

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

ELOÍSA RIBEIRO DE SALES

**ESTUDO COMPARATIVO DA MODELAGEM GEOLÓGICA DE UMA  
OCORRÊNCIA DE MÁRMORE NA PARAÍBA COM FERRAMENTAS  
COMPUTACIONAIS UTILIZADAS NA INDÚSTRIA MINERAL**

Recife

2019

ELOÍSA RIBEIRO DE SALES

**ESTUDO COMPARATIVO DA MODELAGEM GEOLÓGICA DE UMA  
OCORRÊNCIA DE MÁRMORE NA PARAÍBA COM FERRAMENTAS  
COMPUTACIONAIS UTILIZADAS NA INDÚSTRIA MINERAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

**Área de Concentração:** Minerais Industriais

**Orientador:** Prof. Dr. Júlio César de Souza

**Coorientadora:** M.Sc. Suelen Silva Rocha

Recife

2019

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Gabriel da Luz, CRB-4 / 2222.

S163e Sales, Eloísa Ribeiro de.

Estudo comparativo da modelagem geológica de uma ocorrência de mármore na Paraíba com ferramentas computacionais utilizadas na indústria mineral / Eloísa Ribeiro de Sales – Recife, 2019.

119 f., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Júlio César de Souza

Coorientadora: M. Sc. Suelen Silva Rocha

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2019.

Inclui referências e anexos.

1. Engenharia Mineral. 2. Planejamento de mina. 3. Ferramentas computacionais. 4. Avaliação de reservas. 5. Modelagem geológica. I. Souza, Júlio César de. (Orientador). II. Rocha, Suelen Silva. (Coorientadora). III. Título.

UFPE

622 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-342

ELOÍSA RIBEIRO DE SALES

**ESTUDO COMPARATIVO DA MODELAGEM GEOLÓGICA DE UMA  
OCORRÊNCIA DE MÁRMORE NA PARAÍBA COM FERRAMENTAS  
COMPUTACIONAIS UTILIZADAS NA INDÚSTRIA MINERAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Júlio César de Souza (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Márcio Luiz Siqueira Campos Barros (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe (Examinador Externo)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Para as minhas estrelinhas,  
Igor Sales e Braian Henrique

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer primeiramente aos meus pais, Maria do Carmo e Manoel Sales, que me trouxeram a este mundo, aos meus irmãos, Eduardo Sales e Maria Jackeline Nascimento e à minha cunhada Andréa Sales. Aos meus adorados sobrinhos Igor Sales e Braian Henrique que trazem alegria e esperança de serem melhores do que nós.

Ao meu Orientador Júlio César pela paciência, encorajamento e incentivo para a finalização deste trabalho. Sem a colaboração dele e da minha coorientadora Suelen Rocha não seria possível.

Ao CNPQ pela bolsa de pesquisa.

Ao Engenheiro de Minas Alexandre Baltar e a Companhia Brasileira de Vidros Planos pela disponibilização dos dados de pesquisa mineral.

“O planejamento informatizado da lavra de minas tem o objetivo de proporcionar aos técnicos e administradores condições de otimizar processos, diminuir riscos, aumentar a competitividade e segurança”  
(CURI, 2014, p.160)

## RESUMO

Os mármore são rochas metamórficas compostas predominantemente por calcita (carbonato de cálcio –  $\text{CaCO}_3$ ), podendo conter pequenas quantidades de outros minerais como argilominerais e dolomita (carbonato de cálcio e magnésio –  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). São matéria-prima para muitos processos industriais, dentre eles a indústria do vidro. Neste trabalho de pesquisa foi realizada uma avaliação de uma ocorrência de mármore no estado da Paraíba visando a fabricação de vidro plano. Usando técnicas conjuntas para a avaliação da ocorrência mineral desde a elaboração de uma base planialtimétrica, realização de sondagem, amostragem, elaboração de banco de dados, elaboração de modelo tridimensional do corpo de minério, determinação de volume e teores de  $\text{CaO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Foram realizados 16 furos de sondagem, gerando 323 amostras analisadas para a determinação da composição química especialmente de  $\text{CaO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Para a manipulação dos dados foram utilizadas duas ferramentas computacionais com o objetivo de comparar os resultados da estimativa de volume e teores utilizando o método da krigagem ordinária para esse cálculo. Foram utilizados : o *RecMin – Recursos Mineros* e o *Datamine Studio 3*. Com os dados de sondagem foi construído o modelo tridimensional de dois corpos minerais nos referidos softwares, levando em consideração áreas em que os teores estivessem dentro das seguintes especificações:  $\text{CaO} > 45\%$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,50\%$  ou  $\text{CaO} > 50\%$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0,22\%$ . Com o modelo tridimensional e o modelo de blocos foi possível obter o volume e os teores da ocorrência mineral. Os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  mostraram-se com uma variabilidade maior do que a do  $\text{CaO}$ . A ocorrência apresenta boa quantidade de cálcio com contaminação de ferro, o que não é adequado para a fabricação de vidro plano, mas pode ser utilizado para outros tipos de vidro como de embalagens.

**Palavras-chave:** Planejamento de mina. Ferramentas computacionais. Avaliação de reservas. Modelagem geológica.

## ABSTRACT

Marbles are metamorphic rocks composed predominantly of calcite (calcium carbonate -  $\text{CaCO}_3$ ) and may contain small amounts of other minerals such as clay minerals and dolomite (calcium and magnesium carbonate -  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). They are raw materials for many industrial processes, including the glass industry. In this research work an evaluation of a marble occurrence in the state of Paraíba aiming at the manufacture of flat glass was carried out. Using joint techniques to evaluate mineral occurrence from the elaboration of a planialtimetric base, conducting drilling, sampling, database elaboration, elaboration of a three-dimensional ore body model, volume determination and  $\text{CaO}$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  contents. Sixteen drillholes were drilled, generating 323 samples analyzed to determine the chemical composition especially  $\text{CaO}$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . For the manipulation of the data two computational tools were used in order to compare the results of the estimation of volume and contents using the ordinary kriging method for this calculation. *RecMin – Recursos Mineros* and *Datamine Studio 3* were used. With the survey data the three-dimensional model of two mineral bodies was built in the referred software, taking into consideration areas where the contents were within the following specifications:  $\text{CaO} > 45\%$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.50\%$  or  $\text{CaO} > 50\%$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.22\%$ . With the three-dimensional model and the block model it was possible to obtain the volume and the levels of mineral occurrence.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  contents showed a higher variability than  $\text{CaO}$ . The occurrence presents good amount of calcium with iron contamination, which is not suitable for the manufacture of flat glass but can be used for other types of glass as packaging.

**Keywords:** Mine planning. Computational tools. Reserves evaluation. Geological modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Visão geral da mina de calcário agrícola da Votorantim, em Rio Branco do Sul, Curitiba.....	24
Figura 2 – Etapas genéricas sequenciais para o processo de modelagem geológica e planejamento de mina .....	32
Figura 3 – Modelagem geológica tridimensional .....	33
Figura 4 – Modelo sólido triangulado tipo <i>wireframe</i> .....	35
Figura 5 – Modelo tridimensional de blocos de lavra de um depósito hipotético.....	35
Figura 6 – Relação entre informação de exploração, recurso mineral e reserva mineral .....	38
Figura 7 - Modelos de Variogramas Experimentais (à esquerda) e Teóricos (à direita). .....	42
Figura 8 - Variograma com patamar e suas características. ....	43
Figura 9 - Esquema mostrando a pesquisa de para cálculo de variogramas experimentais em uma distribuição irregular .....	43
Figura 10 – Estradas de acesso (azul) partindo de João Pessoa (PB) e a área de pesquisa (vermelho).....	51
Figura 11 – Representação gráfica da área em estudo.....	52
Figura 12 – A) Mapa de localização Folha Surubim B) Esboço geológico mostrando a divisão da Província Borborema nos domínios norte central e sul (DN, DC e DS, respectivamente).....	53
Figura 13 – Afloramento do xisto granadífero dentro da área da poligonal.....	54
Figura 14 – Mármore Cinza- esbranquiçado em A) Furo de sondagem PCX-13 e em B) Amostra de mão.....	55
Figura 15 – Contato entre nível de mármore mais puro e a rocha encaixante (Xisto) .....	56
Figura 16 – Aparência do Mármore Bandado em testemunho de sondagem do furo PCX-07	56
Figura 17 – Aparência da Metamarga em testemunho de sondagem do furo PCX-07 .....	57
Figura 18 – Visão do solo raso e não consolidado próximo ao furo de sondagem PCX-08....	57
Figura 19 – Aspectos da vegetação da área da poligonal .....	58
Figura 20 – Poligonal da área de pesquisa de mármore processo ANM 846.059/2018.....	69
Figura 21 – Caminho regular criado no <i>Google Earth</i> para a obtenção de coordenadas na área pesquisada .....	69
Figura 22 – Interface <i>TCX Converter</i> com o arquivo *.kml com as altitudes atualizadas .....	70
Figura 23 – Janela <i>Importar líneas, superficies o puntos a partir de puntos TXT</i> do RecMin	

para importação do arquivo de pontos no formato *.txt. ....	71
Figura 24 – Pontos abertos no Módulo de <i>Dibujo</i> do <i>RecMin</i> .....	71
Figura 25 – Modelo Digital do Terreno: A) Vista Plana no Módulo de <i>Dibujo</i> e B) Vista 3D no Módulo <i>Render</i> .....	72
Figura 26 – Curvas de nível geradas no <i>RecMin</i> visualizadas no Módulo de <i>Dibujo</i> .....	73
Figura 27 – Curvas de nível geradas no <i>RecMin</i> visualizadas no <i>Google Earth</i> .....	73
Figura 28 – Pontos abertos no Módulo <i>Design</i> do <i>Studio 3</i> .....	74
Figura 29 – Modelo Digital do Terreno no Módulo <i>Design</i> do <i>Studio 3</i> (triangulação).....	74
Figura 30 – Modelo Digital do Terreno no Módulo <i>Visualizer</i> do <i>Studio 3</i> (em 3D).....	75
Figura 31 – Curvas de nível de 5 em 5 metros (vermelho) e de 2 em 2 metros (azuis) visualizadas no Módulo <i>Design</i> do <i>Studio 3</i> .....	75
Figura 32 – Arquivo de pontos (coordenadas) no formato *.txt da topografia convencional ..	76
Figura 33 – Pontos da topografia convencional abertos no Módulo de <i>Dibujo</i> do <i>RecMin</i> .....	76
Figura 34 – Triangulação dos pontos no <i>RecMin</i> .....	77
Figura 35 – Curvas de nível do levantamento convencional obtidas no <i>software RecMin</i> .....	77
Figura 36 – Curvas de nível geradas no <i>RecMin</i> visualizadas no <i>Google Earth</i> .....	78
Figura 37 – Pontos da topografia convencional abertos no Módulo <i>Design</i> do <i>Studio 3</i> .....	78
Figura 38 – Triangulação dos pontos (criação do Modelo Digital do Terreno) no Módulo <i>Design</i> do <i>Studio 3</i> .....	79
Figura 39 – Curvas de nível juntamente com a triangulação no Módulo <i>Visualizer</i> do <i>Studio 3</i> .....	79
Figura 40 – Visualização das Curvas de Nível no Módulo <i>Visualizer</i> (em 3D) do <i>Studio 3</i> ...	79
Figura 41 – Caixas de madeiras onde estão armazenados os testemunhos de sondagem (A e B) e Plaqueta de metal com identificação do Furo PCX-08 sobre o concreto (C).....	82
Figura 42 – Furo de sondagem serrado na longitudinal para a coleta de amostras .....	83
Figura 43 – Arquivo das informações da litologia dos furos de sondagem .....	85
Figura 44 – Arquivo das informações das amostras dos furos de sondagem .....	85
Figura 45 - Histograma dos teores de CaO e Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	86
Figura 46 - Variograma Experimental Omnidirecional para o teor de CaO .....	87
Figura 47 - Variograma Experimental Omnidirecional para o teor de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	88
Figura 48 – Janela de importação dos dados de sondagem no <i>software RecMin</i> .....	89
Figura 49 – Janela de edição de elementos e dados de amostra do <i>RecMin</i> .....	89
Figura 50 – Vista Plana do <i>Módulo de Dibujo</i> para a visualização dos furos de sondagem....	90

Figura 51 – Vista dos furos de sondagem através do <i>Módulo Render 3D</i> do <i>RecMin</i> .....	90
Figura 52 – Visualização do furo PCX-02 com as legendas de teores e das litologias abertas .....	91
Figura 53 – Seções Verticais do Corpo de Minério 1 (em vermelho) e a linha limite entre as seções (em azul claro) .....	92
Figura 54 – Triangulação do Corpo de Minério 1 no <i>Módulo Render 3D</i> com a linha limite.	92
Figura 55 – Triangulação do Corpo de Minério 1 (em azul) e as seções verticais (em vermelho) com a utilização da linha limite .....	93
Figura 56 – Triangulação do Corpo de Minério 1 (em azul) e as seções verticais (em vermelho) sem a utilização da linha limite.....	93
Figura 57 – Corpo de Minério 2 triangulado (em azul) e os furos de sondagem visualizados no <i>Módulo de Dibujo</i> com a utilização da linha limite .....	94
Figura 58 – Corpo de Minério 2 triangulado (em azul), seções verticais (em vermelho) e furos de sondagem em vista 3D no <i>Módulo de Dibujo</i> com a utilização da linha limite.....	94
Figura 59 – Corpo de Minério 2 triangulado em visualização no <i>Módulo Render 3D</i> com a utilização da linha limite .....	95
Figura 60 – Corpo de Minério 2 triangulado (em azul), seções verticais (em vermelho) e furos de sondagem em vista 3D no <i>Módulo de Dibujo</i> sem a utilização da linha limite .....	95
Figura 61 – Modelo de Blocos do Corpo de Minério 1 em vista plana.....	97
Figura 62 – Modelo de Blocos do Corpo de Minério 1 em Vista 3D.....	97
Figura 63 – Modelo de Blocos do Corpo de Minério 2 em vista plana.....	98
Figura 64 – Modelo de Blocos do Corpo de Minério 2 em vista lateral .....	98
Figura 65 – Janela de importação de dados do <i>Studio 3</i> .....	99
Figura 66 – Furos de sondagem aberto na janela <i>Design</i> no <i>Studio 3</i> .....	99
Figura 67 – Furos de sondagem abertos na janela <i>VR</i> do <i>Studio 3</i> .....	100
Figura 68 – Seções verticais do Corpo de Minério 1 visualizados na janela <i>Design</i> do <i>Studio 3</i> .....	100
Figura 69 – Seções verticais na janela <i>VR</i> do <i>Studio 3</i> .....	101
Figura 70 – Corpo de Minério 1 Triangulado sem <i>Tag Strings</i> no <i>Studio 3</i> .....	101
Figura 71 – Corpo de Minério 1 Triangulado com <i>Tag Strings</i> no <i>Studio 3</i> .....	102
Figura 72 – Corpo de Minério 2 triangulado sem <i>Tag Strings</i> no <i>Studio 3</i> .....	102
Figura 73 – Corpo de Minério 2 triangulado sem <i>Tag Strings</i> no <i>Studio 3</i> .....	103

Figura 74 – Modelo de Blocos do Corpo de Minério 1 na aba <i>Design</i> do <i>Studio 3</i> .....	104
Figura 75 – Modelo de blocos Corpo de Minério 2 no <i>Studio 3</i> .....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação química e composição do vidro .....	26
Tabela 2 - Composição do vidro plano.....	27
Tabela 3 – Características dos métodos tradicionais e modernos para projeto e modelagem de mina.....	29
Tabela 4 – <i>Softwares</i> utilizados no planejamento de minas .....	46
Tabela 5 – Comparação entre os <i>softwares</i> comerciais e os <i>softwares</i> gratuitos .....	47
Tabela 6 – Coordenadas dos vértices da poligonal (DATUM: SIRGAS 2000).....	52
Tabela 7 - Médias das altimetrias dos pontos aleatórios de dados de topografia convencional e remota .....	80
Tabela 8 – Campanha de sondagem realizada.....	81
Tabela 9 - Quantidade de amostras coletadas por furo de sondagem.....	83
Tabela 10 – Parâmetros litoquímicos utilizados para caracterização da litologia.....	84
Tabela 11 - Resultados estatísticos das amostras .....	86
Tabela 12 - Parâmetros para a obtenção do variograma experimental.....	87
Tabela 13 – Resultados do variograma experimental do teor de CaO .....	88
Tabela 14 – Resultados do variograma experimental do teor de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	88
Tabela 15 – Coordenadas de Origem do protótipo do modelo de blocos.....	96
Tabela 16 – Limites para o protótipo do Modelo de blocos.....	96
Tabela 17 – Variáveis para o cálculo com blocos do <i>RecMin</i> .....	96
Tabela 18 – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 1 com o <i>RecMin</i> .....	96
Tabela 19 – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 2 com o <i>RecMin</i> .....	97
Tabela 20 – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 1 com o <i>Studio 3</i> .....	103
Tabela 21 – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 2 com o <i>Studio 3</i> .....	104
Tabela 22 – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 1 .....	105
Tabela 23 – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 1 .....	105
Tabela 24 – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 2.....	106
Tabela 25 – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 2 .....	106

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	18
1.2	OBJETIVOS .....	18
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>18</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>20</b>
2.1	CALCÁRIO e Mármore .....	20
<b>2.1.1</b>	<b>Métodos de Lavra de Calcário e Mármore .....</b>	<b>22</b>
2.1.1.1	Lavra em Bancadas.....	23
<b>2.1.2</b>	<b>Processamento.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Utilizações Industriais do Calcário e do Mármore.....</b>	<b>25</b>
2.1.3.1	Indústria do Vidro.....	25
2.1.3.2	Agricultura.....	27
2.2	MINERAÇÃO E <i>SOFTWARES</i> .....	28
2.3	MODELO GEOLÓGICO, MODELO DE BLOCOS E VOLUME DE SÓLIDOS .....	30
2.4	AVALIAÇÃO DE RECURSOS E RESERVAS MINERAIS .....	37
<b>2.4.1</b>	<b>Métodos de Avaliação de Reservas .....</b>	<b>39</b>
2.4.1.1	Método das Seções .....	40
2.4.1.2	Método do Inverso da Potência da Distância .....	41
2.4.1.3	Krigagem .....	41
2.5	<i>SOFTWARES</i> NO PLANEJAMENTO DE MINA.....	45
2.6	<i>SOFTWARES</i> COMERCIAIS E <i>SOFTWARES</i> GRATUITOS .....	47
<b>2.6.1</b>	<b><i>RecMin – Recursos Mineros</i> .....</b>	<b>47</b>
<b>2.6.2</b>	<b><i>Datamine Studio 3</i> .....</b>	<b>49</b>
<b>2.6.3</b>	<b><i>SGeMS</i>.....</b>	<b>50</b>
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>51</b>
3.1	Área de Estudo.....	51
3.2	Localização e Acesso.....	51
3.3	Memorial descritivo do polígono delimitador da área.....	52
3.4	Aspectos geológicos .....	53
<b>3.4.1</b>	<b>Geologia Regional.....</b>	<b>53</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Geologia Local.....</b>	<b>54</b>
3.5	Aspectos Ambientais .....	58

<b>4</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>59</b>
4.1	ELABORAÇÃO DA BASE PLANIALTIMÉTRICA .....	59
<b>4.1.1</b>	<b>Topografia Remota.....</b>	<b>59</b>
4.1.1.1	Obtenção das coordenadas espaciais no <i>Google Earth</i> .....	60
4.1.1.2	Regularização das altitudes no <i>TCX Converter</i> .....	60
4.1.1.3	Obtenção das curvas de nível no <i>RecMin</i> .....	60
4.1.1.4	Obtenção das curvas de nível no <i>Datamine Studio 3</i> .....	61
<b>4.1.2</b>	<b>Topografia Convencional.....</b>	<b>61</b>
4.2	PESQUISA GEOLÓGICA DE DETALHE .....	62
<b>4.2.1</b>	<b>Sondagens, Coleta de Amostras e Caracterização Química .....</b>	<b>62</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Criação do Banco de Dados .....</b>	<b>62</b>
4.3	ANÁLISE VARIOGRÁFICA .....	63
4.4.	MODELAGEM DO DEPÓSITO MINERAL EM <i>SOFTWARES</i> DE MINERAÇÃO	64
<b>4.4.1</b>	<b><i>RecMin</i> – Recursos Mineros .....</b>	<b>64</b>
<b>4.4.2</b>	<b><i>Datamine Studio 3</i> .....</b>	<b>65</b>
4.5	MODELO DE BLOCOS e CÁLCULO DAS ESTIMATIVAS.....	66
<b>4.5.1</b>	<b><i>RecMin</i> – Recursos Mineros .....</b>	<b>66</b>
<b>4.5.2</b>	<b><i>Datamine Studio 3</i> .....</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>69</b>
5.1	Topografia remota .....	69
<b>5.1.1</b>	<b><i>RecMin</i> .....</b>	<b>70</b>
<b>5.1.2</b>	<b><i>Datamine Studio 3</i> .....</b>	<b>74</b>
5.2	Topografia Convencional .....	75
<b>5.2.1</b>	<b><i>RecMin</i> – Recursos Mineros .....</b>	<b>76</b>
<b>5.2.2</b>	<b><i>Datamine Studio 3</i> .....</b>	<b>78</b>
5.3	Comparação dos resultados da topografia.....	80
5.4	SONDAGENS E CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO MINÉRIO E ESTÉRIL .....	80
<b>5.4.1</b>	<b>Sondagens .....</b>	<b>80</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Coleta e caracterização química das amostras .....</b>	<b>82</b>
5.5	ELABORAÇÃO DO BANCO DE DADOS .....	84
5.6	ANÁLISE VARIOGRÁFICA DOS DADOS .....	85
5.7	<i>RECMIN</i> – <i>RECURSOS MINEROS</i> .....	88
<b>5.7.1</b>	<b>Importação do Banco de Dados.....</b>	<b>88</b>
<b>5.7.2</b>	<b>Modelagem Geológica do Corpo de Minério .....</b>	<b>91</b>

<b>5.7.3</b>	<b>Modelagem dos Blocos e Estimativa de Teores.....</b>	<b>95</b>
5.8	<i>Datamine Studio 3</i> .....	98
<b>5.8.1</b>	<b>Importação do Banco de Dados.....</b>	<b>99</b>
<b>5.8.2</b>	<b>Modelagem Geológica do corpo de minério .....</b>	<b>101</b>
<b>5.8.3</b>	<b>Modelagem dos Blocos e Estimativa de Teores.....</b>	<b>103</b>
5.9	COMPARAÇÃO ENTRE OS <i>SOFTWARES</i> utilizados .....	105
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>108</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>109</b>
	<b>ANEXO A - PONTOS PARA COMPARAÇÃO ALTIMÉTRICA: TOPOGRAFIA CONVENCIONAL E TOPOGRAFIA REMOTA.....</b>	<b>115</b>
	<b>ANEXO B - MAPA GEOQUÍMICO ELABORADO PELA COMPANHIA BRASILEIRA DE VIDROS PLANOS .....</b>	<b>118</b>
	<b>ANEXO C - PLANTA DE SITUAÇÃO E MALHA DE SONDAÇÃO ELABORADO PELA COMPANHIA BRASILEIRA DE VIDROS PLANOS.....</b>	<b>119</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os empreendimentos minerais são negócios de alto risco de investimento, exigindo assim alta confiabilidade e transparência dos dados relatados por parte dos profissionais envolvidos. As indústrias de extração mineral trabalham com grande quantidade de dados, principalmente no desenvolvimento de pesquisas para novas áreas de exploração dos recursos minerais (Curi, 2014).

A informatização ganhou grande espaço na pesquisa mineral e no planejamento de mina por proporcionar segurança dos dados e otimização, agilidade e competitividade às minerações, aos técnicos especializados e aos investidores. Ao longo das últimas décadas muitos *softwares* e aplicativos foram desenvolvidos oferecendo a esta indústria ferramentas para o desenvolvimento de novos projetos (Curi, 2014).

Os minerais industriais são todas as rochas e minerais predominantemente não-metálicos, que, por suas propriedades físicas ou químicas podem ser utilizados como matérias-primas, insumo, ou aditivos em processos industriais, o que envolve mais de 200 tipos de rochas e minerais, além de uma ampla funcionalidade nas aplicações industriais (Rodrigues, 2013).

Os mármore são rochas metamórficas derivadas do calcário que é uma rocha sedimentar originada de material precipitado por agentes químicos e orgânicos. Sua composição é basicamente calcita (carbonato de cálcio –  $\text{CaCO}_3$ ) podendo conter menores quantidades de carbonato de magnésio, silício, argila e outros minerais. É matéria-prima para indústria da construção civil, siderúrgica, de tinta, de papel, plásticos e química, material para agregados, cimento, cal, indústria do vidro, refratários, corretivos de solo entre outros usos (Sampaio e Almeida, 2008).

Neste contexto, o principal objetivo deste trabalho é realizar um estudo comparativo entre dois *softwares* o *RecMin – Recursos Mineros* e o *Datamine Studio 3* utilizados na indústria de mineração levando em conta que o primeiro é um *software* disponibilizado gratuitamente e o segundo apresenta custo de licença superior a \$50.000 dólares. Para isso, toma-se como estudo de caso a modelagem geológica de uma ocorrência de mármore utilizando-se de técnicas para a avaliação de recursos e reservas: pesquisa geológica, elaboração de base planialtimétrica, modelo tridimensional do corpo de minério e modelo de blocos.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista que os *softwares* aplicados na indústria de mineração são de fundamental importância para avaliações que permitam a obtenção de dados com alta confiabilidade, hoje a informatização dos dados é imprescindível para otimização da realização das atividades inerentes ao setor mineral.

As rochas carbonáticas (calcário, dolomito e mármore), por sua vez, são materiais de grande importância por ter uma ampla aplicação sendo matéria-prima em muitos setores produtivos como: a indústria da construção, indústria de papel, indústria de tinta, indústria cimenteira, indústria de vidro etc. Sendo a utilização de carbonato de cálcio e magnésio insumo básico para a fabricação de vidro, e que a informatização ganhou grande espaço na indústria mineral, a utilização de várias técnicas conjuntamente para a avaliação de depósitos minerais oferece material para a avaliação da viabilidade técnica de uma ocorrência mineral.

Neste cenário, o desenvolvimento desta dissertação justifica-se pela utilização de técnicas computacionais para a modelagem geológica de um depósito mineral de mármore, em especial pela comparação de resultados entre um *software* comercial de grande aplicação nas indústrias de mineração e outro *software* gratuito desenvolvido junto à Universidade de Oviedo, de livre acesso a qualquer usuário.

## 1.2 OBJETIVOS

De acordo com contexto apresentado o objetivo geral e os objetivos específicos seguem relacionados nos próximos itens.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise comparativa da utilização de um *software* gratuito com outro *software* consolidado no mercado e de ampla aplicação na indústria de mineração, observando seus resultados no processo de avaliação de recursos e reservas minerais de uma ocorrência de mármore no Estado da Paraíba.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Comparar resultados obtidos dos *softwares* utilizados na elaboração uma base planialtimétrica com a topografia convencional e topografia remota;
- b) Comparar modelos: geológico e de blocos do corpo de minério de mármore.
- c) Comparar os resultados obtidos com as ferramentas computacionais utilizadas quanto à avaliação dos teores de CaO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Serão apresentados os temas que embasam esta pesquisa nos itens subsequentes. Relata-se alguns assuntos principais como: mineralização em estudo, a relação entre mineração e software, modelo geológico de blocos e cálculo de volume de sólidos, classificação de recursos e reservas e os métodos de avaliação e os softwares no planejamento de mina apresentando os utilizados na pesquisa.

### 2.1 CALCÁRIO E MÁRMORE

O calcário é um tipo de rocha sedimentar que em muitas regiões se estende por grandes áreas e constitui-se por camadas espessas. São compostos predominantemente por calcita (carbonato de cálcio –  $\text{CaCO}_3$ ), mas podem conter pequenas quantidades de outros minerais. Os calcários com impurezas de argila são chamados de calcários argilosos e quando a dolomita (carbonato de cálcio e magnésio –  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) é um constituinte muito importante a rocha é chamada de dolomito, que se assemelha ao calcário em todas as propriedades físicas sendo identificado e caracterizado com ensaios químicos (Dana, 1974).

A classificação mineralógica das rochas calcárias deve considerar a variação nas proporções de calcita, dolomita, bem como dos componentes não-carbonatados. A calcita apresenta maior valor econômico em comparação às demais variedades. Embora calcita e dolomita possam ser igualmente utilizadas em várias aplicações, em certos casos as suas características químicas são essenciais. A composição química da rocha é mais importante que a mineralógica e ainda devem ser especificados os teores de  $\text{CaCO}_3$  (ou  $\text{CaO}$ ),  $\text{MgCO}_3$  (ou  $\text{MgO}$ ), afóra a quantidade máxima de impurezas que pode ser tolerada (Sampaio e Almeida, 2008). Os minerais mais comuns apresentam as seguintes propriedades físicas:

- **Calcita** ( $\text{CaCO}_3$ ): com 56% de  $\text{CaO}$  é o componente mais comum nos calcários e mármore, bem como de outras rochas sedimentares e metamórficas. Ocorre no sistema cristalino hexagonal com boa clivagem romboédrica, apresenta dureza 3 na escala de Mohs, densidade  $2,71 \text{ g/cm}^3$  e coloração comumente branca, sem cor (hialino) ou colorida (cinza, vermelho, verde, azul, amarelo) (Luz et al., 2008; Klein e Dutrow, 2012);
- **Dolomita** ( $\text{CaO}_3.\text{MgCaCO}_3$ ): com 30,4% de  $\text{CaO}$  e 21,95% de  $\text{MgO}$ , sua origem supõe-se secundária por ser proveniente da substituição do cálcio pelo magnésio. Ocorre no sistema cristalino hexagonal, comumente em cristais romboédricos com faces curvadas, possui dureza

variando de 3,5 a 4,0, densidade  $2,85 \text{ g/cm}^3$  e pode ser rosa, cor de carne, incolor, branca, cinza, verde, marrom ou preta (Luz et al, 2008; Klein e Dutrow, 2012).

Rochas de características calcárias é encontrado em todos os continentes sendo extraído de pedreiras e depósitos que variam em idade desde o Pré-Cambriano até o Holoceno. A formação de depósitos de calcário se dá por meio de precipitação química e orgânica. É uma rocha sedimentar originada de material precipitado por agentes químicos e orgânicos.

Por meio das atividades de erosão e corrosão incluindo a solução de ácidos carbônicos ou outros de origem mineral, as rochas desintegradas e o cálcio em solução são conduzidos para o mar por meio da drenagem das águas. Após atingir o oceano, parte do carbonato de cálcio dissolvido precipita-se em decorrência da sua baixa solubilidade na água marinha. A evaporação e as variações de temperatura podem reduzir o teor de dióxido de carbono contido na água, causando a precipitação do carbonato de cálcio em consequência das condições de saturação. O carbonato de cálcio depositado segundo esse procedimento origina um calcário de alta pureza química (Sampaio e Almeida, 2008).

Embora a calcita possa ser precipitada diretamente da água do mar, a maioria dos calcários resulta da precipitação orgânica. Muitos organismos que vivem no mar extraem carbonato de cálcio da água para construir as resistentes conchas de proteção. Com a morte dos organismos, as partes resistentes e carbonáticas acumulam-se no fundo do mar. Quando a vida marinha é abundante, espessas camadas de conchas e outras partes resistentes podem acumular-se e quando consolidadas tornam-se calcários (Klein e Dutrow, 2012).

Acredita-se que os calcários magnesianos ou dolomíticos foram formados pela substituição, no próprio calcário calcítico, do cálcio pelo magnésio oriundo de águas com elevado teor de sais de magnésio.

O tamanho e a forma das partículas de calcário, decorrentes das condições de pressão temperatura e ação de solvente, são fatores que influenciam as características físicas das rochas (Sampaio e Almeida, 2008).

As impurezas presentes no calcário podem ser um fator limitante ao aproveitamento econômico dos mesmos, essencialmente, quando utilizados para fins considerados nobres:

- Argilas: a impureza mais comum nas rochas carbonatadas provavelmente é a argila (argilominerais - caulinita, argila, illita, clorita, esmectita e outros tipos micáceos). Quando ocorrem em quantidade apreciável, as argilas convertem em calcário de alto cálcio em marga (rocha argilosa). Esse tipo de calcário, quando calcinado, produz cal com propriedades hidráulicas, sendo que 5 a 10% de material argiloso produzem cal fracamente hidráulica e

quantidades de 15 a 30% de material argiloso geram cal altamente hidráulica (Sampaio e Almeida, 2008);

- Sílica: outras impurezas silicosas que não argilominerais comprometem o aproveitamento econômico do calcário, pois a sílica produz efeitos nocivos ao calcário. Calcários para fins metalúrgicos e químicos devem ter menos de 2% de sílica (Sampaio e Almeida, 2008).
- Enxofre e fósforo: os sulfetos, sulfatos e fosfatos são impurezas prejudiciais aos calcários. Nas indústrias metalúrgicas são exigidos calcários puros para usos em geral e os teores de enxofre e fósforo não devem ultrapassar os valores de 0,03 e 0,02%, respectivamente (Sampaio e Almeida, 2008);
- Ferro: é prejudicial à aplicação do calcário para vários fins industriais como cerâmicas, tintas, papel, plásticos, borracha e vidro (Sampaio e Almeida, 2008).
- Sódio e potássio: os compostos de sódio e potássio são raramente encontrados nos calcários e não constituem objeções ao uso da rocha, salvo se produtos finais com elevada pureza são exigidos. Quando presentes em pequenas proporções, estas impurezas podem ser eliminadas durante a queima do calcário (Sampaio e Almeida, 2008).

Embora o calcário seja um produto importante em diversos setores da economia devido à sua versatilidade, os dados de produção apresentam uma dificuldade de obtenção. Em alguns casos é classificado como agregado para a construção civil e não pelo tipo de rocha ou até considerado matéria-prima ou insumo para a indústria sem o devido registro para dados estatísticos do calcário. Hoje, as informações das agências como a USGS (*United States Geological Survey*) e a ANM (Agência Nacional de Mineração) apresentam os relatórios de alguns usos do calcário como a produção de cal, cimento e cal agrícola e não calcário bruto.

Mármore são calcários metamórficos. Rocha cristalina, composta por grânulos de calcita ou dolomita. Caracteriza-se pela baixa dureza e a efervescência com os ácidos (Dana, 1974). Por ser derivado do calcário as características de mineralizações e contaminações são equivalentes.

### **2.1.1 Métodos de Lavra de Calcário e Mármore**

A maior parte das minas de rochas carbonáticas (calcário, dolomito e mármore) são lavradas a céu aberto. Elas são denominadas de pedreiras, embora em muitas áreas, por razões técnicas, ambientais e/ou escala de produção, utilize-se a lavra subterrânea para a produção de calcário (Sampaio e Almeida, 2008).

Em uma lavra de rochas carbonáticas geralmente tem-se as seguintes operações: decapeamento, perfuração, desmonte por explosivos, carregamento e transporte até a usina de processamento. Os tipos de equipamentos utilizados variam com as particularidades de cada operação como capacidade de produção, tamanho e forma do depósito, distância de transporte, estimativa de vida útil da mina, localização em relação aos centros urbanos e fatores socioeconômicos, além das condições ambientais (Sampaio e Almeida, 2008).

A seleção do método de lavra depende essencialmente da relação estéril/minério; da espessura e das propriedades da cobertura; da espessura, forma, configuração e estrutura do depósito mineral; modo de ocorrência; instalações técnicas viáveis para realizar os trabalhos; fatores econômicos e fatores ambientais. A opção pela lavra a céu aberto está relacionada também aos custos da remoção da cobertura, o tipo de equipamento utilizado para esta remoção e à profundidade e espessura desta camada.

#### 2.1.1.1 Lavra em Bancadas

Neste tipo de lavra o capeamento é removido e transportado até um depósito situado nas imediações da abertura para expor o minério. O desenvolvimento é feito de modo descendente, por meio de uma série de bancadas consecutivas e iniciado pela preparação da bancada situada na cota mais elevada, após o trabalho de preparação inicial do terreno (Curi, 2014). Várias bancadas podem estar em operação simultaneamente em diferentes partes da mina a céu aberto (Fourier, 1998). A altura da bancada é normalmente governada pelas especificações das máquinas de operação (como perfuratrizes e shovels), pelas características do maciço e na dimensão dos blocos de lavra (Fourie, 1998; Curi, 2014). A geometria da bancada e da mina depende de muitos fatores como as próprias características do depósito mineral como volume e teor, além dos custos operacionais, a seletividade da lavra, a relação estéril minério, fatores geotécnicos entre muitos outros (Souza, 2001; Curi, 2014). Um exemplo deste método é apresentado na figura 1.

**Figura 1** – Visão geral da mina de calcário agrícola da Votorantim, em Rio Branco do Sul, Curitiba



Fonte: Gazeta do Povo (2017)

### 2.1.2 Processamento

O tratamento das rochas carbonatadas depende do uso e especificações desejadas para o produto. A lavra seletiva, a catação manual, a britagem em estágio unitário e o peneiramento são os métodos usuais para obtenção de produtos, cuja utilização final não requer rígidos controles de especificações (Luz et al., 2008).

A obtenção de produtos para aplicações consideradas nobres (papel, plástico, tintas, borrachas, vidro etc.) necessita de um circuito complexo de beneficiamento para não haver contaminação com ferro, já que a presença deste elemento interfere na alvura dos produtos, implicando conseqüentemente na diminuição do valor agregado aos mesmos (Luz et al., 2008). A cominuição do calcário pode ser feita por circuito em via seca, segundo as etapas de britagem, classificação, moagem em moinho de rolos tipo *Raymond* ou tubulares com bolas, com cuidados para evitar a contaminação por ferro.

Os principais produtos do calcário com maior valor agregado são o GCC (*Ground Calcium Carbonate*) e o PCC (*Precipitated Calcium Carbonate*), utilizados amplamente na indústria de papel, tintas, química e outras, que exigem produtos cada vez mais finos e de maior qualidade (MME, 2009).

