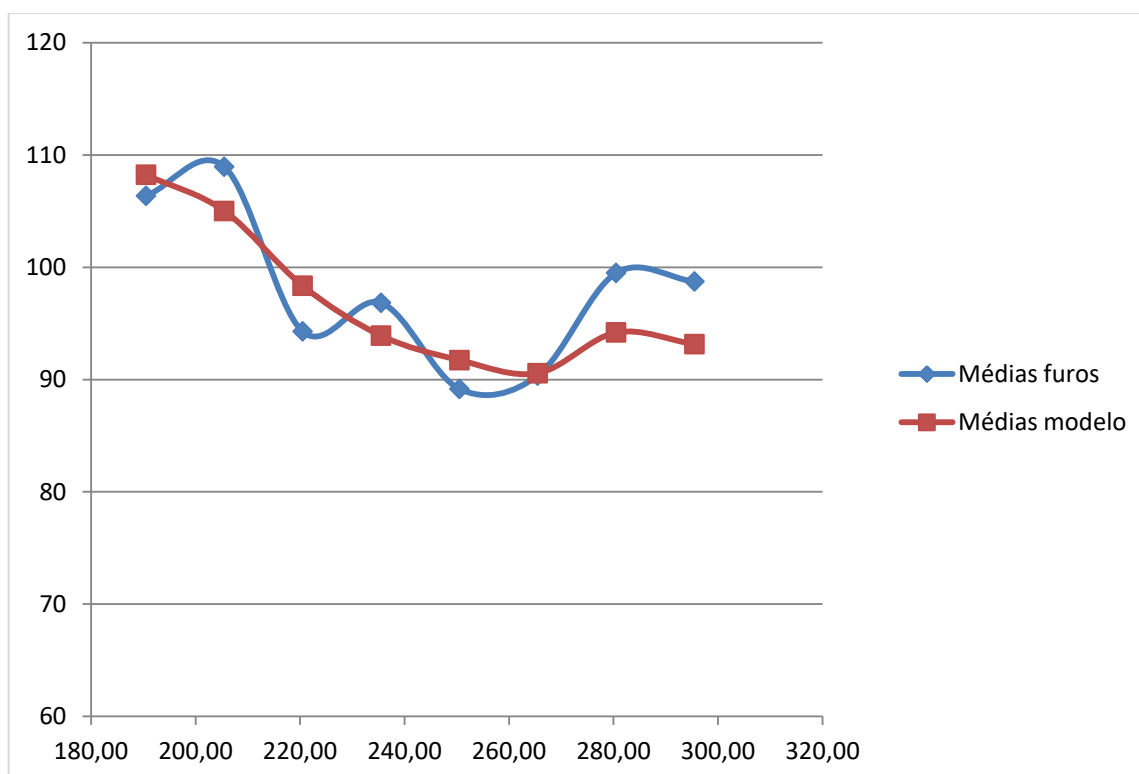
### 5.5.2.3 Análise das médias locais em Z

A análise no eixo Z foi realizada em intervalos fixos de 15 m, seguindo o mesmo procedimento aplicado nas outras direções. Nessa direção, ficou claro que ocorreu a maior suavização entre todas as análises, com as curvas apresentando menos variações bruscas e valores mais próximos das médias centrais. Mesmo com essa suavização mais pronunciada, a tendência geral dos dados foi preservada, e o modelo acompanhou o comportamento vertical (direção Z) do depósito de forma coerente.

Entre as variáveis avaliadas, o CaO (figura 51) foi a que apresentou o comportamento mais estável em Z, com as médias do modelo mais próximas das médias dos furos ao longo dos intervalos. Já o MgO (figura 52), seguido das variáveis de PN (PN (figura 49), PN ácido (figura 50), PN calculado (figura 53) e PN (CaO+MgO) (figura 54)), mostrou uma suavização mais evidente, com redução dos picos e aproximação dos valores centrais. Ainda assim, as curvas mantiveram a tendência observada nos furos, indicando que o modelo conseguiu reproduzir o padrão em Z dos teores sem alterar seu comportamento principal.

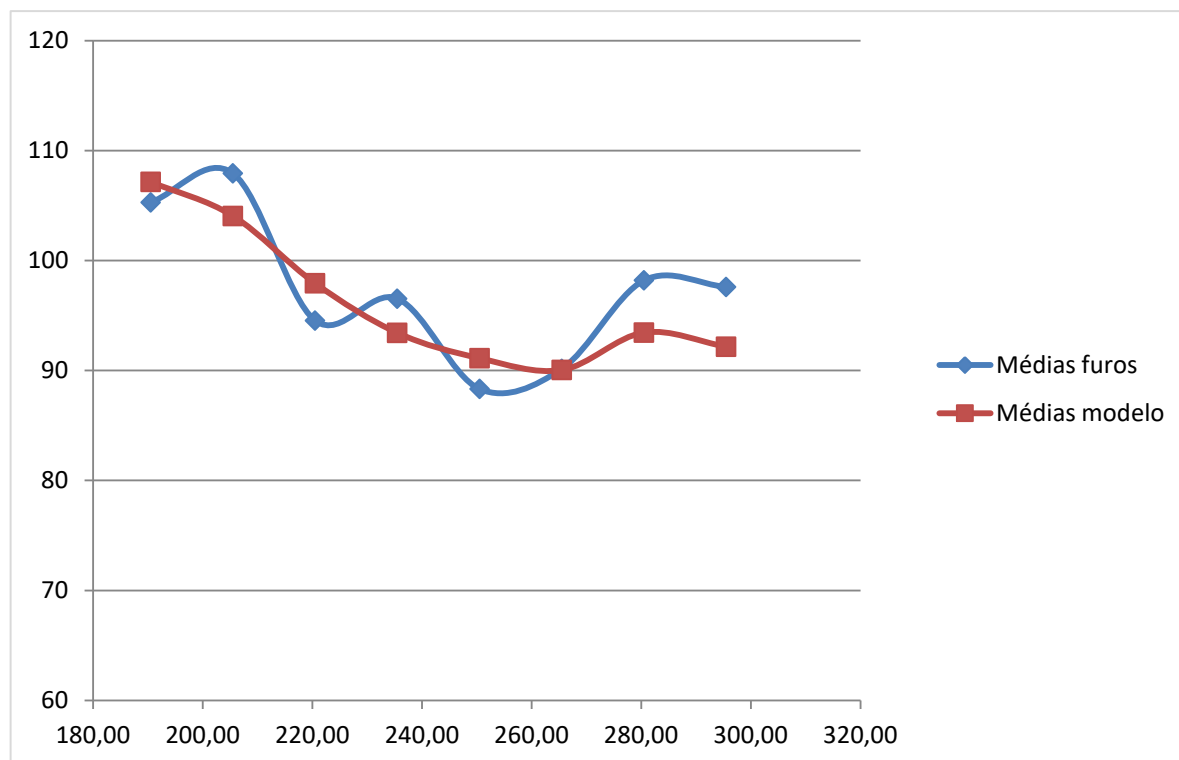
Embora Z tenha sido a direção com a maior suavização, os valores estimados permaneceram próximos das médias dos dados originais.

Figura 49 - Médias locais em Z - PN.



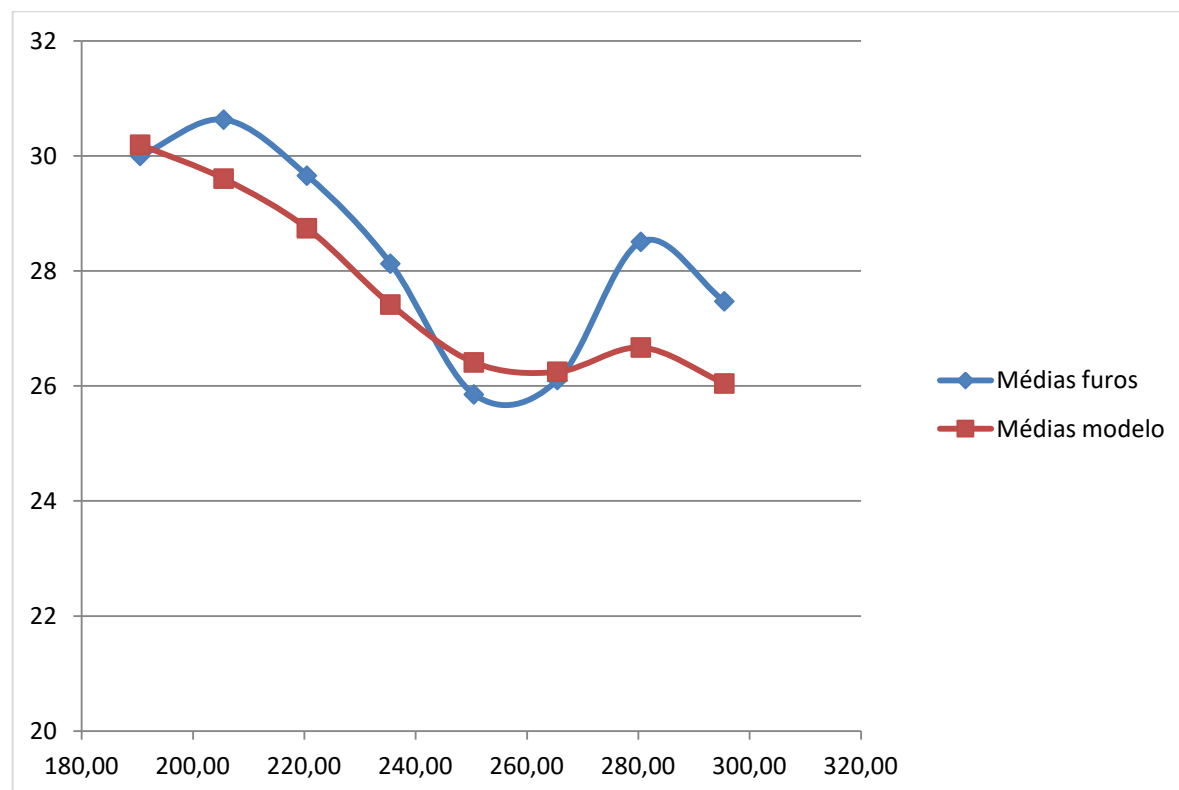
Fonte: autora.

