

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIA MINERAL

CAIO CESAR VIVIAN GUEDES OLIVEIRA

**ANÁLISE E APLICAÇÃO DE *LASER SCANNER* TERRESTRE EM MINERAÇÃO
DE CALCÁRIO NA ESTIMATIVA DA SELETIVIDADE DE LAVRA**

Caçapava do sul

2020

CAIO CESAR VIVIAN GUEDES OLIVEIRA

**ANÁLISE E APLICAÇÃO DE *LASER SCANNER* TERRESTRE EM MINERAÇÃO
DE CALCÁRIO NA ESTIMATIVA DA SELETIVIDADE DE LAVRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Tecnologia Mineral, da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza

Caçapava do Sul

2020

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

0048a Oliveira, Caio Cesar Vivian Guedes

Análise e aplicação de laser scanner terrestre em mineração
de calcário na estimativa da seletividade de lavra / Caio
Cesar Vivian Guedes Oliveira.

88 p.

Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM TECNOLOGIA MINERAL, 2020.

"Orientação: Luis Eduardo de Souza".

1. Mineração. 2. Diluição. 3. Laser scanner. 4.
Imageamento. 5. Reflectância. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

CAIO CESAR VIVIAN GUEDES OLIVEIRA

**ANÁLISE E APLICAÇÃO DE LASER SCANNER TERRESTRE EM MINERAÇÃO DE CALCÁRIO
NA ESTIMATIVA DA SELETIVIDADE DE LAVRA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Mestrado Profissional em Tecnologia Mineral do Programa de Pós Graduação em Tecnologia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia Mineral.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral.

Dissertação defendida e aprovada em: 03 de setembro de 2020

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza
Unipampa

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos
Peroni UFRGS

Dr. Raul Oliveira Neto

Me. Evandro Gomes dos Santos



Documento assinado eletronicamente por **RODRIGO DE LEMOS PERONI, Usuário Externo**, em 16/11/2020, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Raul Oliveira Neto, Usuário Externo**, em 16/11/2020, às 17:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Evandro Gomes dos Santos, Usuário Externo**, em 24/11/2020, às 17:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/11/2020, às 19:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0403366** e o código CRC **467919DF**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

AGRADECIMENTO

Ao Professor Dr. Luis Eduardo de Souza pela orientação, compreensão e apoio ao longo do meu caminho acadêmico, em especial na colaboração desta dissertação.

Ao Me. Tecnólogo de Minas Evandro Gomes dos Santos pelos acompanhamentos e sugestões que nortearam este trabalho.

A Tecnóloga de Minas Ângela Cristina Bertoi Fleck pelo auxílio nas atividades práticas.

A minha esposa Darcilene da Rosa Corrêa por estar sempre ao meu lado em todos os caminhos que a vida nos proporciona.

A Universidade Federal do Pampa por proporcionar uma formação profissional de qualidade e gratuita.

A empresa Dagoberto Barcellos por nos receber de bom grado e auxiliar na obtenção dos dados fundamentais ao desenvolvimento desta dissertação.

A todos os amigos e familiares que me apoiam incondicionalmente.

A minha querida avó, Dilma Brito Vivian (*in memoriam*), que sempre me apoiou na busca por conhecimento, inclusive em grande parte deste mestrado.