O GCC é usado em diversas aplicações nas indústrias de papel, plásticos, tintas, entre outras, constituindo-se do carbonato de cálcio natural moído, com granulometria ultrafina ( $<10 \mu\text{m}$ ). Há duas faixas granulométricas do GCC que são importantes para a indústria de papel: uma grossa ( $<45 \mu\text{m}$ ) e uma ultrafina ( $<10 \mu\text{m}$ ). Na faixa grossa, a moagem é geralmente realizada em moinhos de rolos (método a seco), em circuitos fechados e com sistemas de classificação, e na faixa ultrafina, a moagem geralmente é realizada em moinhos de rolos. O método de moagem a úmido, com moinhos de bolas, é mais eficiente para obter granulometrias

finas. Esse método é mais complexo, porém pode ser empregado numa variedade de matérias-primas que, em muitos casos, prepara a alimentação da flotação. Na moagem ultrafina e a úmido, eventualmente há necessidade do uso de dispersantes químicos, que garantem a fluidez da polpa, melhorando a eficiência da moagem, mas deve ser avaliado o efeito no produto (Sampaio e Almeida, 2009).

O PCC é geralmente obtido através da calcinação do calcário, formando cal e dióxido de carbono com o objetivo de obter um carbonato de cálcio mais puro. Nessa calcinação há uma redução de 44% na massa original do  $\text{CaCO}_3$ , em decorrência da liberação do  $\text{CO}_2$ , e essa perda pode atingir 48% quando se utilizam calcários magnesianos. A reação de calcinação é reversível, ou seja, a cal é um produto instável que, ao reagir com água em uma transformação exotérmica, resulta na cal hidratada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), um produto mais estável, objeto da etapa seguinte. Finalmente, a cal hidratada, ao reagir com dióxido de carbono, resulta no PCC, carbonato de cálcio puro, precipitado (Sampaio e Almeida, 2009).

### **2.1.3 Utilizações Industriais do Calcário e do Mármore**

O carbonato de cálcio está presente maioria dos setores da indústria moderna. Os principais usos dos produtos contendo carbonato de cálcio são:

- Produção de cimento;
- Correção de solos ácidos;
- Aditivos em diversos processos químicos;
- Carga em diversos processos industriais;
- Purificação do ar e tratamento de esgotos;
- Refino de açúcar e outras aplicações em alimentos e produtos de higiene;
- Fabricação de vidros, aço, papéis, plásticos, tintas, cerâmica e muitos outros;
- Rocha ornamental.

#### **2.1.3.1 Indústria do Vidro**

A indústria do vidro é uma das consumidoras do  $\text{CaO}$  (gerado do mármore e do calcário) como matéria-prima. O processo de fabricação dos diversos tipos de produtos da indústria vidreira é praticamente o mesmo. As principais matérias-primas utilizadas nas usinas são sílica, barrilha ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), calcário, dolomita, feldspato e aditivos de sódio, ferro, cobalto, cromo, selênio, magnésio, cálcio etc. (Freire, 2016).

A composição soda-cal-sílica depende do vidro a ser fabricado. A cal atua como fundente sobre a areia de quartzo aumentando a insolubilidade e a resistência, além de reduzir a fragilidade do vidro. A composição da mistura ponderada das matérias-primas para manufatura do vidro segue um controle especial em função da qualidade do produto, o vidro. Grandes quantidades de magnésio afetam a dissolubilidade (Sampaio e Almeida, 2008).

Em Akerman (2000) temos que os vidros mais usados são classificados em cinco grupos principais dependendo da composição química:

*Vidros de Sílica fundida:* possuem resistência ao choque térmico. São utilizados em janelas de veículos espaciais, espelhos astronômicos, fibras óticas.

*Vidros de Borossilicato:* alta resistência ao choque térmico e ao ataque químico. Utilizados em utensílios domésticos como pratos, copos, alguns equipamentos de laboratório.

*Vidros de Chumbo:* é um vidro com baixas temperaturas de fusão e trabalho. Este é um tipo nobre de vidro aplicado em copos e taças finas conhecidas como cristal, além de muito utilizados na indústria eletroeletrônica.

*Vidros de Alumino-Borossilicato:* compreendem o alumínio cerca de 10 vezes maiores do que nos vidros sodo-cálcicas. São utilizados em tubos de combustão, fibras de reforço, vidros com alta resistência química e vitro cerâmicos.

*Vidros Sodo-Cálcicos:* a sua composição está dentro de 8 a 12% de óxido de cálcio e de 12 a 17% de óxido de sódio. Baixos teores de cálcio ou alto teor de óxidos alcalinos resultam em vidros com baixa estabilidade química.

**Tabela 1** - Classificação química e composição do vidro

		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	PbO
<b>sodo-cálcicos</b>	embalagens	72,0	2,0	-	12,5	1,0	11,0	1,5	-
	plano	71,0	1,0	-	13,5	0,5	10,0	4,0	-
	lâmpada	73,0	1,0	-	16,5	0,5	5,0	4,0	-
<b>Borossilicato</b>	Pyrex	79,0	2,0	13,0	5,5	-	-	-	-
	Fibra isolamento	66,0	1,5	3,5	15,5	1,0	8,0	4,0	-
<b>Chumbo</b>	Cristal	59,0	-	-	4,0	12,0	2,0	2,0	24,0
	Néon	63,0	1,0	-	8,0	6,0	-	-	22,0
	Lente	32,0	-	-	1,0	2,0	-	-	65,0
<b>Aluminobo-rossilicato</b>	Farmacêutico	72,0	6,0	11,0	7,0	1,0	1,0	-	-
	Fibra reforço	55,0	15,0	7,0	-	-	19,0	4,0	-

Fonte: Akerman (2000)

Os vidros podem adquirir cores devido às impurezas presentes na matéria-prima ou pode ser colorida de propósito com a introdução de óxidos como de ferro (verde, marrom), manganês (âmbar escuro, ametista, incolor), cobalto (azul escuro), selênio (tons de vermelho) e muitos outros.

A denominação vidro plano refere-se ao vidro fabricado em folhas planas ou chapas que, posteriormente podem ser usadas para outros fins (construção civil, automóveis e decoração). Na fabricação desses produtos, a dolomita é usada em decorrência do óxido de magnésio atuar como estabilizador para melhorar a resistência do vidro contra ataques por gases e umidade, tanto de origem química como natural. A dolomita também atua na redução da temperatura de fusão que aumenta a trabalhabilidade e na inibição das reações entre o estanho e o vidro no banho de estanho fundido para a obtenção de vidros planos (Sampaio e Almeida, 2008).

Os principais insumos utilizados na composição de uma mistura para fabricação de vidro plano são apresentados na tabela 2.

**Tabela 2** - Composição do vidro plano

<b>Componentes</b>	<b>(%)</b>
Sílica	51
Barrilha	16
Dolomita	13
Calcário	4
Sulfato de sódio	1
Vidro Reciclado	15

Fonte: Sampaio e Almeida (2008)

### 2.1.3.2 Agricultura

Todas as rochas carbonáticas compostas predominantemente por carbonato de cálcio e/ou carbonato de cálcio e magnésio (calcários, dolomitos, mármore etc.), independentemente da proporção CaO/MgO, são fontes para a obtenção de corretivos de acidez dos solos. Portanto, as reservas brasileiras de calcário agrícola podem ser consideradas como as mesmas reservas brasileiras de calcário, independentemente de sua aplicação. As reservas lavráveis de calcário no Brasil estão relativamente bem distribuídas pelos estados e, como em muitos países, representam centenas de anos de produção nos níveis atuais (DNPM, 2016).

## 2.2 MINERAÇÃO E *SOFTWARES*

Os empreendimentos minerais são negócios de alto risco de investimento exigindo assim, alta confiabilidade e transparência dos dados relatados por parte dos profissionais envolvidos. Tendo em vista que as indústrias de extração mineral trabalham com grande quantidade de dados no desenvolvimento de pesquisas para novas áreas de exploração dos recursos minerais, a informatização ganhou grande espaço na pesquisa mineral, planejamento de mina, modelagem geológica, lavra, relatórios de produção, projetos de ventilação (em minas subterrâneas), gerenciamento de frota e suprimentos, entre outras áreas, por proporcionar agilidade, competitividade às minerações, além de manipulação segura dos dados aos técnicos especializados e segurança dos resultados relatados aos investidores (Curi, 2014).

Ao longo das últimas décadas muitos *softwares* e aplicativos foram desenvolvidos oferecendo a esta indústria ferramentas para a geração de banco de dados, gerenciamento de dados topográficos e de amostragem, modelagem geológica, de blocos e de escavações, projetos de cavas, além de eficiência nas estimativas de recursos e reservas minerais – necessárias às indicações de viabilidade de projeto –, criação de modelos econômicos, *design* de mina e sequenciamento da retirada do minério (Curi, 2014).

As ferramentas computacionais na mineração estão presentes em praticamente todas as fases de um projeto de lavra de minas:

- **Pesquisa Mineral:** gerenciamento dos dados de sondagem, geológicos, geotécnicos, geoquímicos, criação de gráficos, mapas, modelos de superfície e sólidos, utilização de geoestatística para cubagem de depósitos minerais, desenvolvimento de modelos geológicos tridimensionais, seleção e aplicação de modelos de blocos, análise da geologia e da viabilidade do projeto (Ruiz Dioses, 2015; DATAMINE, 2018; GEOVIA SURPAC, 2018; MAPTEK, 2018);
- **Planejamento de Mina:** planejamento a longo, médio e curto prazo, programação de operações de mineração, projeção e otimização da mina, cálculo de volume e determinação de parâmetros de qualidade adequados, maximização da recuperação de minério, análise e visualização dos limites físicos da área da mineração, estocagem, limites de cava final, sequenciamento de produção, visualização das seções geológicas, dos limites do minério e da localização espacial, além do estudo de alocação de infraestrutura, escolha de método de lavra, dimensionamento de acessos e aberturas e otimização dos projetos de cava (DATAMINE, 2018; GEOVIA SURPAC, 2018; MAPTEK, 2018; Curi, 2014);

- **Produção:** os softwares visam otimizar e planejar o avanço da frente de lavra, melhorar a produtividade e realizar o controle de custos para maximizar a rentabilidade, fornecem ferramentas e recursos para planejar, programar e gerenciar a produção da mina, gerenciar equipamentos, plantas de beneficiamento e realizar o controle sobre o produto final, bem como planejar e gerenciar as operações de perfuração e desmonte (DATAMINE, 2018; GEOVIA SURPAC, 2018; MAPTEK, 2018);
- **Geomecânica:** os *softwares* são destinados à análise de escavações de mineração a céu aberto e subterrânea, incluindo análise de tensões, estabilidades de rochas em ambiente bidimensional e tridimensional e realizar o projeto de suporte de rochas (ROCSCIENCE, 2018).
- **Ventilação de Mina:** os *softwares* simulam o processo de ventilação em minas subterrâneas, modelando e simulando fluxos de ar, pressão, calor e gases, modelamento 3D, simulação de tubos de ventilação e ventiladores, propagação básica de contaminantes, simuladores de emergência, modelos de galerias e poços de minas subterrâneas (VENTSIM, 2018).

De acordo com Miladinovic (2011) pode-se relacionar os métodos considerados tradicionais e modernos para projeto e modelagem de uma mina segundo o tipo de processamento, custo do projeto, necessidade de investimento, visualização do corpo de minério, análise geométrica e de blocos (tabela 3).

**Tabela 3** – Características dos métodos tradicionais e modernos para projeto e modelagem de mina

TRADICIONAIS	MODERNOS
<b>Processamento manual de dados</b>	Computador para processamento de dados
<b>Muito tempo para processamento de dados</b>	Período muito curto para processamento de dados
<b>Ponto de início é determinado geologicamente pelo corpo de minério ou depósito</b>	Ponto de início com desenvolvimento de modelos computacionais do corpo de minério
<b>Aplicação da análise geométrica e análise da relação estéril/minério</b>	Análise de blocos baseado na sequência de mineração ótima
<b>Alto custo do projeto</b>	Baixo custo do projeto
<b>Pouco investimento</b>	Requer grandes investimentos em equipamentos e programas de computação
<b>Obtém resultados aproximados do processamento</b>	Processamento de dados acurados
<b>Permite somente visualização 2D</b>	Permite a exibição 2D e 3D de todos objetos

Fonte: Miladinovic (2011)

Miladinovic (2011) também afirma que as ferramentas computacionais podem ser divididas em três grupos considerando sua finalidade:

- **finalidade geral:** para modelamento e projeção de depósitos minerais por meio de mineração a céu aberto e subterrânea;

- **finalidade especializada**: para otimização de mineração a céu aberto e subterrânea, exploração e análises de minerais metálicos e não metálicos;
- **finalidade de aplicação específica**: designado para a análise de problemas específicos relatados para o projeto de mina ou o projeto de tecnologia de exploração, por exemplo análise dos custos de mineração, análises de estabilidade de talude, gestão de frota, entre outros.

Em Tomi (2001) tem-se que as aplicações de computadores na indústria mineral incrementam a quantidade e a qualidade de soluções para problemas de geologia e de engenharia de minas. Antes, os *softwares* de mineração eram projetados e desenvolvidos especificamente para requerimentos de uma única mina, apenas para minas de grande porte e limitados a computadores tipo *mainframe*; hoje, o avanço tecnológico, a difusão de conhecimento e a acessibilidade às ferramentas computacionais permitem:

- soluções generalizadas, apresentando recursos para todos os tipos de minas e qualidade de minérios;
- acesso pelas minerações de pequeno porte;
- possibilidade de utilização em computadores pessoais (*desktop* ou *notebook*), além de outros aparelhos como *tablets* e *smartphones*.

O processo de seleção de um *software* para ser utilizado em projetos da indústria extrativa mineral, segundo Curi (2014), deve:

- iniciar pelo levantamento de informações em catálogos, revistas, publicações, seminários, congressos e antigos usuários;
- considerar que a manipulação de dados deve ser fácil, possibilitar correção, adição, importação e exportação de dados;
- observar quais são os tipos de modelo de interpolação e de composição de amostras;
- avaliar os módulos estatísticos e geoestatísticos;
- avaliar a adequação do programa ao tipo de depósito;
- avaliar as técnicas de otimização e sequenciamento da lavra oferecidas pelo programa;
- avaliar a relação custo-benefício do programa.

### 2.3 MODELO GEOLÓGICO, MODELO DE BLOCOS E VOLUME DE SÓLIDOS

A realização de um modelo geológico tem a função de representar o corpo de minério de forma adequada simulando a geometria, a forma, zonas mineralizadas e determinar os volumes, auxiliando assim os profissionais da área a compreender, prever e planejar a exploração do recurso mineral. Um modelo deve reproduzir tridimensionalmente as

características reais do corpo mineral com o intuito de calcular recursos e reservas minerais, tendo em vista que os valores reais só serão conhecidos após serem minerados (Curi, 2014).

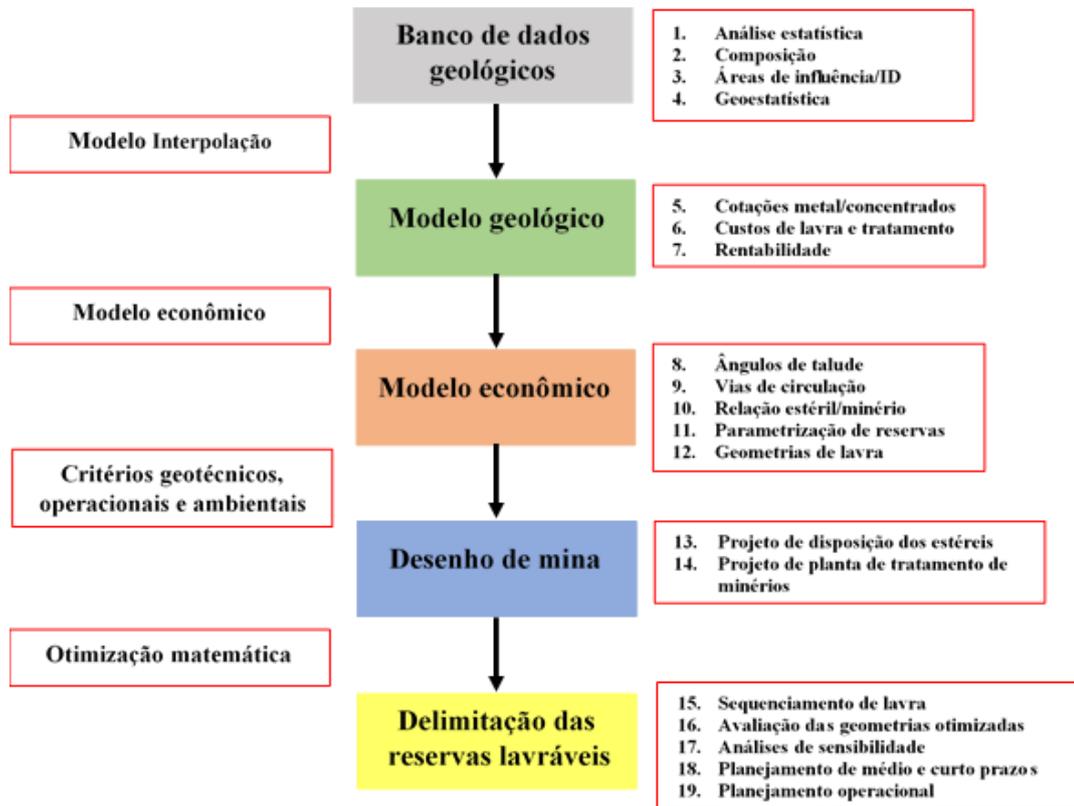
Modelar um depósito mineral e planejar sua lavra é uma atividade complexa, não apenas devido aos aspectos técnicos e financeiros a serem observados, mas também devido às diversidades a curto, médio e longo prazos a serem consideradas na vida útil de uma mina. O modelo tridimensional tem que representar de maneira adequada o nível de conhecimento das reservas já que é possível avaliar casos reais de forma precisa além de permitir sua manipulação (Yamamoto, 2001).

Yamamoto (2001) define uma série de etapas genéricas sequenciais para o processo de modelagem geológica e planejamento de mina:

- o acesso ao banco de dados e processamento inicial;
- estruturação dos bancos de dados;
- interpretação geológica;
- modelagem de superfícies (topografia e estruturas geológicas);
- modelagem geométrica do depósito;
- modelagem de teores;
- determinação dos limites ótimos de lavra;
- projeto da mina;
- estimativa de reservas lavráveis; e
- planejamento de lavra, programação e controles de produção.

Essas atividades sequenciais estão resumidas na figura 2, que consiste em um fluxograma simplificado com as etapas a serem seguidas para a determinação das reservas minerais lavráveis. À esquerda do fluxograma tem-se os modelos e critérios utilizados entre cada etapa, e à direita os estudos fundamentais que devem ser realizados para chegar até à delimitação das reservas lavráveis.

**Figura 2** – Etapas genéricas sequenciais para o processo de modelagem geológica e planejamento de mina



Fonte: Curi (2014)

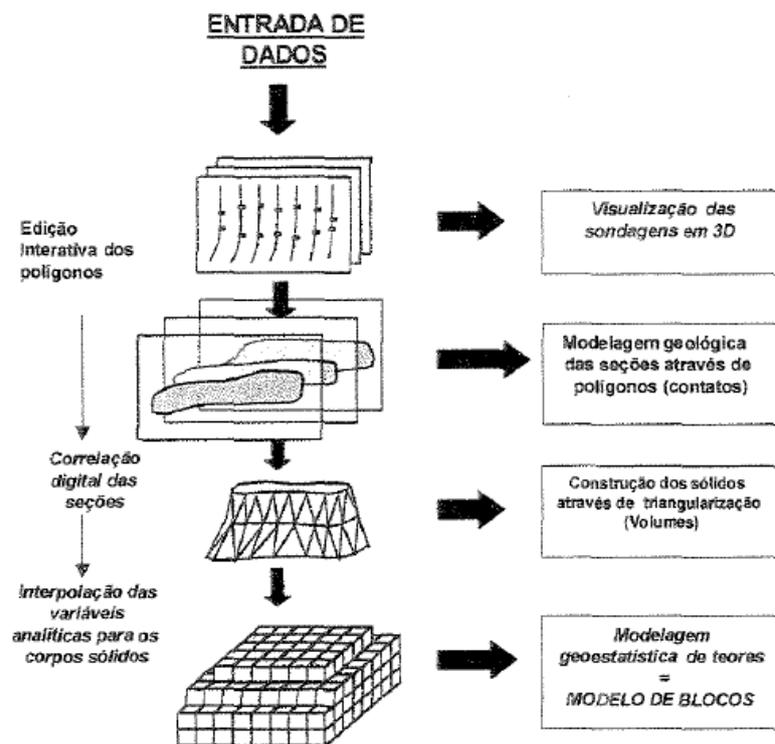
O banco de dados é confeccionado com as informações de sondagem (coordenadas da boca dos furos de sondagem, direção, mergulho), resultados de amostragem, dados de topografia, análises geoquímicas, litologias, mineralogia. Esses dados são analisados usando-se métodos padronizados como relatórios e listagens impressas, interpretação de planos e seções, técnicas de interpolação, análises estatísticas e geoestatísticas, apresentação gráfica interativa (Yamamoto, 2001; Curi, 2014).

A realização da caracterização geológica para a formação do banco de dados considera que as propriedades geológicas apresentam variação espacial e que podem ser influenciadas por fatores estratigráficos e estruturais, podendo aparecer como continuidade ou descontinuidade, de acordo com as características de cada depósito. A partir destes dados, compilados no banco de dados, como mencionado anteriormente, pode-se construir seções verticais modeladas geometricamente em ferramentas computacionais. A interpretação interativa destes elementos em cada seção gera polígonos que sintetizam áreas com os mesmos atributos geológicos, como litotipos. A união destes polígonos permite representar estas formas em 3 (três) dimensões, através de um corpo sólido que representa a geometria ou volume do atributo a ser representado (Silva, 2000; Houlding, 1992; Kavouras, 1992).

A figura 3 sintetiza o método de modelagem geológica através de sistemas computacionais. Primeiramente, as seções são interpretadas ou modeladas, resultando em polígonos que representam domínios com as mesmas propriedades. Estes polígonos são unidos sequencialmente, seção por seção, permitindo a geração de sólidos. Esta união é feita através de ferramentas computacionais especializadas, onde os polígonos são unidos por meio de triângulos ou malhas triangulares, chamadas *wireframes* (Silva, 2000; Kavouras, 1992). Deve-se enfatizar que os modelos tipo *wireframe* representam apenas a superfície de objetos e não a variação de valores (teores) ou qualquer outro atributo espacial. Para representar essas variações são utilizados os modelos de bloco (Tomi, 2001).

A modelagem tridimensional dos depósitos minerais é feita por um processo computacional chamado popularmente de triangulação. Esse processo pode ser entendido como uma representação matemática altamente precisa de dados (ou pontos), dispostos em 3 (três) dimensões. A triangulação é muito usada na modelagem de formas naturais, tais como: topografia, escavações mineiras, desenho de minas, estradas, feições geológicas em geral, entre outras (Curi,2014).

Figura 3 – Modelagem geológica tridimensional



Fonte: Kavouras (1992)

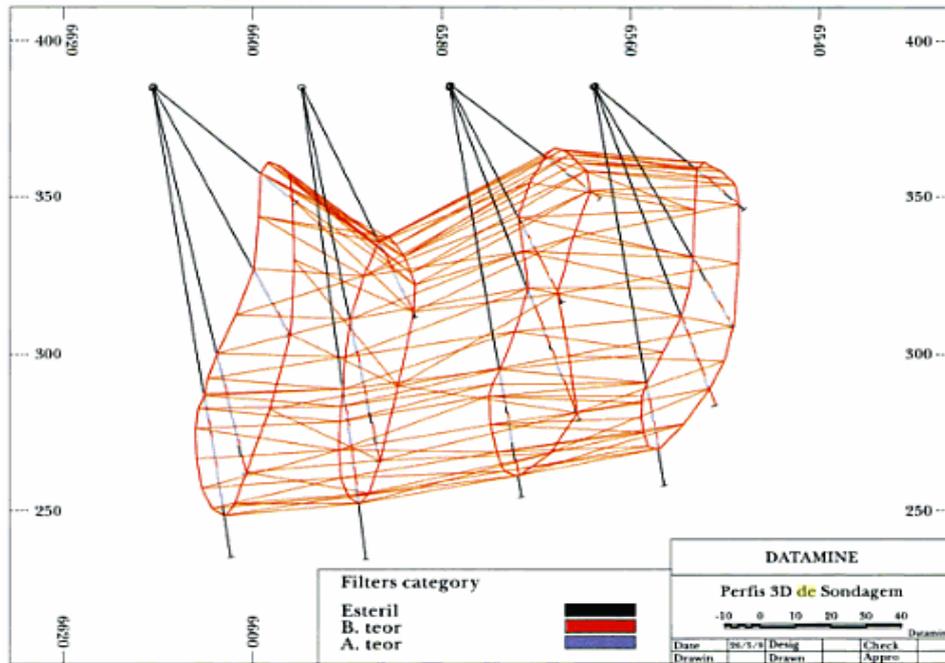
O modelo geológico tem a sua confecção dependente do julgamento, experiência e conhecimento do profissional, que terá como tarefa principal delinear o contorno, entre o corpo mineralizado e sua encaixante. Após a definição dos limites da região mineralizada, passa-se à determinação da morfologia do depósito. Uma vez estabelecida a forma do depósito e seus contornos, deve-se relacionar os diversos tipos de materiais rochosos presentes, com as devidas características de qualidade, quantidade e localização (Curi, 2014).

A modelagem de superfícies é feita normalmente por meio de modelos digitais de terreno (*Digital Terrain Model - DTM*), um método para representar superfícies muito usado pela indústria de *software* tipo CAD (*Computer Aided Design*). Os modelos digitais de terreno são utilizados na modelagem das superfícies topográficas e feições geológicas, como fraturas, falhas e juntas (Henley et al., 1989 *apud* Tomi, 2001)

Existem diversos métodos para a triangulação de um conjunto de pontos tridimensionais. Um dos mais utilizados é a triangulação de *Delaunay*, que permite criar malhas trianguladas praticamente otimizadas e únicas para um conjunto de pontos tridimensionais (Davis, 1986 *apud* Tomi, 2001). Além disso, são muito úteis as ferramentas que permitem a definição de poligonais-limite, tanto internas quanto externas, para um controle abrangente da superfície a ser modelada. A malha triangulada resultante é armazenada em um conjunto de dois arquivos um contendo as informações dos pontos (*points*) e o outro contendo os detalhes dos triângulos da malha (*triangles*) (Tomi, 2001).

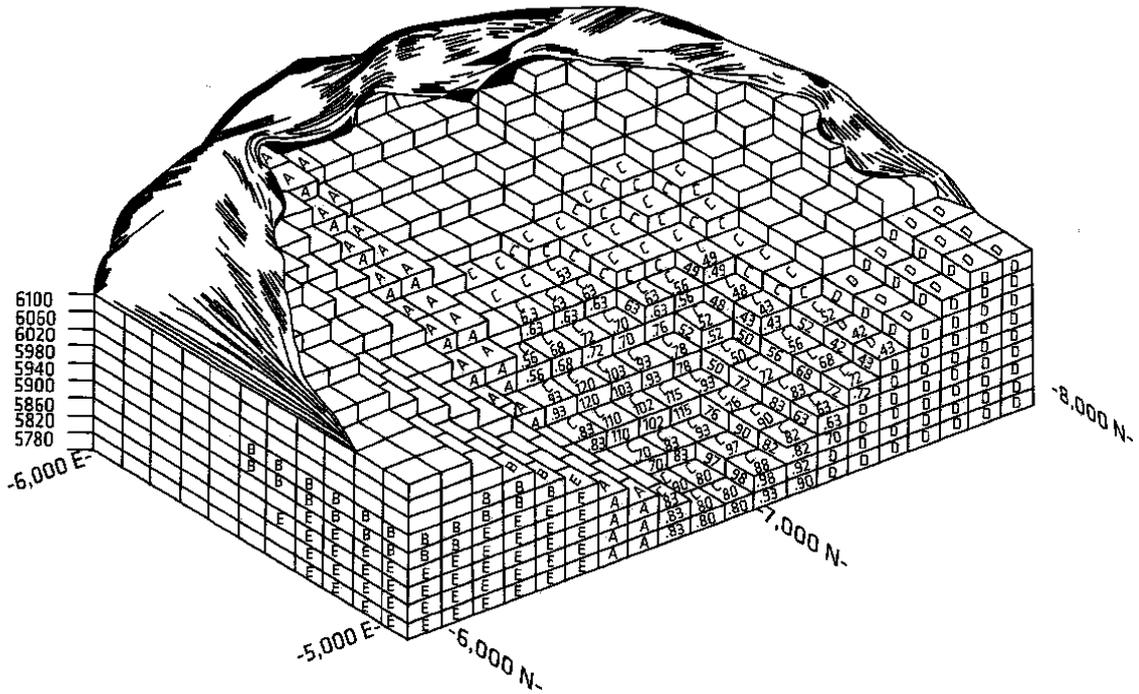
Como mencionado anteriormente, os modelos tipo *wireframe* representam apenas a superfície de objetos e não a variação de valores (teores) ou qualquer outro atributo espacial. Quem faz esta representação são os modelos de bloco. Até a década de 1960 as jazidas eram representadas por seções contínuas. A representação de corpos de minério por meio de modelo de blocos em vez do tradicional modelo de representação por seções, base dos métodos manuais do desenho dos limites da lavra, possibilitou uma revolução em termos do planejamento de lavra de minas (Curi, 2014). Exemplos visuais de uma *wireframe* e um modelo de blocos podem ser vistos nas figuras 4 e 5, respectivamente.

Figura 4 – Modelo sólido triangulado tipo *wireframe*



Fonte: Carmo (2013)

Figura 5 – Modelo tridimensional de blocos de lavra de um depósito hipotético



Fonte: Crawford e Davey (1979) *apud* Curi (2014)

Em Tomi (2001) tem-se que o modelo de blocos permite o armazenamento de uma grande variedade de atributos e variáveis, como litologias, teores de minerais, densidade, informações geotécnicas ou hidrogeológicas, entre outras. Um bloco tridimensional é ao mesmo tempo uma unidade de informação e um volume a ser escavado, podendo isso ser notado quando tal bloco pode armazenar, atualizar, mapear os dados atribuídos a ele, possuir um valor econômico, possuir teor e uma posição espacial real. O volume de cada bloco do modelo representa a menor porção, unidade ou célula do corpo mineral a ser avaliada pelo modelo matemático. A cada uma dessas unidades, ou células, serão atribuídas todas as propriedades ou variáveis de interesse, para posterior interpretação (Gama, 1986; Curi, 2014).

O modelo de blocos tem a função de complementar a modelagem geológica por *wireframes*, com unidades discretizadas que permitem modelar a variabilidade de todas as variáveis presentes no modelo preenchendo o modelo *wireframe* com blocos e sub-blocos (Tomi, 2001).

De modo geral são requeridos 4 (quatro) tipos básicos de arquivos de dados para criar um modelo de blocos a ser usado pelos modelos matemáticos específicos para o planejamento de lavra de minas, segundo Curi (2014):

- a) o arquivo de furos de sondagem;
- b) os arquivos de composição;
- c) o arquivo modelo de blocos vazio; e
- d) o arquivo de superfície topográfica (opcional).

Em resumo, antes de se usar qualquer *software*, o arquivo de furos de sondagens deve ser criado pelo usuário, assim como o arquivo de superfície topográfica. Com base no arquivo de furos de sondagens, cria-se o arquivo de composição, da mesma forma que, com base no modelo de blocos vazio (em branco) e no arquivo de composição (com ou sem arquivo de superfície topográfica) é obtido o modelo de blocos que deve ser então preenchido com os atributos de interesse. Os elementos necessários para preencher o modelo de blocos podem ser obtidos com base nas informações do banco de dados geológico e dos arquivos de composição dos furos de sondagem (Curi *et al.*, 2013).

A maior parte dos estudos de modelagem de jazidas é baseada na apresentação e interpretação seccional de dados e diferentes depósitos geológicos têm métodos específicos para sua interpretação inicial, mas o principal método de interpretação geológica inicial é o de seções verticais ou horizontais através dos dados de sondagem (Tomi, 2001).

Peroni (2011) e Carmo (2013) afirmam que a intenção de construção de um sólido de corpo mineral é verificar o volume que tal sólido envolve considerando que os corpos geológicos não apresentam geometria simples e regular. Através da modelagem pode-se obter a representação espacial da geologia, o volume que o sólido envolve e os teores do material dentro desse sólido ou de um domínio de interesse.

#### 2.4 AVALIAÇÃO DE RECURSOS E RESERVAS MINERAIS

A avaliação dos recursos e reservas de um depósito mineral é um procedimento que tem o objetivo de estimar tonelagens e/ou teores, e também o erro associado a essas estimativas, tendo em vista que os valores verdadeiros só são conhecidos quando o minério é completamente lavrado. Esses valores estimados serão úteis para realizar o estudo de viabilidade técnica e econômica. O sucesso de qualquer empreendimento de mineração depende fundamentalmente da relevância das estimativas de reservas minerais efetuados a partir de variáveis como espessura, densidade, teor etc., medidas experimentalmente nos depósitos minerais (Yamamoto, 2001; Curi, 2014).

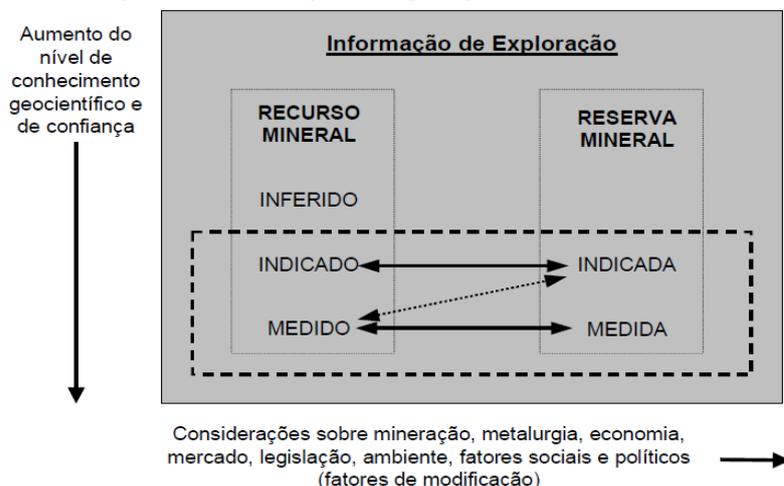
O recurso mineral é definido como um depósito de minério que, se pesquisado, pode apresentar parâmetros com possibilidade de aproveitamento. O nível de conhecimento geológico não está associado a fatores econômicos, legais e de lavra. A partir do conhecimento geológico estabelecem-se classes de recursos em inferido, indicado e medido e com o aumento de informações geológicas os recursos inferidos podem se tornar indicados e/ou medidos (Curi, 2014).

A jazida mineral é compreendida como uma parte do recurso mineral que apresenta viabilidade técnica e econômica. As reservas são classificadas em indicada (ou provável) e medida (ou provada), de acordo com o nível de conhecimento geológico e do nível de confiança dos dados. Para estas avaliações devem ser levados em considerações muitos fatores para garantir a confiabilidade dos resultados, tais como: a época em que foi realizada a pesquisa, método de lavra e beneficiamento, aspectos ambientais, aspectos sociais, aspectos econômicos e aspectos legais. As reservas indicadas podem tornar-se medidas de acordo com o aumento das informações geológicas e com o nível de confiança adequado (Curi, 2014).

Os recursos e reservas estão interligados pelas análises dos fatores de modificação que influenciam na viabilidade econômica. Recursos indicados podem ser convertidos em reservas indicadas (prováveis) assim como recursos medidos podem ser convertidos em reservas medidas (provadas), levando em consideração o aumento de informações da exequibilidade

econômica, aspectos legais, sociais e técnicos. A figura 6 mostra essa relação de conversão de recursos em reservas.

**Figura 6** – Relação entre informação de exploração, recurso mineral e reserva mineral



Fonte: DNPM (2002)

Por não ser um resultado exato, o cálculo de reservas envolve estimativas e incertezas que estão associadas à geologia do depósito mineral, variabilidade da mineralização, método de pesquisa, disponibilidade e confiabilidade dos dados e o grau de acurácia. As técnicas de obtenção dos dados e do cálculo desses valores influenciam nestas estimativas. Quando determinados os parâmetros geológicos e geométricos do depósito tem-se os elementos iniciais para o cálculo de reservas, cuja base são os pontos de amostragem (Popoff, 1966; Conde e Yamamoto, 1995; Yamamoto, 2001).

O processo de avaliação de um depósito inicia-se com a sua amostragem, que tem por objetivo determinar a extensão da mineralização e a geometria do corpo mineralizado, os seus teores e sua distribuição espacial. No processo de seleção de amostras estão implícitas as condições necessárias para que a amostragem seja representativa do depósito mineral. De acordo com a Teoria de Amostragem de Pierre Gy, elaborada na década de 50, qualquer amostragem comporta erros, sendo alguns deles associados ao próprio minério e outros relacionados aos procedimentos técnicos de amostragem (Yamamoto, 2001).

O grau de confiabilidade na quantificação de reservas minerais é inerente aos métodos de pesquisa utilizados, às técnicas analíticas, à precisão da localização dos pontos de amostragem e, sobretudo, à variabilidade apresentada pelo corpo de minério (Yamamoto, 2001). Para garantir a confiabilidade dos dados, Curi (2014) afirma que o cálculo de reservas deve obter as estimativas de tonelagem e teores com o erro associado e em certo intervalo de

confiança. A seleção de amostras deve ser bem planejada e executada para garantir a representatividade.

Yamamoto (2001) e Popoff (1966) destacam que o cálculo de reservas é útil para todos os estudos de viabilidade técnica e econômica posteriores que, por sua vez, são necessários para determinar os seguintes parâmetros: produção anual, vida útil provável da mina, método de lavra, método de beneficiamento e investimentos (equipamentos, mão-de-obra, instalações, energia, materiais etc.).

Popoff (1966) relata que o procedimento de cálculo de reservas compreende as seguintes operações:

- avaliações geológicas: visa a determinação dos limites do corpo de minério;
- avaliações do método de pesquisa e amostragem: analisa se a sondagem é adequada e gera uma amostra confiável assim como se o processo de amostragem (quantidade analisada e redução da amostra) foi adequado;
- avaliação dos dados de pesquisa: analisa informações sobre a densidade dos dados, exatidão da localização dos pontos de amostragem, recuperação dos testemunhos, densidade aparente, peso específico e qualidade das análises;
- delineação do corpo mineral: a análise e a interpretação dos dados disponíveis permitem determinar a forma, os limites e as dimensões de um depósito mineral;
- seleção de um método apropriado para o cálculo de reservas.