Figura 50 - Médias locais em Z - PN ácido.



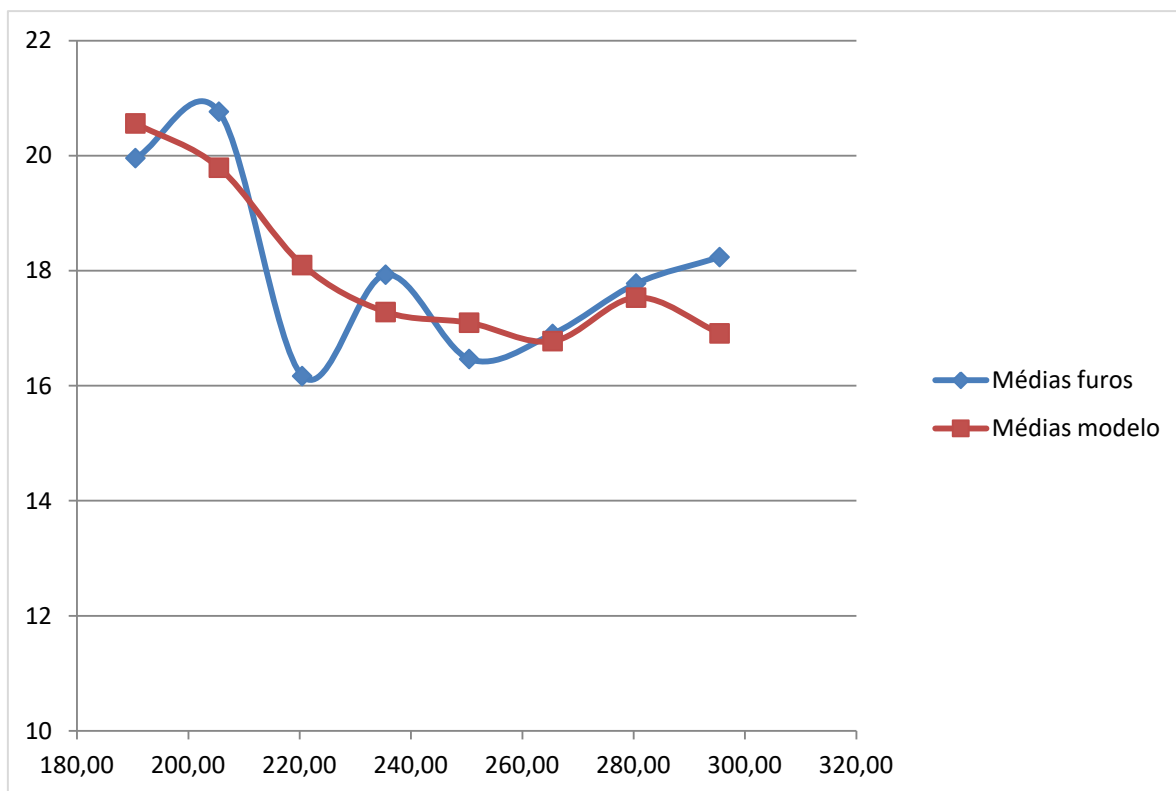
Fonte: autora.

Figura 51 - Médias locais em Z - CaO.



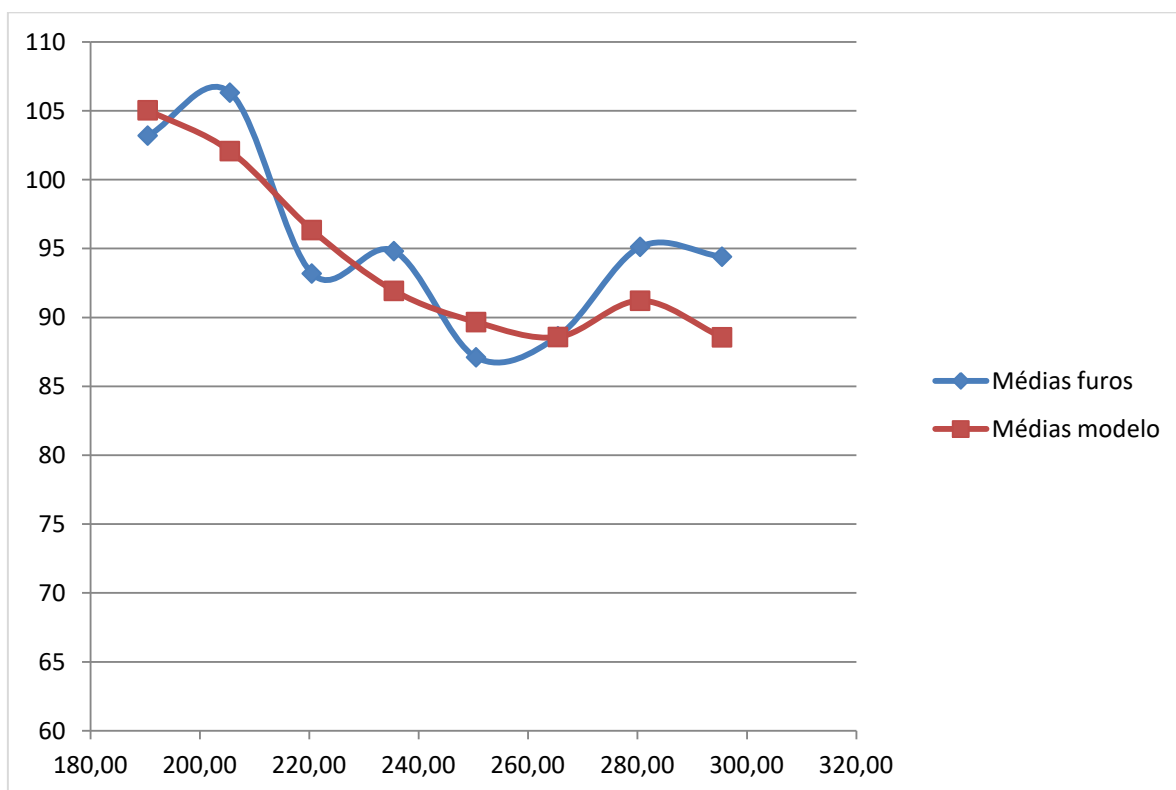
Fonte: autora.

Figura 52 - Médias locais em Z - MgO.



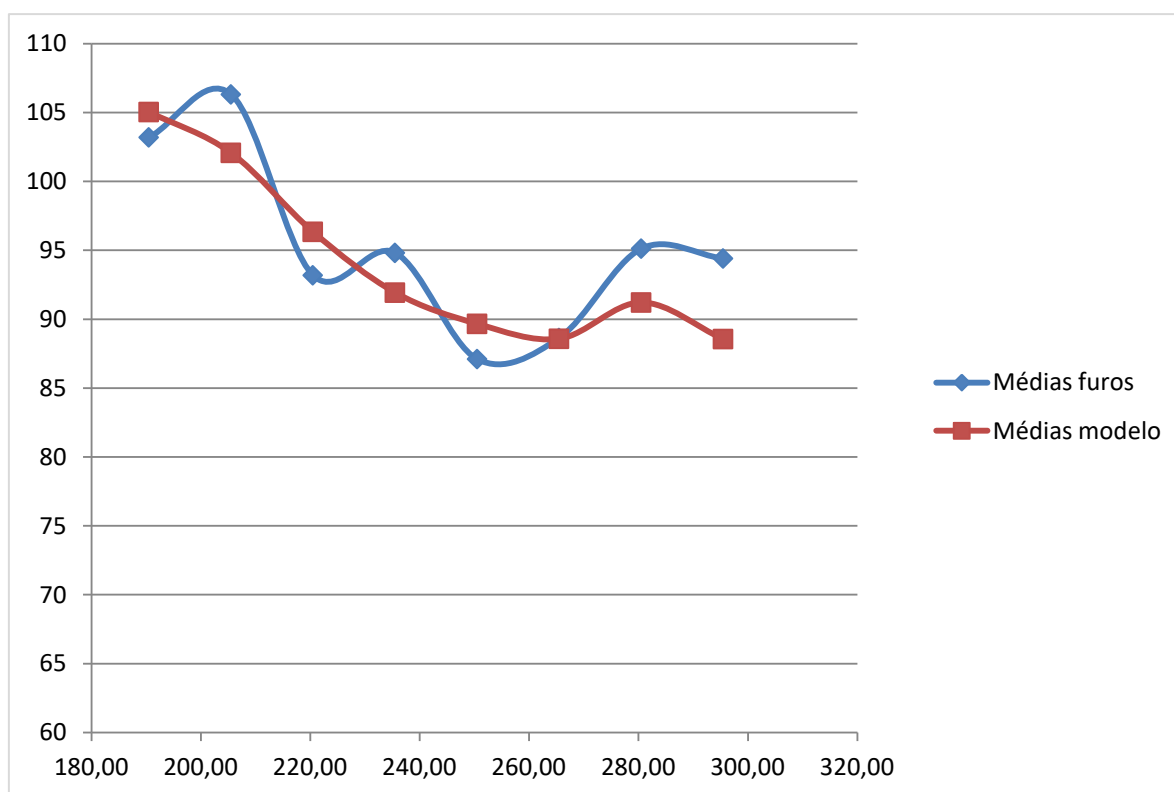
Fonte: autora.

Figura 53 - Médias locais em Z - PN calculado.



Fonte: autora.

Figura 54 - Médias locais em Z - PN (CaO+MgO).



Fonte: autora.

## 5.6 Planejamento do avanço de lavra

O planejamento de lavra foi realizado no *software Micromine*, utilizando a função de Design de Cava Dinâmico para gerar o desenho da cava. O objetivo principal do modelo foi englobar a maior quantidade possível de minério, reduzindo ao máximo o volume de estéril a ser movimentado, como pode ser observado na figura 61.