RESUMO

Nos últimos anos, a tecnologia vem avançando rapidamente nos mais diversos setores da indústria de mineração, tanto em termos de equipamentos quanto nos próprios processos industriais. Neste sentido, o *scanner a laser* terrestre 3D é um destes avanços tecnológicos que, recentemente, tornou-se utilizado em levantamento de minas. A informação 3D capturada pelo *scanner a laser* é complementada com dados de imagem digital, através de uma densa nuvem de pontos associados à reflectância dos minerais presentes nas rochas, informação esta que é capaz de fornecer uma distinção entre as diversas litologias presente no campo de visão da varredura executada pelo equipamento. Essas litologias decorrem de uma grande variabilidade geológica a qual é um dos parâmetros que necessita de máximo domínio possível sobre seu comportamento, pois está diretamente relacionada com a lavra do minério, afetando a diluição do material de interesse e, portanto, devendo ser considerada no planejamento dos avanços de lavra. Neste sentido, o presente trabalho foi proposto buscando identificar e quantificar a diluição do minério presente nas bancadas em uma mineração de calcário na região de Caçapava do Sul, com o auxílio do *laser scanner* e suas ferramentas computacionais. Foram realizados levantamentos ao longo de 2019 e 2020, com a análise dos resultados envolvendo quatro etapas, sendo elas: (i) análise da reflectância e definição de ponto de distinção entre minério e estéril; (ii) análise da diluição utilizando a reflectância das rochas por meio do uso do *software Reconstructor*[®]; (iii) análise comparativa entre os métodos de cálculo de diluição utilizados pela empresa e pela metodologia anterior e; (iv) elaboração de metodologia alternativa para automação do cálculo de diluição presente nas bancadas. Os resultados demonstraram que os valores obtidos de diluição através do *software Reconstructor*[®] são os mais confiáveis, os métodos de análise através do *software* proporcionam grande precisão no reconhecimento das áreas de minérios e estéril. Além da técnica de imageamento por cor ambiente também temos a presença da reflectância que demonstra valores em forma de cores para nos auxiliar na identificação das litologias, assim, o que os olhos não veem a reflectância demonstra de forma precisa com a realidade, tornando assim um trabalho vantajoso para empresa, favorecendo um conhecimento maior sobre sua jazida e até mesmo um controle mais específico nos avanços de lavra de cada bancada.

Palavras-chave: Mineração. Diluição. *Laser scanner*. Imageamento. Reflectância.

ABSTRACT

In recent years, technology has been advancing rapidly in the most diverse sectors of the mining industry, both in terms of equipment and in the industrial processes themselves. In this sense, the 3D terrestrial laser scanner is one of these technological advances that, recently, has become used in mine surveying. The 3D information captured by the laser scanner is complemented with digital image data, through a dense cloud of points associated with the reflectance of the minerals present in the rocks, information that is able to provide a distinction between the various lithologies present in the field of view. of the scan performed by the equipment. These lithologies result from a great geological variability, which is one of the parameters that needs maximum possible control over its behavior, as it is directly related to the mining of the ore, affecting the dilution of the material of interest and, therefore, should be considered in the planning of mining advances. In this sense, the present work was proposed seeking to identify and quantify the dilution of the ore present in the benches in a limestone mining in the region of Caçapava do Sul, with the aid of the laser scanner and its computational tools. Surveys were carried out throughout 2019 and 2020, with the analysis of the results involving four stages, namely: (i) analysis of reflectance and definition of the point of distinction between ore and barren; (ii) dilution analysis using the reflectance of the rocks using the Reconstructor® software; (iii) comparative analysis between the dilution calculation methods used by the company and the previous methodology and; (iv) elaboration of an alternative methodology for automating the dilution calculation present in the benches. The results showed that the values obtained from dilution using the Reconstructor® software are the most reliable, the methods of analysis through the software provide great precision in the recognition of the mineral and sterile areas, in addition to the ambient color imaging technique we also have the presence the reflectance that demonstrates values in the form of colors to assist us in the identification of lithologies, thus, what the eyes do not see reflectance accurately demonstrates with reality, thus making it an advantageous work for the company, favoring greater knowledge about its deposit and even more specific control in the mining advances of each bench.