A quantificação e qualificação das reservas minerais são os passos iniciais para determinar a viabilidade técnica e econômica de um projeto de mineração. A mudança de cenário econômico, assim como uma mudança de necessidade industrial, pode influenciar nestes valores, por isso o fator tempo também deve ser considerado.

#### **2.4.1 Métodos de Avaliação de Reservas**

Todos os métodos existentes para avaliação de reservas procuram determinar, segundo seus princípios, os valores médios das variáveis de interesse (teor, densidade e espessura) que, aplicados às equações básicas para determinação de reservas, fornecem o valor da reserva de uma porção ou de todo o depósito. Anteriormente a avaliação era baseada em fatos, experiência e intuição. O aumento do conhecimento acerca dos depósitos minerais, dos conhecimentos tecnológicos, de técnicas de amostragem mais eficientes e dos métodos de mineração melhoraram e embasaram os métodos de avaliação existentes atualmente (Popoff, 1966; Yamamoto, 2001).

Conde e Yamamoto (1995) dizem que o aperfeiçoamento dos métodos para avaliação de reservas permitiu a geração de resultados mais precisos e confiáveis, o que foi possível devido à crescente escassez de jazidas minerais ricas, ao grande investimento necessário à abertura de novas minas e à evolução de computadores, permitindo manuseio de grande volume de dados.

Os métodos de avaliação de reservas podem ser classificados em três grupos: Convencionais, Estatísticos e Geoestatísticos (Carmo, 2013).

- a) Métodos Convencionais, Clássicos ou Tradicionais: são baseados nos princípios de interpretação de Popoff (1966) e permitem realizar o cálculo de reservas usando fatores médios ponderados (teores, espessuras e volumes), os quais são aplicados a áreas ou volumes de influência. Exemplos de métodos desta classe são: método das seções ou perfis, método dos polígonos, dos triângulos, método das matrizes de blocos, método dos contornos, método do inverso da potência da distância (Revuelta e Jimeno, 1997);
- b) Métodos Estatísticos: baseados em amostragens aleatórias realizadas no depósito mineral, interpretam a natureza aleatória das mineralizações considerando os princípios elementares de estatística convencional (Curi, 2014);
- c) Métodos Geoestatísticos: surgiram para levar em consideração tanto as correlações espaciais entre as amostras como a aleatoriedade representada pelas variações imprevistas de um ponto a outro no depósito (Conde e Yamamoto, 1995).

#### 2.4.1.1 Método das Seções

Quando as sondagens são feitas em malhas regulares e dispostas em linhas pode-se utilizar esse método para a avaliação dos depósitos onde as seções são traçadas transversais à direção do maior eixo do corpo mineralizado (Pereira, 2003). Essas seções permitem o cálculo da área ocupada pelo minério e o volume pode ser calculado pela equação:

$$T = \frac{S_1 + S_2}{2} \times H \times d \quad (1)$$

sendo:

T: tonelada de minério

S<sub>1</sub>: área da seção 1

S<sub>2</sub>: área da seção 2

H: distância entre as seções

d: densidade do minério

#### 2.4.1.2 Método do Inverso da Potência da Distância

Em Yamamoto (2001) tem-se que este método está fundamentado no fato de que os teores de amostras dos furos vizinhos, em relação a um determinado ponto ou bloco do depósito, são proporcionais ao inverso das respectivas distâncias ou a uma potência destas. Disso, pode-se concluir que amostras que estejam mais perto do furo têm maiores pesos em relação a amostras mais distantes. A equação que se utiliza para a interpolação dos teores de um ponto ou bloco é dada por:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \cdot \frac{1}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (2)$$

onde:

$T_i$ : teor da  $i$ -ésima amostra localizada no ponto de coordenadas  $(x_i, y_i, z_i)$

$d_i$ : distância entre a  $i$ -ésima amostra de coordenadas  $(x_i, y_i, z_i)$  e o ponto com coordenadas  $(x, y, z)$

$p$ : potência

O método necessita que a definição da potência para o projeto seja adequada. Barnes (1980) *apud* Yamamoto (2001) afirma que uma potência igual a 2 (dois) produz uma interpolação intermediária e adequada tendo em vista que potências mais baixas geram suavização dos valores extremos e potências altas geram um realce desses valores. Por ser a potência 2 (dois) a mais adequada, este método pode ser denominado de Inverso do Quadrado da Distância (IQD).

O método IQD pode ser aplicado em avaliações pontuais ou avaliação de blocos. Para utilizá-lo deve-se levar em consideração a definição dos blocos de avaliação, o fator de ponderação e a definição de área de busca (Vargas, 2016).

#### 2.4.1.3 Krigagem

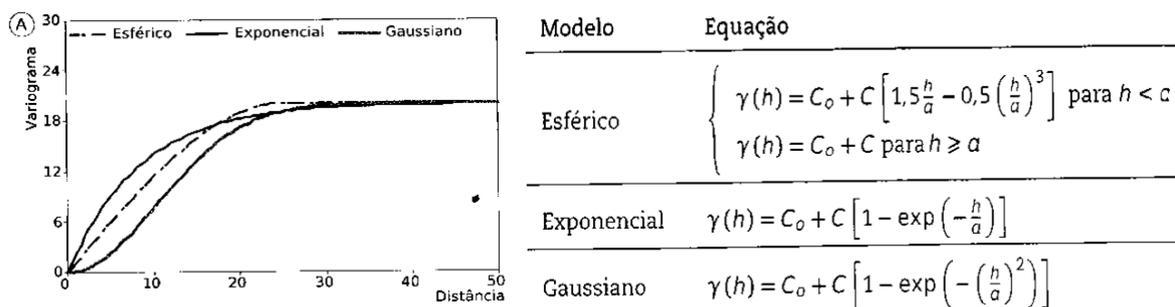
Krigagem é um processo geoestatístico utilizado para estimar valores de parâmetros no espaço quando considerados interdependentes pela análise variográfica. Abrange uma família de algoritmos conhecidos como krigagem simples, krigagem da média, krigagem ordinária e krigagem universal (Yamamoto e Landim, 2013). A krigagem refere-se à ponderação das amostras com pesos maiores ou menores, considerando a distância entre as mesmas e seus

agrupamentos. As principais vantagens de sua utilização são as minimizações dos erros de estimação e a possibilidade de uso da totalidade da informação disponível (Curi, 2014).

Realizar uma krigagem exige a realização de uma análise variográfica dos dados através da elaboração da função variograma que mede a variância entre pontos separados por uma distância  $h$ , onde para pontos próximos a variância é pequena e para pontos distantes a variância aumenta (Yamamoto e Landim, 2013).

Os tipos de variogramas são experimentais e teóricos em que o primeiro é calculado a partir dos dados e o segundo é uma equação que se ajusta ao experimental. Dentro desses modelos temos alguns mais comuns como: o exponencial, o esférico e o gaussiano, apresentados na figura 7.

**Figura 7** - Modelos de Variogramas Experimentais (à esquerda) e Teóricos (à direita).



Fonte: Yamamoto e Landim (2013)

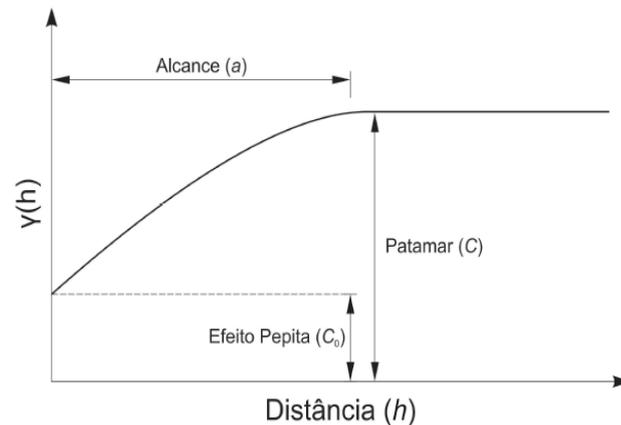
As principais propriedades de um variograma são: o alcance, o efeito pepita e o patamar (figura 8).

- Alcance, amplitude ou range ( $a$ ): a distância segundo a função variograma atinge certo nível (patamar) igual a variância dos dados.

- Efeito pepita ( $C_0$ ): causado pela variância aleatória pode ser resultado tanto da variabilidade do fenômeno espacial em estudo como da escala de amostragem

- Patamar ( $C$ ): quando a variância se estabiliza em torno de uma variância máxima, levando em consideração uma distância máxima. Mesmo com o aumento da distância a função variograma apresenta uma variância máxima. Quando isso não ocorre e a variância continua aumentando o variograma não apresenta o patamar.

**Figura 8** - Variograma com patamar e suas características.



Fonte: Pereira (2017)

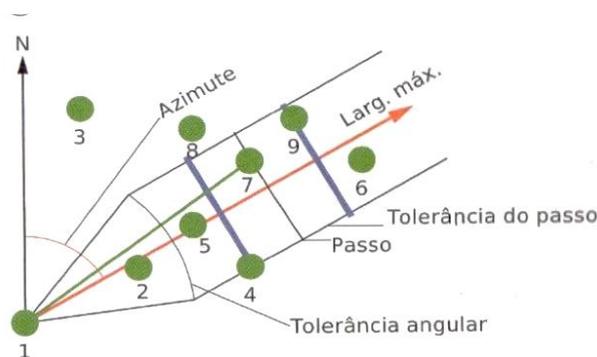
Para o cálculo de variogramas experimentais é necessário saber que com relação à distribuição espacial de pontos amostrais, ele pode ser regular ou irregular.

- Distribuição regular: o variograma pode ser calculado diretamente com base nos pontos amostrais devido a regularidade da malha de distribuição. Os pares de pontos encontrados a uma distância  $h$ , ao longo de uma direção, são usados para calcular as diferenças ao quadrado que são acumuladas para o cálculo da média, pela equação:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \{ [Z(x+h) - Z(x)]^2 \} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (3)$$

- Distribuição irregular: como os pontos da malha de distribuição estão a distâncias irregulares, necessita-se definir parâmetros além da distância e de direção para regularizar a malha. Para cada ponto de dado, define-se uma janela (caracterizada por direção, tolerância angular, largura máxima, tamanho do passo e tolerância do passo) dentro da qual pode haver um ou mais pontos, ou nenhum. O esquema da janela para cálculo de variogramas experimentais é apresentado na figura 9.

**Figura 9** - Esquema mostrando a pesquisa de para cálculo de variogramas experimentais em uma distribuição irregular



Fonte: Yamamoto e Landim (2013)

#### 2.4.1.3.1. Krigagem Ordinária

Dos tipos de krigagem citados no início desta seção a krigagem ordinária é a que faremos uso nesta pesquisa. É o método mais simples em que a estimativa em um ponto não amostrado resulta da combinação linear dos valores encontrados na vizinhança próxima. Seu estimador é apresentado na equação 4. Sendo  $x_0$  um local não amostrado,  $n$  valores obtidos em pontos adjacentes e  $\{\lambda_i, i = 1, n\}$  são os pesos associados aos  $n$  dados.

$$Z_{KO}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (4)$$

#### 2.4.2 Terminologia da Classificação de Recursos e Reservas Minerais

Em 2002 o Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM (atual Agência Nacional de Mineração – ANM) constituiu um grupo de trabalho, através da Portaria 229/2002, com o objetivo de fornecer diretrizes para compreensão das definições, terminologia, classificação e parametrização dos recursos e reservas minerais. Em setembro de 2002, foi publicada a minuta “Norma brasileira para classificação de recursos e reservas minerais” estabelecendo essas normas. A terminologia adotada pelo DNPM nesta norma para a classificação dos recursos e reservas foi:

- ✓ Recursos: medido, indicado e inferido
- ✓ Reservas: medida e indicada.

A Comissão Brasileira de Recursos e Reservas (CBRR), formada em 2015 com o objetivo de difundir melhores práticas para declaração de resultados de exploração e pesquisa mineral estabeleceu no ano de 2016 o “Guia Brasileiro para declaração de recursos e reservas minerais” que orienta a emissão de relatórios públicos com tais dados. Esse guia pode ser utilizado para todos os minerais sólidos, minerais industriais, rochas e agregados, carvão e gemas. A terminologia adotada pela CBRR neste guia para a classificação dos recursos e reservas foi:

- ✓ Recursos: medido, indicado e inferido
- ✓ Reservas: provável e provada.

O guia da CBRR foi criado com base nas orientações do *Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards* (CRIRSCO), criado em 1994 com o objetivo de unificar os códigos de diversos países em um único com exigências de qualidade técnica tendo em vista que todos os códigos apresentavam semelhanças. Reúne representantes das principais

organizações reconhecidas que são responsáveis pelos códigos e guias para declaração de recursos e reservas minerais, quais sejam: Canadá (CIM), Australásia (JORC), Estados Unidos (EUA), Europa (PERC), África do Sul (SAMREC), Chile (*Comisión Minera*), Mongólia (MPIGM), Indonésia (KOMPERS), Cazaquistão (KAZRC), Rússia (NAEN) e Brasil (CBRR).

## 2.5 SOFTWARES NO PLANEJAMENTO DE MINA

O planejamento de mina informatizado tem o objetivo de proporcionar aos técnicos e administradores condições de otimizar processos, diminuir riscos, aumentar competitividade e segurança. Existem alguns programas específicos para o planejamento de mina, e o objetivo de tais ferramentas é agilizar e facilitar o trabalho. Esses *softwares* são formados por um conjunto de aplicativos específicos, denominados módulos (Curi, 2014).

Segundo Curi (2014) os programas específicos para o planejamento de mina apresentam as seguintes diferenças:

- configuração de *hardware*;
- interface gráfica;
- interface com o usuário (característica de amigabilidade);
- equipamentos acessórios; e
- preço de venda.

Os principais módulos que geralmente compõem esses *softwares* são:

- **Banco de dados**: contém toda entrada e manipulação de informações de pesquisa mineral, o que inclui dados de sondagem, teores, litologias, coordenadas, aspectos geofísicos, geoquímicos, hidrogeológicos e dados de desmontes, fornecendo com isso a base fundamental para avaliar recursos e reservas (Curi, 2014; DATAMINE, 2018);
- **Gerenciador de dados topográficos**: para entrada de dados de arquivos de topografia, geração de mapas de superfícies, curvas de níveis e cálculos de volume entre superfícies (Curi, 2014);
- **Gerenciador de amostragem**: gerencia o tratamento estatístico e geoestatístico dos dados de entrada armazenados no banco de dados, possibilita a interpretação geológica, diferenciação dos tipos litológicos, geração de relatórios de volumes e tonelagens (Curi, 2014, DATAMINE, 2018);
- **Modelagem tridimensional (3D)**: confecção de seções geológicas e cálculo de volumes do corpo modelado, modelagem feita por um processo de triangulação utilizando dados de pesquisa contidos no banco de dados (Tomi, 2001; Curi, 2014);

- **Modelagem de blocos**: visualização tridimensional de todo o modelo de blocos, como blocos ou nuvem de pontos, visualização da distribuição espacial de áreas de maior concentração de minérios e diferentes tipos litológicos. Os blocos de lavra são selecionados segundo especificações técnicas e econômicas como posição, geometria, qualidade, teores, imposições geotécnicas, características mineralógicas etc. (Curi, 2014);
- **Projeto de cava**: traçado de bancos e bermas, rampas e acessos à mina, seções geológicas e de produção, cálculo de volume de estéril etc. (Curi, 2014);
- **Gerenciador de escavação**: para otimização matemática de cava e planejamento de lavra, permitindo simular os planejamentos de lavra a longo e médio prazo considerando cenários e/ou estratégias diversas (Curi, 2014);
- **Interface gráfica**: promove uma apresentação gráfica 3D do ambiente, visualização topográfica, possui renderizador que permite a construção dos modelos digitais de terreno, menu de controle, possibilita gravar, salvar etc. (Curi, 2014);
- **Gerenciador de impressão**: permite a visualização de qualquer arquivo gerado no sistema para inclusão de dados adicionais como legendas, títulos, cabeçalhos e desenhos destacando áreas. Saídas para *plotters* e impressoras são obtidos por meio das opções do sistema (Curi, 2014);

Alguns dos *softwares* utilizados no planejamento de mina são apresentados na tabela 4 a seguir.

**Tabela 4** – *Softwares* utilizados no planejamento de minas

<i>Software</i>	<i>Empresa</i>	<i>País</i>	<i>Logotipo</i>
<i>Datamine Studio 3.0</i>	Constellation Software Inc (TSX:CSU)	Canadá	
<i>Vulcan</i>	<i>Maptek</i>	Austrália	
<i>Surpac</i>	Dassault Systèmes <i>GEOVIA</i>	França	
<i>MineSight</i>	<i>Hexagon</i>	Suécia	
<i>Micromine</i>	Micromine	Austrália	
<i>Deswik</i>	Deswik	Austrália	

Fonte: A autora (2018)

## 2.6 SOFTWARES COMERCIAIS E SOFTWARES GRATUITOS

O mercado econômico oferece à mineração hoje duas características comerciais de *softwares*: os gratuitos (ou de livre acesso) e os comerciais. Os dois tipos apresentam soluções de uso em pequenos, médios e grandes projetos da indústria mineral. As principais diferenças entre eles consistem nos custos das licenças que são altíssimas para os *softwares* comerciais chegando a milhares de dólares, e os *softwares* gratuitos muitas vezes não tem suporte de uso além das limitações para processamento de dados (Vargas, 2016; Ruiz Dioses *et al.*, 2008). Os altos custos de licenças limitam o uso de tais *softwares* a empresas de médio a grande porte deixando de fora da informatização as empresas pequenas, profissionais e universidades.

Exemplos de *softwares* comerciais utilizados na mineração são os produtos *Datamine*, *MineSight*, *Vulcan* e *Surpac*, como apresentados na tabela 4. Como exemplo de *softwares* gratuitos tem-se o *RecMin*, *SGeMS* e *GSLIB*, sendo o primeiro utilizado para importação de dados, modelamento geológico, modelamento de blocos e estimativas de teores dos blocos, e os dois últimos utilizados para estimação de teores através de métodos geoestatísticos. Na tabela 5 é apresentada uma comparação entre os *softwares* comerciais e os *softwares* gratuitos.

**Tabela 5** – Comparação entre os *softwares* comerciais e os *softwares* gratuitos

<i>Software Gratuito versus Software Comercial</i>		
<b>Características</b>	<b>Software Comercial</b>	<b>Software Gratuito</b>
Custo de Licença	Mais de \$50.000 dólares	Gratuito
Suporte de autores ou provedores	Constante	Escasso
Aplicações em mineração	Todo tipo de projetos (pequenos e grandes projetos)	Aplicações de uso parcial em mineração (pequenos e médios projetos)
Funcionalidade	Complexos	Fácil uso
Idioma	Inglês	Inglês, Espanhol, Francês

Fonte: Ruiz Dioses (2008)

### 2.6.1 *RecMin* – Recursos Mineros

O *RecMin* é um *software* gratuito que foi desenvolvido para gestão de projetos de investigação e exploração de recursos minerais e foi criado em 1992 pelo Dr. César Castañon Fernández, professor de Engenharia de Minas da Universidade de Oviedo, Espanha, para uso exclusivo da empresa canadense *Rio Narcea Gold Mines S.A.* Hoje, o *software* encontra-se disponível para *download* no site *www.recmin.com*. O programa é gratuito para *download* e uso com as seguintes condições:

- Não existe responsabilidade nenhuma quanto ao funcionamento do programa;

- Não existem limitações para uso educativo em escolas e universidades;
- Não existem limitações para uso particular ou de empresas que o utilizam como ferramenta para seus próprios trabalhos;
  - Não existem limitações quanto à divulgação do programa e cursos sobre ou com o programa, desde que seja respeitado e mencionado explicitamente o nome e a propriedade do programa;
  - Em trabalhos publicados em revistas e/ou livros em que o programa foi utilizado como ferramenta, o nome e a propriedade do programa devem ser explicitamente mencionados;
  - A comercialização deste programa não é permitida;
  - Não é permitido fazer o *download* deste programa de um lugar diferente do site do autor.

Existe também uma opção para empresas mediante pagamento anual que permite algumas vantagens como suporte individualizado, adaptações personalizadas do programa, curso de formação, utilização ilimitada de extensões do programa de gestão de informação de base de dados de blocos, gestão de frota e impressão de códigos de barras personalizados.

O programa é composto basicamente por 5 módulos:

- Módulo de depósito (*RMYac.exe*) – neste módulo pode-se: adicionar, excluir e editar depósitos minerais; adicionar, excluir e editar modelo de bloco; importar e exportar modelos, arquivos \*.DXF etc.; executar cálculos de interpolação, cone invertido, interseções; editar permissões de acesso; pode funcionar em rede e com réplicas dos bancos de dados (RECMIN, 2018).
- Módulo de edição (*RMEdit.exe*) – é o módulo no qual se pode: editar todas as informações das sondagens em relação às coordenadas do *collar*, medidas de desvio, litologias, dados de análise, interseções com corpos minerais etc.; ver gráficos de dados de amostra; calcular interseções de acordo com o teor de corte, exportar informações; pode ter várias tabelas de dados de litologias de amostras (RECMIN, 2018).
- Módulo de desenho (*RMDraw.exe*) – é um módulo com formato gráfico que trabalha em 3D e permite: abrir e editar sondagens, superfícies, linhas, modelos de blocos, triangulação, notas de texto etc.; trabalhar em várias janelas e visualizar os objetos em 3D; gerar superfícies, linhas, malhas etc.; fazer seções, giros e translações; preparar impressões; realizar cálculo de área, volumes etc. (RECMIN, 2018).
- Módulo 3D (*RM3D.exe*) – no módulo de renderização em 3D pode-se: visualizar em 3D os objetos selecionados, com opção de dar *zoom*, girar, mover, transladar objetos e mudar a direção; abrir arquivos \*.RMR salvos do módulo de desenho com os objetos que forem

selecionados; iniciar o programa a partir do módulo de desenho para ver os objetos ativos naquele momento; ver apresentações em modo automático (RECMIN, 2018).

- Módulo de segurança (*RMSeg.exe*) – é o módulo de cópias de segurança e compactação de base de dados, no qual se pode: programar semanalmente as cópias de segurança de arquivos, conjuntos de arquivos ou pastas; selecionar as cópias de segurança \*.BAK.; no caso das bases de dados que o programa utiliza, elas podem ser compactadas enquanto os *backups* são feitos (RECMIN, 2018).

### 2.6.2 *Datamine Studio 3*

Criada em 1981, a *Datamine* é a líder global no mercado para fornecimento de tecnologia e serviços de *software* de geologia e planejamento de mina, com operação em 30 países e operando em mais de 1.400 empresas ao redor do mundo. Em 2015 foi adquirida pela *Constellation Software Inc*, a maior companhia de *software* canadense.

As ferramentas computacionais da *Datamine* fornecem soluções para gerenciamento de dados de: Modelagem de corpo de minério; Lavra a céu aberto; Lavra subterrânea; Geologia: exploração GIS, gerenciamento de dados geológicos, modelamento de recursos e reservas e mapeamento e análises; Planejamento: planejamento a céu aberto e planejamento subterrâneo; e Operações: desmonte a céu aberto, desmonte subterrâneo e controle de minério.

É composto por muitos módulos, dentre os quais destacam-se:

- *Studio EM* – é a solução completa para interpretação geológica e análises de exploração. Inclui edição de pontos e *strings*, *wireframes*, modelagem básica de bloco e estimação. É capaz de vincular dinamicamente um banco de dados de sondagens. Tem um conjunto completo de recursos de plotagem para produzir gráficos de seções, gráficos de planos e relatórios, visualização 3D abrangente e opção de publicar arquivos \*.PDF em 3D (DATAMINE, 2018).

- *Studio RM* – produzir modelos de recursos e reservas que representam com precisão a geologia, estruturas, mineração e teor. Inclui fatores de custos e engenharia. Dados de análise estrutural, modelamento implícito para rápida análise de teor ou litologia, simulação condicional para análise de teor de corte e otimização de reserva mineral para definição da parte lavrável dos modelos de recursos (DATAMINE, 2018).

- *Strat3D* – para modelagem de depósitos estratificados. Cria rapidamente modelos 3D de alta qualidade para a visualização, classificação e avaliação de minério de ferro, bauxita e outros depósitos estratificados. Cria modelos de blocos de estratos (DATAMINE, 2018).

- *DataBlast* – abrange todo o processo de perfuração e desmonte desde o projeto até as operações de campo. Transfere dados eletronicamente, responde a mudanças em tempo real e gera relatórios de reconciliação. Identifica tendências e melhora o desempenho das detonações ao longo do tempo. (DATAMINE, 2018).
- *NPV Scheduler* – fornece um sistema completo de planejamento estratégico de mina a céu aberto com funcionalidade que abrange desde a otimização do *pit*, geração de *pushbacks*, otimização de teor de corte, programação, otimização de transporte e gerenciamento de estoque (DATAMINE, 2018).

### 2.6.3 SGeMS

Nome derivado da sigla em inglês *Stanford Geoestatistical Earth Modelling Software*, é um programa de download gratuito para análise geoestatística dos dados, criado na Universidade de Stanford. Apresenta uma interface 3D e quase todas as ferramentas de estimação por krigagem e simulação geoestatística. A interface do *SgeMS* é composta por três seções principais: o painel de algoritmos, o painel de visualização e o painel de comandos (Yamamoto e Landim, 2013; Ruiz Dioses, 2015)

### 3 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo são apresentados a localização, as características do processo ANM (Agência Nacional de Mineração), os aspectos geológicos (Regional e Local) e os aspectos ambientais da área em estudo.

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

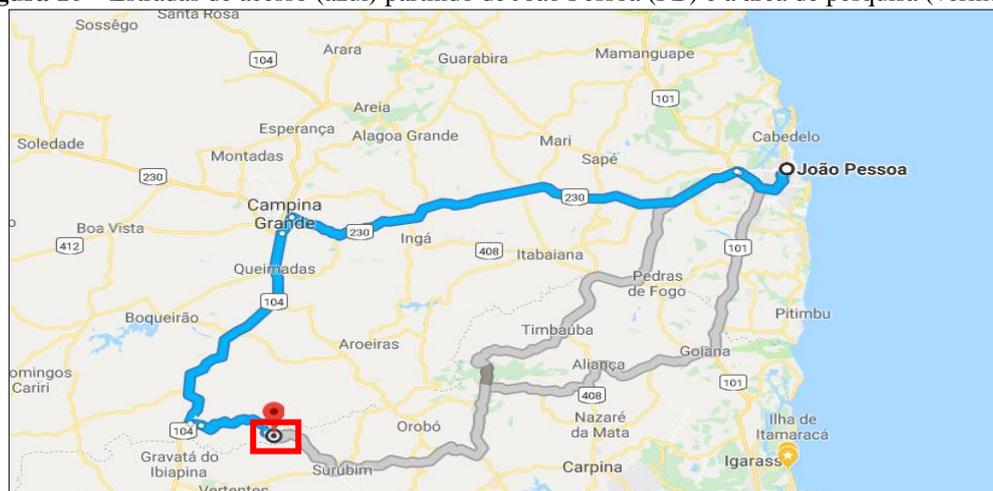
A área em estudo está situada na zona rural do município de Santa Cecília, Estado da Paraíba e refere-se a uma ocorrência de mármore calcítico a dolomítico cujo aproveitamento desejado é como matéria-prima para produção de vidro.

#### 3.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

O município de Santa Cecília está localizado na porção sul do estado da Paraíba, a aproximadamente 180 km da capital João Pessoa. Possui 284 km<sup>2</sup> de área territorial, com população estimada em 6.674 habitantes em 2018 (IBGE, 2019). Faz fronteira com o estado de Pernambuco. Tem sua capacidade produtiva baseada nos setores agropecuários e em parcela muito menor, a indústria.

A área em estudo está situada na zona rural do município. O acesso à área partindo da capital João Pessoa se dá a partir da BR-230 sentido Campina Grande. Contornando a rotatória na entrada de Campina Grande toma-se a BR-104 até a cidade de Queimadas-PB, seguindo 70 km em estrada asfaltada até o Posto Fiscal de Alcantil, onde se pega à esquerda percorrendo 28 km na PB-150 até chegar à área pesquisada. Na figura 10 podem ser observadas as estradas de acesso e a área pesquisada em vermelho.

**Figura 10** – Estradas de acesso (azul) partindo de João Pessoa (PB) e a área de pesquisa (vermelho)

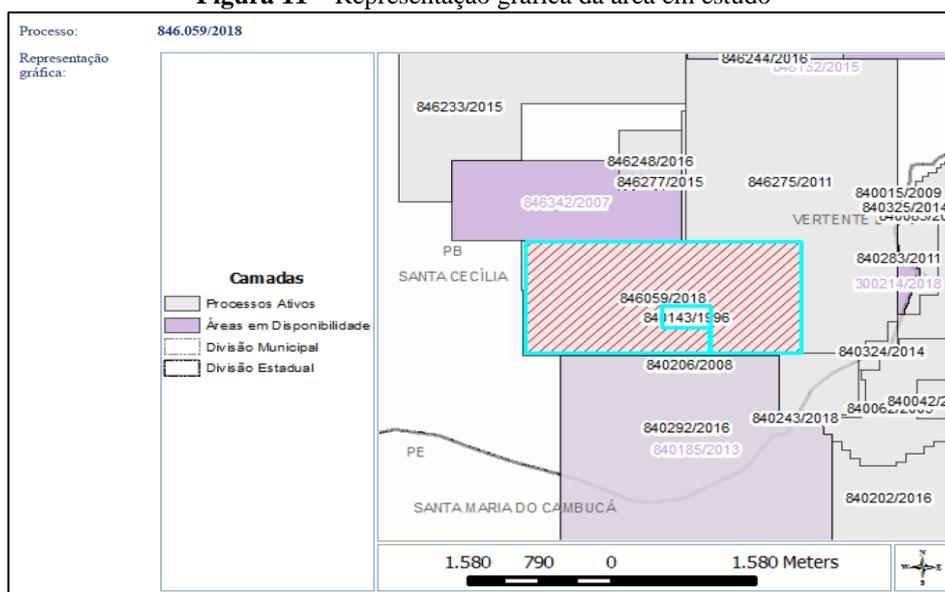


Fonte: Google Maps (2018)

### 3.3 MEMORIAL DESCRITIVO DO POLÍGONO DELIMITADOR DA ÁREA

O polígono delimitador da área de pesquisa mineral refere-se ao processo mineral 846.059/2018 da ANM (Agência Nacional de Mineração) requerido para lavra de calcário, sendo fruto de uma cessão parcial do processo original 840.143/1996. A área encontra-se totalmente dentro dos limites do município de Santa Cecília. Todos esses detalhes podem ser observados na figura 11.

**Figura 11** – Representação gráfica da área em estudo



Fonte: ANM (2018)

A área da poligonal do processo mineral apresenta 403,46 ha (quatrocentos e três e quarenta e seis hectares) com 8 (oito) vértices, especificados na tabela 6, com ponto de amarração coincidente com um dos vértices da poligonal.

**Tabela 6** – Coordenadas dos vértices da poligonal (DATUM: SIRGAS 2000)

Latitude	Longitude
-07°45'47''088	-35°53'33''781
-07°46'32''570	-35°53'33''781
-07°46'32''570	-35°54'06''000
-07°46'13''120	-35°54'06''000
-07°46'13''120	-35°54'22''960
-07°46'22''460	-35°54'22''960
-07°46'22''460	-35°54'06''100
-07°46'32''570	-35°54'06''100
-07°46'32''570	-35°55'11''597
-07°45'47''088	-35°55'11''597
-07°45'47''088	-35°53'33''781

Fonte: ANM (2018)

### 3.4 ASPECTOS GEOLÓGICOS

As características da Geologia Regional e Local são apresentadas nos itens 3.4.1 e 3.4.2.

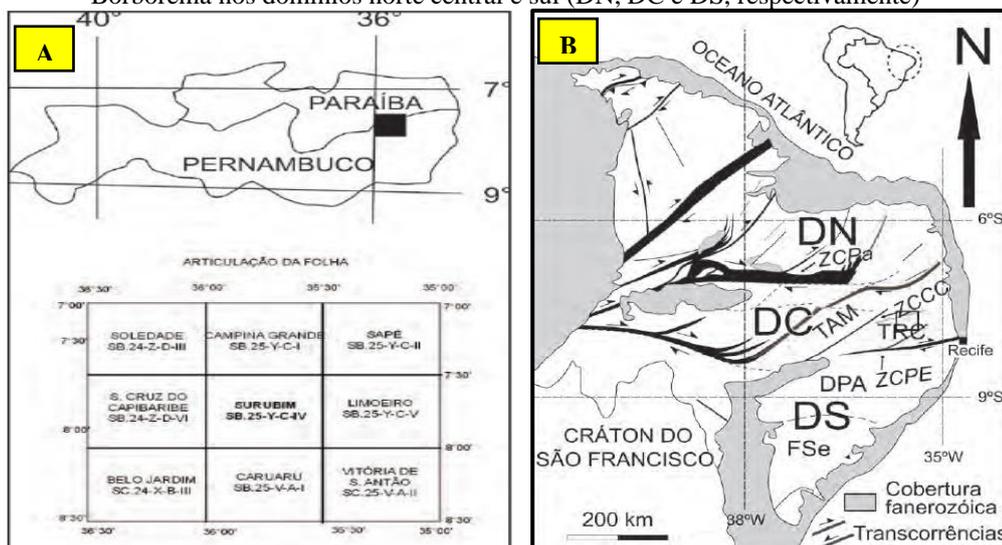
#### 3.4.1 Geologia Regional

A área de estudo está localizada no município de Santa Cecília, na Paraíba e está inserida na Folha Surubim - leste dos estados de Pernambuco e da Paraíba - limitada pelas coordenadas  $35^{\circ}30'$  e  $36^{\circ}00'$  de longitude W e entre  $7^{\circ}30'$  e  $8^{\circ}00'$  de latitude S. Articula-se com as folhas Santa Cruz do Capibaribe, a oeste, Campina Grande, a norte, Caruaru, a sul e Limoeiro, a leste.

No contexto geológico regional, a Folha Surubim está localizada no Domínio Central da Província Borborema que é tradicionalmente separado dos domínios Sul e Norte pelos sistemas de zonas de cisalhamento Pernambuco e Patos. A localização da Folha Surubim e o esboço da Província Borborema com os domínios podem ser vistos na figura 12. Sua geologia é representada por ortognaisses e seqüências supracrustais agrupadas em diferentes complexos; numerosos plútons graníticos e sieníticos; zonas de cisalhamento transcorrentes com expressivas faixas de milonitos; e uma cobertura sedimentar de idade fanerozóica.

Dentro das seqüências metassedimentares presentes tem-se o Complexo Surubim – Caroalina no qual se encontra a área estudada. Esse complexo ocupa uma boa parte da Folha Surubim e compreende uma ampla variedade de tipos litológicos; micaxistos paragnaisses pelíticos a semi-pelíticos, leucognaisse, anfibólio- biotita paragnaisses, quartzitos, mármores, rochas calcissilicáticas e para anfibolitos, intercalações entre dois tipos petrográficos são comuns, variando de decímetros a metros de largura. A granada é um acessório comum.

**Figura 12** – A) Mapa de localização Folha Surubim B) Esboço geológico mostrando a divisão da Província Borborema nos domínios norte central e sul (DN, DC e DS, respectivamente)



Fonte: CPRM (2017)

### 3.4.2 Geologia Local

As rochas alvo da pesquisa mineral estão inseridas no Complexo Surubim-Caroalina e nos trabalhos de mapeamento foram identificados alguns litotipos básicos na região: Micaxistos Granadíferos e Anfibólio Biotita paragnaises, Unidade de Calcários (mármore) que inclui Mármore Cinza-Esbranquiçado, Mármore Bandado rico em Biotita e Metamarga, e Unidade dos Sedimentos Terciários e Quaternários.

- ***Micaxistos Granadíferos e Anfibólio Biotita paragnaisse:*** são característicos do Complexo Surubim-Caroalina, ocupam a porção Sudoeste e Nordeste da área e representam cerca de 40% das rochas aflorantes no local. Caracteriza-se por um gnaisse migmatítico de bandamento centimétrico a métrico, diferenciado pela variação mineralógica. A grossulária é um mineral comumente encontrado na área estudada. É uma granada de cálcio-alumínio com a fórmula  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ , embora o cálcio possa em parte ser substituído por ferro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) e o alumínio por ferro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ). São encontradas em tons vermelhos nesta região. É um mineral típico de metamorfismo de contato entre o Paragnaisse e os calcários. O afloramento do xisto granadífero dentro da área em pesquisa pode ser observado na figura 13.

**Figura 13** – Afloramento do xisto granadífero dentro da área da poligonal



Fonte: Companhia Brasileira de Vidros Planos (2019)

- ***Unidade de Calcários (mármore)*** – Comportam-se como lentes “amendoadas” de direção NW-SE inseridas em meio às rochas encaixantes silicáticas descritas anteriormente. Afloram em cerca de 45% da área da poligonal, sendo seu aspecto essencialmente magnesiano

à dolomítico verificado pela pouca reação ao ácido clorídrico (HCL). Esta sequência carbonática apresentou espessura superior aos 75 m de profundidade.

Em geral, são rochas de coloração cinza apresentando um aspecto bandado devido à presença de micas (biotita), com granulação média à fina e porções mais cisalhadas de cor cinza-escuro (níveis metapelíticos) e de granulação mais fina contendo pirita (FeS). Na base da sequência, apresentam aspecto estriado e composição calcissilicática (vênulos quartzosos, anortita, clorita).

- *Mármore Cinza-Esbranquiçado*: representam a minoria do pacote carbonático, cerca de 15% do volume, formando uma lente de aspecto amendoado de direção WNW-ESE. Material de composição tipicamente calcítica e baixo teor de ferro (Fe), reage muito bem ao ácido clorídrico (HCL). Raras manchas (milimétricas) contendo biotita e pirita podem ocorrer. Apresenta plano de foliação 300Az/50° - SW. O aspecto bandado desta camada de rocha pode ser observado na figura 14, com a apresentação de um furo de sondagem e de uma amostra de mão, e a figura 15 mostra o contato do mármore com a rocha encaixante.