Os parâmetros utilizados para o planejamento estão apresentados na tabela 20, e foram inseridos no *software* para que fossem empregados em toda a cava. Também foi respeitada a largura mínima entre 40 e 50 m para o fundo da cava, garantindo condições adequadas de operação. Além disso, buscou-se seguir os limites físicos definidos pela poligonal de extração, o que resultou em um desenho que acompanha de forma coerente as restrições impostas para a área. Essa poligonal, por sua vez, já reflete as limitações ambientais locais, como os limites de APP's e os contornos das áreas de vegetação nativa de porte médio a avançado, conforme pode ser observado na figura 64.

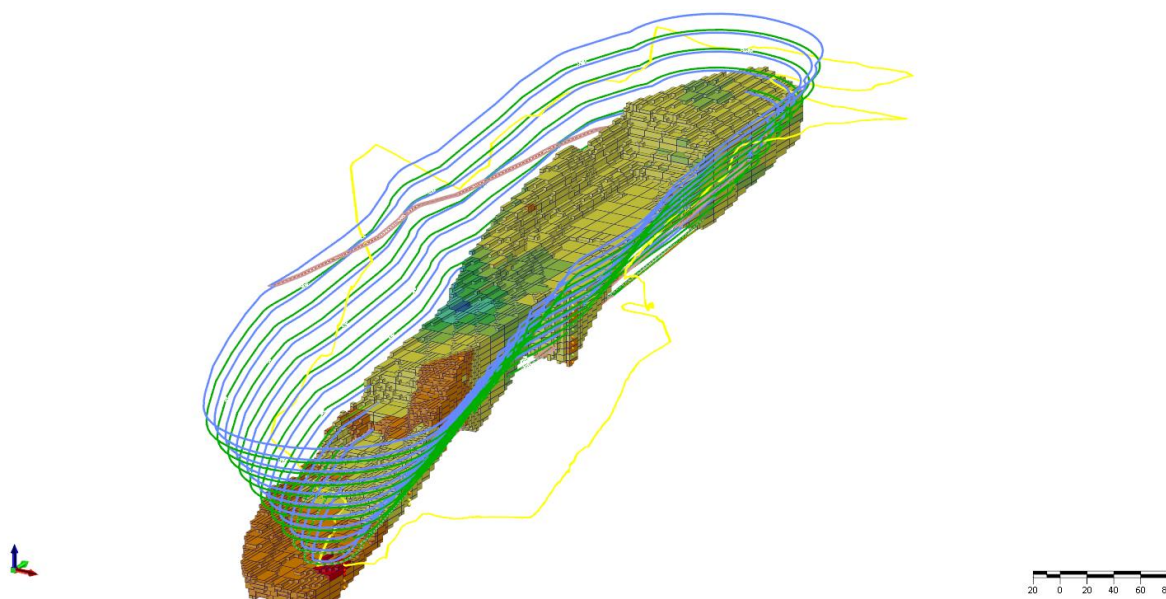
Por fim, foram definidos dois pontos de acesso distintos, para facilitar a operação de descarregamento junto à pilha de estéril e a saída do minério para o beneficiamento.

Tabela 20 - Parâmetros utilizados para design da cava operacional.

Parâmetros utilizados na cava – Design de cava dinâmico	
Ângulo de talude	80°
Berma	6 m
Altura do talude	12 m

Fonte: autora.

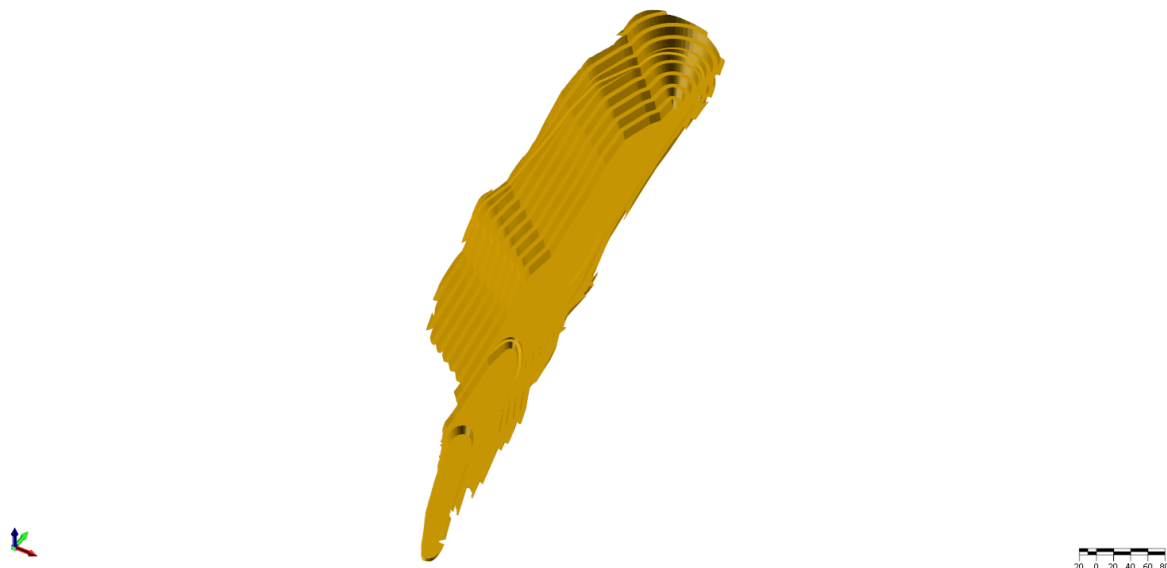
Figura 55 - Cava dinâmica em processo de construção, juntamente com o modelo de blocos e poligonal de extração (linha amarela). As linhas azul/lilás são as cristas dos taludes. As linhas em verde representam o pé dos taludes e em rosa os acessos projetados.



Fonte: autora.

Depois de realizado o desenho da cava operacional, ela foi recortada considerando a topografia atual e os limites definidos pela poligonal de extração. A partir desse processamento, obteve-se a cava projetada para o avanço da lavra, que representa a porção efetivamente possível de ser lavrada dentro das restrições impostas para a área. O resultado desse recorte pode ser observado na figura 62.

Figura 56 - Cava projetada para o avanço da lavra.



Fonte: autora.

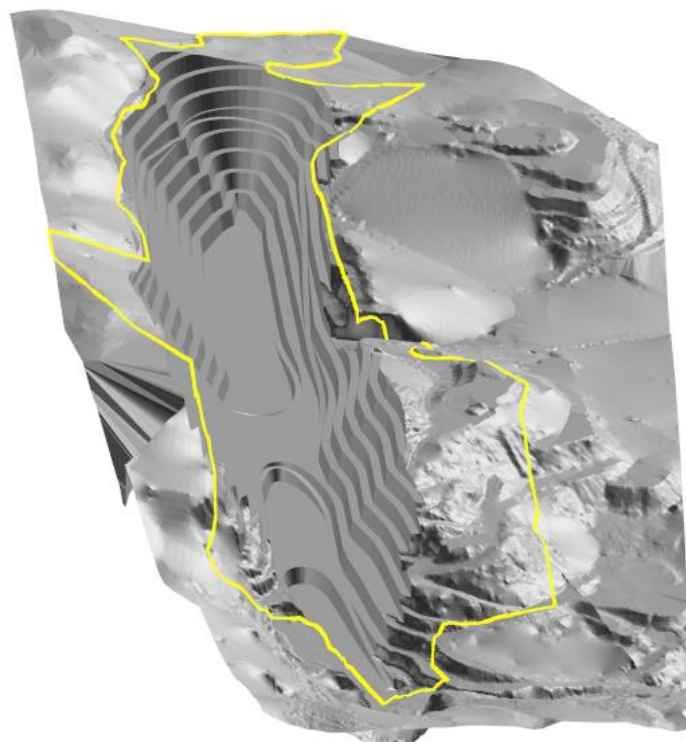
Após o recorte, foi realizada a união entre a cava projetada e a topografia atual, permitindo gerar o modelo final da cava de avanço. Esse modelo representa a configuração final prevista para o avanço, já com os limites consolidados e com os acessos planejados (figura 63 e 64).

Figura 57 - Avanço projetado juntamente com a topografia atual.



Fonte: autora.

Figura 58 - Sobreposição da poligonal de extração licenciada, para a cava projetada.