Keywords: Mining. Dilution. Laser scanner. Imaging. Reflectance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação da diluição.	26
Figura 2 - Sequência das perdas e diluição.	27
Figura 3 - Matriz tridimensional de blocos projetados para aproximar a geometria de um depósito mineral.	29
Figura 4 - Descrição dos componentes do <i>scanner</i> X300.	32
Figura 5 - Opções de configurações da varredura.	33
Figura 6 - Princípio “ <i>time-of-flight</i> ”.	36
Figura 7 - Espectros de rochas sedimentares argilosas: (1) argilito branco; (2) argilito róseo; (3) folhelho roxo.	38
Figura 8 - Espectros de rochas carbonáticas: (1) calcário argiloso; (2) doloarenito; (3) dololutito; (4) calciesparito; (5) calcilutito; (6) e (7) calcarenito.	38
Figura 9 - Reflectâncias do calcário dolomítico.	39
Figura 10 - Espectros de rochas metamórficas argilosas de baixo grau (fácies xisto verde): (1) metassilito avermelhado; (2) ardósia avermelhada; (3) ardósia cinza-escuro.	40
Figura 11 - Espectros de (1) mármore branco puro dolomítico, (2) mármore calcítico de cor bege contaminado por óxido de ferro e (3) rocha calcissilicática.	41
Figura 12 - Etapas de processamento realizadas até a identificação e análise dos objetos.	45
Figura 13 - Mapa de localização e situação.	50
Figura 14 - Mapa geológico regional simplificado.	52
Figura 15 - Mapa geológico da área de estudo.	54
Figura 16 - Mapa dos pontos de instalação e varredura com o <i>scanner a laser</i>	57
Figura 17 - Varredura da face da bancada por meio da utilização do <i>laser scanner</i> STONEX X300.	58
Figura 18 - Comparação das reflectâncias em diferentes malhas.	59
Figura 19 – Levantamentos de reflectâncias em faixas restritas nas bancadas de calcário.	60
Figura 20 - Reflectâncias referente a distintas cores do calcário.	61
Figura 21 - Bancada de avanço de lavra representada pela nuvem de pontos de reflectância.	62
Figura 22 - Bancada de avanço de lavra com sua respectiva área.	63
Figura 23 - Recorte das intrusões (estéril) e suas respectivas áreas.	64
Figura 24 - Bancada de avanço de lavra com sua respectiva área.	66
Figura 25 - Intrusões e suas respectivas áreas.	66

Figura 26 - Bancada do “X” com sua respectiva área total.	69
Figura 27 - Intrusões presentes na bancada do “X” e suas respectivas áreas.	70
Figura 28 - Bancada Fontinha com sua respectiva área total.	72
Figura 29 - Intrusões presentes na bancada Fontinha e suas respectivas áreas.	73
Figura 30 - Reflectância por distinção única da bancada do “X”.....	76
Figura 31 - Planilha com os cálculos de análise da diluição da bancada do “X”.....	76
Figura 32 - Reflectância por distinção única da bancada da Fontinha.	77
Figura 33 - Planilha com os cálculos de análise da diluição da bancada da Fontinha.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resolução do <i>scanner a laser</i> e suas implicações.....	33
Tabela 2 - Tonelagem de material carregado da bancada do "X" baseado nas cargas dos caminhões.....	68
Tabela 3 - Tonelagem de material carregado da bancada Fontinha baseado nas cargas dos caminhões.....	72
Tabela 4 - Resultados das diluições calculadas por diferentes métodos.....	80

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	13
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Estado-da-arte	15
1.2 Meta	21
1.3 Objetivos específicos	21
1.4 Metodologia	22
1.5 Organização desta dissertação	22
CAPÍTULO 2	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 Diluição	24
<i>2.1.1 Classificação da diluição</i>	25
2.2 Laser scanner	29
<i>2.2.1 Especificações técnicas do scanner a laser Stonex X300</i>	31
2.3 Reflectância	34
<i>2.3.1 Reflectância em rochas sedimentares</i>	37
<i>2.3.2 Reflectância em rochas metamórficas</i>	40
2.4 Técnicas de imageamento para problemas mineiros	41
CAPÍTULO 3	49
3 APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	49
3.1 Localização e histórico da empresa	49
3.2 Geologia regional	51
3.3 Geologia local	53
CAPÍTULO 4	56
4 AVALIAÇÃO DA DILUIÇÃO POR TÉCNICAS DE IMAGEAMENTO	56
4.1 Obtenção dos resultados	56
4.2 Análise e discussões dos resultados	58