**Figura 14** – Mármore Cinza- esbranquiçado em A) Furo de sondagem PCX-13 e em B) Amostra de mão



Fonte: Companhia Brasileira de Vidros Planos (2019)

**Figura 15** – Contato entre nível de mármore mais puro e a rocha encaixante (Xisto)



Fonte: Companhia Brasileira de Vidros Planos (2019)

- *Mármore Bandado rico em Biotita*: corresponde a 70% da sequência carbonática. Material maciço, apresenta aspecto bandado (alternância entre bandas claras carbonáticas e bandas escuras ricas em biotita ( $K_2(Mg,Fe)_2(OH)_2(AlSi_3O_{10})$ )). Por vezes pode ser cortado por vênulos quartzosos preenchendo fraturas. Pode ocorrer piritização nas partes mais escuras. Sua composição química é variável, sendo relacionada com a predominância de silicatos ou carbonatos, o que foi verificado nas sondagens realizadas. A aparência do Mármore Bandado no furo de sondagem PCX-07 é apresentada na figura 16.

**Figura 16** – Aparência do Mármore Bandado em testemunho de sondagem do furo PCX-07



Fonte: Companhia Brasileira de Vidros Planos (2019)

- *Metamarga*: esta litologia não aflora em superfície, sendo possível sua visualização apenas a partir dos furos de sonda. Estratigraficamente é a litologia mais profunda dentro do pacote carbonático, sendo o seu surgimento um indicativo de proximidade das rochas do embasamento. Sua coloração é verde escura (clorita + epidoto), e apresenta granulometria fina. Não apresenta

características químicas desejáveis para uso na fabricação do vidro. A aparência da Metamarga pode ser vista na figura 17 do testemunho do furo PCX-07.

**Figura 17** – Aparência da Metamarga em testemunho de sondagem do furo PCX-07



Fonte: Companhia Brasileira de Vidros Planos (2019)

- **Unidade dos Sedimentos Terciários e Quaternários** – Estes são representados pelos depósitos aluvionares neógenos, sendo constituídos por sedimentos arenosos e conglomeráticos não consolidados. Na área apresentam espessura, em geral, inferior à 1 m, recobrendo as rochas. Estes sedimentos podem ser observados na figura 18.

**Figura 18** – Visão do solo raso e não consolidado próximo ao furo de sondagem PCX-08



Fonte: Companhia Brasileira de Vidros Planos (2019)

### 3.5 ASPECTOS AMBIENTAIS

A região apresenta solos pobres e rasos, exceto nos vales estreitos e profundos. A vegetação é composta por espécies dos biomas Floresta Caducifolia, Cerrado, Caatinga. As características da vegetação podem ser vistas na figura 19.

**Figura 19** – Aspectos da vegetação da área da poligonal



Fonte: Companhia Brasileira de Vidros Planos (2019)

## 4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Com base no que foi apresentado na Fundamentação Teórica foi estabelecida a metodologia experimental para alcançar os objetivos dessa dissertação. A metodologia empregada constitui-se das seguintes etapas: levantamento topográfico; análise dos resultados das sondagens; construção do banco de dados; elaboração da base planialtimétrica com topografia remota e topografia convencional; modelagem tridimensional do corpo mineral e discretização do mesmo em um modelo de blocos; determinação das reservas e teores.

### 4.1 ELABORAÇÃO DA BASE PLANIALTIMÉTRICA

O levantamento topográfico de uma área pode ser realizado com a obtenção das coordenadas bidimensionais X e Y (levantamento planimétrico) e com a obtenção da coordenada Z, que se refere à altimetria ou desnível em relação a um ponto de referência (levantamento altimétrico). A elaboração de uma base planialtimétrica, ou seja, levantamento de campo das coordenadas X, Y e Z, em um trabalho de pesquisa mineral e implantação de um projeto de mineração é importante devido à necessidade de se conhecer o terreno em que irá executar a lavra, além de avaliar o comportamento do corpo de minério. Conhecer as curvas de nível, determinar a locação dos acessos e da infraestrutura da mina, ou a demarcação da poligonal realizada para identificação da área no campo, além da avaliação ambiental, são alguns exemplos da importância desse levantamento. Com o objetivo de comparar metodologias foram realizados dois procedimentos: a topografia convencional e a topografia remota (com o auxílio do *Google Earth* e do *software* de conversão de arquivos *TCX Converter* - versão 2.0.32). Além disso, para comparação dos dados topográficos foram coletados 100 pontos aleatórios de cada metodologia (topografia convencional e topografia remota) para avaliação dos dados de altimetria dos pontos com o objetivo de avaliar se a topografia remota apresenta precisão que dispensaria o uso da topografia convencional.

#### 4.1.1 Topografia Remota

Um levantamento topográfico remoto pode ser realizado para conhecimento do terreno antes de uma investigação mais detalhada em campo, permitindo uma análise de relevo, prévio conhecimento de existência de acidentes geográficos como rios, barragens e estradas, aspectos da vegetação, entre outros elementos que sejam necessários. Realizar uma avaliação topográfica

com o auxílio de *softwares* que geram mapas planialtimétricos a partir de imagens de satélite não isenta a realização do levantamento topográfico convencional, tendo em vista que o conhecimento exato só é obtido *in loco*.

Para realizar o levantamento topográfico remoto foram utilizados 4 *softwares*:

- *Google Earth*: utilizado para obtenção dos dados espaciais de pontos da área (coordenadas X, Y e Z);
- *TCX Converter*: utilizado para carregar as altitudes e converter o arquivo \*.kml (gerado no *Google Earth*) em formato \*.csv para ser exportado para os *softwares* de modelagem de superfície *RecMin* e *Datamine Studio 3*;
- *RecMin*: utilizado para importar os pontos obtidos no aplicativo *TCX Converter* e gerar um modelo digital de superfície e respectivas curvas de nível;
- *Datamine Studio 3*: utilizado para o mesmo objetivo do *software RecMin*.

#### 4.1.1.1 Obtenção das coordenadas espaciais no *Google Earth*

Quando aberto o *Google Earth*, deve ser localizada a área em estudo. Com a opção *Adicionar Caminho* cria-se um caminho com espaçamento regular em uma linha contínua como se estivesse fazendo um levantamento de campo cobrindo toda a área de estudo. Depois de traçado o caminho, o arquivo deve ser salvo no formato \*.kml. Nesta etapa são obtidas e armazenadas as coordenadas dos pontos do caminho criado.

#### 4.1.1.2 Regularização das altitudes no *TCX Converter*

Após obtenção das coordenadas espaciais dos pontos na área do levantamento utiliza-se o *TCX Converter* para carregar o arquivo \*.kml criado anteriormente. Após regularização das altitudes pode-se salvar o arquivo de coordenadas dos pontos em formato \*.csv.

#### 4.1.1.3 Obtenção das curvas de nível no *RecMin*

Para esta etapa, deve-se primeiramente importar o arquivo de coordenadas espaciais. Ao abrir o *RecMin*, selecione o projeto de trabalho, e no menu *Importar/Ficheros de líneas, superficies o puntos en formato de puntos* \*.txt. importe os dados com o arquivo no formato \*.pts (pontos) seguindo todos os procedimentos da janela aberta. Após a importação o arquivo de pontos deve ser aberto no Módulo de *Dibujo*, através do ícone *Abrir fichero de puntos*.

O segundo passo é triangular os pontos abertos para obter o modelo digital de terreno no menu *Sup-Lin-T3/Triangular superficies/grupos de puntos*, e para isso deve-se escolher o arquivo de pontos e selecionar *Triangular*. O terceiro passo é gerar as curvas de nível em *Sup-Lin-T3/Generar isolineas de las T3 activas*, o que se consegue seguindo as instruções das janelas seguintes até as curvas serem geradas. Pode-se criar curvas principais e secundárias, de acordo com o grau de detalhamento desejado, e também visualizar o valor das cotas nas linhas através do menu *Sup-Lin-T3/Ver cotas*.

Um quarto passo alternativo pode ser realizado. Após esse processo é possível transferir o arquivo de curvas de nível para o *Google Earth* em arquivo \*.kml através do seguinte procedimento: abra a *Lista de superficies abiertas*, clique no nome do arquivo das curvas com o botão direito do mouse e no menu encontre *Generar fichero KML* (de coordenadas em UTM ETRS89 (GPS)). Realize o procedimento como indicado nas janelas que serão abertas. Quando finalizado o procedimento as curvas serão visualizadas no *Google Earth*.

#### 4.1.1.4 Obtenção das curvas de nível no *Datamine Studio 3*

Após importar o arquivo de pontos de topografia em formato de texto \*.txt, abra o arquivo e crie uma linha limite ao redor dos pontos para limitar a superfície do modelo digital de terreno que será criado posteriormente; vá ao menu *Wireframes/Interactive DTM creation/Make DTM* e na janela aberta selecione *Inside boundary strings/Next*; selecione o arquivo de pontos e clique em *Next*; selecione a *string* limite e clique em *Finish*. O DTM será criado.

Para criar as curvas de nível vá ao menu *Wireframes/Plane Operations/Multiple section* e na janela aberta siga as instruções de quantos em quantos metros devem ser traçadas as curvas. As curvas de nível serão criadas permitindo a edição de cor e espessura, salvar, e visualizar em 3D.

### 4.1.2 Topografia Convencional

Denomina-se de topografia convencional aquela em que os dados de campo (coordenadas e elevação) são obtidos com a utilização do equipamento Estação Total e do *Global Positioning System* (GPS). O levantamento fornece as coordenadas e altitudes para, em seguida, exportá-las por meio de planilhas confeccionadas em *Microsoft Office Excel 365* e, logo após, salvar em arquivos de texto para permitir a importação para o *software* de obtenção

do modelo digital de terreno (DTM). Neste trabalho foram utilizados dois desses *softwares*. A obtenção das curvas de nível foi realizada com a construção de modelos digitais de terreno nos *softwares RecMin e Datamine Studio 3* por meio dos comandos e processos dos próprios *softwares* já apresentados na seção anterior.

## 4.2 PESQUISA GEOLÓGICA DE DETALHE

A pesquisa geológica de detalhe é a etapa que dá suporte de conhecimentos, técnicas e ferramentas para a caracterização do depósito mineral. Nesta fase incluem-se os estudos mineralógicos, petrográficos, cartográficos, físicos, químicos e geoestruturais do depósito mineral que são necessários para conhecimento da mineralização.

Nas próximas seções são apresentadas as etapas de pesquisa geológica realizadas no depósito mineral em estudo: planejamento de sondagens, execução de sondagens, coleta de amostras e caracterização tecnológica finalizando com a criação do banco de dados. Após a criação do banco de dados foi realizada a modelagem tridimensional do corpo de minério para avaliação dos recursos minerais disponíveis.

### 4.2.1 Sondagens, Coleta de Amostras e Caracterização Química

Foi realizado um planejamento para execução de furos de sondagem após o levantamento topográfico que identificou muitas rochas aflorantes na área em estudo. Foram planejados 16 furos de sondagem, que foram realizados no período de 16 de outubro até 4 de dezembro de 2018 com utilização de 2 sondas MACH 700 rotativa diamantada. Os testemunhos recuperados foram acondicionados em caixas de madeira devidamente identificadas.

Após as sondagens foram coletadas amostras do mármore para caracterização química e identificação dos óxidos presentes.

### 4.2.2 Criação do Banco de Dados

Quando coletadas todas as informações referentes ao depósito como topografia, teores, geologia, inclinação e posição dos furos de sondagem, é possível gerar os arquivos necessários para utilização nos *softwares*. Esses dados foram compilados no *Microsoft Office Excel* gerando planilhas. Posteriormente essas tabelas foram convertidas para arquivo de texto \*.txt, aceito

para a importação dos dados nos *softwares* utilizados na modelagem geológica do corpo de minério. Foram construídos 4 (quatro) arquivos de entrada básicos:

- *Survey*: arquivo que reúne os dados de azimute (*BRG*) e inclinação dos furos ou mergulho (*DIP*) em um determinado comprimento (*AT*).
- *Geology*: arquivo que reúne os dados das camadas litológicas obtidas na descrição dos furos de sondagem. Neste arquivo, teremos quatro colunas: 1º) denominação do furo de sondagem (*BHID*); 2º) cota de início de uma camada litológica (*FROM*); 3º) cota final da camada litológica (*TO*); 4º) tipo de litologia da camada (*ROCK*).
- *Assays*: arquivo com informação dos teores obtidos a partir da análise química das amostras com configuração semelhante ao arquivo *Geology*.
- *Collar*: arquivo com as coordenadas X, Y e Z de localização da boca dos furos das sondagens. Neste arquivo, teremos quatro colunas: 1º) denominação do furo de sondagem (*BHID*); 2º) Coordenada X (*XCOLLAR*); 3º) Coordenada Y (*YCOLLAR*); 4º) Coordenada Z ou elevação (*ZCOLLAR*).

Os arquivos necessários para gerar uma representação espacial das sondagens com as informações necessárias ao modelamento geológico foram digitalizados e organizados de acordo com o modelo apresentando a seguir. Os dados completos dos arquivos utilizados são apresentados em anexo.

- *Collar.txt*

<i>BHID</i>	<i>XCOLLAR</i>	<i>YCOLLAR</i>	<i>ZCOLLAR</i>
-------------	----------------	----------------	----------------

- *Geology.txt*

<i>BHID</i>	<i>FROM</i>	<i>TO</i>	<i>ROCK</i>
-------------	-------------	-----------	-------------

- *Survey.txt*

<i>BHID</i>	<i>AT</i>	<i>BRG</i>	<i>DIP</i>
-------------	-----------	------------	------------

- *Assays.txt*

<i>BHID</i>	<i>FROM</i>	<i>TO</i>	<i>ATTRIBUTES</i>
-------------	-------------	-----------	-------------------

### 4.3 ANÁLISE VARIOGRÁFICA

Para a análise variográfica dos dados foram realizados histogramas e variogramas das amostras para teores CaO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Todos os resultados estatísticos e geoestatístico foram realizados no *software SGeMS*. Os histogramas têm o objetivo de verificar se os dados apresentam

uma distribuição normal ou outro tipo de distribuição. Os variogramas foram realizados para a obtenção dos dados para krigagem ordinária.

#### 4.4. MODELAGEM DO DEPÓSITO MINERAL EM *SOFTWARES* DE MINERAÇÃO

Para a construção do modelo geológico do corpo de minério em estudo neste projeto foram utilizados dois *softwares*, o *RecMin – Recursos Mineros* e o *Datamine Studio 3*, com o objetivo de determinar o volume do sólido, o que corresponde à quantificação das reservas minerais e determinação dos teores médios, referente à qualidade das reservas. Nos itens seguintes é apresentada a metodologia utilizada para a construção do modelo geológico e determinação dos volumes e teores de minério através dos *softwares*.

##### 4.4.1 *RecMin – Recursos Mineros*

O *software RecMin* é uma ferramenta que permite a validação de dados, visualização gráfica das sondagens em 3D através do *Módulo de edición de sondeos*, permite a construção de seções geológicas verticais e a triangulação para a construção de modelo sólido do corpo de minério no *Módulo de Dibujo*, além de visualização de objetos em 3D no *Módulo de render 3D*.

O primeiro passo foi a importação do banco de dados. Para este processo foram necessários os arquivos *Collar*, *Geology*, *Survey* e *Assays*. Esses arquivos devem ser em formato de texto (\*.txt) para que o programa reconheça a importação que deve ser feita no *Módulo de Yacimientos* através da opção *Importar/Dados de sondeos*. O banco de dados para o *software* é configurado em *Microsoft Office Access* e criado automaticamente pelo *software* quando é criado o projeto. Os dados importados são enviados diretamente para os campos já criados no banco de dados formado no *Microsoft Office Access*.

O próximo passo foi a interpretação geológica com a construção das seções geológicas, a união das seções com a triangulação, criando o sólido do corpo de minério, e a avaliação do volume do corpo de minério. Essas etapas foram realizadas no *Módulo de Dibujo* através das ferramentas de visualização e de desenho como *Hacer secciones* e *Dibujar 1 linea/superficie* para a formulação das seções. Para a construção do corpo sólido representativo do corpo de minério foi utilizada a opção *Unir con T3 a otra linea* conectando as seções com triangulação e criando um sólido fechado.

Após a construção do sólido fechado foi possível realizar a avaliação de volume do sólido, principal informação para a avaliação econômica, na opção de menu *Sup-Lin-T3/Volumen de T3 cerrado*. O resultado do volume é dado em m<sup>3</sup> e, para obter o valor em toneladas, deve-se multiplicar pela densidade do material.

O *RecMin* não diferencia muito seu processo de modelagem de outros *softwares* em que é possível realizar este processo de análise. O que muda é a interação gráfica do *software* com o usuário e alguns processos.

#### 4.4.2 *Datamine Studio 3*

O *software Datamine Studio 3* é um dos mais utilizados em empresas de mineração. É uma ferramenta de manipulação de dados, de construção de modelos e que permite a validação de dados, visualização gráfica das sondagens em 3D, construção de seções geológicas verticais e horizontais e a triangulação para a construção de modelo sólido do corpo de minério.

O primeiro passo foi a criação de um novo projeto. Ao iniciar o programa, na ficha *Start*, na janela *Recent Projects* pode ser criado um novo projeto no comando *Create Project*. Nas janelas seguintes foram definidos o nome do projeto, sua localização e a configuração de outros detalhes como instruído nas janelas subsequentes. Após criar o projeto, foi realizada a importação do banco de dados criado anteriormente.

O processo utilizado no *Studio 3* para importação de dados é um pouco diferente, mas segue uma operação equivalente ao *RecMin*. A importação pode ser realizada através do ícone *Import* ou do menu *File/Add To Project/Imported From Data Source*. Através destes passos foram importados os arquivos de textos gerados no banco de dados, criando arquivos com extensão \*.dm do *Studio 3*. Foram importados os arquivos *Collar*, *Geology*, *Survey* e *Assays* no formato \*.txt e transformados em \*.dm. Neste processo muitas janelas são abertas para carregar e configurar o arquivo para que o programa o identifique da melhor forma. O arquivo importado deverá aparecer na barra de controle *Project Files*.

Quando importamos os arquivos, o *Studio 3* precisa combinar a informação de cada um deles para que seja possível localizar cada amostra independente no espaço. Para isso foi utilizado o processo chamado *HOLE3D*, que pode ser acessado através do comando *holes3d* ou do menu *Drillholes/Validate and desurvey/Holes 3D*, e depois foi realizado o processo de composição dos furos de sondagem para regularizar os intervalos criados no *HOLE3D*. Essa composição é realizada no menu *Drillholes/Drillhole Processes/Composite Down Drillholes*.

Para a interpretação geológica do corpo de minério utilizou-se a construção de seções geológicas e a posterior triangulação ou criação do sólido. O primeiro processo é a construção das seções geológicas verticais paralelas, seguindo o ordenamento dos furos de sondagem. Para construir estas seções utilizou-se a construção ou digitalização de *strings* através do comando *New Strings* na barra de ferramentas do menu de edição de pontos e linhas. Após todas as seções construídas é ideal que se faça uma construção de linhas de *linking* nas bordas para que a construção do sólido não ultrapasse esses limites. A construção do sólido do corpo de minério foi obtida conectando as seções digitalizadas através do comando no *Wireframes/Linking/Link Strings*, conectando uma a uma as *strings* construídas em cada uma das seções verticais. As bordas do sólido também podem ser fechadas com a triangulação para formar um sólido completo e fechado. Ao serem criadas, as *strings* e as *wireframes* aparecem na janela *Project Files*. Pode-se notar também que a *wireframe* é formada por dois arquivos: \*.pt (arquivo de pontos) e \*.tr (arquivo de triângulos).

#### 4.5 MODELO DE BLOCOS E CÁLCULO DAS ESTIMATIVAS

Nos itens 4.5.1 e 4.5.2 são apresentados os métodos de obtenção do modelo de blocos e cálculo de estimativas nos softwares *RecMin* e *Studio 3* respectivamente.

##### 4.5.1 *RecMin* – Recursos *Mineros*

No *software RecMin*, antes de criar o modelo de blocos propriamente dito é preciso criar a base de dados exclusiva para a alocação dos blocos. Essa base de dados é independente da base de dados criada anteriormente para alocar os furos de sondagem. A etapa de criação do modelo de blocos é feita no módulo de *Yacimientos* no menu *Bloques/Crear nueva BD de bloques*. Depois de nomeada e criada a base de dados o passo seguinte foi criar a chamada “tabela de blocos” no módulo *Bloques/Nueva tabla bloques*, inserindo os parâmetros para caracterizar o modelo de blocos. Esses parâmetros são as coordenadas de origem do modelo de blocos, medidas dos blocos e número de blocos em cada eixo além de acrescentar os campos dos parâmetros de propriedades dos blocos que serão utilizadas como os teores, litologias e outros atributos que se deseja para a avaliação de cada bloco.

Após a criação da tabela dos blocos foram gerados os blocos individuais no menu *Bloques/Editar tabla de bloques*. Nessa etapa foram inseridos o número de blocos de cada eixo (através da opção de número do primeiro bloco do eixo e número do último bloco do eixo).

A próxima etapa foi a de cálculos com blocos, em que foi possível calcular os teores e as litologias dos blocos utilizando interpolação com as informações das amostras nos dados de sondagem. Para iniciar este processo acessou-se o menu *Bloques/Cálculos con bloques*, apresentado na janela *Cálculos con Bloques* que possui 7 abas: *Inicio*, *Sondeos*, *Muestras*, *Bloques*, *Datos*, *Método*, *Categorias* e *Cálculos*.

- *Inicio*: para gerar uma nova base de dados de amostras, a partir de uma nova base de dados ou acrescentar novas amostras a uma base já existente;

- *Sondeos*: permite selecionar as sondagens que contém as amostras para o cálculo;

- *Muestras*: permite alterar os dados da tabela selecionando as células que se quer alterar;

- *Bloques*: permite selecionar o bloco que será utilizado;

- *Datos*: permite selecionar se os cálculos serão realizados com as litologias ou com os teores;

- *Método*: permite escolher o método de avaliação entre o inverso da distância, inverso da distância mais constante, cálculo pelas amostras mais próximas e Krigagem Ordinária;

- *Categorias*: permite selecionar quais colunas na tabela e dados devem ser armazenados.

- *Cálculos*: permite realizar o cálculo das estimativas pelos métodos do Inverso da Potência da Distância, Amostras mais Próximas ou Krigagem Ordinária.

Na opção *Bloques/Cálculo con bloques* finaliza-se o processo com a escolha do método de Cálculo de Blocos. Neste trabalho foi utilizado o método da Krigagem Ordinária para a obtenção dos resultados.

#### 4.5.2 *Datamine Studio 3*

No *Datamine Studio 3* a construção de um modelo de blocos envolve 3 etapas:

- Criação do Protótipo – *PROTO*

Acessando o menu *Models/Create Model/Create Model Prototype* são determinados os tamanhos dos blocos, a origem do modelo, as coordenadas máximas e a quantidade de blocos em cada eixo. No campo *Output* é colocado o nome deste protótipo.

- Preenchimento do Protótipo – *WIREFILL*

Acessado através do menu *Models/Create Model/ Define and Fill Wireframe*. A janela que se abre deve ser preenchida com o protótipo criado, a *wireframe* (\*.tr e \*.pt) do corpo ou da topografia que se deseja preencher com os blocos e o nome do modelo de blocos que está sendo criado. É importante que na aba *Parameters* e no campo *Wiretype* especifique-se o tipo de superfície ou sólido que o modelo irá preencher.

- Selecionar dados comparados com um banco de dados - *SELWF*

Acessado através do menu *Wireframes/Wireframing Processes/Select Data Using Wireframe*. O procedimento *SELWF* seleciona qualquer tipo de dado comparado com um banco de dados. Um exemplo muito claro é selecionar os furos de sondagem para garantir que os dados utilizados para a estimativa são apenas os dados pertencentes ao domínio geológico correspondente.

Para realizar a interpolação de teores deve-se acessar o menu *Models/Interpolation Processes/Basic Grade Interpolation* utilizando o processo *GRADE* para realizar a avaliação por Krigagem Ordinária.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos tópicos a seguir serão apresentados os resultados das etapas de pesquisa estabelecidas na seção de Metodologia Experimental.

### 5.1 TOPOGRAFIA REMOTA

A área utilizada na pesquisa de mármore é apresentada na figura 20. O caminho utilizado para obtenção dos dados espaciais da área de estudo, como mostrado na figura 21, foi salvo no formato \*.kml e, após ser processado no *TCX Converter*, as altitudes foram atualizadas. O arquivo foi salvo no formato \*.csv. A interface do *TCX Converter* é apresentada na figura 22.

**Figura 20** – Poligonal da área de pesquisa de mármore processo ANM 846.059/2018



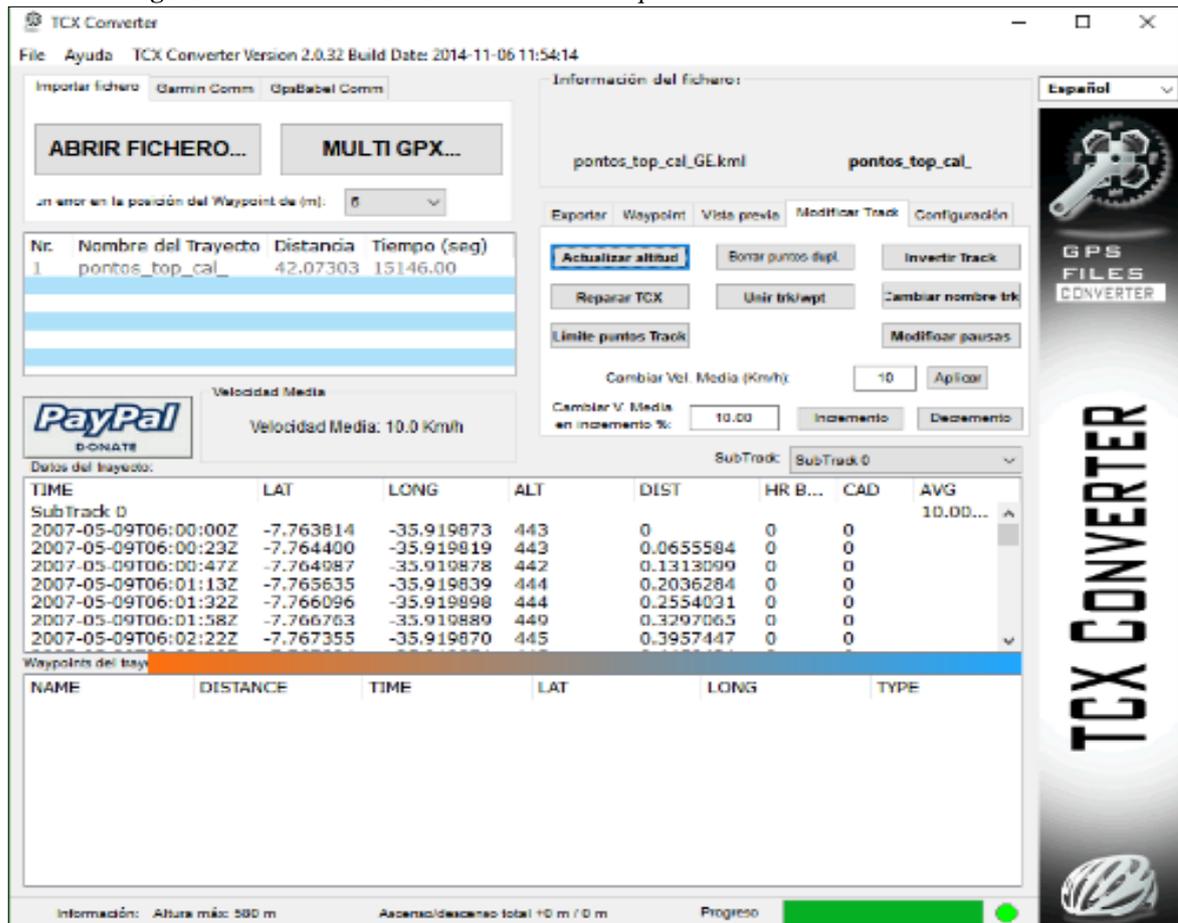
Fonte: A autora (2019)

**Figura 21** – Caminho regular criado no *Google Earth* para a obtenção de coordenadas na área pesquisada



Fonte: A autora (2019)

Figura 22 – Interface *TCX Converter* com o arquivo \*.kml com as altitudes atualizadas

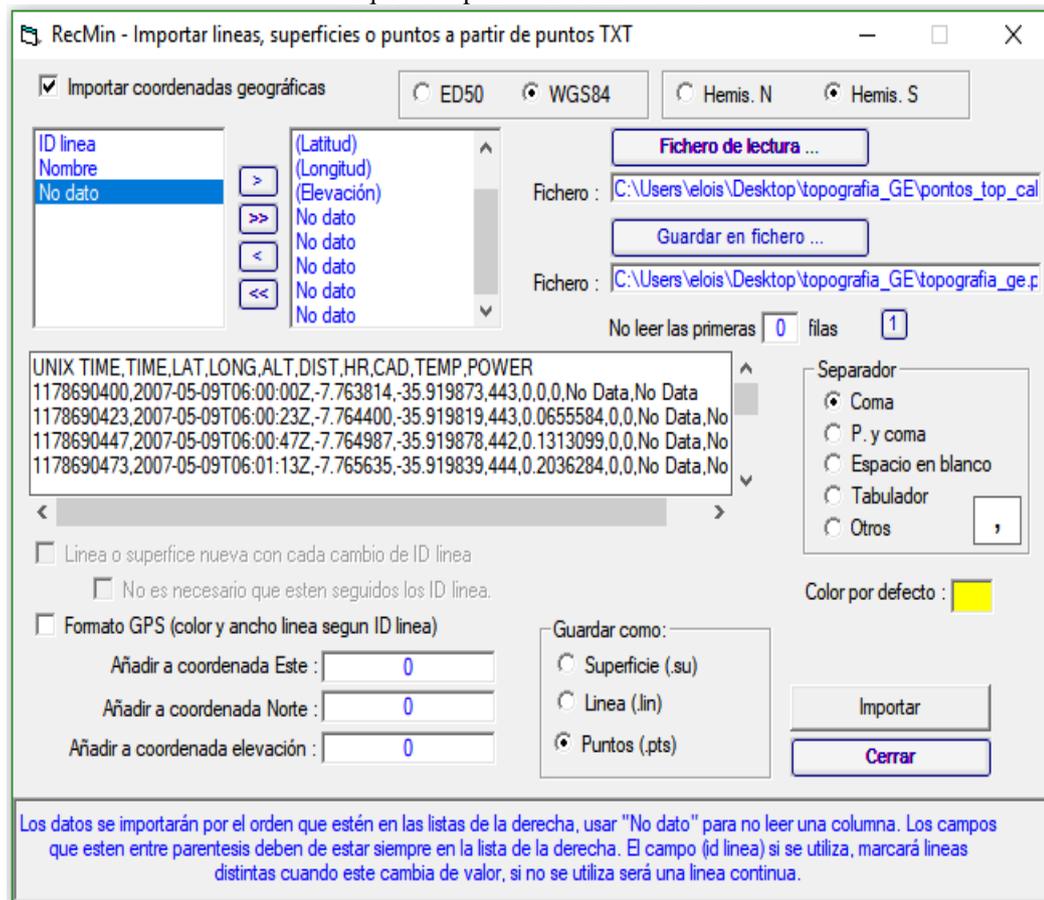


Fonte: A autora (2019)

### 5.1.1 RecMin

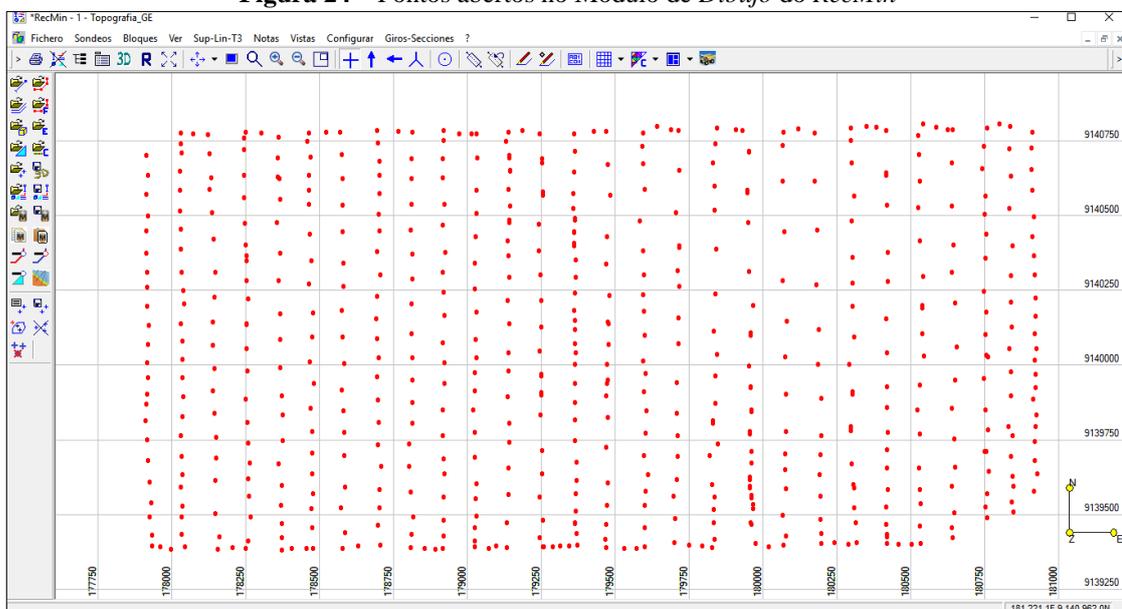
As coordenadas obtidas no *software TCX Converter* foram importadas no programa *RecMin*. A figura 23 apresenta a janela *Importar líneas, superficies o puntos a partir de puntos TXT* utilizada para esta finalidade. O arquivo foi importado como coordenadas geográficas e no formato pontos (\*.pts). Logo após o processo de importação os pontos foram abertos no Módulo de *Dibujo* do *software RecMin* (figura 24 para realizar a triangulação e gerar o respectivo Modelo Digital de Terreno - DTM).

**Figura 23** – Janela *Importar líneas, superficies o puntos a partir de puntos TXT* do RecMin para importação do arquivo de pontos no formato \*.txt.



Fonte: A autora (2019)

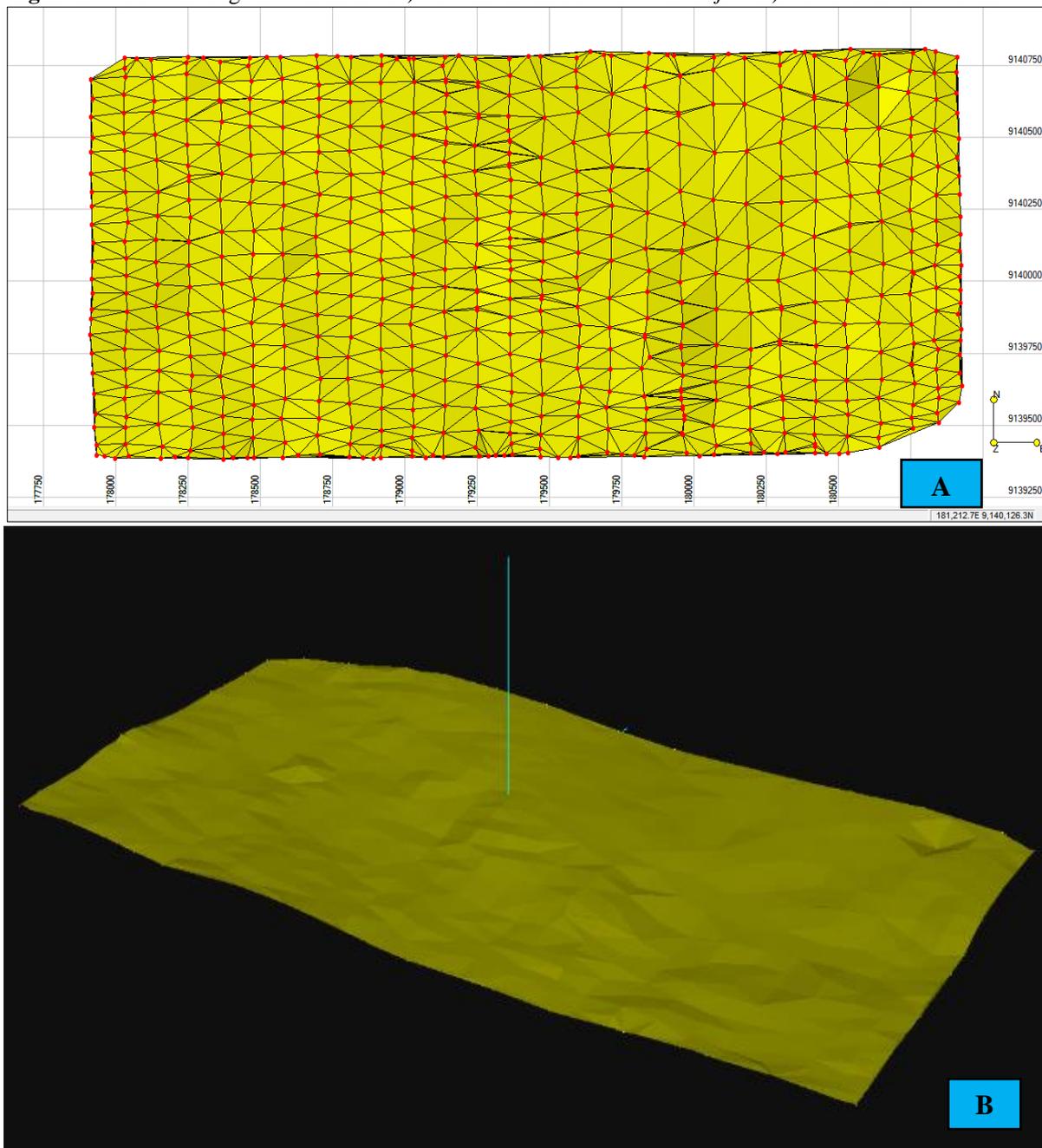
**Figura 24** – Pontos abertos no Módulo de *Dibujo* do RecMin



Fonte: A autora (2019)

A triangulação foi realizada segundo o processo descrito na metodologia. A figura 25 apresenta o Modelo Digital do Terreno em planta superior (A) e em vista 3D (B), mostrando que o terreno não apresenta grandes variações de nível.