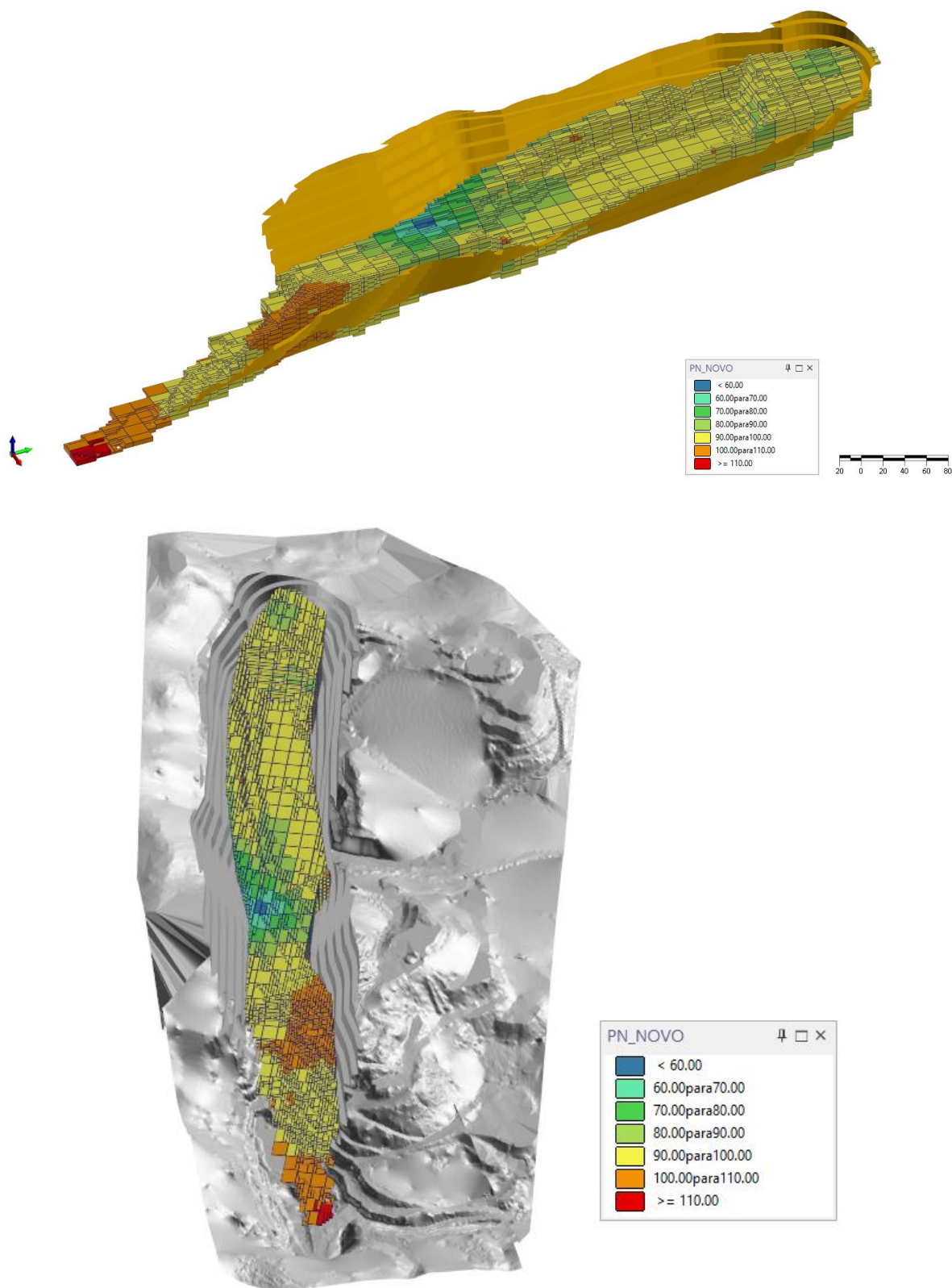
Fonte: autora.

### 5.6.1 Modelo de blocos recortado

Com a cava projetada definida, foi realizado o recorte dos modelos de blocos das variáveis PN (figura 59), PN ácido (figura 60), PN calculado (figura 61) e PN (CaO+MgO) (figura 62). Esse recorte permitiu selecionar apenas os blocos efetivamente contidos no volume lavrável, garantindo que os cálculos de volumes e tonelagens fossem representativos do avanço planejamento.

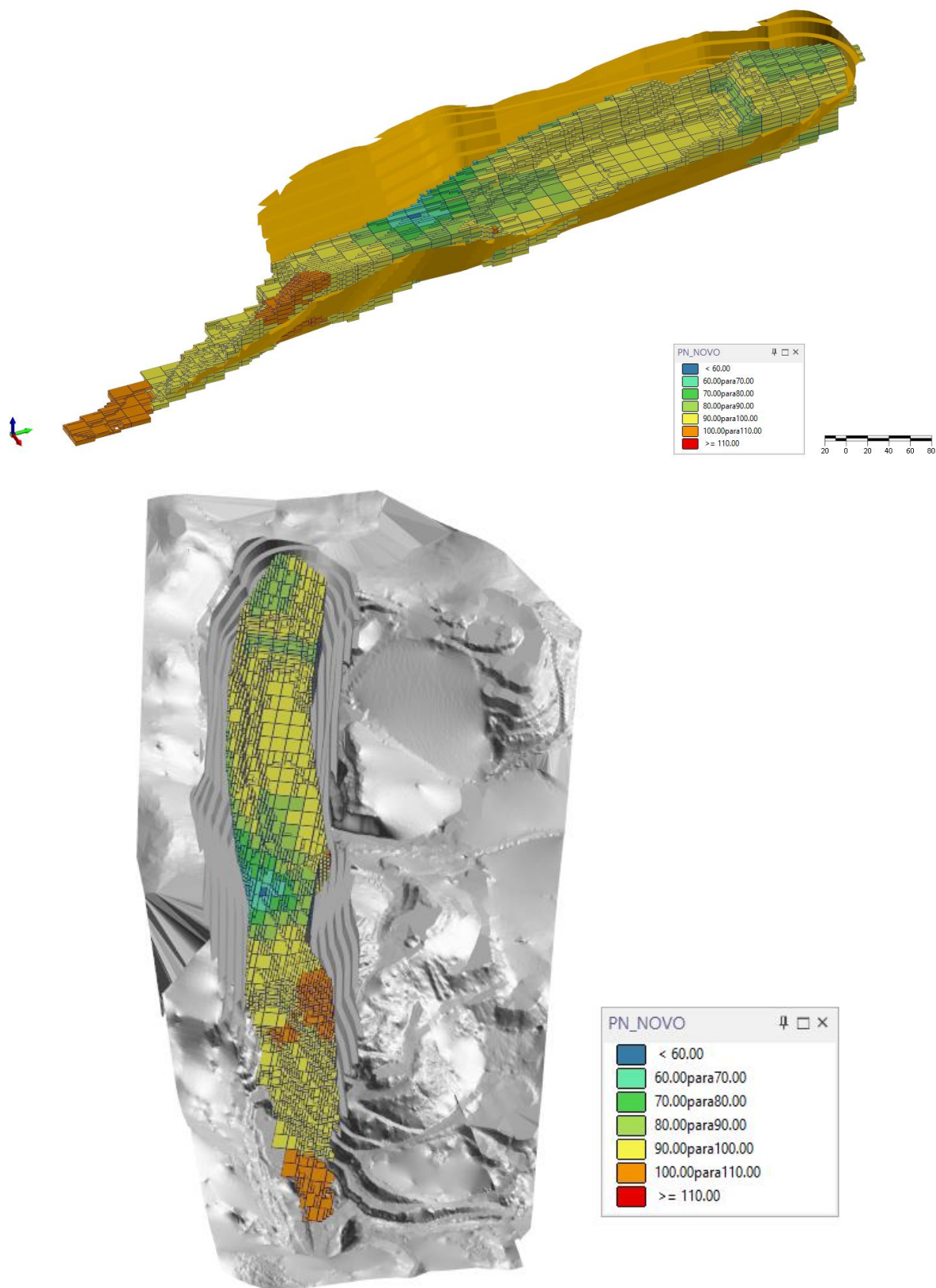
Os modelos de blocos das variáveis CaO e MgO, por sua vez, não foram consideradas nessa etapa, pois seus modelos de blocos foram elaborados exclusivamente para permitir o cálculo do PN (CaO+MgO). Dessa forma, elas não participaram da avaliação final de volumes, tonelagens ou da determinação da relação estéril/minério.

Figura 59 - Modelo de blocos recortado - PN.



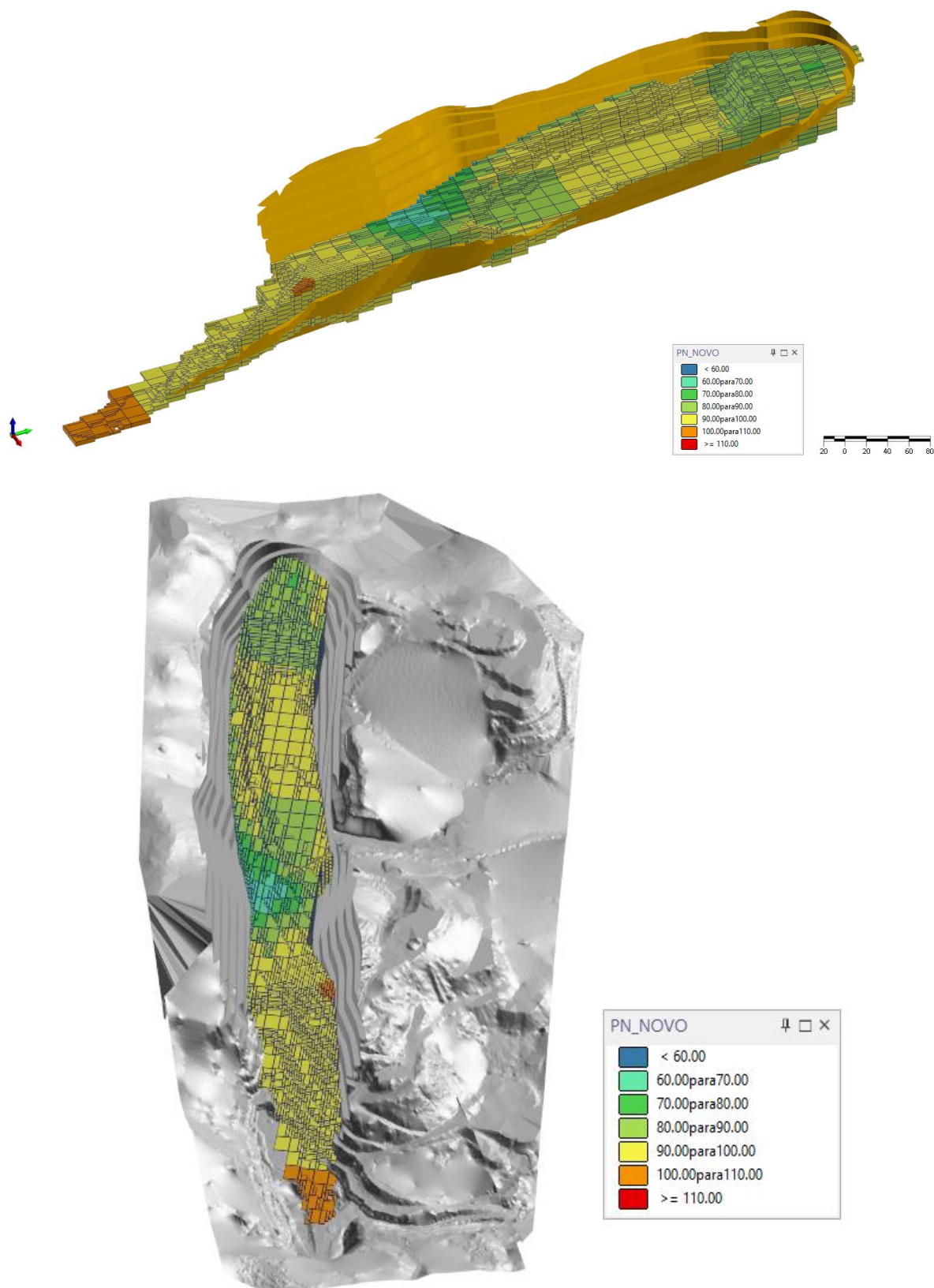
Fonte: autora.