**Figura 25** – Modelo Digital do Terreno: A) Vista Plana no Módulo de *Dibujo* e B) Vista 3D no Módulo *Render*

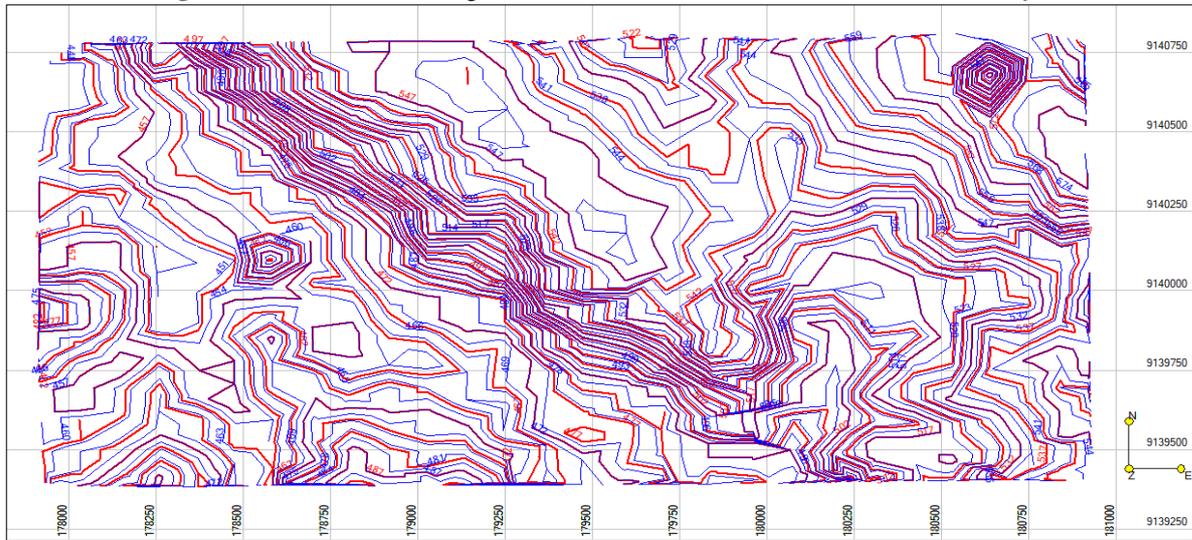


Fonte: A autora (2019)

As curvas de nível geradas com a triangulação são apresentadas na figura 26. O *software RecMin* não proporciona a possibilidade de suavização das linhas (*strings*) criadas na formação das curvas de nível, mas possibilita a transferência das curvas criadas para o *Google Earth*,

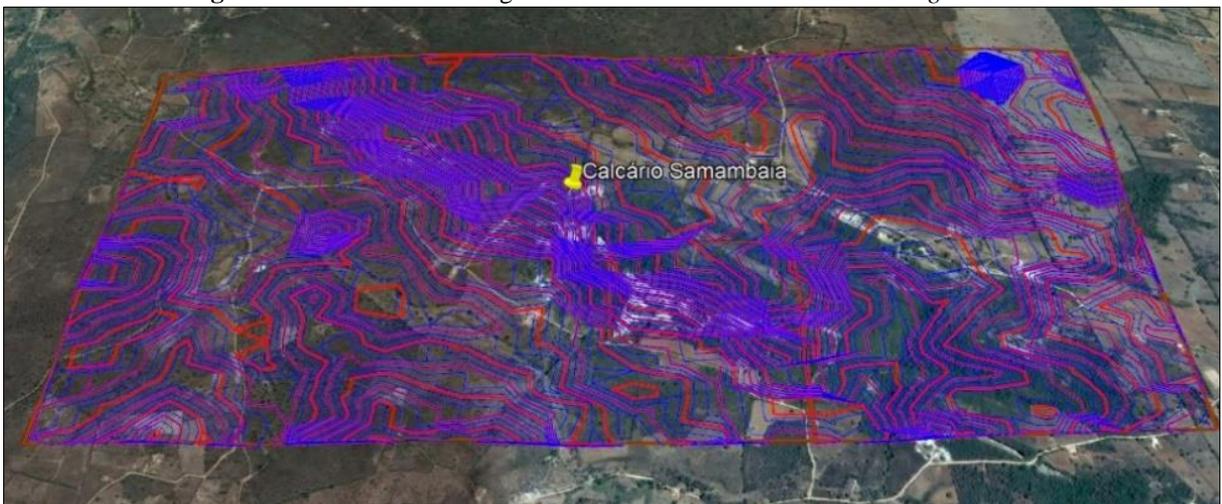
permitindo a visualização de sua adaptação ao terreno. O resultado deste processo pode ser visto na figura 27.

**Figura 26** – Curvas de nível geradas no *RecMin* visualizadas no Módulo de *Dibujo*



Fonte: A autora (2019)

**Figura 27** – Curvas de nível geradas no *RecMin* visualizadas no *Google Earth*

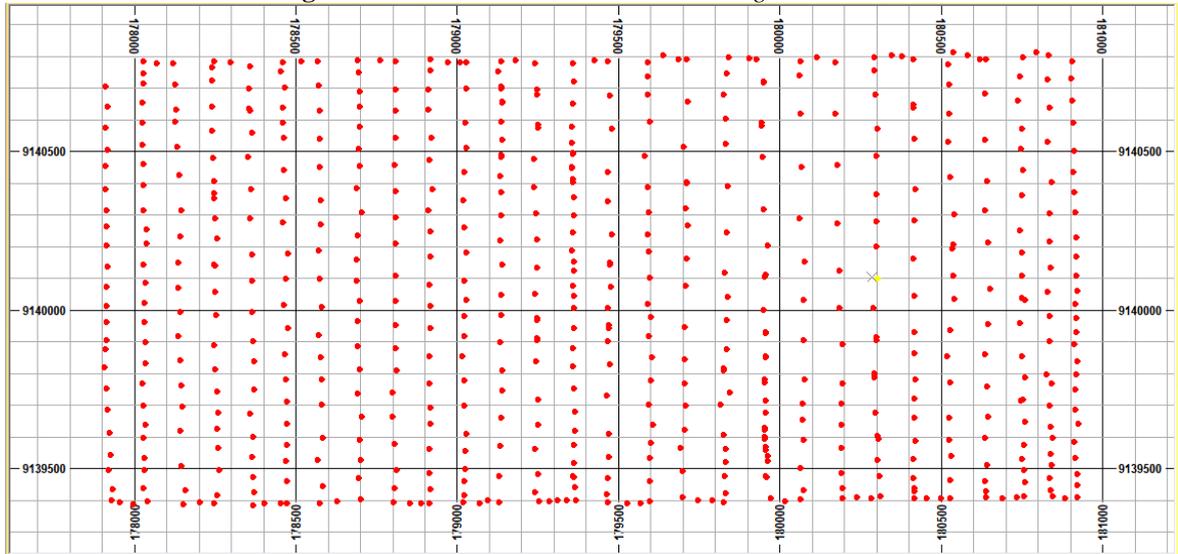


Fonte: A autora (2019)

### 5.1.2 Datamine Studio 3

As coordenadas obtidas foram importadas ao *Studio 3* e abertas no Módulo *Design*. A figura 28 apresenta esses pontos abertos.

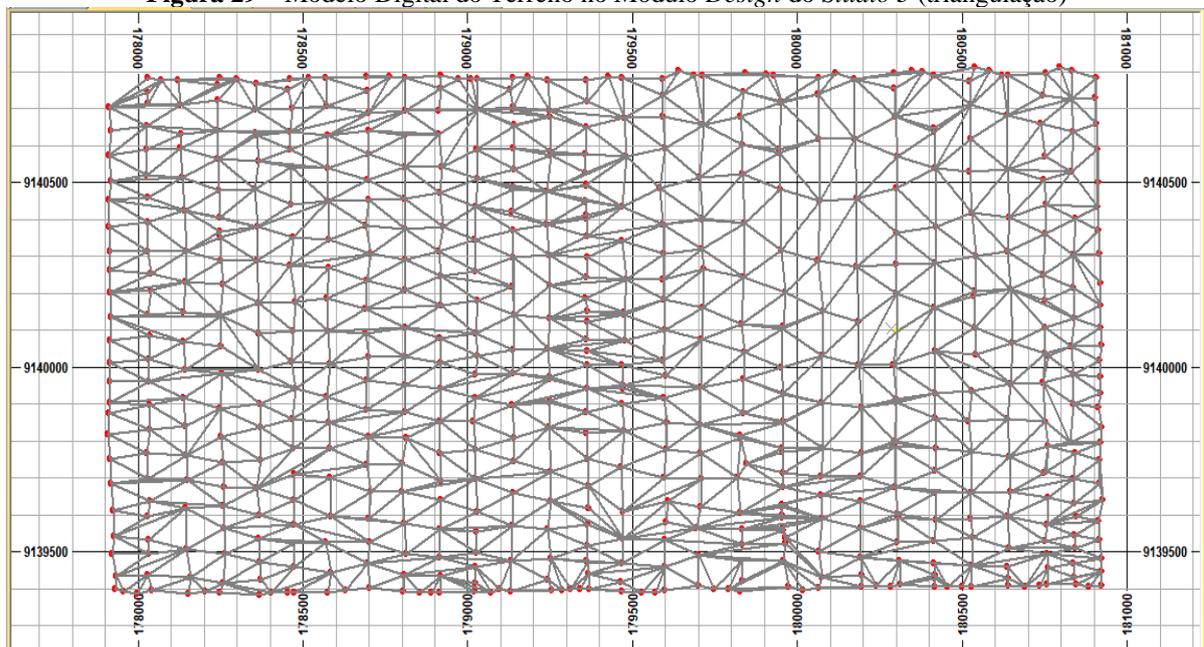
**Figura 28** – Pontos abertos no Módulo *Design* do *Studio 3*



Fonte: A autora (2019)

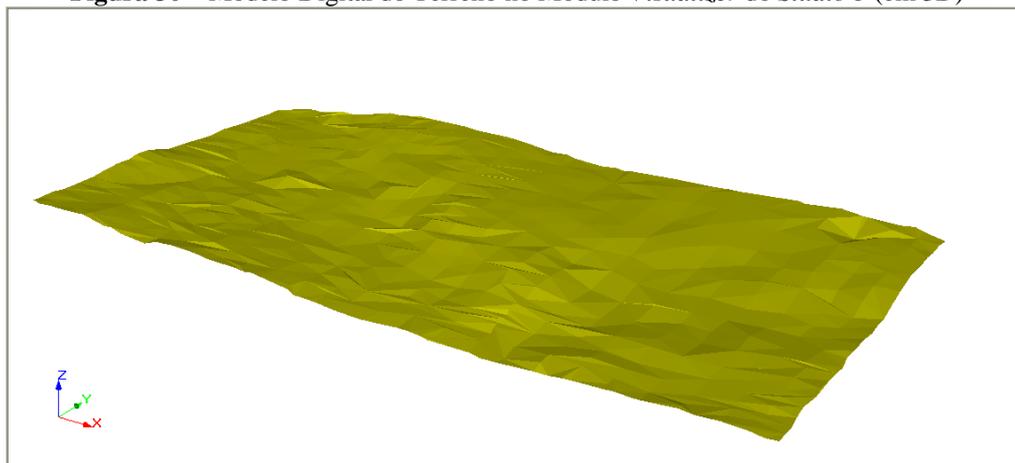
Com os pontos foi realizada a triangulação para a obtenção das curvas de nível. Abaixo tem-se o Modelo Digital do Terreno no Módulo *Design* (figura 29) e no Módulo *Visualizer* (figura 30).

**Figura 29** – Modelo Digital do Terreno no Módulo *Design* do *Studio 3* (triangulação)



Fonte: A autora (2019)

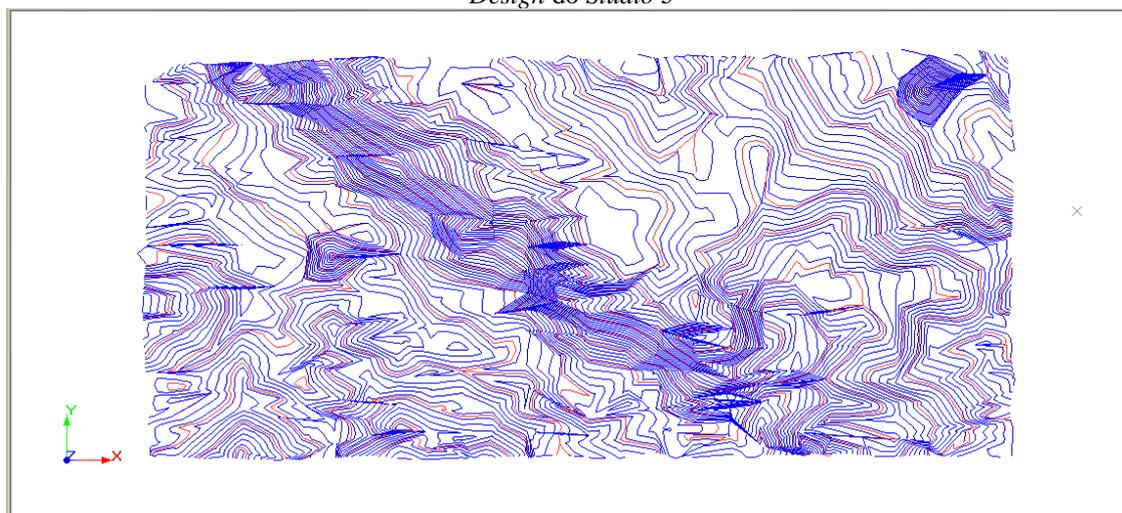
**Figura 30** – Modelo Digital do Terreno no Módulo *Visualizer* do *Studio 3* (em 3D)



Fonte: A autora (2019)

As curvas de nível geradas com a triangulação são apresentadas na figura 31 com curvas primárias de 5 em 5 metros (em vermelho) e curvas secundárias de 2 em 2 metros (em azul). Pode-se perceber que as linhas (*strings*) criadas para formar as curvas de nível apresentam o contorno mais suave, pois o *Studio 3* permite a suavização das linhas através do comando *Smooth String* gerando uma melhor visualização das linhas.

**Figura 31** – Curvas de nível de 5 em 5 metros (vermelho) e de 2 em 2 metros (azuis) visualizadas no Módulo *Design* do *Studio 3*

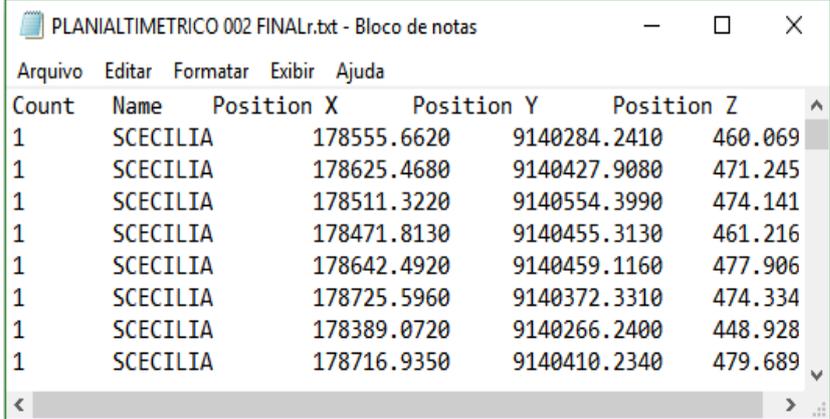


Fonte: A autora (2019)

## 5.2 TOPOGRAFIA CONVENCIONAL

O arquivo de pontos foi elaborado no formato \*.txt através de dados obtidos por topografia convencional, como exemplificado na figura 32.

**Figura 32** – Arquivo de pontos (coordenadas) no formato \*.txt da topografia convencional



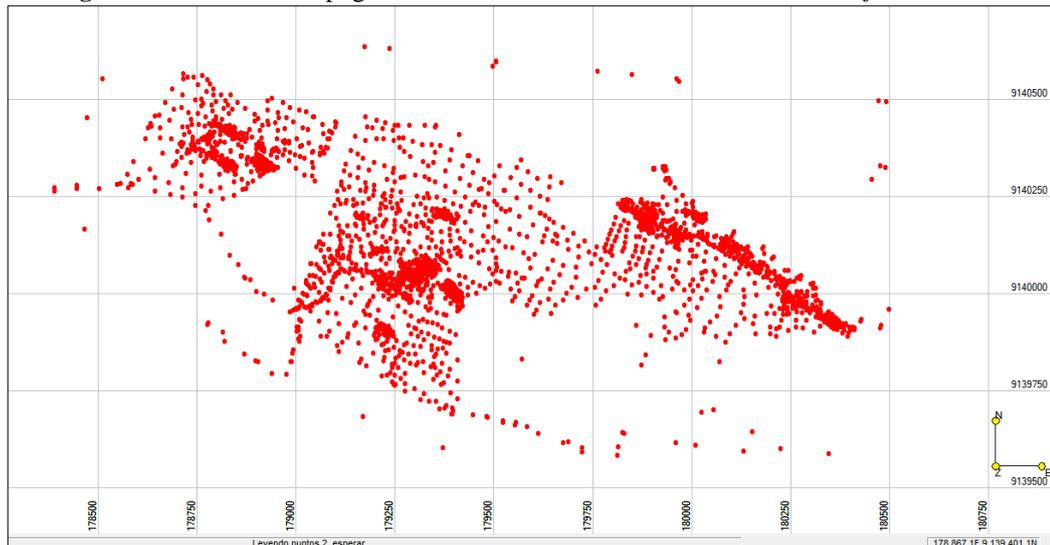
Count	Name	Position X	Position Y	Position Z
1	SCECILIA	178555.6620	9140284.2410	460.069
1	SCECILIA	178625.4680	9140427.9080	471.245
1	SCECILIA	178511.3220	9140554.3990	474.141
1	SCECILIA	178471.8130	9140455.3130	461.216
1	SCECILIA	178642.4920	9140459.1160	477.906
1	SCECILIA	178725.5960	9140372.3310	474.334
1	SCECILIA	178389.0720	9140266.2400	448.928
1	SCECILIA	178716.9350	9140410.2340	479.689

Fonte: A autora (2019)

### 5.2.1 RecMin – Recursos Mineros

O arquivo de pontos em formato \*.txt foi importado ao *RecMin*. Na visualização dos pontos abertos no Módulo de *Dibujo* apresentados na figura 33 pode-se observar que o levantamento topográfico foi adensado nas regiões central e porções a leste e a oeste, onde tem-se a presença de afloramentos importantes do minério. Os pontos mais distantes apresentados na parte superior da figura são bem espaçados da concentração de pontos, o que pode gerar algumas distorções na criação da triangulação e das curvas de nível.

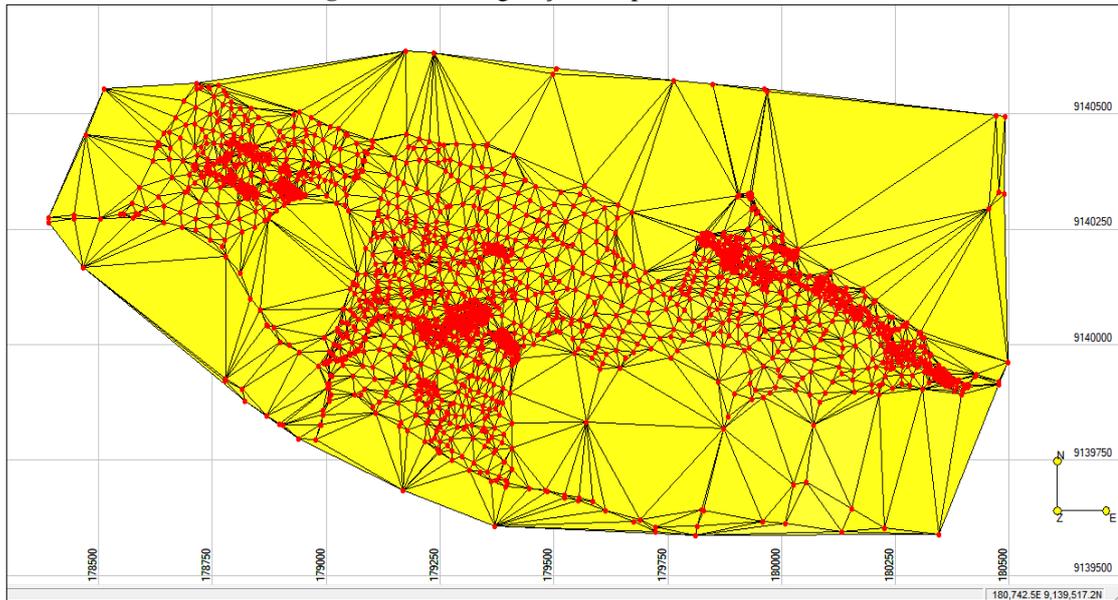
**Figura 33** – Pontos da topografia convencional abertos no Módulo de *Dibujo* do *RecMin*



Fonte: A autora (2019)

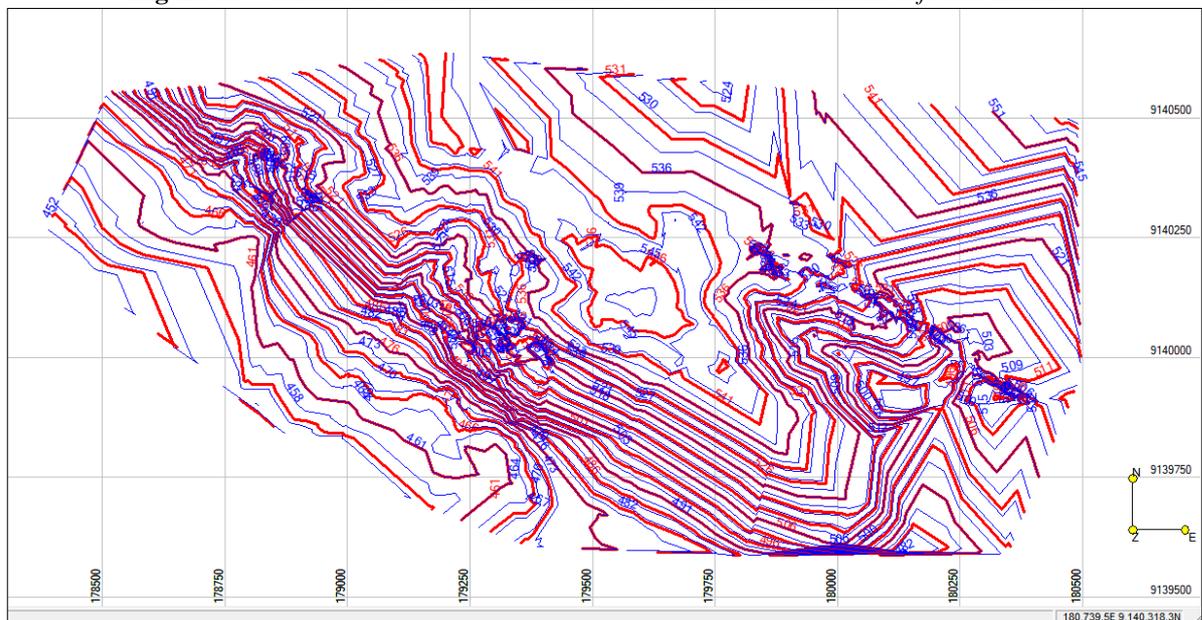
A construção do modelo digital de superfície pelos dados do levantamento topográfico convencional permite observar que este levantamento revela picos de maior intensidade que não são verificados no levantamento remoto por imagem do *Google Earth*, o que é mostrado nas figuras 34 e 35 com a construção das curvas de nível.

**Figura 34** – Triangulação dos pontos no *RecMin*



Fonte: A autora (2019)

**Figura 35** – Curvas de nível do levantamento convencional obtidas no *software RecMin*



Fonte: A autora (2019)

Na figura 36 é apresentada a visualização das curvas de nível adaptadas ao terreno no *Google Earth*. As curvas foram construídas de 5 em 5 metros (vermelhas) e de 3 em 3 metros (azuis).

**Figura 36** – Curvas de nível geradas no *RecMin* visualizadas no *Google Earth*

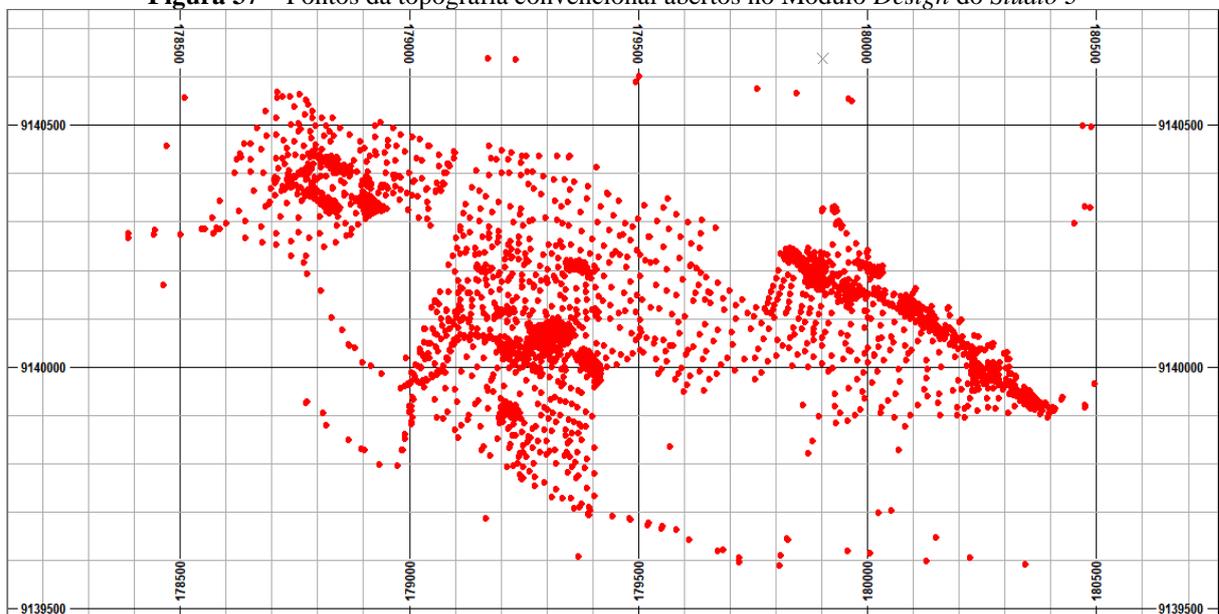


Fonte: A autora (2019)

### 5.2.2 *Datamine Studio 3*

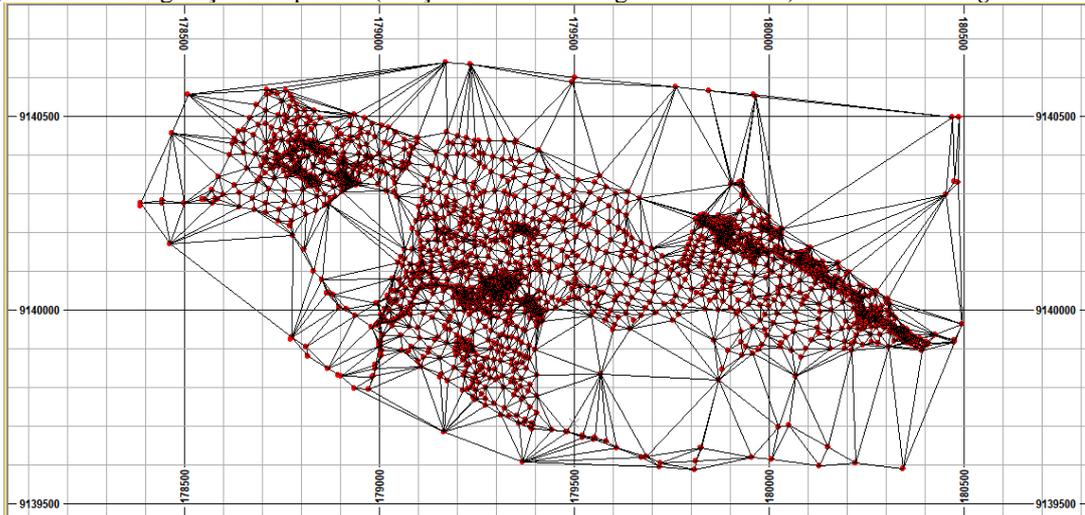
O arquivo de pontos em formato \*.txt foi importado no *Studio 3*. Na figura 37 pode-se visualizar tais pontos no Módulo de *Design* e na figura 38 é mostrado o resultado da triangulação no Módulo *Visualizer* deste *software*.

**Figura 37** – Pontos da topografia convencional abertos no Módulo *Design* do *Studio 3*



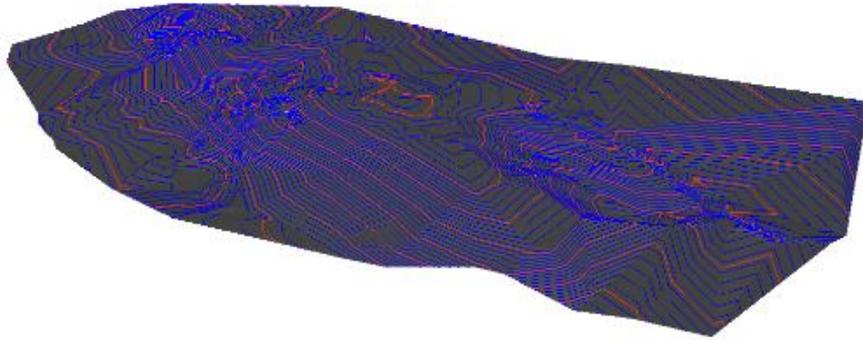
Fonte: A autora (2019)

**Figura 38** – Triangulação dos pontos (criação do Modelo Digital do Terreno) no Módulo *Design* do *Studio 3*



Fonte: A autora (2019)

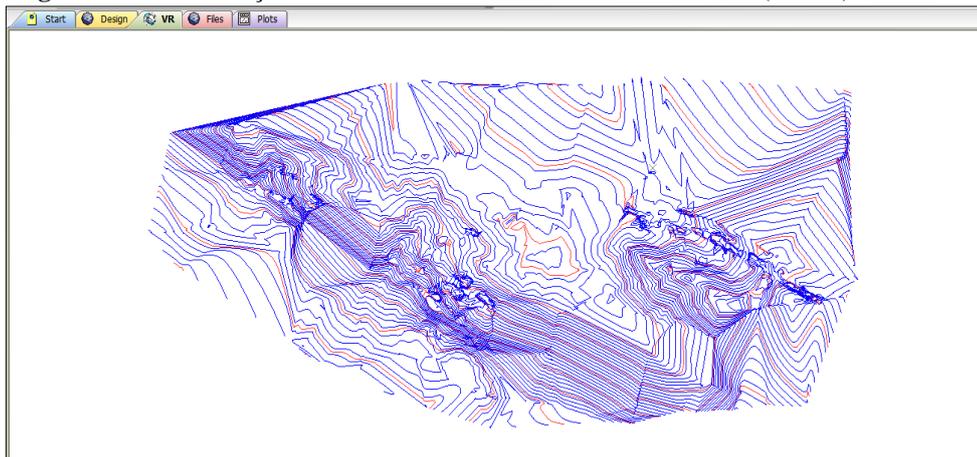
**Figura 39** – Curvas de nível juntamente com a triangulação no Módulo *Visualizer* do *Studio 3*



Fonte: A autora (2019)

A figura 40 mostra a visualização das curvas de nível no Módulo *Visualizer* (módulo de visualização 3D). São curvas construídas de 5 em 5 metros (vermelhas) e de 2 em 2 metros (azuis). Podemos notar os picos mais acentuados e, quanto as possibilidades de alcance do software podemos notar a suavização das linhas novamente.

**Figura 40** – Visualização das Curvas de Nível no Módulo *Visualizer* (em 3D) do *Studio 3*



Fonte: A autora (2019)

### 5.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA TOPOGRAFIA

Foram obtidos 100 pontos aleatórios (apresentados em Anexo) da topografia remota e da topografia convencional. Os resultados médios das altimetrias dos pontos são apresentados na tabela 7 nos mostra que a topografia convencional não deve ser substituída pela topografia remota tendo em vista que os valores altimétricos chegam a variar mais de 10 metros em relação aos valores obtidos em campo. Há casos que a diferença chega a 20 metros de diferença. A diferença percentual da média mostra uma pequena variação, mas para avaliação de recursos e reservas pequenos percentuais topográficos representam grandes diferenças volumétricas.

**Tabela 7** - Médias das altimetrias dos pontos aleatórios de dados de topografia convencional e remota

Número de amostras	Topografia Convencional	Topografia Remota	Diferença
100	503,4	509,3	1,17%

Fonte: A autora (2019)

A suavização da superfície e o não detalhamento de pontos de picos e de depressões foi verificado no modelo de topografia remota em relação ao modelo de topografia convencional. Foi possível observar isso com a manipulação dos softwares em seus módulos 3D. Tanto o *RecMin* quanto o *Studio 3* apresentaram os mesmos resultados.

### 5.4 SONDAGENS E CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO MINÉRIO E ESTÉRIL

Nos itens a seguir descreve-se o processo de sondagem na área em estudo e a caracterização tecnológica das amostras obtidas neste processo.

#### 5.4.1 Sondagens

A base planialtimétrica juntamente com o mapeamento geológico foram realizados pela equipe de geologia da empresa Companhia Brasileira de Vidros Planos, sendo a determinação das coordenadas dos furos de sondagem realizada com o auxílio de um aparelho GPS. Os trabalhos foram realizados com duas sondas rotativas diamantadas funcionando em um turno diurno.

Ao todo foram executados 16 furos com diâmetro 42 mm, sendo 10 na direção 60AZ e inclinação de 40° para NE e 6 (seis) verticais. A média de distanciamento dos furos foi de aproximadamente 250 metros. Ao todo, foram 786 m de rocha perfurada apresentando

recuperação média em torno de 90%. A tabela 6 apresenta os dados dos furos realizados na campanha de sondagem.

**Tabela 8** – Campanha de sondagem realizada

Furos	Coordenada Este	Coordenada Norte	Inclinação	Cota (m)	Início	Fim	Profundidade (m)
PCX-01	179041	9140030	90°	482	16/10/2018	17/10/2018	16.25
PCX-01B	179079	9140091	40°	495	18/10/2018	19/10/2018	15.15
PCX-01C	179147	9140107	40°	506	20/10/2018	26/10/2018	35.55
PCX-02	179115	9140230	40°	553	28/10/2018	03/11/2018	51
PCX-03	179184	9140403	40°	553	26/11/2018	28/11/2018	50.1
PCX-04	179198	9139972	40°	495	22/11/2018	23/11/2018	28.7
PCX-05	179302	9140141	40°	544	30/10/2018	03/11/2018	70.15
PCX-06	179368	9140331	90°	558	29/11/2018	30/11/2018	40.65
PCX-07	179485	9140064	90°	554	28/11/2018	30/11/2018	71.85
PCX-08	179556	9140254	40°	554	06/11/2018	07/11/2018	40.3
PCX-09	179666	9140013	90°	558	16/11/2018	22/11/2018	100.25
PCX-10	179374	9140208	90°	539	03/12/2018	04/12/2018	75.5
PCX-11	179926	9140159	60°	544	08/11/2018	12/11/2018	58.7
PCX-12	179963	9139813	90°	540	24/11/2018	27/11/2018	50.8
PCX-13	180113	9140029	40°	525	13/11/2018	15/11/2018	56.85
PCX-14	180303	9139963	50°	521	17/11/2018	21/11/2018	24.2

Fonte: Companhia Brasileira de Vidros Planos (2019)

Após a conclusão da campanha de sondagem os 16 locais perfurados receberam marcos de concreto com identificação contendo nome do furo, data de conclusão, coordenadas e profundidade, assim como as caixas de testemunhos de sondagem, conforme apresentados na figura 41 A, B e C.

**Figura 41** – Caixas de madeiras onde estão armazenados os testemunhos de sondagem (A e B) e Plaqueta de metal com identificação do Furo PCX-08 sobre o concreto (C)



Fonte: Companhia Brasileira de Vidros Planos (2019)

#### 5.4.2 Coleta e caracterização química das amostras

Os testemunhos de sondagem coletados e devidamente acondicionados em caixas de madeira com a identificação dos furos (figura 41) foram serrados na longitudinal para a coleta de amostra (figura 42). Metade voltou a ser acondicionada na caixa de madeira e a outra metade foi encaminhada para a caracterização química. As amostras foram coletadas a intervalos regulares de 2 em 2 metros tendo como limite a mudança de litologia, sendo acondicionadas em sacos plásticos e em seguida armazenadas nas caixas de madeira. Nos furos PCX-01, PCX-01B e PCX-08 não foram preparadas amostras para realização dos ensaios de caracterização por ser possível notar visualmente através da descrição litológica a ausência de mármore. Na tabela 9 tem-se a quantidade de amostras coletadas por furo que foram enviadas ao laboratório para análises, totalizando 323 amostras.

**Figura 42** – Furo de sondagem serrado na longitudinal para a coleta de amostras

Fonte: Companhia Brasileira de Vidros Planos (2019)

**Tabela 9.** Quantidade de amostras coletadas por furo de sondagem.

Furo	Quantidade de amostras coletadas
PCX-01	0
PCX-01B	0
PCX-01C	18
PCX-02	25
PCX-03	22
PCX-04	1
PCX-05	33
PCX-06	11
PCX-07	31
PCX-08	0
PCX-09	50
PCX-10	38
PCX-11	29
PCX-12	24
PCX-13	29
PCX-14	12

Fonte: Companhia Brasileira de Vidros Planos (2019)

Todas as amostras foram analisadas para os seguintes óxidos principais: **CaO**, **SiO<sub>2</sub>**, **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**, **Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**, **K<sub>2</sub>O**, **Na<sub>2</sub>O**, **MgO** e **SO<sub>3</sub>**, sendo realizadas no laboratório SGS GEOSOL localizado em Vespasiano, estado de Minas Gerais, através da técnica de Fluorescência de Raios X (FRX). Baseado nos resultados dos teores médios obtidos na análise química pode-se afirmar que a sequência carbonática predominante na área em estudo é de caráter magnesiano à dolomítico.

Na descrição litoquímica, tendo em vista a utilização do mármore como matéria-prima na indústria do vidro, foi utilizado como critério para determinação das nomenclaturas dos tipos de mármore o teor de Cálcio (CaO) e Ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), conforme pode ser observado na tabela 10. O ideal para utilização como matéria-prima para fabricação de vidro é que o mármore se encontre nas categorias de mármore e mármore calcítico especificadas na tabela.