Figura 60 - Modelo de blocos recortado - PN ácido.



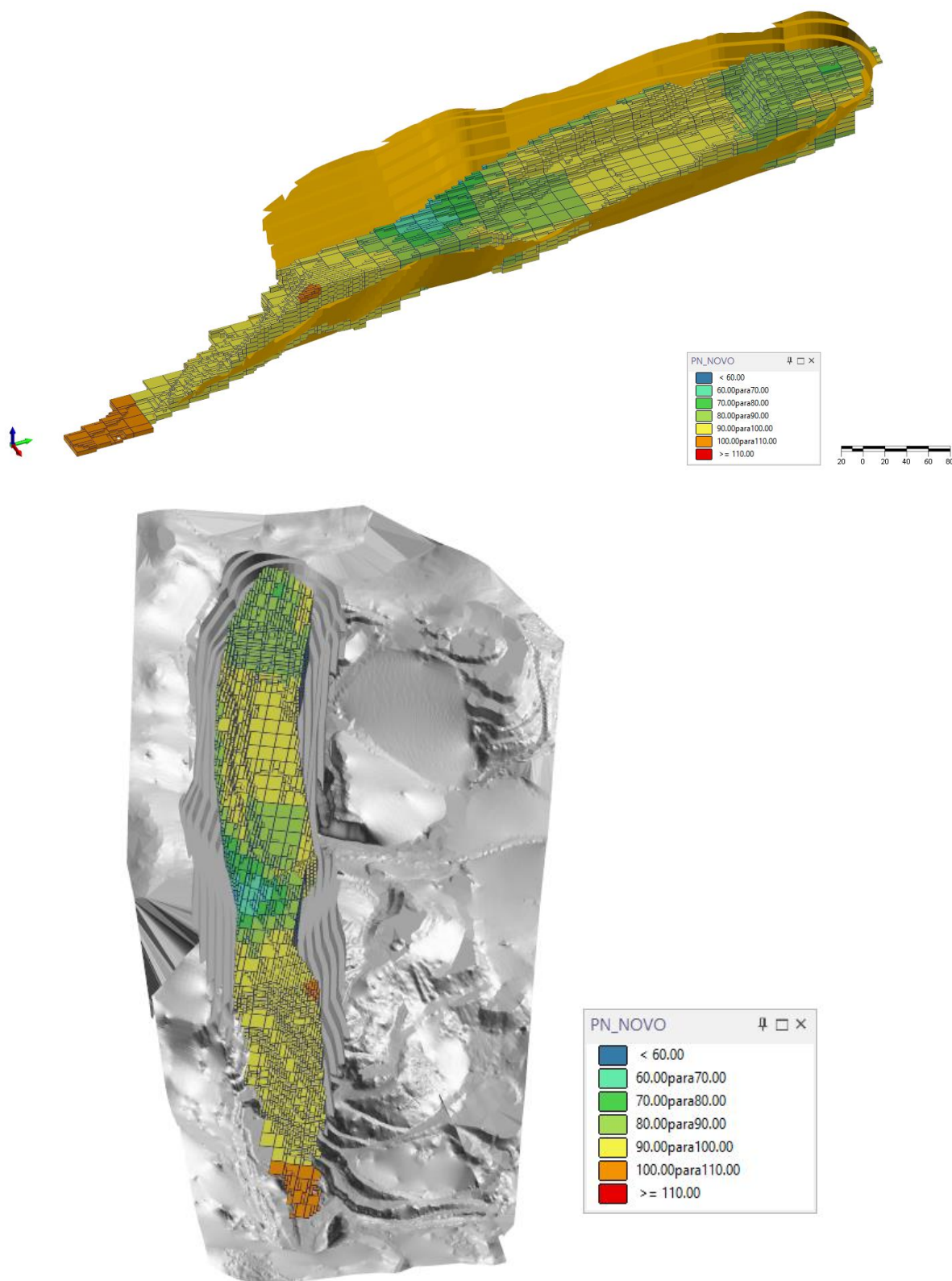
Fonte: autora.

Figura 61 - Modelo de blocos recortado - PN calculado.



Fonte: autora.

Figura 62 - Modelo de blocos recortado - PN (CaO+MgO).



Fonte: autora.

Com os modelos de blocos já recortados pela cava projetada, foi gerado o volume final do corpo, que permaneceu igual para todas as variáveis, já que, nesse

momento, a única limitação considerada era a própria geometria da cava, sem diferenciação por teor. Usando a densidade de 2,7 t/m<sup>3</sup>, correspondente ao mármore, foi calculada a tonelagem total contida dentro da cava.

A partir desses blocos recortados, também foram obtidos os teores médios de cada variável, e, com isso, foi possível calcular a tonelagem de minério contido, multiplicando a tonelagem do corpo pelo teor médio de cada uma delas. Todos esses valores podem ser observados na tabela 21.

Tabela 21 - Modelo de blocos recortado – volumes e médias.

Variável	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (t/m <sup>3</sup> )	Tonelagem (t)	PN (%)
PN	1.879.350,00	2,7	5.074.245,00	92,331
PN ácido	1.879.350,00	2,7	5.074.245,00	91,799
PN calculado	1.879.350,00	2,7	5.074.245,00	90,135
PN (CaO+MgO)	1.879.350,00	2,7	5.074.245,00	90,135

Fonte: autora.

Conforme se pode observar na tabela 21, a proporção das médias foi mantida desde os dados brutos, sendo o método de cálculo por titulação (PN) o que apresenta os maiores valores, refletindo os maiores teores e, conseqüentemente, a maior tonelagem de minério contido.

Essa diferença se torna ainda mais evidente quando se realiza a filtragem do modelo para considerar apenas os blocos com PN acima de 67% (tabela 22), valor definido como teor de corte para o calcário agrícola, conforme apresentado na tabela 2. Após essa filtragem, os volumes, médias dos teores e tonelagens passam a apresentar diferenças entre os métodos de cálculo, evidenciando as características de cada um.

Observa-se que o PN por titulação gerou um teor médio mais alto (92,719%), mas uma tonelagem de minério ligeiramente menor (5.003.451,00 t) em relação aos métodos calculados (PN calculado e PN CaO+MgO), que apresentaram médias menores (90,447%) e, ao mesmo tempo, volumes e tonelagens ligeiramente maiores (5.010.984,00 t). O PN ácido apresenta valores intermediários após a filtragem, com teor médio de 92,189% e tonelagem de 5.001.669,00 t.

Essa diferença ocorre porque os métodos PN calculado e PN (CaO+MgO) apresentam maior uniformidade em torno do teor de corte, incluindo mais blocos próximos a 67%, enquanto o método por titulação apresenta blocos com teores mais altos, elevando a média de PN, mas não necessariamente a tonelagem total de

minério após filtragem. No entanto, é possível observar que quando se leva em consideração a tonelagem de minério contido, o PN apresenta a maior tonelagem, corroborando com a tendência dos dados.

Tabela 22 - Modelo de blocos recortado – volumes e médias para teores (PN) acima de 67 (%).

Variável	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (t/m <sup>3</sup> )	Tonelagem (t)	PN (%)
PN	1.853.130,00	2,7	5.003.451,00	92,719
PN ácido	1.852.470,00	2,7	5.001.669,00	92,189
PN calculado	1.855.920,00	2,7	5.010.984,00	90,447
PN (CaO+MgO)	1.855.920,00	2,7	5.010.984,00	90,447

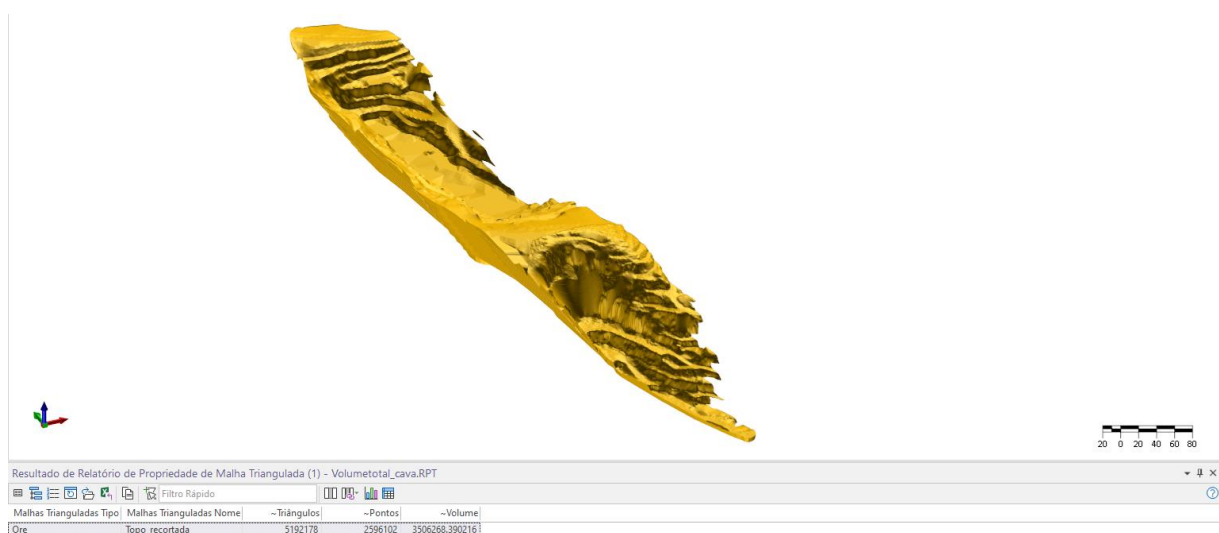
Fonte: autora.

### 5.7 REM – Relação estéril/minério

Para o cálculo da relação estéril/minério, inicialmente foi determinado o volume total do avanço de lavra. A partir desse volume total, calculou-se o volume de estéril como a diferença entre o volume total do avanço e o volume de minério contido na área da cava projetada.

Na Figura 63, é apresentado o sólido correspondente ao avanço de lavra, que inclui a cava projetada e o volume da topografia. O volume total do avanço de lavra foi calculado como 3.506.268,39 m<sup>3</sup>.

Figura 63 - Sólido da cava do avanço e topografia atual.



Fonte: autora.

### 5.7.1 REM de todo o avanço de lavra

Para o cálculo, consideram-se inicialmente os valores de volume e tonelagem do corpo de minério de todo o avanço que é 1.879.350,00 m<sup>3</sup>. O volume de estéril é obtido como a diferença entre o volume total do avanço e o volume de minério:

$$V_{estéril} = V_{total\ do\ avanço} - V_{minério} = 3.506.268,39 - 1.879.350,00 = 1.626.918,39\ m^3$$

A REM do avanço, expressa em volume de estéril por volume de minério (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) é calculada como:

$$REM_{avanço} = \frac{1.626.918,39}{1.879.350,00} = 0,866\ m^3/m^3$$

Já a REM em volume de estéril por tonelada de minério (m<sup>3</sup>/t) pode ser calculada considerando a tonelagem de minério (5.074.245 t):

$$REM_{avanço} = \frac{1.626.918,39}{5.074.245,00} = 0,321\ m^3/t$$

Esses resultados indicam que, para cada 1 m<sup>3</sup> de minério, há aproximadamente 0,87 m<sup>3</sup> de estéril a ser movimentado, ou, equivalentemente, para cada tonelada de minério, será necessário movimentar cerca de 0,32 m<sup>3</sup> de estéril.

É importante destacar que essa relação não é constante em toda a mina, visto que principalmente entre cavas, a proporção de estéril/minério é maior que no restante da mina. Além disso, o fator de empolamento do estéril, que aumenta o volume após escavação, não foi considerado nesses cálculos, podendo impactar a quantidade real de material a ser movimentado.

### 5.7.2 REM conforme as variáveis de estudo para PN >67%

A partir do filtro de PN acima de 67%, foi possível calcular a relação estéril/minério em m<sup>3</sup>/t para cada variável, considerando o volume de estéril como a diferença entre o volume total do avanço de lavra e o volume de minério filtrado. Os resultados estão apresentados na tabela 23.

Tabela 23 - REM conforme variáveis &gt; 67%.

Variável	Volume de minério (m <sup>3</sup> )	Tonelagem do minério (t)	Volume de estéril (m <sup>3</sup> )	REM (m <sup>3</sup> /t)
PN	1.853.130,00	5.003.451,00	1.653.138,39	0,330
PN ácido	1.852.470,00	5.001.669,00	1.653.798,39	0,331
PN calculado	1.855.920,00	5.010.984,00	1.650.348,39	0,329
PN (CaO+MgO)	1.855.920,00	5.010.984,00	1.650.348,39	0,329

Fonte: autora.

Observa-se que os valores de REM são bastante semelhantes entre os métodos, variando de 0,329 a 0,331 m<sup>3</sup>/t. O PN ácido apresenta a maior relação estéril/minério (0,331 m<sup>3</sup>/t), indicando que, para cada tonelada de minério, é necessário movimentar um pouco mais de estéril em comparação aos outros métodos. O PN por titulação apresenta 0,330 m<sup>3</sup>/t, enquanto os métodos PN calculado e PN (CaO+MgO) apresentam valores ligeiramente menores (0,329 m<sup>3</sup>/t).

Essas diferenças refletem a distribuição dos blocos de minério após a filtragem: os métodos PN calculado e PN (CaO+MgO) apresentam maior uniformidade, incluindo mais blocos próximos ao teor de corte, resultando em volumes de estéril ligeiramente menores em relação à tonelagem de minério. Por outro lado, o PN ácido, com valores intermediários de PN, gera um volume de estéril proporcionalmente maior, elevando ligeiramente a REM.

### 5.8 Identificação de áreas para cal

Um dos objetivos do trabalho foi à identificação de áreas com potencial para cal, que, segundo as empresas da região, correspondem aos locais com PN acima de 100%. Para isso, foi possível filtrar os modelos de blocos para cada variável e observar visualmente as diferenças, conforme apresentado nas figuras 64 a 67, bem como analisar os volumes, médias e tonelagens de cada variável, conforme a tabela 24.

Tabela 24 - Volumes e médias para teores (PN) maiores do que 100 (%).

Variável	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (t/m <sup>3</sup> )	Tonelagem (t)	PN (%)
PN	157.230,00	2,7	424.521,00	101,818
PN ácido	90.180,00	2,7	243.486,00	101,828
PN calculado	19.860,00	2,7	53.622,00	104,355
PN (CaO+MgO)	19.860,00	2,7	53.622,00	104,355

Fonte: autora.

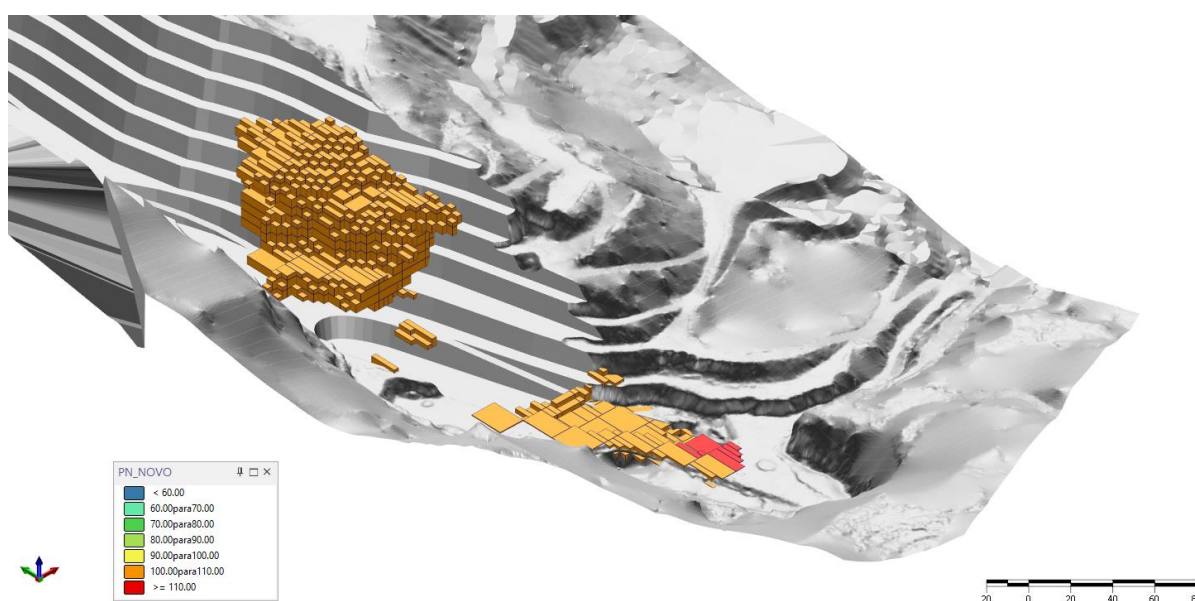
Neste caso, observa-se que o PN por titulação apresenta os maiores valores de tonelagem (424.521,00 t), embora sua média de PN (101,818%) seja menor do que a do PN calculado (104,355%). Essa diferença ocorre porque o PN calculado concentra-se em poucos blocos de pequeno volume com PN muito alto, elevando à média, mas contribuindo pouco para a tonelagem total. Por outro lado, o PN por titulação inclui mais blocos com PN acima de 100%, distribuídos de forma mais ampla, o que aumenta significativamente a tonelagem total, mas reduz a média comparativa.

O PN ácido permanece em posição intermediária, tanto em termos de teor médio (101,828%) quanto de tonelagem (243.486,00 t), mantendo o padrão de diferenciação observado nas análises anteriores.

Dessa forma, a análise dos blocos com PN acima de 100% evidencia que os diferentes métodos de cálculo refletem características distintas do minério, o PN por titulação destaca a quantidade de minério disponível, enquanto o PN calculado evidencia blocos mais ricos, mas em menor volume.

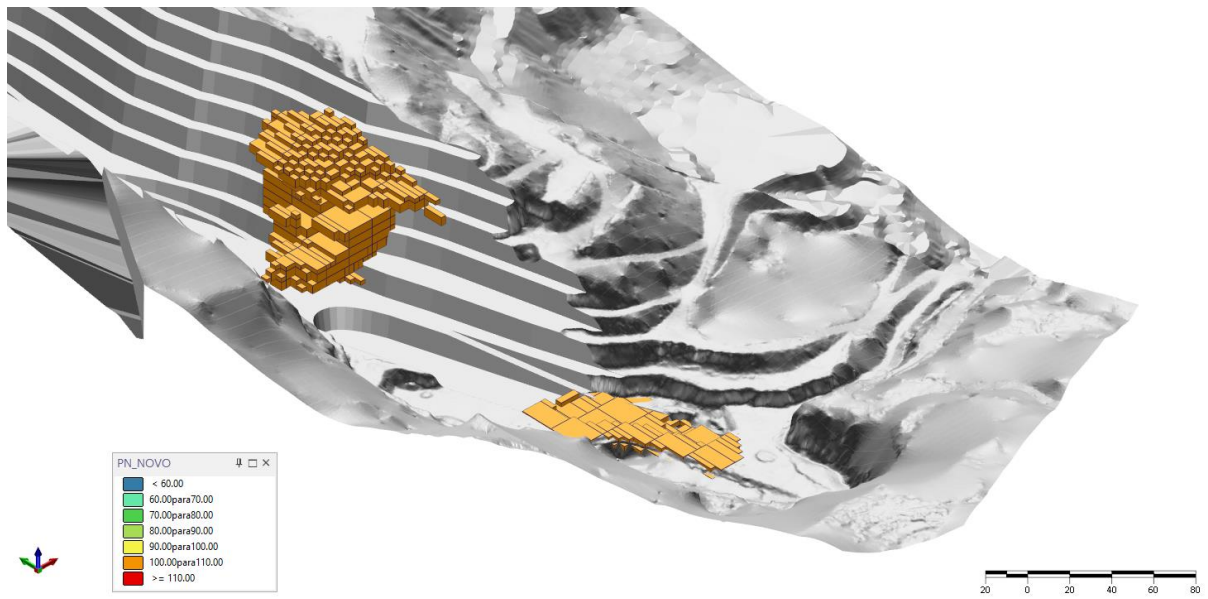
Pode-se observar também que as áreas indicadas para a produção de cal, que seria um subproduto com maior valor agregado, estão localizadas ao sul da cava sul, conforme destacado nas figuras 64 a 67, e, portanto, essas informações podem auxiliar a empresa no planejamento e no melhor sequenciamento de lavra, visando manter um produto com teor mais equilibrado.