**Tabela 10** – Parâmetros litoquímicos utilizados para caracterização da litologia

<b>Litologia</b>	<b>Parâmetro Usado</b>
Mármore Calcítico	<b>CaO</b> > 50% e <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> < 0,22%
Mármore	50% > <b>CaO</b> > 45% e <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> < 0,50%
Mármore Magnesiano	<b>MgO</b> > 3% ( <b>CaO</b> + <b>Fe</b> fora dos padrões)

Fonte: Companhia Brasileira de Vidros Planos (2019)

## 5.5 ELABORAÇÃO DO BANCO DE DADOS

Após a campanha de sondagem, coleta de amostras e caracterização química foi confeccionado o banco de dados em formato \*.txt gerando-se os seguintes arquivos: *collar.txt*, *survey.txt*, *geology.txt* e *assays.txt*.

Os arquivos gerados têm as seguintes características:

- *Collar.txt*: formado por 4 (quatro) colunas com as coordenadas dos 16 furos: *BHID*, *XCOLLAR*, *YCOLLAR* e *ZCOLLAR*.
- *Geology.txt*: formado por 4 (quatro) colunas com os dados da litologia ao longo do furo de sondagem: *BHID*, *FROM*, *TO* e *ROCK*. Na figura 43 é apresentado o exemplo do arquivo *geology* em formato de texto.

**Figura 43** – Arquivo das informações da litologia dos furos de sondagem

BHID	FROM	TO	ROCK
PCX-01	0.00	4.50	CAPEAMENTO (Solo) - BIOTITA-ANFIBÓLIO XISTO
PCX-01	4.50	9.80	BIOTITA-ANFIBÓLIO XISTO INTEMPERIZADO
PCX-01	9.80	16.25	BIOTITA-ANFIBÓLIO XISTO
PCX-01B	0.00	1.00	CAPEAMENTO (Solo) - MÁRMORE INTEMPERIZADO
PCX-01B	1.00	15.00	BIOTITA-ANFIBÓLIO XISTO INTEMPERIZADO

Fonte: A autora (2019)

- *Survey.txt*: formado por 4 (quatro) colunas apresentando o sentido e o mergulho do furo de sondagem. As colunas são: *BHID*, *AT*, *BRG* (azimute) e *DIP* (mergulho).
- *Assays.txt*: o arquivo foi formado por 14 colunas com os teores dos óxidos detectados na análise química: CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, MgO, SrO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e MnO. Para a finalidade de aplicação do minério na fabricação de vidros, são relevantes as especificações apresentadas na tabela 10 para os teores de CaO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com menor importância para o teor de MgO. Na figura 44 é apresentado o exemplo do arquivo *assays* em formato de texto.

**Figura 44** – Arquivo das informações das amostras dos furos de sondagem

BHID	FROM	TO	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	TiO2	P2O5	Na2O	K2O	MnO	SrO
PCX-01C 0	2	4	6.02	0.58	0.35	45.7	6.79	0.04	0.05	0.1	0.21	0.01	0.18
PCX-01C 2	4	6	5.8	0.54	0.3	45.7	6.68	0.03	0.05	<0.1	0.17	0.01	0.17
PCX-01C 4	6	8	5.02	0.56	0.29	46.6	5.73	0.04	0.06	0.13	0.17	<0.01	0.18
PCX-01C 6	8	10	5.81	0.82	0.56	46	5.95	0.05	0.05	<0.1	0.23	0.02	0.18
PCX-01C 8	10	12	5.96	0.69	0.41	44.6	7.12	0.04	0.05	<0.1	0.25	0.01	0.16

Fonte: A autora (2019)

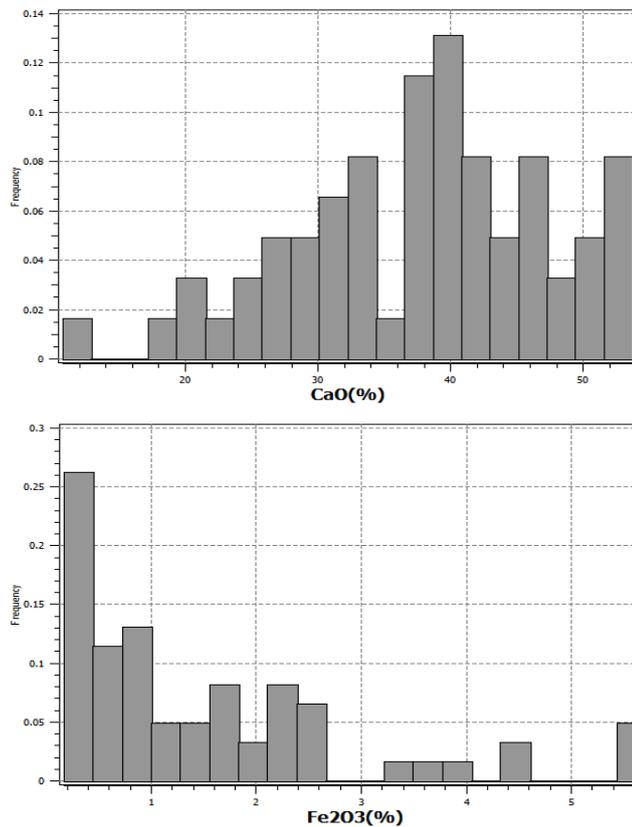
## 5.6 ANÁLISE VARIOGRÁFICA DOS DADOS

Para esta etapa foi utilizado o software SGeMS determinando o tipo de distribuição dos dados. Temos os resultados estatísticos para os teores de CaO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na tabela 11 e, logo em seguida, o histograma de frequências para os respectivos teores também (figura 45).

**Tabela 11** - Resultados estatísticos das amostras

<b>Número de amostras</b>	<b>61</b>
<b>CaO</b>	
<b>Média</b>	37.621
<b>Variância</b>	93.0827
<b>Máximo</b>	53.7
<b>Mínimo</b>	10.76
<b>Mediana</b>	38.95
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	
<b>Média</b>	1.53918
<b>Variância</b>	2.03975
<b>Máximo</b>	5.71
<b>Mínimo</b>	0.17
<b>Mediana</b>	0.96

Fonte: A autora(2019)

**Figura 45** - Histograma dos teores de Cao e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Fonte: A autora(2019)

Em Yamamoto e Landim (2013) temos que se a distribuição tiver assimetria positiva, há necessidade de transformação dos dados para evitar a influência dos poucos valores altos na estimativa de pontos da vizinhança, caracterizada por baixos valores. As estimativas geoestatísticas para os dados transformados são obtidas por meio de krigagens multigaussiana, lognormal e indicadora. Neste caso podemos observar que o teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> apresenta uma certa

assimetria positivas, porém o software utilizado neste estudo, o *RecMin* só permite uma avaliação por Krigagem Ordinária. Respeitando essa limitação como o fator a ser considerado posteriormente para uma avaliação mais detalhada não foi realizado transformação de dados para estes fins.

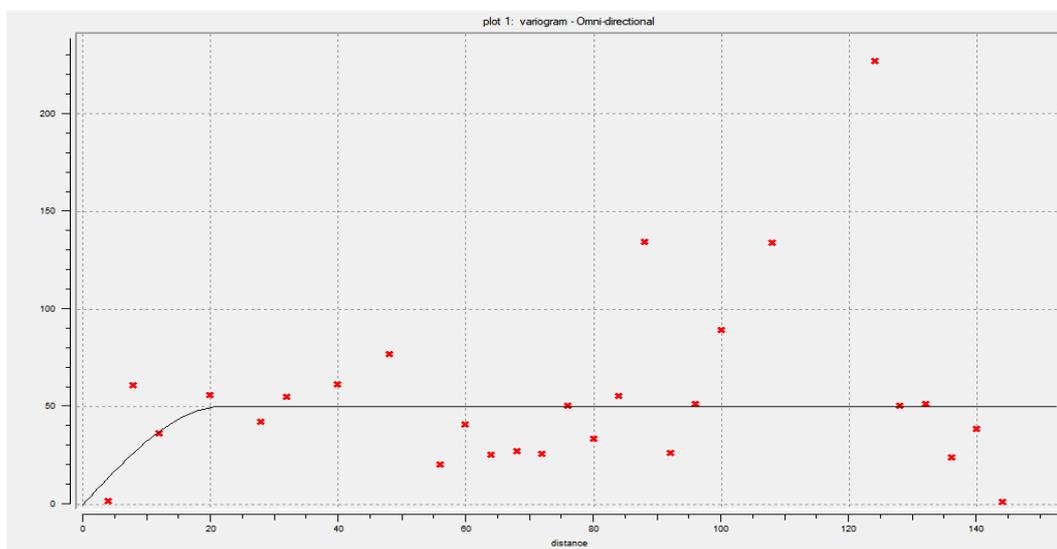
Foram escolhidos os parâmetros para o modelamento dos variogramas apresentados na tabela 12. Com esses parâmetros foi realizado um variograma omnidirecional que permite analisar a continuidade espacial das amostras que apresenta todas as possibilidades direcionais combinadas nele próprio. Os variogramas experimentais são apresentados na figura 46 para o teor de CaO e na figura 47 para o teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Foi interpretado como variograma experimental com o objeto de obter o modelo teórico ajustado aos dados. Através do variograma foram obtidos os parâmetros teóricos para a realização da krigagem ordinária nas próximas seções. Esses parâmetros são apresentados nas tabelas 13 e 14 para os teores de CaO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> respectivamente.

**Tabela 12** - Parâmetros para a obtenção do variograma experimental.

Parâmetros	Valores
Número de passos	36
Tamanho de passos	4
Tolerância do passo	2
Número de Direções	1
Azimute	0
Mergulho	0
Tolerância angular	90
Bandwidth	50
Tipo de Medida	variograma

Fonte: A autora(2019)

**Figura 46** - Variograma Experimental Omnidirecional para o teor de CaO

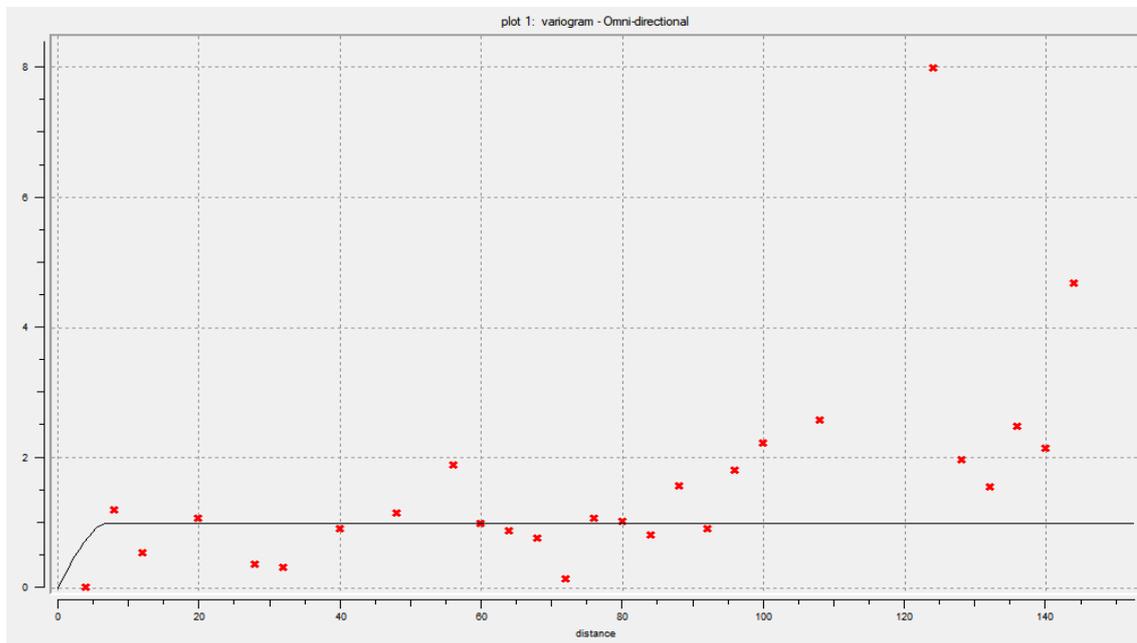


Fonte: A autora(2019)

**Tabela 13** – Resultados do variograma experimental do teor de CaO

Parâmetros	Valores
Tipo	Esférico
Efeito Pepita	0
Alcance	20
Patamar	50

Fonte: A autora (2019)

**Figura 47** – Variograma Experimental Omnidirecional para o teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Fonte: A autora (2019)

**Tabela 14** – Resultados do variograma experimental do teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Parâmetros	Valores
Tipo	Esférico
Efeito Pepita	0
Alcance	7,2
Patamar	1

Fonte: A autora (2019)

## 5.7 RECMIN – RECURSOS MINEROS

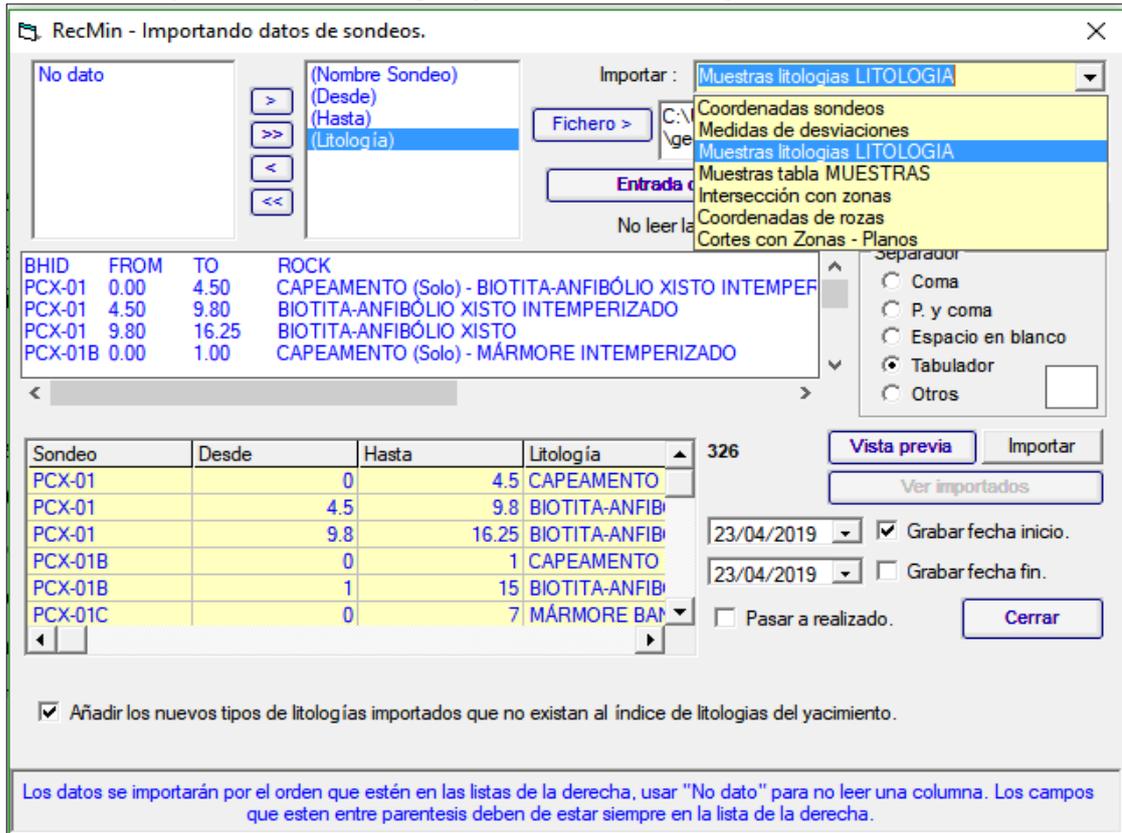
O processo de importação dos dados, de modelagem geológica do corpo de minério, a modelagem de blocos e o cálculo de estimativa de teores realizados no *RecMin* é descrito nos itens a seguir.

### 5.7.1 Importação do Banco de Dados

Foram importados os arquivos *collar*, *geology*, *survey* e *assays* no Módulo de *Yacimientos* através da opção *Importar/Dados de sondeos*. Os arquivos foram importados na

janela *Importando datos de sondeos* como mostrado na figura 48. Antes de importar o arquivo de teores (assays) foram acrescentados através do menu *Editar/Índice de Elementos* os óxidos principais obtidos na análise química, como pode ser visto na figura 49.

**Figura 48** – Janela de importação dos dados de sondagem no *software RecMin*



Fonte: A autora (2019)

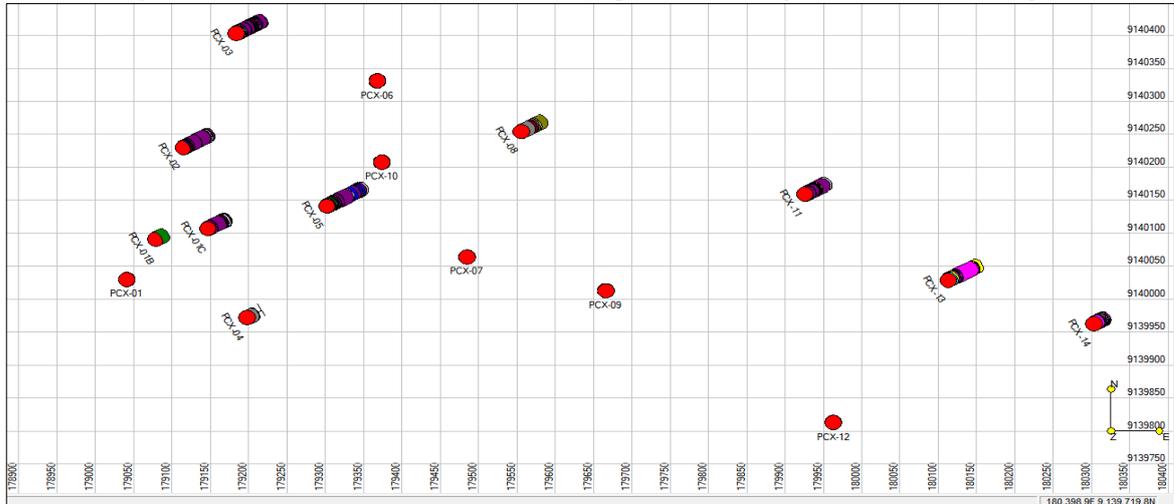
**Figura 49** – Janela de edição de elementos e dados de amostra do *RecMin*



Fonte: A autora (2019)

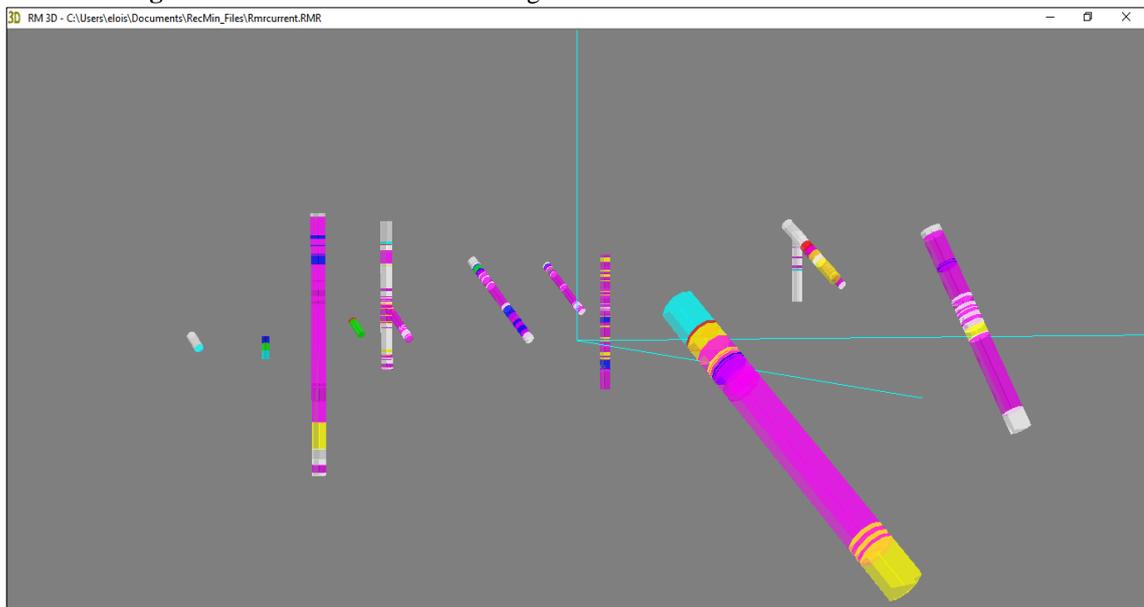
Após a importação dos 4 (quatro) arquivos, os furos foram abertos no Módulo de *Dibujo*, como pode ser visto em planta na figura 50 e no módulo *Render 3D* na figura 51.

**Figura 50** – Vista Plana do *Módulo de Dibujo* para a visualização dos furos de sondagem



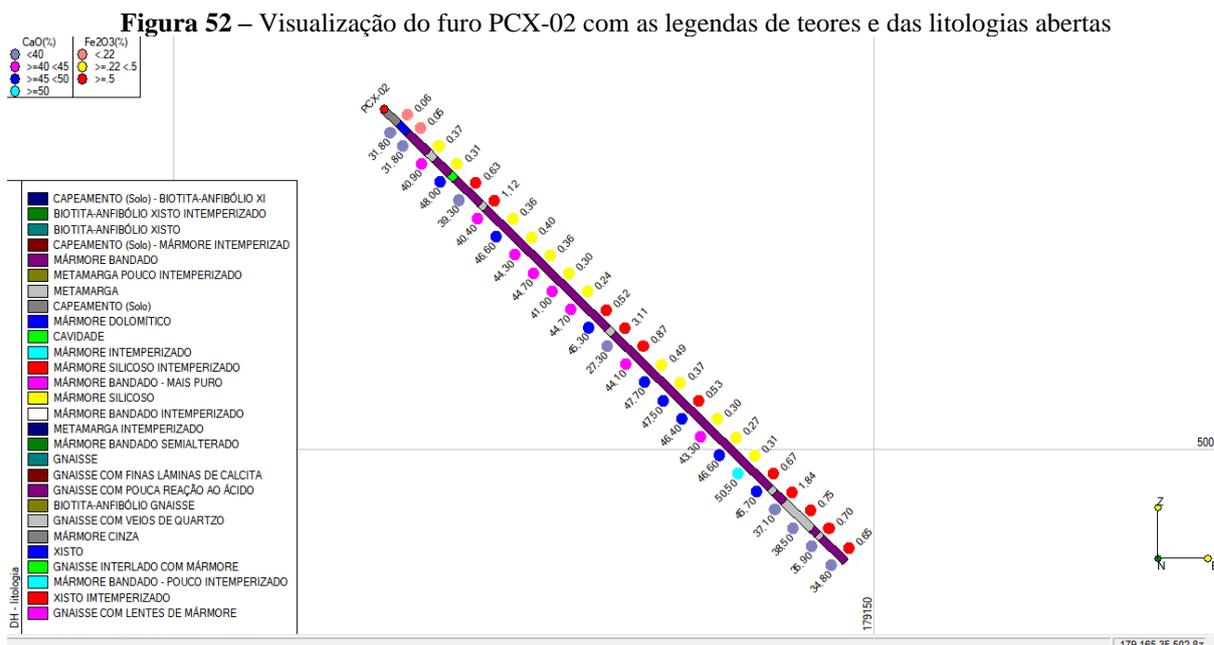
Fonte: A autora (2019)

**Figura 51** – Vista dos furos de sondagem através do *Módulo Render 3D* do *RecMin*



Fonte: A autora (2019)

No *Módulo de Dibujo* pode-se visualizar a disposição espacial dos furos de sondagem em 3D (vista 3D ou módulo *render 3D*), visualizar os furos individualmente, visualizar a litologia e os teores com legenda e obter a média de teores, como no exemplo da figura 52. Todas essas visualizações são necessárias para identificação dos furos que serão utilizados para a construção do sólido. Através desta avaliação pode-se perceber que os furos PCX-01, PCX-01B, PCX-04, PCX-06, PCX-07, PCX-08, PCX-10 e PCX-12 não atendem as especificações relativas à litologia e os teores desejados de ferro e óxido de cálcio.



Fonte: A autora (2019)

### 5.7.2 Modelagem Geológica do Corpo de Minério

De acordo com a localização dos furos de sondagem que atendem às especificações da fábrica de vidro, foram modelados 2 corpos de minério, conforme indicação da equipe de geologia (mapa em anexo):

- O Corpo de Minério 1 (CM1), que envolve os furos PCX-01C, PCX-02 e PCX-03;
- O Corpo de Minério 2 (CM2), que envolve os furos PCX-11, PCX-13 e PCX-14.

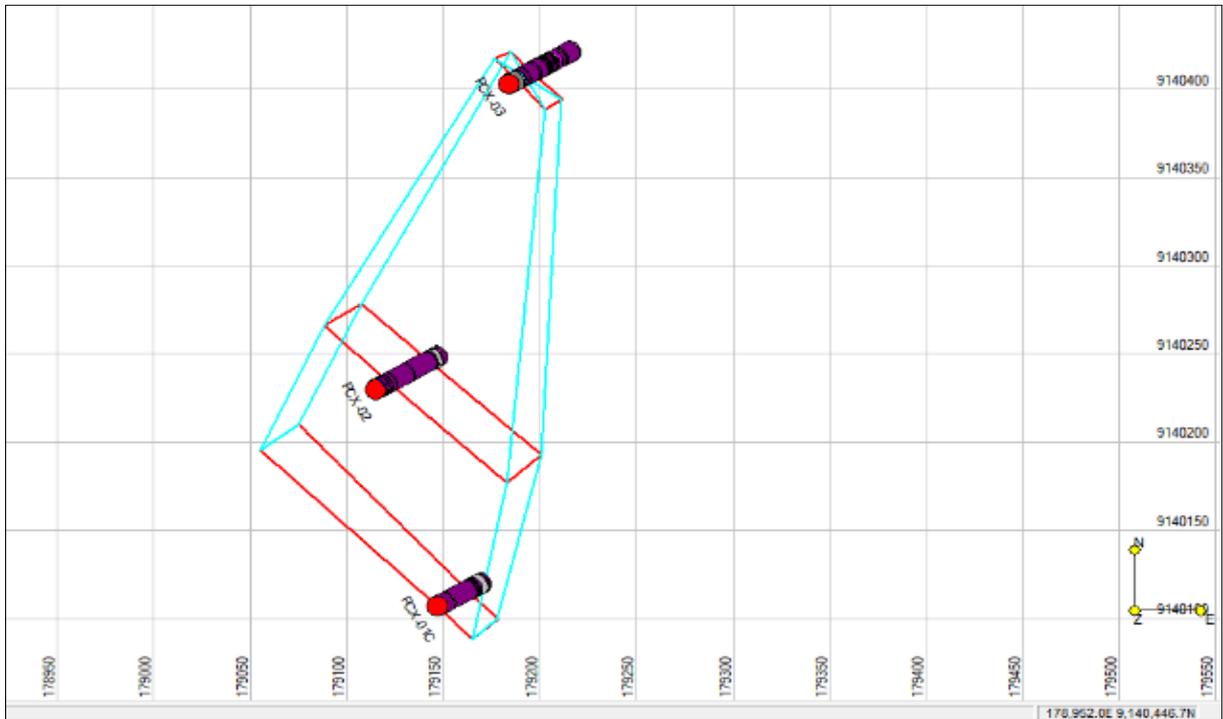
Levando em consideração a especificação da fábrica para um teor médio de CaO entre 45 e 50% e teor de  $Fe_2O_3 = 0,22\%$  ou teor de CaO maior do que 50% teor de  $Fe_2O_3 < 0,50\%$  foram selecionados os furos de sondagem supracitados. Além desses furos selecionados, outros dois furos (PCX-05 e PCX-09) atendem às especificações citadas, mas decidiu-se trabalhar somente com os 6 furos já que esses outros furos são isolados, como pode ser visto na figura 44.

- Corpo de Minério 1

Os furos escolhidos para a realização da modelagem geológica estão distantes mais de 100 metros levando em consideração o alinhamento dos furos e as características litológicas de continuidade do depósito de mármore. O primeiro passo foi a construção das seções verticais para o Corpo de Minério 1, sendo elaboradas 3 seções verticais. Após a elaboração das seções verticais foi utilizada uma linha para conectar as seções (linha azul clara na figura 53) e

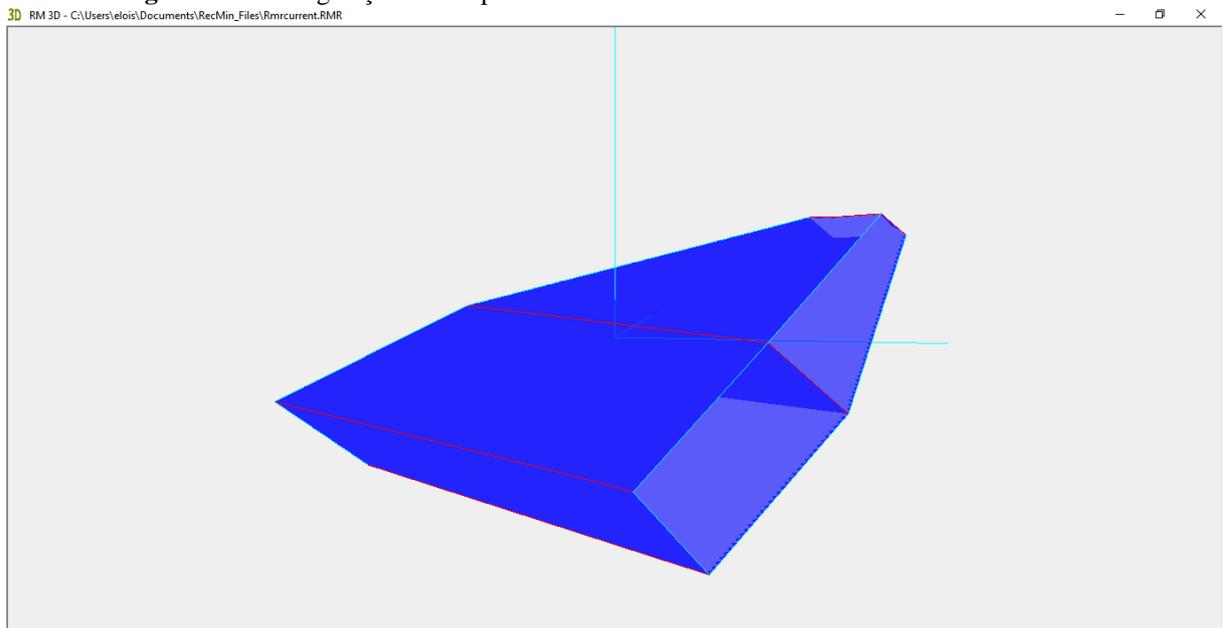
delimitar a triangulação realizada em seguida. A triangulação do sólido pode ser vista nas figuras 54 e 55, em vista no módulo *Render 3D* e em planta, respectivamente. O corpo mineral 1 triangulado sem a linha limite é apresentado na figura 56.

**Figura 53** – Seções Verticais do Corpo de Minério 1 (em vermelho) e a linha limite entre as seções (em azul claro)



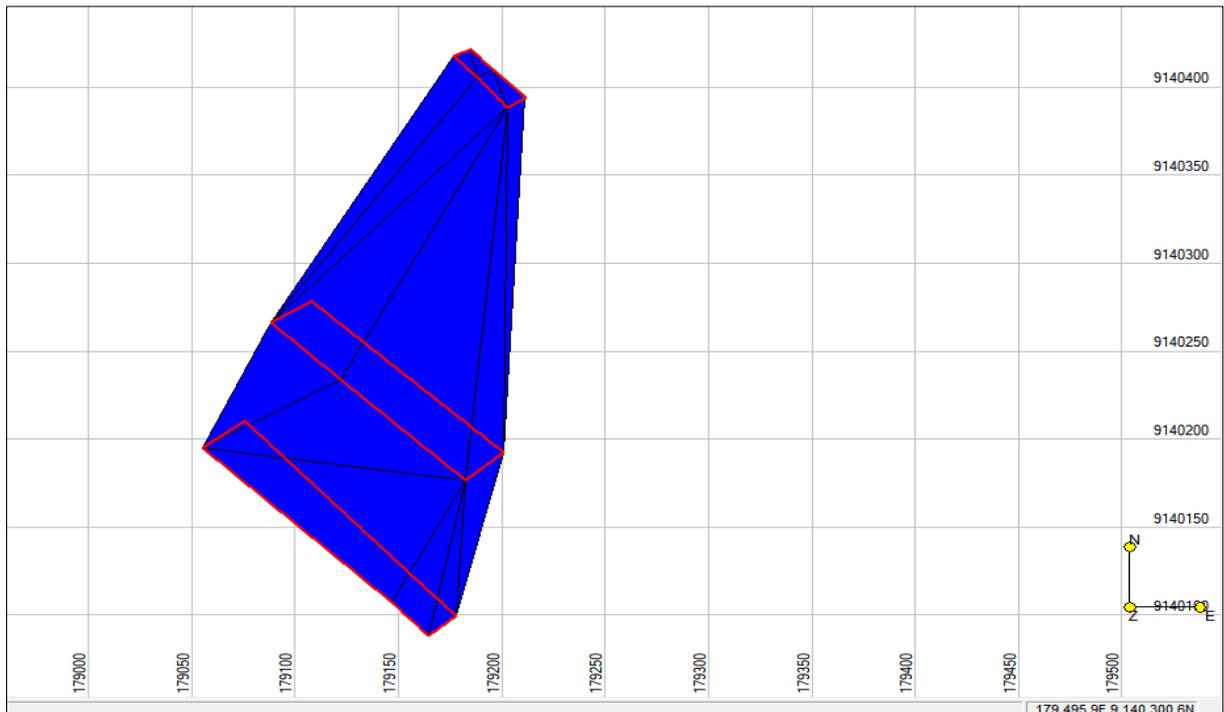
Fonte: A autora (2019)

**Figura 54** – Triangulação do Corpo de Minério 1 no Módulo *Render 3D* com a linha limite.



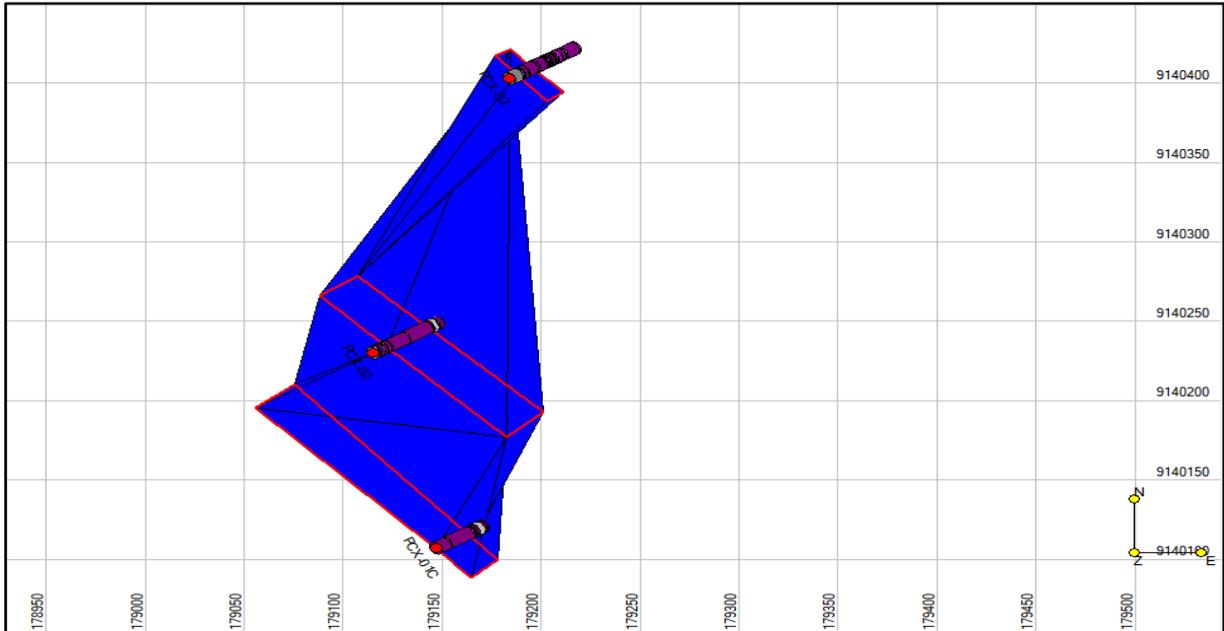
Fonte: A autora (2019)

**Figura 55** – Triangulação do Corpo de Minério 1 (em azul) e as seções verticais (em vermelho) com a utilização da linha limite



Fonte: A autora (2019)

**Figura 56** – Triangulação do Corpo de Minério 1 (em azul) e as seções verticais (em vermelho) sem a utilização da linha limite



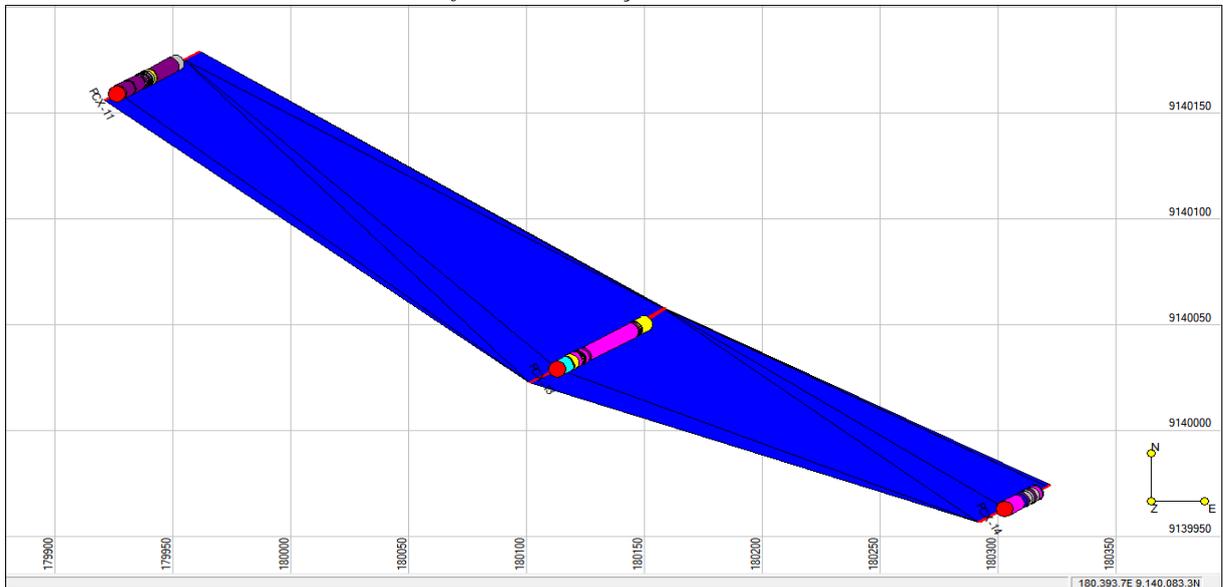
Fonte: A autora (2019)

- **Corpo de Minério 2**

No Corpo de Minério 2 os furos estão distantes cerca de 200 metros. Foram utilizados na construção deste sólido os furos PCX-11, PCX-13 e PCX-14. Na figura 57 são apresentados a triangulação, as seções e os furos de sondagem em planta. As seções verticais foram

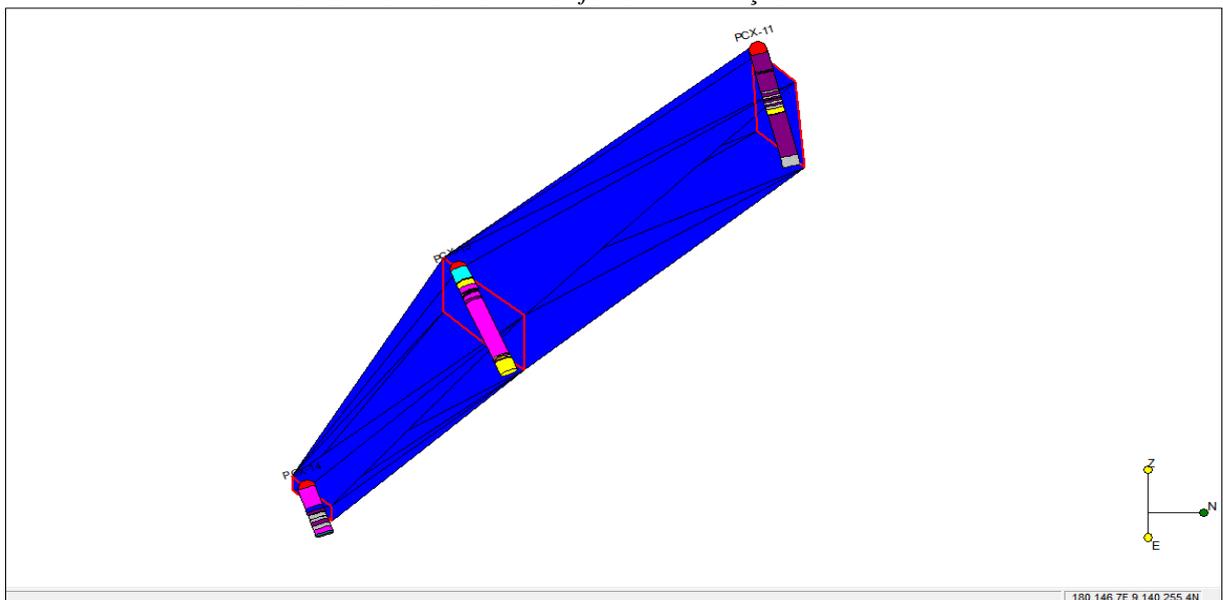
elaboradas levando em consideração o alinhamento dos furos e a litologia conforme pode ser visto na figura 58. Após a construção das seções foi utilizada uma linha para conectar as seções e delimitar a triangulação realizada em seguida como pode ser visto nas figuras 59 (visualização em 3D da triangulação) e 60 (visualização em 3D da triangulação sem a linha limite).