Figura 64 - Áreas para cal - PN.



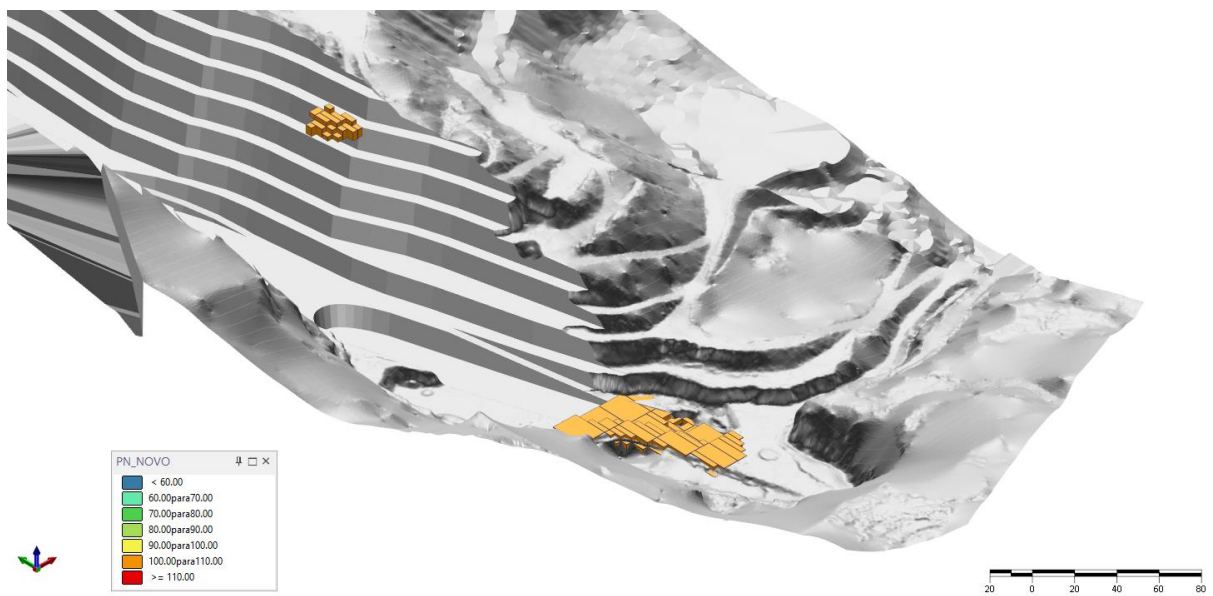
Fonte: autora.

Figura 65 - Áreas para cal - PN ácido.



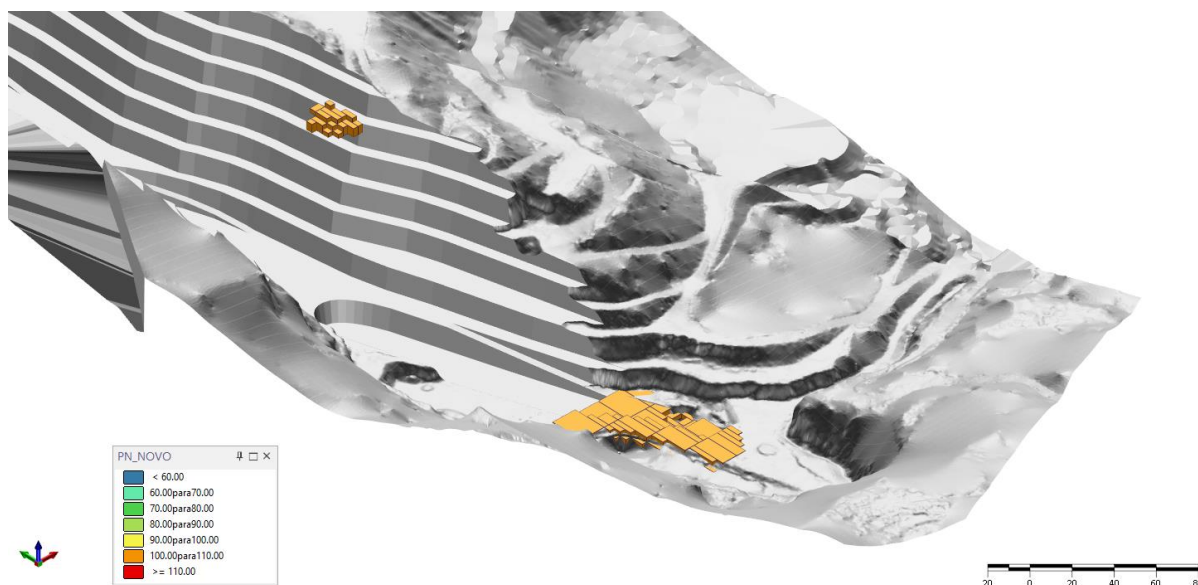
Fonte: autora.

Figura 66 - Áreas para cal - PN calculado.



Fonte: autora.

Figura 67 - Áreas para cal - PN (CaO+MgO).



Fonte: autora.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises realizadas ao longo deste trabalho permitiram avaliar se existem diferenças significativas entre os métodos de determinação do Poder de Neutralização (PN) e como essas variações influenciam o planejamento do avanço de lavra de uma mina de calcário dolomítico em Caçapava do Sul. Com base nos resultados obtidos, observou-se que todos os métodos apresentaram comportamentos coerentes entre si, tanto nos dados dos furos quanto nos modelos estimados, indicando que as diferentes formas de cálculo do PN não geraram diferenças que comprometessem o modelo geológico, o modelo de blocos ou o planejamento do avanço.

Os objetivos específicos foram satisfatoriamente alcançados. Inicialmente, os valores de PN, PN ácido, CaO e MgO foram obtidos de maneira consistente pelas análises químicas, permitindo também o cálculo dos PNs derivados. A comparação crítica entre as três metodologias mostrou que o PN por titulação apresentou as maiores médias e variabilidade, enquanto o PN calculado a partir de CaO e MgO resultou nos menores valores médios e nas menores amplitudes. O PN ácido manteve comportamento intermediário. Ainda assim, todos eles apresentaram forte correlação entre si, e as diferenças observadas foram pequenas e compatíveis com o comportamento esperado para um depósito dolomítico.

A modelagem geológica explícita gerou um sólido coerente com a geologia observada em campo e nos dados de sondagem, representando adequadamente o

prolongamento do corpo mineralizado. A partir desse modelo, foi possível estruturar o modelo de blocos com parâmetros adequados à geometria da jazida, permitindo uma estimativa eficiente pelo método do Inverso do Quadrado da Distância (IQD).

Os modelos de blocos gerados apresentaram uma boa coerência, refletindo as tendências espaciais e os padrões estatísticos dos dados amostrais. As validações realizadas, médias, quartis e análise de deriva, mostraram que a estimativa manteve a tendência central e a distribuição dos teores com diferenças mínimas, sempre inferiores a 1% para as médias e com boa preservação dos padrões espaciais. As variáveis PN calculado e PN (CaO+MgO) apresentaram um coeficiente de Pearson 1, como esperado pela própria fórmula utilizada.

Na etapa do planejamento de lavra, os quatro modelos de PN permitiram projetar o avanço para unificação das duas cavas existentes. As diferenças nos valores de relação estéril/minério (REM) foram discretas, variando de 0,329 a 0,331 m<sup>3</sup>/t, o que demonstrou que a escolha do método de obtenção do PN não altera significativamente o dimensionamento volumétrico do avanço. Além disso, a identificação das zonas com PN superior a 100% permitiu localizar áreas com potencial para a produção de cal, concentradas principalmente ao sul da cava sul, o que fornece uma informação importante para o sequenciamento da lavra com foco em produtos de maior valor agregado.

De forma geral, conclui-se que todas as metodologias de obtenção do PN mostraram-se adequadas e consistentes para os objetivos do estudo. As pequenas diferenças entre elas não comprometeram a modelagem geológica, nem a estimativa, tampouco os cálculos de REM ou a definição do avanço da lavra. Assim, o uso integrado dos métodos químicos e dos PNs calculados se mostra viável no planejamento mineiro, permitindo que cada empresa escolha a metodologia mais conveniente do ponto de vista operacional, sem prejuízo à confiabilidade dos resultados.

## **6.1 Recomendações para trabalhos futuros**

Como continuidade deste estudo, diversas análises podem ser realizadas para aprimorar o planejamento da lavra e a avaliação econômica da operação. Uma das principais sugestões é a avaliação dos custos de movimentação de estéril e minério, que permitirá estimar o custo real associado à retirada de cada tipo de material e, assim, calcular de forma mais precisa a viabilidade econômica da lavra.

Além disso, é importante verificar o fator de empolamento do estéril, considerando a variação volumétrica após a escavação, o que pode impactar significativamente o volume de material a ser movimentado e, conseqüentemente, a relação estéril/minério.

Outro ponto relevante é a avaliação do sequenciamento de lavra, principalmente nas áreas entre as cavas, onde os valores de PN são menores, para verificar o impacto da unificação das cavas sobre o lucro total da operação. Paralelamente, é recomendada a análise da variação do PN ao longo de toda a cava, permitindo identificar zonas de maior ou menor teor, o que auxilia no planejamento da produção de produtos com diferentes teores, como o calcário de maior valor agregado.