**Figura 57** – Corpo de Minério 2 triangulado (em azul) e os furos de sondagem visualizados no Módulo de *Dibujo* com a utilização da linha limite



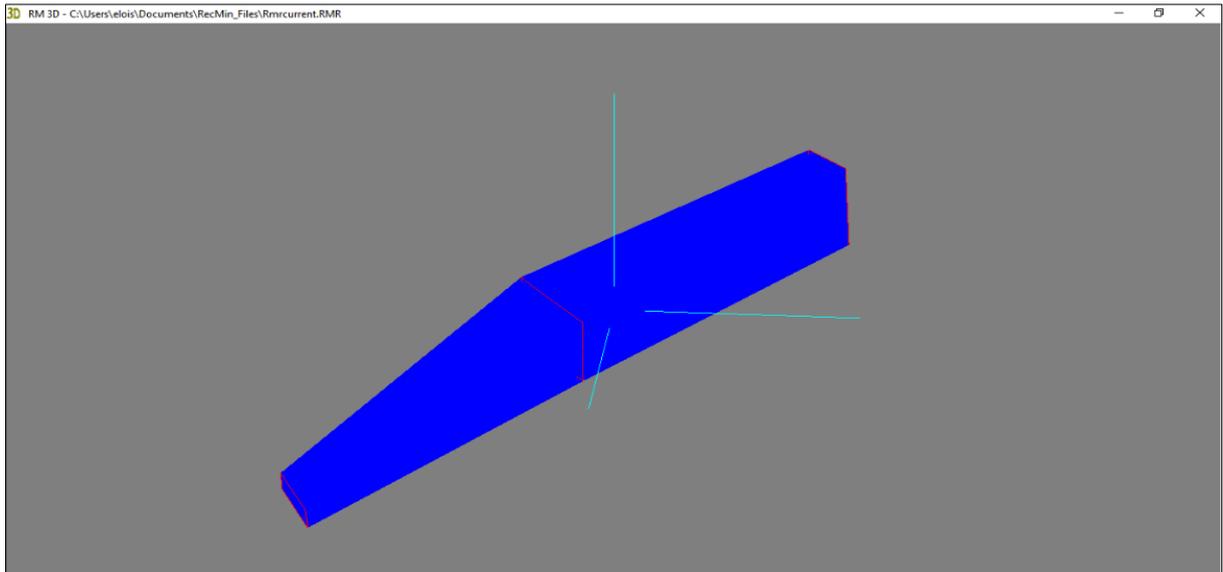
Fonte: A autora (2019)

**Figura 58** – Corpo de Minério 2 triangulado (em azul), seções verticais (em vermelho) e furos de sondagem em vista 3D no Módulo de *Dibujo* com a utilização da linha limite



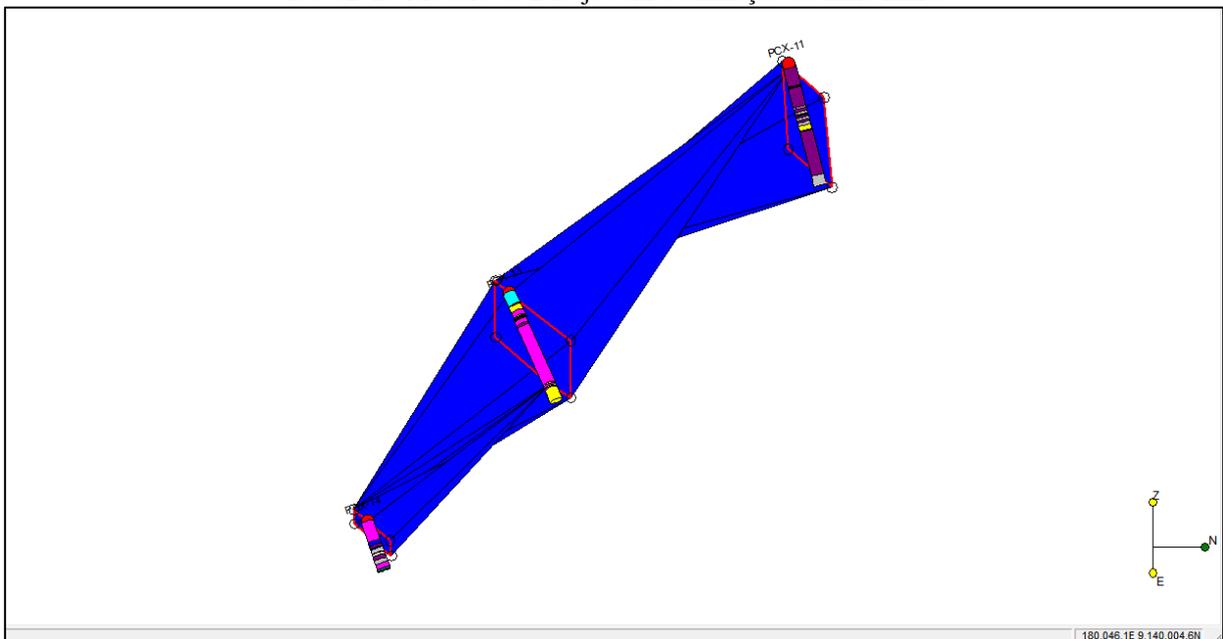
Fonte: A autora (2019)

**Figura 59** – Corpo de Minério 2 triangulado em visualização no Módulo *Render 3D* com a utilização da linha limite



Fonte: A autora (2019)

**Figura 60** – Corpo de Minério 2 triangulado (em azul), seções verticais (em vermelho) e furos de sondagem em vista 3D no Módulo de Dibujo sem a utilização da linha limite



Fonte: A autora (2019)

### 5.7.3 Modelagem dos Blocos e Estimativa de Teores

As coordenadas de origem dos blocos são apresentadas na tabela 15. O modelo de blocos foi criado de acordo com os limites indicados na tabela 16. A seguir foram definidos os parâmetros de construção do modelo de blocos conforme especificado na metodologia experimental, contendo todas as variáveis admitidas pelo programa *RecMin* para o cálculo das estimativas (tabela 17).

**Tabela 15** – Coordenadas de Origem do protótipo do modelo de blocos

<b>Coordenadas de Origem do Bloco</b>	
Coordenada Este (X)	178.911
Coordenada Norte (Y)	9.139.745
Coordenada de Elevação (Z)	442

Fonte: A autora (2019)

**Tabela 16** – Limites para o protótipo do Modelo de blocos

<b>Coordenadas</b>			<b>Tamanho dos Blocos</b>	<b>Quantidade de blocos</b>
X (Este)	Limite Superior	180.446	10	154
	Limite Inferior	178.911		
Y (Norte)	Limite Superior	9.140.491	10	75
	Limite Inferior	9.139.745		
Z (Elevação)	Limite Superior	544	10	11
	Limite Inferior	442		

Fonte: A autora (2019)

**Tabela 17** – Variáveis para o cálculo com blocos do *RecMin*

<b>Variáveis</b>	<b>Tipos de Dados</b>
Lito	Texto
Peso	Numérico
CaO	Numérico
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Numérico
Ângulo de direção	Numérico
Ângulo de mergulho	Numérico
Ângulo de inclinação	Numérico
Fator na direção X	Numérico
Fator na direção Y	Numérico
Fator na direção Z	Numérico
Extra_1	Numérico

Fonte: A autora (2019)

Os resultados apresentados para o Método da Krigagem Ordinária para a estimativa de teores foram:

- **Corpo de Minério 1**

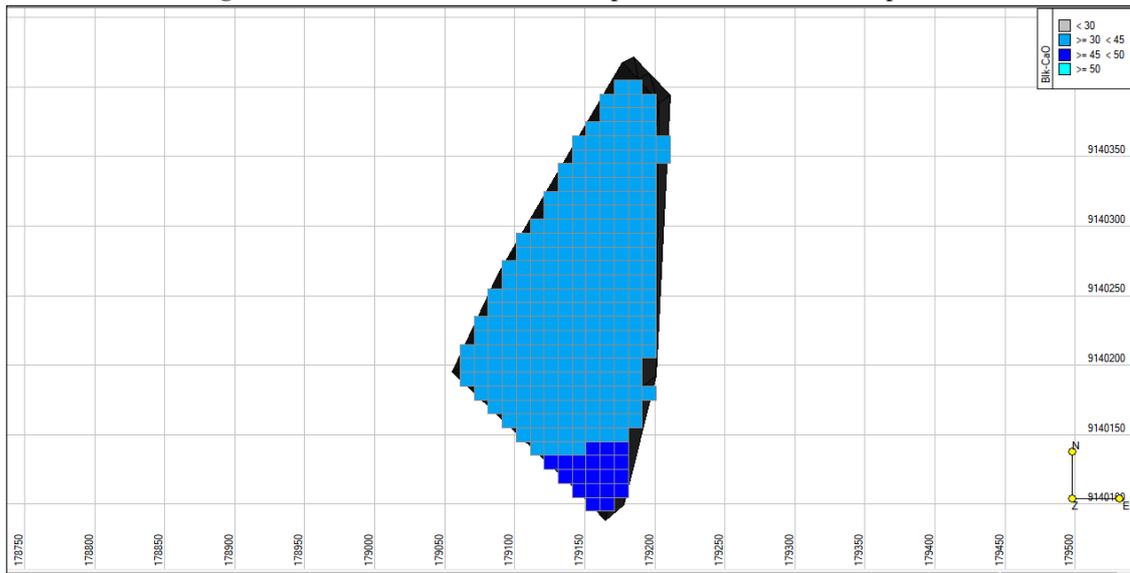
Para o Corpo de Minério 1 foram obtidos os resultados para volumes e teores mostrados na tabela 18, e as figuras 61 e 62 mostram o modelo de blocos em planta e em 3D.

**Tabela 18** – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 1 com o *RecMin*

<b>Corpo de Minério 1</b>	
Volume	512.000,0 m <sup>3</sup>
CaO	42,029%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,676%
Densidade	2,5 t/m <sup>3</sup>

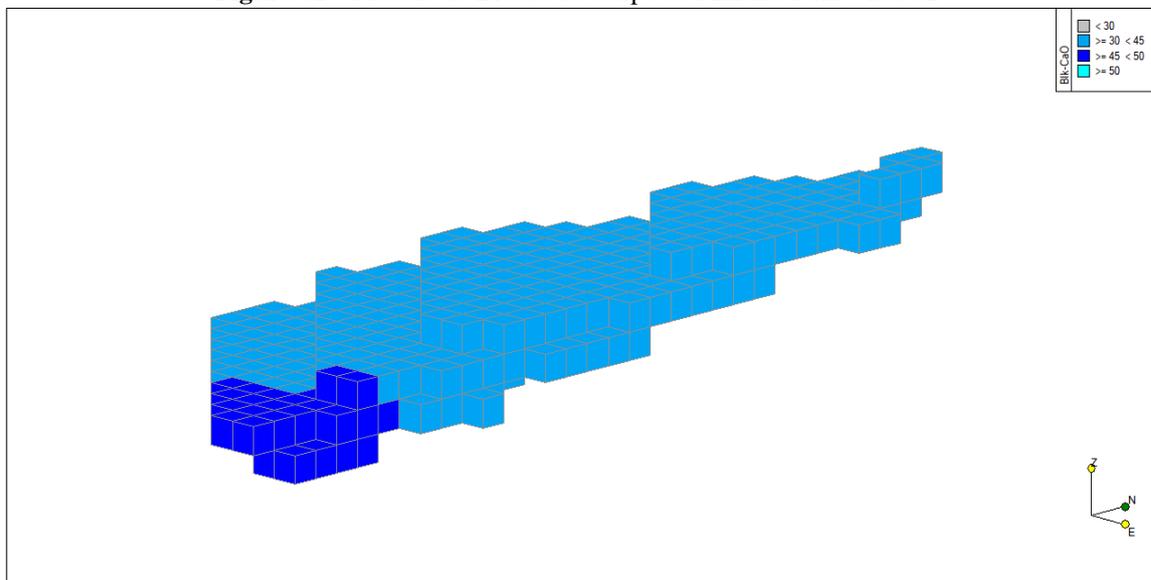
Fonte: A autora (2019)

**Figura 61** – Modelo de Blocos do Corpo de Minério 1 em vista plana



Fonte: A autora (2019)

**Figura 62** – Modelo de Blocos do Corpo de Minério 1 em Vista 3D



Fonte: A autora (2019)

- **Corpo de Minério 2**

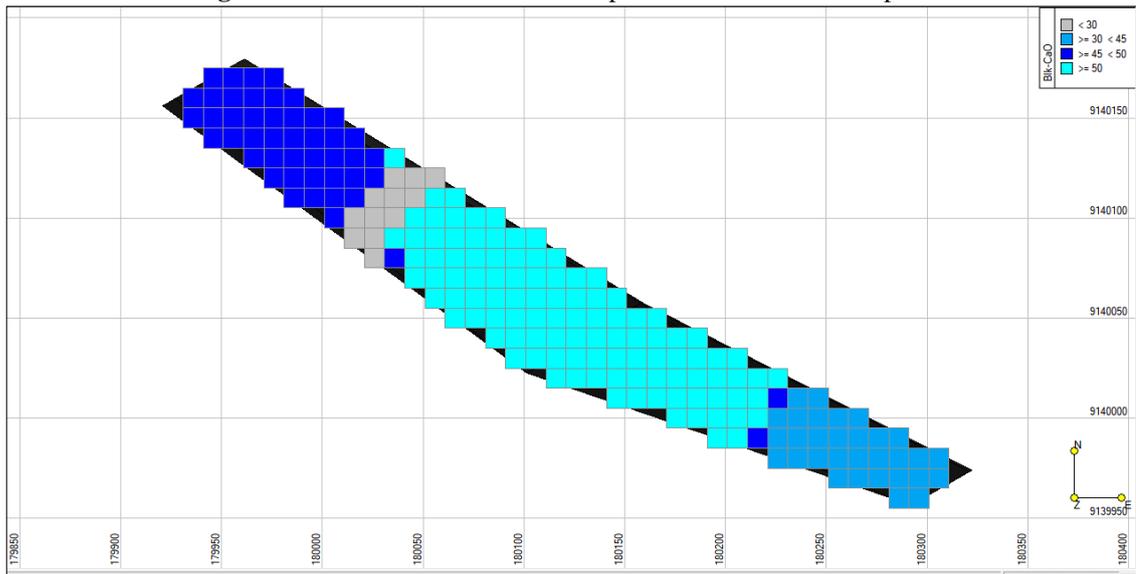
Para o Corpo de Minério 2 os seguintes resultados foram obtidos (tabela 19 e figuras 63 e 64):

**Tabela 19** – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 2 com o *RecMin*

<b>Corpo de Minério 2</b>	
Volume	598.000,0 m <sup>3</sup>
CaO	48,974%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,923%
Densidade	2,5 t/m <sup>3</sup>

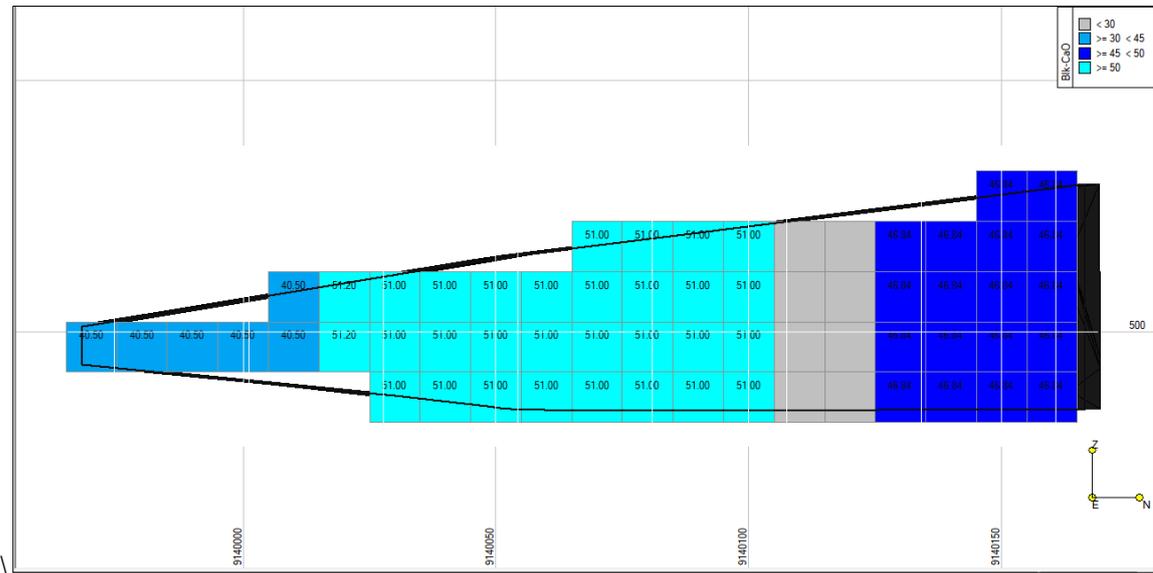
Fonte: A autora (2019)

**Figura 63 – Modelo de Blocos do Corpo de Minério 2 em vista plana**



Fonte: A autora (2019)

**Figura 64 – Modelo de Blocos do Corpo de Minério 2 em vista lateral**



Fonte: A autora (2019)

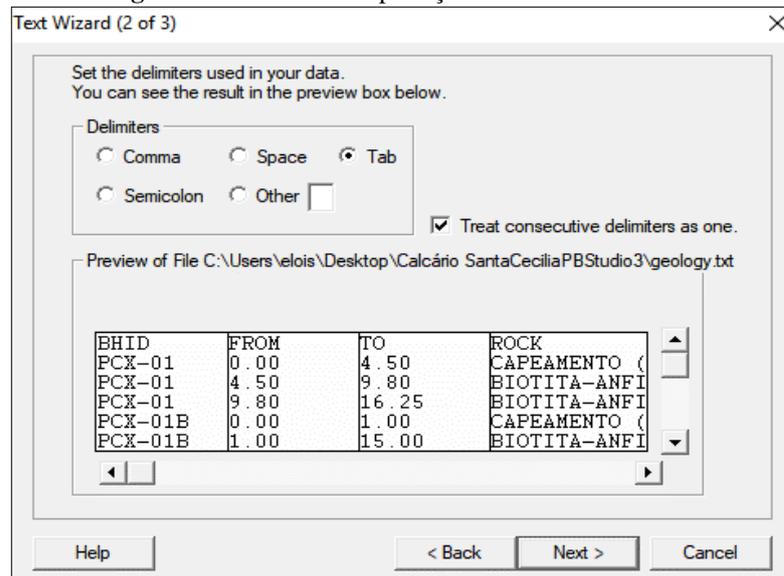
### 5.8 DATAMINE STUDIO 3

O processo de importação dos dados, de modelagem geológica do corpo de minério, a modelagem de blocos e o cálculo de estimativa de teores realizados no *Studio 3* é descrito nos itens a seguir.

### 5.8.1 Importação do Banco de Dados

Os arquivos necessários para modelagem geológica (*assays*, *collar*, *geology* e *survey*) foram importados conforme descrito na metodologia experimental para a formação do banco de dados no *Datamine Studio 3*. Um exemplo de uma das janelas de importação de arquivos externos nesse *software* é apresentado na figura 65.

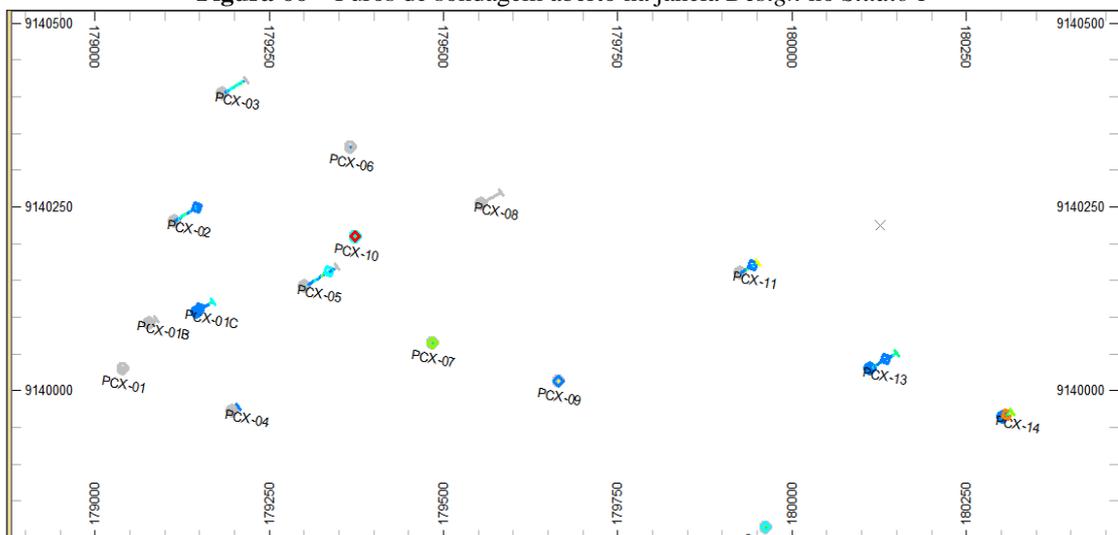
**Figura 65** – Janela de importação de dados do *Studio 3*



Fonte: A autora (2019)

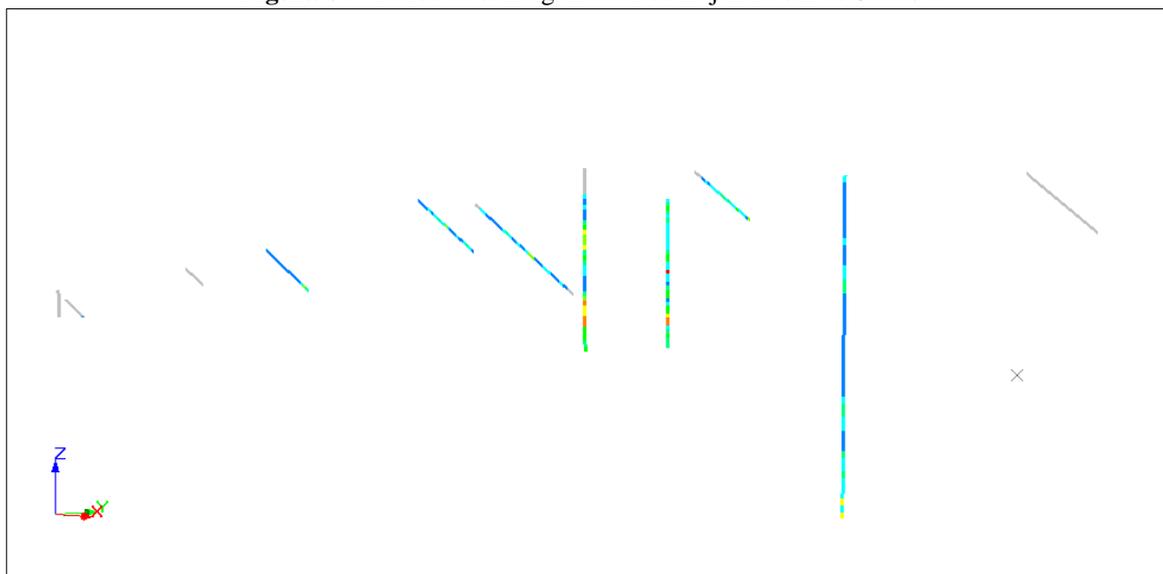
Depois da importação dos dados foram realizados os processos *Holes3D* e *COMPDH* para a regularização amostral. Após esses processos os furos de sondagem foram carregados nas janelas *Design* e *Visualizer* conforme pode ser visto nas figuras 66 e 67.

**Figura 66** – Furos de sondagem aberto na janela *Design* no *Studio 3*



Fonte: A autora (2019)

**Figura 67** – Furos de sondagem abertos na janela VR do *Studio 3*

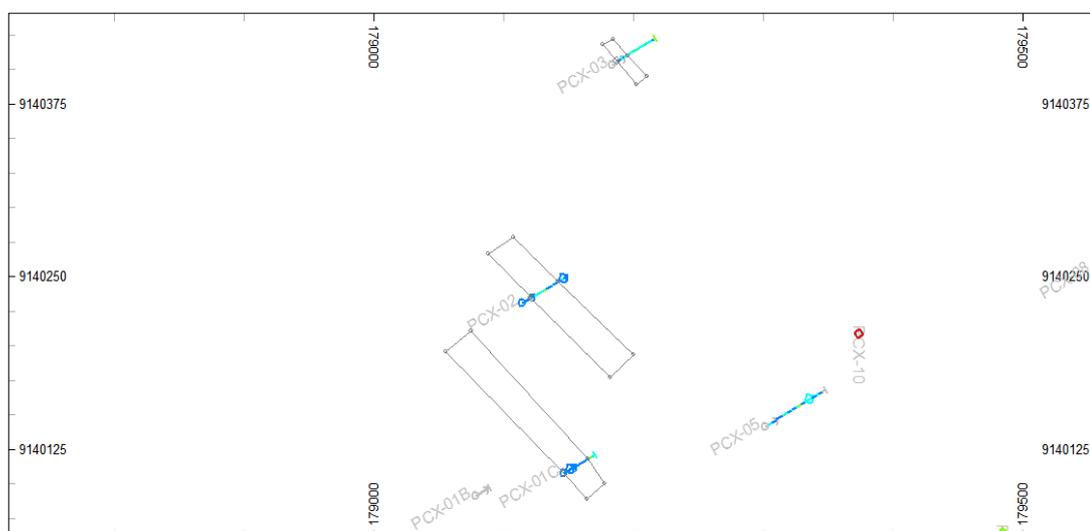


Fonte: A autora (2019)

- **Corpo de Minério 1**

Como mostrado no modelamento com o *RecMin*, para este Corpo de Minério foram construídas 3 (três) seções, como pode ser observado na figura 68 a visualização na janela *Design* do *Studio 3*.

**Figura 68** – Seções verticais do Corpo de Minério 1 visualizados na janela *Design* do *Studio 3*



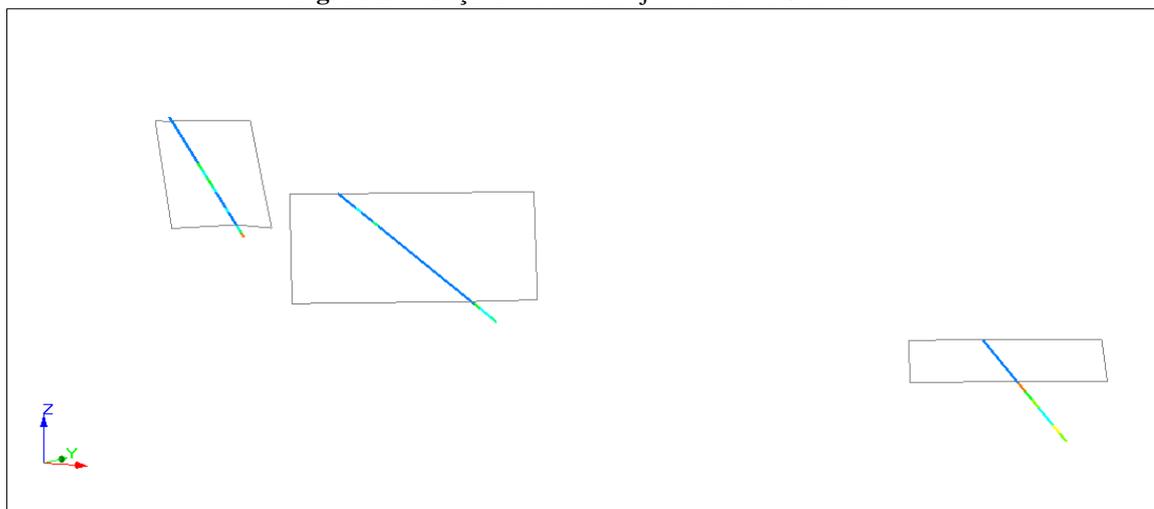
Fonte: A autora (2019)

- **Corpo de Minério 2**

Para o Corpo de Minério 2, como mostrado anteriormente na modelagem com *RecMin*, também foram construídas 3 (três) seções verticais. Os furos estão espaçados a uma distância

média de 200 metros. A visualização em planta das seções verticais criadas na janela *Design* é mostrada na figura 69.

**Figura 69** – Seções verticais na janela VR do *Studio 3*

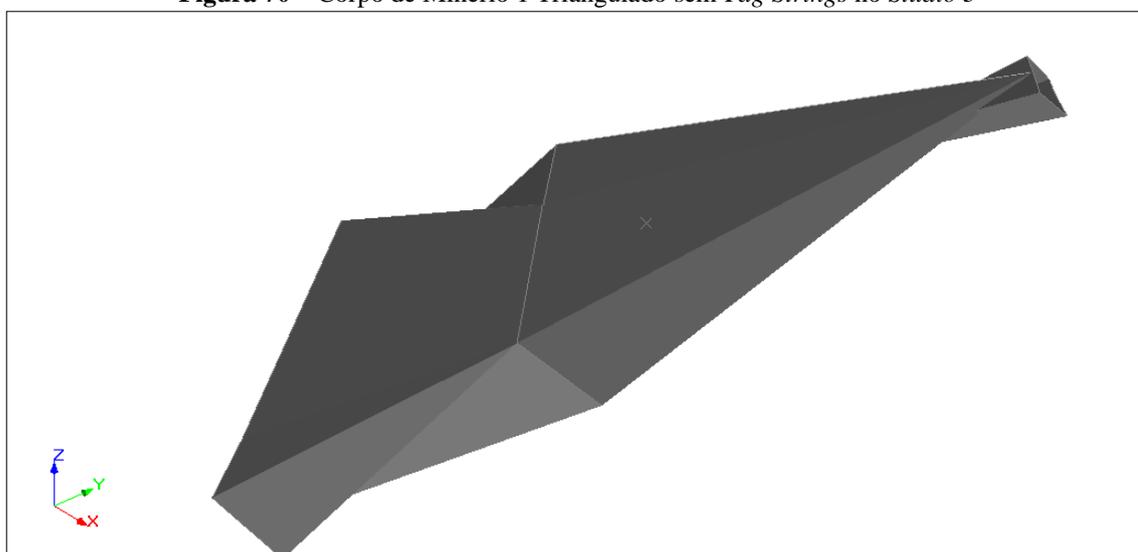


Fonte: A autora (2019)

### 5.8.2 Modelagem Geológica do corpo de minério

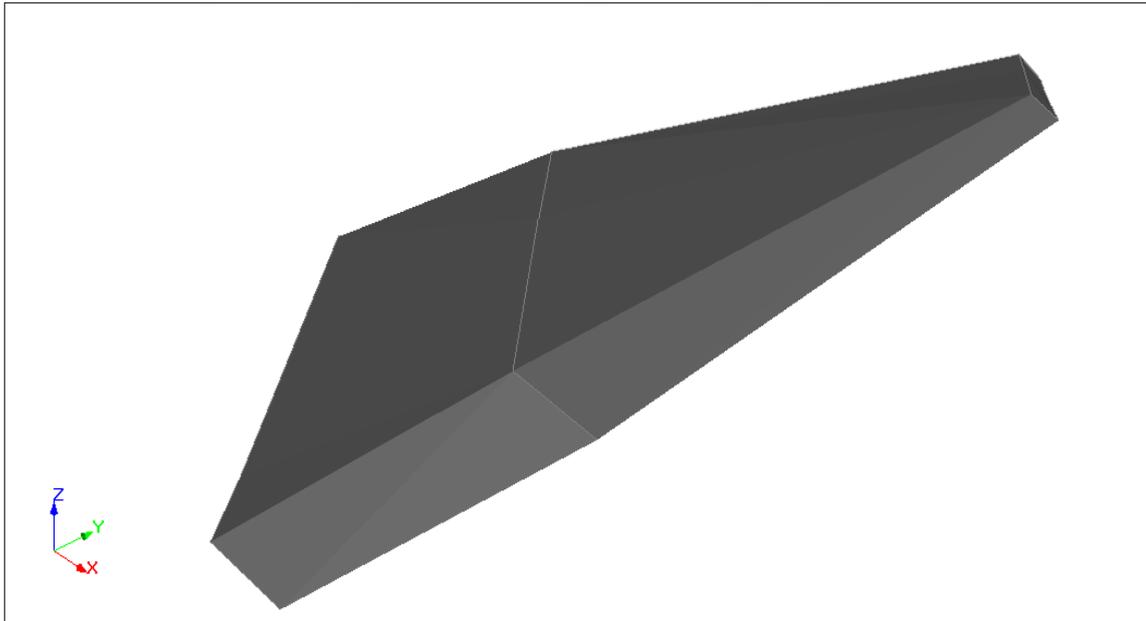
A triangulação dos corpos minerais foi realizada como especificado na metodologia experimental. Para a observação das linhas guias ou *tag strings* foram realizadas duas triangulações para os dois sólidos. A triangulação do Corpo de Minério 1 pode ser observada na figura 70 e a do Corpo de Minério 2 na figura 72 sem a utilização das *tag strings*. Os corpos de minério com a utilização das *tag strings* podem ser observados nas figuras 71 e 73.

**Figura 70** – Corpo de Minério 1 Triangulado sem *Tag Strings* no *Studio 3*



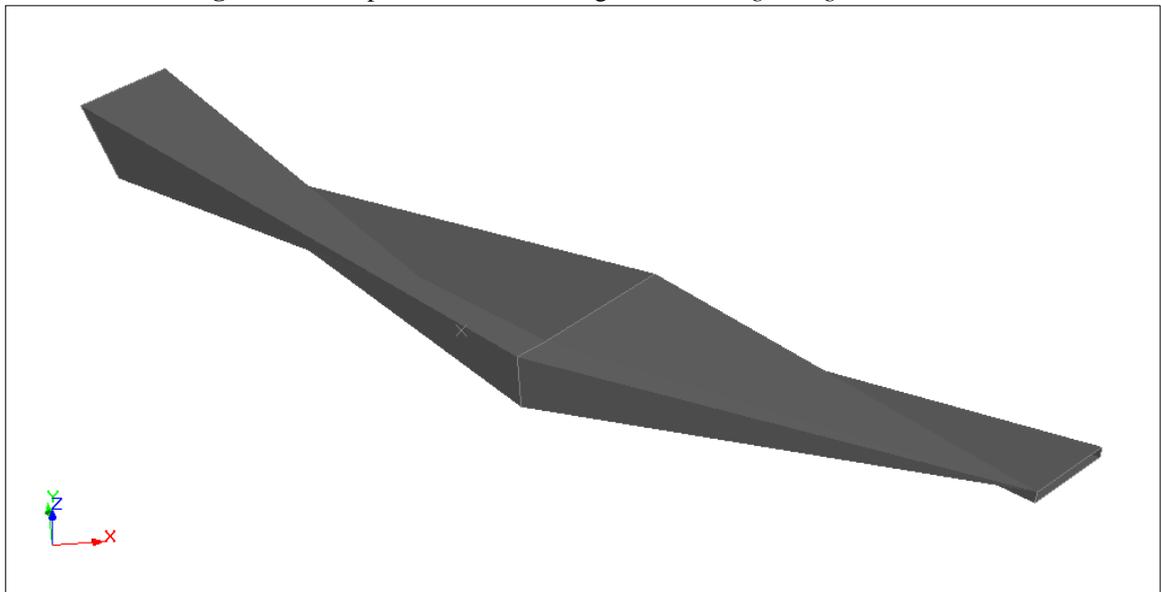
Fonte: A autora (2019)

**Figura 71** – Corpo de Minério 1 Triangulado com *Tag Strings* no *Studio 3*

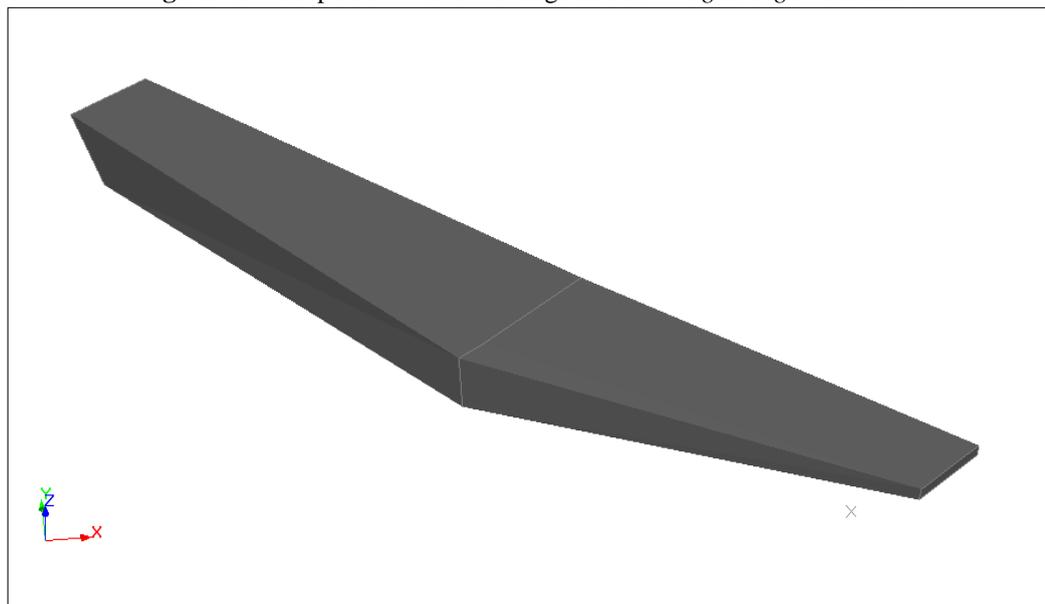


Fonte: A autora (2019)

**Figura 72** – Corpo de Minério 2 triangulado sem *Tag Strings* no *Studio 3*



Fonte: A autora (2019)

**Figura 73** – Corpo de Minério 2 triangulado sem *Tag Strings* no *Studio 3*

Fonte: A autora (2019)

### 5.8.3 Modelagem dos Blocos e Estimativa de Teores

Foi criado um protótipo contendo os blocos para o preenchimento dos corpos de minério na área em que estão inseridas as triangulações geradas na etapa anterior. Os limites utilizados para criação do arquivo protótipo para os blocos foram os mesmos do processo utilizado no *software RecMin* para criar o modelo de blocos básico. A próxima etapa foi o preenchimento dos corpos de minério através do processo *Wirefill*.

Os resultados obtidos através da krigagem de teores para os blocos gerados no *Studio 3*, utilizando o método da krigagem ordinária para os dois corpos de minério são apresentados a seguir.

- **Corpo de Minério 1**

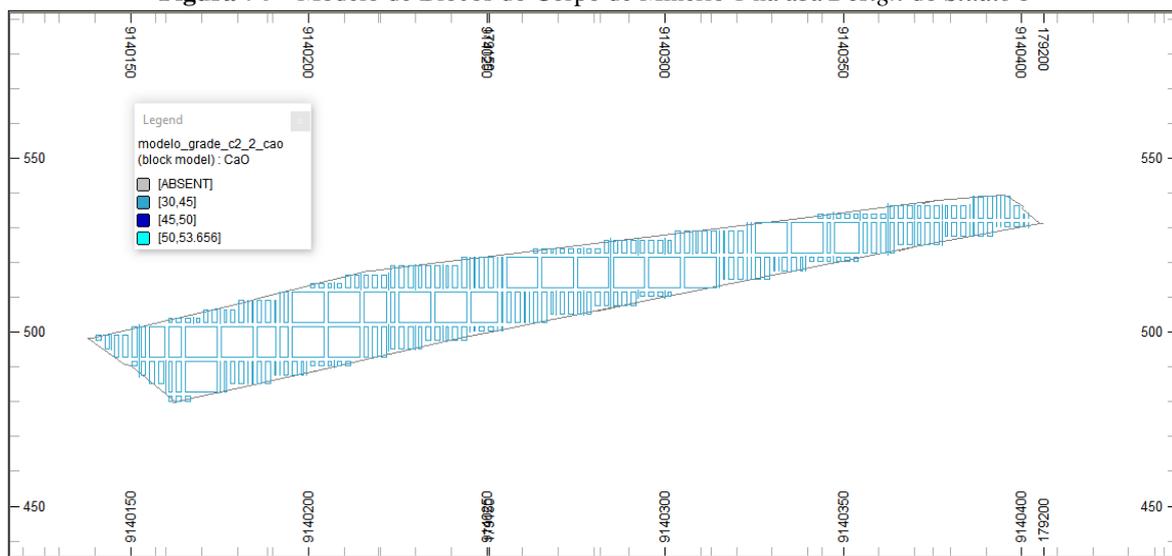
Para o Corpo de Minério 1 foram obtidos os resultados para volumes e teores mostrados na tabela 20, e a figura 74 mostra o modelo de blocos em planta.

**Tabela 20** – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 1 com o *Studio 3*

<b>Corpo de Minério 1</b>	
Volume	485.414,1 m <sup>3</sup>
CaO	41,979%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,813%
Densidade	2,5 t/m <sup>3</sup>

Fonte: A autora (2019)

**Figura 74** – Modelo de Blocos do Corpo de Minério 1 na aba *Design* do *Studio 3*



Fonte: A autora (2019)

- **Corpo de Minério 2**

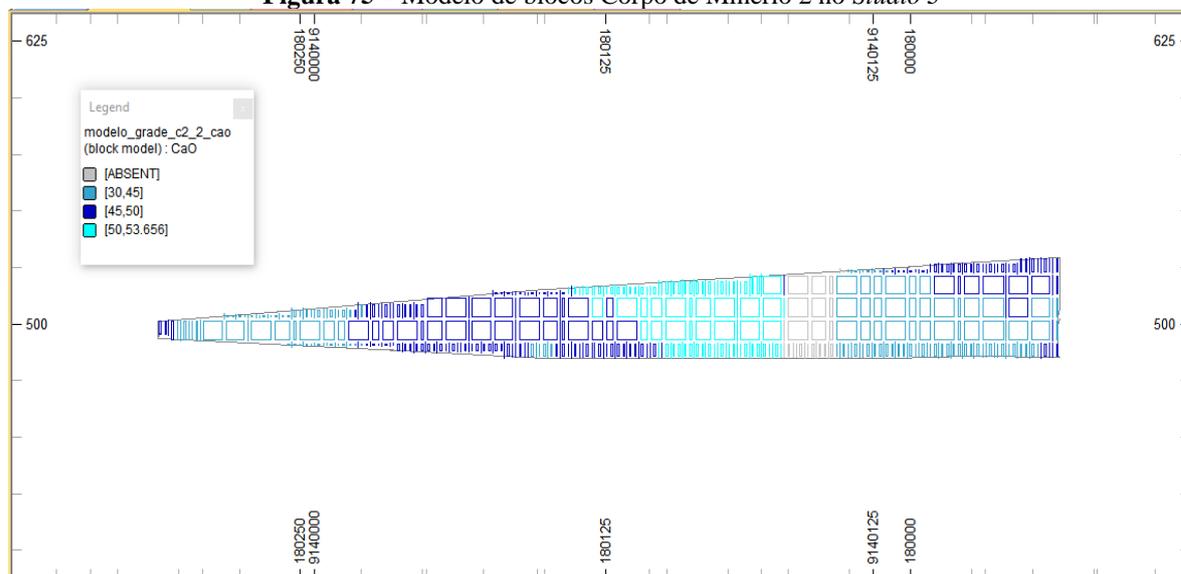
Para o Corpo de Minério 2 foram obtidos os seguintes resultados (tabela 21 e figura 75):

**Tabela 21** – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 2 com o *Studio 3*

Corpo de Minério 2	
Volume	551.630,5 m <sup>3</sup>
CaO	46,61%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,242%
Densidade	2,5 t/m <sup>3</sup>

Fonte: A autora (2019)

**Figura 75** – Modelo de blocos Corpo de Minério 2 no *Studio 3*



Fonte: A autora (2019)

## 5.9 COMPARAÇÃO ENTRE OS *SOFTWARES* UTILIZADOS

Quanto ao volume dos sólidos gerados, ambos os softwares não apresentaram diferenças consideráveis quando utilizadas as linhas limite ou *tag strings*, considerando os dois corpos minerais modelados e comparados nas mesmas circunstâncias. A máxima diferença entre os volumes é 8,50% apresentada para o sólido do corpo mineral 1 realizado sem as linhas limite. Os valores comparativos de volume e teores de CaO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são apresentados nas tabelas 22 e 23 para o corpo mineral 1 e. 24 e 25 para o corpo mineral 2.

Em relação aos dados analisados do corpo mineral 1 nos modelos desenvolvidos nos softwares *RecMin* e *Studio 3* pode-se notar que a diferença de volume entre ambos é bem maior quando não se utiliza as linhas limite na modelagem. Quando se compara os valores dos sólidos com e sem linhas limite temos uma diferença de 25,78% entre os modelos do *RecMin* e 12,61% entre os modelos do *Studio 3*, sendo a primeira mais significativa. Os teores de CaO são praticamente iguais em ambos os softwares, não apresentando variações consideráveis e os teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mostram uma maior diferença entre os teores krigados para os modelos dos dois softwares o que mostra uma maior variabilidade desse elemento no sistema.

**Tabela 22** – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 1

Corpo de Minério 1 (sem linha limite)			
Parâmetro	<i>RecMin</i>	<i>Studio 3</i>	Diferença
Volume	380.000,0m <sup>3</sup>	415.311,2 m <sup>3</sup>	8.50%
CaO	41,721%	41,944%	0,53%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,646%	0,784%	17.60%

Fonte: A autora (2019)

**Tabela 23** – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 1

Corpo de Minério 1 (com linha limite)			
Parâmetro	<i>RecMin</i>	<i>Studio 3</i>	Diferença
Volume	512.000,0 m <sup>3</sup>	485.414,1 m <sup>3</sup>	5,19%
CaO	42,02%	41,514%	0.12%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,676%	0,701%	16.85%

Fonte: A autora (2019)

Em relação aos dados analisados do corpo mineral 2 pode-se notar também que a diferença de volume entre ambos é maior quando não se utiliza as linhas limite na modelagem. Quando se compara os valores dos sólidos com e sem linhas limite de um mesmo software podemos notar que a variação de volume é bem maior para o corpo mineral 2 do que o valor obtido para o corpo mineral 1 anteriormente. Os volumes do corpo modelado com a linha limite é 44,98% do que sem a linha limite no software *RecMin* e 36,54% no *Studio 3* evidenciando que a utilização das linhas limites são extremamente necessárias para a construção de dados

mais uniformes para análise de recursos minerais. Os teores de CaO não apresentam pequenas variações, não chegando a 5% do valor. O teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é o que apresenta maior variabilidade entre os softwares apresentando um valor 19,63% maior para o modelo do *Studio 3* sem linha limite em relação ao modelo do *RecMin* e 25,68% maior para o modelo do *Studio 3* com linha limite em relação ao modelo do *RecMin*. Essa grande variação do teor, como dito anteriormente pode significar que o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> apresenta uma maior variabilidade dentro do espaço de pesquisa, diferentemente do teor de CaO reforçando características de impureza no material.

**Tabela 24** – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 2

Corpo de Minério 2 (sem linha limite)			
Parâmetro	<i>RecMin</i>	<i>Studio 3</i>	<i>Diferença</i>
Volume	329.000,0 m <sup>3</sup>	356.136,4 m <sup>3</sup>	7.62%
CaO	46,05%	47,36%	3.45%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,909%	1,131%	19.63%

Fonte: A autora (2019)

**Tabela 25** – Resultados de volume e teores do Corpo de Minério 2

Corpo de Minério 2 (com linha limite)			
Parâmetro	<i>RecMin</i>	<i>Studio 3</i>	<i>Diferença</i>
Volume	598.000,0 m <sup>3</sup>	551.630,5 m <sup>3</sup>	7,75%
hCaO	48,974%	46,61%	4,83%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,923%	1,242%	25,68%

Fonte: A autora (2019)

Os cálculos de volume indicam uma redução nos volumes do corpo geológico quando não há a utilização das linhas limite tanto no *RecMin* quanto no *Studio 3*. A criação de *wireframes* no *Studio 3* necessita da utilização da ferramenta *Create Tag Strings* que servem como linhas guias que limitam o processo de triangulação das seções verticais. Ignorar a utilização de *tag strings* pode gerar um sólido disforme, formação de triângulos interpostos, faces e vértices duplicados. Isso pode ser observado nas figuras 70 e 72, elaboradas sem a utilização das *tags strings* e nas figuras 71 e 73 que utilizaram as *tags strings*. As *tags strings* necessitam de ativação no software para que possam ser utilizadas no processo de *linkagem*. O software *RecMin* também necessita da utilização da linha de conexão, mas diferentemente do *Studio 3* utiliza-se uma linha única para conexão das seções verticais valendo-se da ferramenta de construção de linha *Dibujar Ilinea/superfície*.

O *RecMin* permite gerar um modelo de blocos que comporta todos os teores que se deseja alocar aos blocos, diferentemente do *Studio 3* que necessita criar um modelo para que cada teor que se deseja ser incorporado ao estudo. Realizar um modelo de bloco único só seria possível se a análise variográfica dos teores em estudos fossem equivalentes. Como as

características dos variogramas dos teores de CaO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são diferentes foram realizadas análises diferentes. No caso do *Studio 3*, posteriormente esses modelos de blocos individuais (por teor) podem ser combinados, um a um, obtendo-se então um modelo de blocos global com todos os teores de interesse, no *RecMin* não foi verificada essa possibilidade de combinação de modelos.

As informações numéricas sobre volume obtidas no modelo de blocos do *RecMin* são apresentadas com o volume dos blocos inteiros que estão dentro da modelagem devido a isso, os valores são apresentados em números inteiros, isso pode ser observado nos valores apresentados nas tabelas acima.

## 6. CONCLUSÃO

Quanto à modelagem digital do terreno, a combinação de ferramentas computacionais gratuitas tais como os *softwares RecMin, Google Earth e TCX Converter* é útil para reconhecimento de área, análise do relevo e decisão de alocação dos furos de sondagem como informações oficiais para detalhamento e cálculo de recursos e reservas minerais a topografia remota não se mostra segura por apresentar valores alterados de altimetria do terreno.

Quando à sondagem, foram realizados 16 furos irregularmente alocados para uma área de 130 ha. Os furos chegam a se distanciar mais de 200 metros e apresentam uma variação muito grande de comprimento (variando de 16,25 m até 100,25 m). Essa irregularidade é um fator determinante para a alta dispersão dos resultados levando a uma análise de baixa confiabilidade para fins de planejamento de lavra.

Quanto ao modelo de blocos os resultados para o *RecMin* mostraram que o modelo gerado não apresenta uma aderência tão eficiente ao contorno da *wireframe* isso pode ser observado na figura 64 e também através dos valores numéricos obtidos para os volumes apresentados nas tabelas 18 e 19 que são valores inteiros dos blocos que preenchem a *wireframe*. O *Studio 3* apresenta seus blocos quase aderentes ao contorno da *wireframe*. Após a krigagem, o teor  $Fe_2O_3$  apresentou uma variabilidade maior em relação ao teor de CaO quando se compara o resultado dos dois *softwares*. As diferenças são consideráveis quando observado principalmente os valores do corpo mineral 2. Os valores podem apresentar essa variabilidade devido ao próprio mineral ou ao método utilizado para a sua análise.

A ocorrência de mármore estudada não atende aos requisitos especificados para a fabricação de vidro plano, em especial quanto aos teores limites de  $Fe_2O_3$ . O fator limitante da presença de ferro na ocorrência de mármore pode ser um fator impeditivo para o uso em vidro plano, mas para outros vidros sodo-cálcicos destinados, por exemplo, à produção de embalagens que podem apresentar coloração.

O *RecMin* se mostrou de fácil interação e uso para quem desejar utilizá-lo. Para pequenas empresas e principalmente para a formação e qualificação de futuros profissionais nas universidades para uso de *softwares* na mineração o *RecMin* pode ser uma alternativa viável técnica e financeiramente, gerando resultados compatíveis com o *software Studio 3*. A qualidade do Datamine *Studio 3* e de outros *softwares* de mineração são indiscutíveis tendo em vista a consolidação no mercado comercial como ferramenta computacional utilizada na indústria de mineração. Entretanto o custo de aquisição é muitas vezes um fator impeditivo de sua utilização.

## REFERÊNCIAS

AKERMAN, M. **Natureza Estrutura e Propriedades do Vidro**, São Carlos-SP: Centro Técnico de Elaboração do Vidro, 2000.

ANM (2018). **Cadastro Mineiro**. Disponível em <<http://www.anm.gov.br/assuntos/ao-minerador/cadastro-mineiro>> Acesso em: 05 mar. 2018.

CARMO, I. M. **Estudo comparativo de ferramentas computacionais para modelagem geométrica e cubagem de maciços rochosos**. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

CONDE, R. P. e YAMAMOTO, J. K. Avaliação de reservas por métodos convencionais: um estudo de caso na Mina de Canoas 2 (PR). **Bol. IG-USP, Sér. Cient.**, 26:13-28. São Paulo, 1995.

CPRM (2017). Geologia e recursos minerais da folha surubim, Sb.25-Y-C-IV: Estados de Pernambuco e Paraíba. Disponível em <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17775>> Acesso em: 20 de jan. 2019.

COMPANHIA BRASILEIRA DE VIDROS PLANOS (2019). **Relatório de reavaliação de reservas**: processo ANM n°846059/2018. Janeiro, 2019.

CPRH (2003). **Diagnóstico Socioambiental do Litoral Norte de Pernambuco**. 214p Publicações CPRH/MMA – PNMA11, Recife, 2003.

CRIRSCO. **Sobre CRIRSCO**. Disponível em <<http://www.criusco.com/welcome.asp>> Acesso em: 18 abr. 2018.

CURI, A.; NEME, M. B.; SILVA, J. M.; CARNEIRO, A. C. B. Realização de projeto de lavra de mina subterrânea com utilização de aplicativos específicos. **Revista da Escola de Minas**, v.64, p. 519-524, 2011.

CURI, A., PEREIRA, M. A., SOUSA, W. T. e SILVA, V. C. Final open pit design for Monte Raso phosphate mine. **International Journal of Modern Engineering Research**, Vol. 3, Issue 6, Nov. – Dec., 2013, pp-3780-3785.

CURI, A. **Minas a céu aberto**: planejamento de lavra. 1ª ed, 223 p. Oficina de textos. São Paulo, 2014.

CURI, A. **Lavra de Minas**. 1ª ed., 462 p. Oficina de textos. São Paulo, 2017.

DANA, J. D. **Manual de Mineralogia**. Vol1 e 2. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1974.

DATAMINE (2018). **Resource & Reserve Modelling**. Disponível em <<http://www.dataminesoftware.com/resource-modelling/>> Acesso em: 24 de abr. 2018.

DATAMINE (2018). **Open Pit Planning**. Disponível em <<http://www.dataminesoftware.com/open-pit-planning/>> Acesso em: 24 de abr. 2018.

DATAMINE (2018). **Softwares solutions for every stage of mining**. Disponível em <<http://www.dataminesoftware.com/>> Acesso em: 24 de abr. 2018

DNPM (2002). **Norma brasileira para classificação de recursos e reservas minerais (minuta)**. 36p. Departamento Nacional de Produção Mineral, Ministério de Minas e Energia. Brasília, Setembro/2002.

DNPM (2018). **Sumário Mineral 2016**. Versão 1: Junho/2018, 131p. Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasil.

FREIRE, L. L. R. **A indústria de vidros planos**. Caderno Setorial ETENE. Banco do Nordeste. Novembro, 2016.

GAMA, C. D. **Metodologia de controle de lucro em mineração**. Publicação IPT 1661. São Paulo: IPT, 1986. 24p.

GAZETA DO POVO (2017). **Agricultura**. Disponível em <<https://www.gazetadopovo.com.br/agronegocio/agricultura/com-construcao-civil-parada-votorantim-aposta-no-agro-com-fabrica-na-rmc-86k4r7notptiqxdvxfdlpga5//>> Acesso em: 20 de jun. 2018.

GEOVIA SURPAC (2018). **Geovia Surpac™: integrated geology, resource modeling, mine planning and production**. Disponível em <<https://www.3ds.com/products-services/geovia/products/surpac/>> Acesso em: 20 de jun. 2018.

GOMES, M. I. F. **Colina Histórica de Igarassu: Iluminação e Embutimento subterrâneo das redes aéreas**. Dissertação (Mestrado Profissional em conservação e restauração de

monumentos e núcleos históricos) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, 2011.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory mining engineering**. 2. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2002.

HOULDING, S.W. The application of a new 3-D computer modelling techniques to mining. *In: Three-dimensional modeling with geoscientific information systems*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1992. p. 303-325.

IBGE. **Igarassu**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/igarassu/panorama>>. Acesso em: 01 maio 2018.

IMA. **Industrial Minerals: Kaolin**. Disponível em: <[www.ima-europe.eu/about-industrial-minerals/industrial-minerals-ima-europe/kaolin](http://www.ima-europe.eu/about-industrial-minerals/industrial-minerals-ima-europe/kaolin)>. Acesso em: 14 abr. 2018.

KAVOURAS, M. **A spatial information system with advanced modeling capabilities**. A.K. Turner (ed.), *Three-Dimensional modeling with Geoscientific Information System*, 59-67. Kluwer Academic Publishers. Athens, Greece, 1992.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**. 23. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. p. 551-552.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas e minerais industriais: usos e especificações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral; Ministério de Ciência e Tecnologia, 2008. 900p.

MASCARENHAS, J. C., BELTRÃO, B. A., SOUZA JUNIOR, L. C. de, GALVÃO, M. J. T. G., PEREIRA, S. N. e MIRANDA, J. L. F. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do Município de Igarassu, Estado de Pernambuco**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

MAPTEK. **Maptek Vulcan**. Disponível em: <<https://www.maptek.com/products/vulcan/index.html>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

MCCARTER, M. K. et al. Open Cast (Strip) Mining. *In: Hartman, H. L. S. M. E. Mining Engineering Handbook*. 2. ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1992. p. 1403-1446.

MILADINOVIC, M.; CEBASEK, V.; GOJKOVIC, N. **Computer programs for design and modelling in mining**. Underground Mining Engineering. Faculty of Mining and Geology, Belgrado, Sérvia, 2011.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Perfil do calcário**. Brasília: MME, 2009.

MURRAY, H. H. Clays. *In: Ulmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, v. A7, p. 109-136, VCH, Verlagsgesellschaft, Weinheim, Alemanha, 1986.

PEREIRA, P.E.C. **Estimativa de Recursos Minerais e otimização de cava aplicados a um estudo de caso de uma Mina ade Calcário**. 2017.171f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2017.

PEREIRA, R. M. **Fundamentos de Prospecção Mineral**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003, 167p.

PERONI, R. **Tutorial Datamine para o ensino de engenharia de minas**. UFRGS. Disponível em: <<https://lume-re-demonstracao.ufrgs.br/datamine/index.php>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

POPOFF, C. C. **Computing reserves of mineral deposits: principles and conventional methods**. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, Washington, EUA. 1966.

PRASAD, M.S.; REID, K. J.; MURRAY, H. H. Kaolin: processing, properties and application. **Applied Clay Science**, v.6, 1991, p. 87-119.

RECMIN. **RMyac-Editor yacimientos**. Disponível em: <[https://recmin.com/WP/?page\\_id=69](https://recmin.com/WP/?page_id=69)>. Acesso em: 28 abr. 2018.

RECMIN. **RMedit-Sondeos**. Disponível em <[https://recmin.com/WP/?page\\_id=76](https://recmin.com/WP/?page_id=76)> Acesso em: 28 abr. 2018.

RECMIN. **RMdraw-Dibujo**. Disponível em: <[https://recmin.com/WP/?page\\_id=80](https://recmin.com/WP/?page_id=80)> Acesso em: 28 abr. 2018

RECMIN. **RM3d-Render 3D**. Disponível em: <[https://recmin.com/WP/?page\\_id=86](https://recmin.com/WP/?page_id=86)>. Acesso em: 28 abr. 2018.

RECMIN. **RMSeg-copias**. Disponível em: <[https://recmin.com/WP/?page\\_id=268](https://recmin.com/WP/?page_id=268)>. Acesso em: 28 abr. 2018.

RECMIN. **Condiciones de uso**. Disponível em:<[www.recmin.com/wp/?page\\_id=149](http://www.recmin.com/wp/?page_id=149)>. Acesso em: 14 set. 2017.

REVUELTA, M. B. & JIMENO, C. L. **Manual de Evaluación y diseño de Explotaciones Mineras**. Editora Entorno Gráfico. Madrid, 1997.

ROCSCIENCE. **Geotechnical tools**. Disponível em:<<https://www.rocscience.com/software/geotechnical-tools>>. Acesso em: 20 jun. 2018

RODRIGUES, A.F.S. Mineração de Rochas e Minerais Industriais. *In: Economia Mineral do Brasil*. Departamento Nacional de Produção Mineral/Ministério de Minas e Energia, 2009.

RUIZ DIOSES, Y. P.; DOMINGUEZ, D. E. C. e FERNANDEZ, C. C. **Aplicación de software libre para la estimación de recursos y para la evaluación técnica económica de las reservas minerales**. SolMine,, 2008.

RUIZ DIOSES, Y. P. **Aplicación de software libre para la estimación de recursos y para la evaluación técnica económica de las reservas minerales**. 2015. 278 f. Monografía (Graduação em Engenharia de Minas), Universidade Nacional de Piura, Peru, 2015.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L.M., Cálcaro e Dolomito. *In: LUZ, A. B. da L; Fernando A. F. Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Ministério de Ciência e Tecnologia, 2008. 900p.

SILVA, A. M. P. **Sustentabilidade operacional no contexto da indústria mineral caso da lavra de Caulim no município de Cabo de Santo Agostinho/PE**. 2008 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SILVA, A. H. M. **Modelagem geológica e estocástica da porção NE da mina de Morro do Ouro, Paracatu (MG)**. 2000. 99 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Departamento de Metalogênese e Geoquímica. Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2000.

TANNO, L.C.; MOTTA, J. F. M. Panorama setorial: minerais industriais. **Cerâmica Industrial**, n. 5, Maio/Jun., p. 37-40, 2000.

TOMI, G. Modelagem geológica informatizada em Datamine. *In: J. K. Yamamoto. Avaliação e classificação de reservas minerais*. São Paulo: EDUSP; FAPESP, 2001.

USGS (2017). **Mineral Commodity Summaries 2017**. United States Geological Survey, Virginia, US, Janeiro/2017.

VARGAS, V. F. V. **Estimación de Reservas Minerales y Propuesta de Diseño Preliminar de Explotación del Bloque 2 del sector “X7” Mina LAS PARALELAS utilizando herramientas informáticas**. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Guayaquil, Ecuador, 2016.

VENTSIM (2018). **Ventsim Visual**. Disponível em <<http://www.ventsim.com/es/productos/ventsim-visual/>> Acesso em: 20 de junho 2018.

WILSON, I. D. (2006). **Filler and Coating Pigments for Papermakers**. Disponível em <[www.semanticscholar.org/](http://www.semanticscholar.org/)> Acesso em: 30 abr. 2018.

WILSON, I. R.; SANTOS, H. S.; SANTOS, P. S. Caulins brasileiros: alguns aspectos da geologia e da mineralogia. **Cerâmica**. v.44, n. 287-288, 1998.

YAMAMOTO, J. K. **Avaliação e classificação de reservas minerais**. São Paulo: EDUSP; FAPESP, 2001. 226 p.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

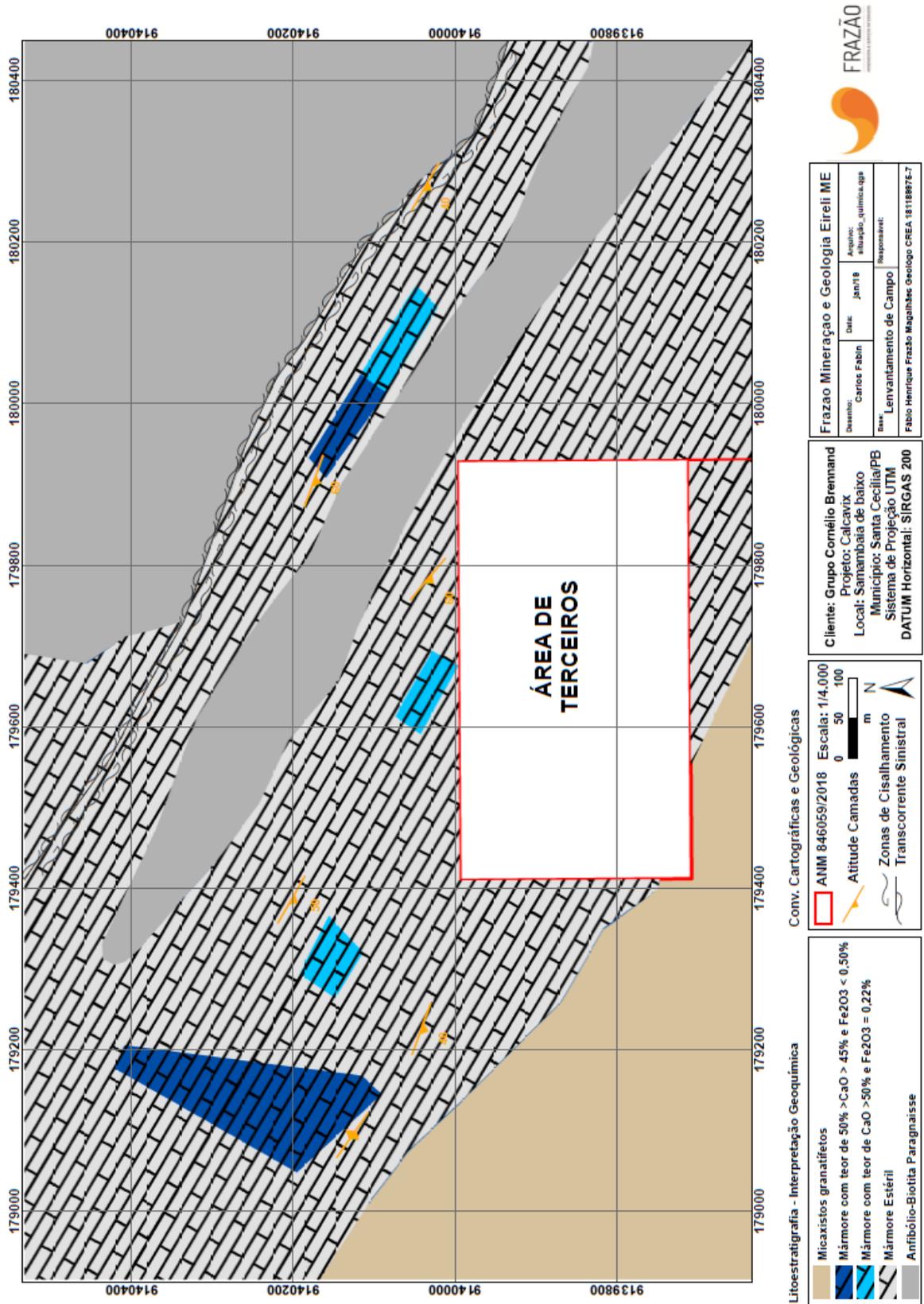
**ANEXO A - PONTOS PARA COMPARAÇÃO ALTIMÉTRICA: TOPOGRAFIA  
CONVENCIONAL E TOPOGRAFIA REMOTA**

	<b>LATITUDE</b>	<b>LONGITUDE</b>	<b>Altitude convencional</b>	<b>Altitude Google Earth</b>	<b>Diferença</b>
1	178555.662	9140284.241	460	464	0.85%
2	178511.322	9140554.399	474	484	2.04%
3	180428.125	9139936.227	513	518	0.98%
4	180497.959	9139962.234	513	522	1.70%
5	180346.108	9139589.384	495	515	3.90%
6	180225.102	9139603.837	486	503	3.40%
7	179173.266	9140637.277	548	552	0.80%
8	178445.083	9140272.869	452	459	1.52%
9	178712.757	9140250.275	462	467	1.01%
10	179930.375	9140329.141	531	539	1.56%
11	180312.755	9139997.408	506	516	1.94%
12	180488.393	9140327.123	540	542	0.39%
13	179968.453	9140548.535	537	543	1.09%
14	180490.579	9140495.383	558	562	0.72%
15	179567.524	9140345.359	539	545	1.10%
16	179505.032	9140598.96	535	535	0.04%
17	179073.983	9140083.173	483	493	2.07%
18	179139.557	9139979.757	476	484	1.76%
19	180136.8763	9140107.823	518	521	0.62%
20	180209.2022	9140059.822	507	515	1.47%
21	179145.821	9140229.143	519	526	1.33%
22	179176.029	9140456.183	547	549	0.41%
23	179242.139	9140267.15	523	535	2.32%
24	179178.334	9139815.063	465	469	0.88%
25	179343.604	9139856.88	476	487	2.20%
26	179756.494	9139971.869	546	548	0.33%
27	179645.193	9139950.178	538	541	0.53%
28	180309.425	9139903.8	515	511	0.81%
29	180131.317	9139975.023	504	509	0.92%
30	180084.312	9139876.119	500	513	2.47%
31	179992.3455	9140214.315	531	536	0.95%
32	179797.8765	9140099.267	536	542	1.19%
33	179807.9924	9140198.254	538	543	0.88%
34	179584.453	9140147.653	548	551	0.57%
35	180036.044	9140109.367	527	528	0.16%
36	179460.304	9140342.886	543	549	1.14%
37	179993.188	9139987.053	508	521	2.45%
38	179000.027	9140323.911	525	527	0.42%
39	178939.765	9140504.165	526	530	0.82%
40	179067.15	9140437.89	535	541	1.13%

41	179406.857	9139776.63	474	483	1.95%
42	179298.171	9139757.818	460	470	2.05%
43	179000.027	9140323.911	525	527	0.42%
44	178763.075	9140563.452	521	524	0.60%
45	178687.77	9140528.323	510	508	0.47%
46	178662.081	9140363.222	468	477	1.81%
47	178842.42	9140255.057	466	480	2.84%
48	178820.015	9140392.288	492	501	1.72%
49	178779.168	9140191.812	458	468	2.05%
50	178832.743	9140099.31	464	469	1.09%
51	179268.2531	9140072.942	516	519	0.63%
52	179406.857	9139776.63	474	483	1.95%
53	178820.173	9139878.242	457	459	0.39%
54	179584.319	9139660.568	478	487	1.76%
55	178466.145	9140168.16	447	455	1.84%
56	179860.405	9139920.195	541	542	0.22%
57	178937.819	9139795.885	452	462	2.07%
58	179370.641	9139606.183	472	475	0.54%
59	179168.358	9139685.086	456	465	1.99%
60	179477.202	9140014.962	537	538	0.23%
61	179441.621	9140126.612	540	546	1.01%
62	180312.755	9139997.408	506	516	1.94%
63	178511.322	9140554.399	474	464	2.14%
64	180428.125	9139936.227	513	518	0.98%
65	180497.959	9139962.234	513	522	1.70%
66	180225.102	9139603.837	486	503	3.40%
67	180346.108	9139589.384	495	515	3.90%
68	179930.375	9140329.141	531	539	1.56%
69	180488.393	9140327.123	540	542	0.39%
70	180490.579	9140495.383	558	562	0.72%
71	179968.453	9140548.535	537	543	1.09%
72	179505.032	9140598.96	535	535	0.04%
73	179504.629	9140598.394	536	535	0.10%
74	178712.757	9140250.275	462	467	1.01%
75	178445.083	9140272.869	452	459	1.52%
76	179289.172	9140177.16	526	532	1.16%
77	179567.524	9140345.359	539	545	1.10%
78	179353.472	9140434.813	548	549	0.26%
79	178918.427	9140000.766	464	471	1.52%
80	179173.266	9140637.277	548	552	0.80%
81	179011.874	9139931.599	463	472	1.83%
82	179446.409	9139689.676	476	481	1.06%
83	178466.145	9140168.16	447	455	1.84%
84	179641.834	9140303.019	542	547	0.92%
85	179571.079	9139833.315	506	513	1.37%

86	178832.743	9140099.31	464	469	1.09%
87	178779.168	9140191.812	458	468	2.05%
88	178820.173	9139878.242	457	459	0.39%
89	179584.319	9139660.569	478	487	1.76%
90	179168.358	9139685.086	456	465	1.99%
91	179860.405	9139920.195	541	542	0.22%
92	179370.641	9139606.183	472	475	0.54%
93	180008.458	9139612.646	508	508	0.06%
94	180054.348	9139701.886	519	518	0.27%
95	179810.915	9139586.404	487	497	2.05%
96	180008.458	9139612.646	508	508	0.06%
97	180054.348	9139701.886	519	518	0.27%
98	179446.409	9139689.676	476	481	1.06%
99	179571.079	9139833.315	506	513	1.37%
100	180276.405	9140047.962	502	514	2.35%
<b>MÉDIA</b>			503.4	509.3	1.26%

## ANEXO B - MAPA GEOQUÍMICO ELABORADO PELA COMPANHIA BRASILEIRA DE VIDROS PLANOS



## ANEXO C - PLANTA DE SITUAÇÃO E MALHA DE SONDAGEM ELABORADO PELA COMPANHIA BRASILEIRA DE VIDROS PLANOS