A realização de mais furos de sondagem, rotativa de preferência, em malha regular também se mostra necessária, pois possibilitará a aplicação de métodos geoestatísticos, como a krigagem, permitindo comparar os resultados com os obtidos neste estudo e aumentar a confiabilidade dos modelos de blocos. Por fim, a separação em domínios distintos, identificando zonas contaminadas e zonas de calcário mais puro, poderá otimizar a produção e garantir a uniformidade do produto final, contribuindo para um planejamento de lavra mais eficiente e economicamente vantajoso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCARDE, José Carlos. **Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas**, *Boletim Técnico* 6. São Paulo, ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos, 24 p, 2005. Disponível em: [https://anda.org.br/wp-content/uploads/2019/03/boletim\\_06.pdf](https://anda.org.br/wp-content/uploads/2019/03/boletim_06.pdf). Acesso em: 10 out. 2024.

ALCARDE, José Carlos; HANASIRO, Jairo. **Metodologia Oficial de Análise de Corretivos de Acidez**. 3 ed. ABRACAL, Porto Alegre, 2016.

ALMEIDA, Fernando. F. M de; HASUI, Yociteru; BRITO NEVES, Benjamin Bley de. *The Upper Precambrian of South America*. **Boletim IG. Instituto de Geociências, USP**, São Paulo, v. 7, p 45-80, 1976.

BITENCOURT. Maria de Fátima. **Geologia, petrologia e estrutura dos metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Geociências, UFRGS, Porto Alegre, 161p. 1983.

BRASIL. **Instrução Normativa SDA N° 35**. Secretaria de Defesa Agropecuária nº 132. Brasília, 2006. ISSN 1677-7042.

BUDKE, Régis. **Modelagem geológica e de blocos de um depósito de fosfato**. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Pará, Marabá, 2012.

CARBONI, Fernanda. **Integração de dados geológicos, geoquímicos e geofísicos para modelagem tridimensional de depósitos minerais: comparação entre abordagens explícita, implícita e probabilística**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Geociências, USP, São Paulo, 94p, 2022.

CHEMALE JR, Farid. **Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense**. Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, CIGO-UFRGS, p. 13-52, 2000.

CHEMALE Jr, Farid; HARTMANN, Léo Afraneo; SILVA, Luis C. da. *Stratigraphy and Tectonism of Brasiliano Cycle in Southern Brazil*. **Communs geol. Surv. Namibia**, v.10, p. 151-166, 1995.

COELHO FILHO, Luiz Carlos Teixeira; BRITO, Jorge Luís Nunes e Silva. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: EdUERJ, 196 pp, 2007. ISBN 978-85-7511-114-7.

COWAN, Jun; BEATSON, Rick; ROSS, H. J; FRIGHT, W. R; MCLENNAN, T. J; EVANS, T. R; CARR, J. C; LANE, R. G; BRIGHT, D. V; GILLMAN, A. J; OSHUST, P.A; TITLEY, M. *Practical implicit geological modelling*. In: **5th International Mining Geology Conference**. The Australasian Institute Of Mining And Metallurgy. Austrália: Bendigo, Victoria, 2003. ISBN: 1-920806-06-7.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **FOLHA SH.22-Y-A CACHOEIRA DO SUL** - Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil Carta Geológica - Escala 1:250.000 - Anexo I, 2000.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Projeto Geologia do Brasil ao Milionésimo – Programa Geologia do Brasil: Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, escala 1:750.000**. CPRM, 2008.

DAVID, Michel. **Geostatistical Ore Reserve Estimation**. Amsterdam: *Elsevier Scientific Publishing Company*, 364p, 1977.

FAÉ, Yuri Abreu. **Modelagem geológica e estimativa do Poder de Neutralização em uma mina de calcário no Rio Grande do Sul**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Geologia, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2021.

FREITAS, Jhulien Loreto de. **Proposição de avanço de lavra para a mina Dom Feliciano**. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Tecnologia em Mineração, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2015.

GOUDINHO, Mateus Machado. **Modelagem geológica de um corpo de minério de mármore a partir de aerofotogrametria digital**. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Tecnologia em Mineração, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2021.

HARTMANN Léo Afraneo; CHEMALE Jr, Farid; PHILIPP, Ruy Paulo. **Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano**. Instituto de Geociências, 50 anos de Geologia no Rio Grande do Sul, Porto Alegre: UFRGS, p.97-123, 2007.

HOULDING, Simon W. **3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization**. Springer-Verlag, Berlin, 1 ed, 309pp, 1994.

HUSTRULID, William; KUCHTA, Mark; MARTIN, R. **Open-Pit Mine Planning and Design**. CRC Press, Nova Iorque, 3 ed, v.1, 1288 pp, 2013.

IBGE. Atlas Geográfico Escolar. **Levantamento fotogramétrico**. Disponível em: <https://atlascolar.ibge.gov.br/cartografia/21736-aerofotogrametria.html>. Acesso em: 15 out. 2024.

ISAAKS, Edward. H; SRIVASTAVA, R. Mohan. **Applied Geostatistics**. Oxford University Press, Nova Iorque, 561 pp, 1989. ISBN: 978-0-19-505013-4.

JOHNSON, This. B. **Optimum Open Pit Mine Production Scheduling**. Tese de PhD, *Operations Research Center, University of California*, Berkeley, 131 p, 1968.

LI, Jin; HEAP, Andrew. *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*. **Geoscience Australia**, Austrália: Camberra, v. 23, 137 pp, 2008.

MARTINS Jr, Fábio Lúcio. Calcário agrícola. **Sumário Mineral – DNPM**, Tocantins, 2013. 2 p. Disponível em:

[https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?idbancoarquivoarquivo=8971](https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?idbancoarquivoarquivo=8971). Acesso em: 12 de nov. 2024.

NARDI, Lauro Valentim Stoll; BITENCOURT, Maria de Fátima. Geologia, Petrologia e Geoquímica do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS. **Revista Brasileira de Geociências**. Porto Alegre: UFRGS, v. 19, n. 2, p 153-169, 1989. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/144166>. Acesso em: 15 nov. 2024.

PASETTO, Giovanni Argenta. **Modelagem geológica 3D utilizando aerofotogrametria com VANT em mina de mármore no município de Caçapava do Sul – RS**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Geologia, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2018.

PEREIRA, Tatiane Fortes. **Proposta de retomada e expansão para uma mina de calcário**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em Mineração, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2017.

PORCHER, Carlos Alfredo; LOPES, Ricardo da Cunha; FONSECA, José Alcides; FERNANDES, Luis Alberto D'Avila; PORCHER, Carla Cristina; RAMGRAB, Gilberto Emilio; CAMOZZATO, Eduardo. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - Cachoeira do Sul**, Folha SH.22-Y-A. Estado do Rio Grande do Sul. Brasília, CPRM, 2000. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/8476?mode=full>. Acesso em 30 set. 2024.

PREFEITURA DE CAÇAPAVA DO SUL. **Dia Nacional do Calcário Agrícola**. Disponível em: <https://cacapavadosul.rs.gov.br/noticia/visualizar/id/6983/?diagonal-nacional-do-calcario-agricola.html#:~:text=Ca%C3%A7apava%20do%20Sul%20%C3%A9%20conhecida%20como%20a,seus%20funcion%C3%A1rios%2C%20respons%C3%A1veis%20pel a%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20mais>. Acesso em: 15 out. 2024.

PRIMAVESI, Ana Cândida; PRIMAVESI, Odo. **Características de corretivos agrícolas**. São Carlos, SP; Embrapa Pecuária Sudeste, 2004. 28 p. Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 37. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/61985/1/Doc37ACP2004.pdf>. Acesso em 18 nov. 2024.

RAIJ, Bernardo Van. Estudo de materiais calcários usados como corretivos do solo no Estado de São Paulo. IV — O Poder Relativo de Neutralização Total. **Bragantia – Revista Científica do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo**, Campinas, v. 36, n. 12, p 139-145, Maio. 1977. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/CLkdMPCCGdNNJY5Y56ggnw/?format=pdf>. Acesso em: 28 out. 2024.

RANGEL, Andrei. C; SIMÕES, Natalia Trojahn; RITA, Thays Soares; CASARTELI, Maria Regina Oliveira. **Os Minerais Calcário e Dolomito na Região Do Pampa**. Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2014. Disponível em: <https://sites.unipampa.edu.br/pibid2014/files/2015/08/indicador-5-banner-mineralogia.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

REMUS, Marcos Vinicius. D; HARTMANN, Léo Afraneo; MCNAUGHTON, N. J; GROVES, D. I; FLETCHER, I. R. *The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Caçapava Granite of the Brasileiro Cycle in Southern Brazil. Journal of South American Earth Sciences*, v. 13, p 191-216, 2000.

ROSSI, Mario. E; DEUTSCH, Clayton. V. *Mineral Resource Estimation*. Springer, Londres. 332 pp, 2014. ISBN (ebook): 978-1-4020-5717-5.

RUBIO, Ricardo José Hundelshausen. **Otimização de parâmetros de krigagem baseada na minimização do erro absoluto e o erro quadrático**. Tese de doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), UFRGS, Porto Alegre, 120p. 2018.

SANTOS, Daner Valcarengi dos. **Extração semiautomática da orientação de descontinuidades com modelo tridimensional de taludes obtido por fotogrametria digital**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em Mineração, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2017.

SEBRAE. **Data MPE Caçapava do Sul**. 2022. Disponível em: <https://datampe.sebrae.com.br/profile/geo/cacapava-do-sul>. Acesso em: 20 out. 2024.

SILVEIRA, Fátima Teresinha da Silva. **Estudo comparativo entre propostas de avanço para cava de calcário por meio de diferentes metodologias de cálculo para o PRNT**. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Tecnologia em Mineração, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2022.

SINCLAIR, Alastair. J; BLACKWELL, Garston. H. *Applied Mineral Inventory Estimation: Cambridge university Press*, Reino Unido, 382 p, 2002. ISBN: 0-521-79103-0.