4.2.1 <i>Análise da reflectância na área do estudo</i>	58
4.2.2 <i>Análise da diluição utilizando software Reconstructor®</i>	62
4.2.3 <i>Análise comparativa da diluição obtida através do scanner a laser e do método utilizado pela empresa.</i>	68
4.2.4 <i>Análise dos resultados através de metodologia alternativa de automação do cálculo de diluição</i>	75
CAPÍTULO 5	80
5 CONCLUSÕES	80
5.1 Sumário dos resultados obtidos	80
5.2 Proposta metodológica	81
5.3 Recomendações	82
6 REFERÊNCIAS	84

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Enquanto o desenvolvimento tecnológico tanto de equipamentos quanto de processos avança muito rapidamente, a indústria de mineração como um todo, mas de maneira especial as operações de pequeno e médio porte, não parece conseguir acompanhar esse crescimento, no sentido de aplicar estas tecnologias para otimização do ciclo produtivo ou redução dos custos operacionais. Muitos avanços tecnológicos ocorrem, mas sua aplicação acaba sendo considerada inviável financeiramente, pelo investimento necessário ou por falta de mão-de-obra capacitada, apesar das vantagens a médio e longo prazo que as empresas poderiam conseguir com sua implementação (VAN DER MERWE; ANDERSEN, 2013).

A utilização de instrumentos topográficos é considerada como método antigo de levantamentos de medidas angulares. A técnica utilizada atualmente com medidores eletrônicos de distâncias e direções tornou-se mais eficiente e eficaz com a utilização das estações totais. Com a melhora desses medidores a *laser* tornou-se possível a realização de medidas de distâncias sem a necessidade de refletores, o que permitiu a determinação remota de coordenadas, evitando situações de risco associadas a topografias acidentadas. Com isso, a evolução da tecnologia aplicada a estes equipamentos, desenvolveu a medição programada de pontos, sem a necessidade de um operador e sem expor pessoal a zonas sujeitas à ruptura ou caimento (TOMMASELLI, 2003).

O *Scanner a Laser Terrestre 3D* é um aperfeiçoamento desses equipamentos, que recentemente tornou-se utilizado em levantamento de minas. A abordagem apresentada neste trabalho é inspirada em novos desenvolvimentos na tecnologia de digitalização a *laser*. A informação 3D capturada pelo *scanner a laser* é complementada com dados de imagem digital. Devido à maior resolução, as imagens ópticas oferecem possibilidades complementares no processamento de nuvens de pontos.

As imagens capturadas pelo *scanner a laser* são formadas por pontos de reflectância dos objetos mapeados, ou no caso da mineração pelas rochas. Esses dados capturados fornecem uma distinção entre as diversas litologias presente no campo de visão da varredura executada

pelo equipamento. O tipo de reflectância fornecido pelo *scanner a laser* é demonstrado em forma de porcentagem, ou seja, na variação entre 0 e 1, sendo 1 equivalente a 100%. Esse valor representa o quanto determinado mineral reflete, ou seja, sua capacidade de reflectância, esses valores são interpretados através do *software Reconstructor*[®].

Atualmente, as empresas buscam manter o máximo controle de suas operações. Logo, sabe-se que quanto melhor é o controle e o domínio sobre as atividades desenvolvidas na empresa, menores serão os riscos e erros associados ao controle das operações. Estes erros podem levar a resultados indesejáveis e ao não aproveitamento dos recursos minerais existentes.

A variabilidade geológica é um dos parâmetros que necessita de máximo domínio possível sobre seu comportamento, pois está diretamente relacionada com a lavra do minério. Esta variabilidade geológica afeta a diluição do material de interesse, portanto ela deve ser considerada no planejamento dos avanços de lavra do minério.

Segundo Diakite (1999) a diluição de minério é a adição de rocha residual, material não-minério e o material que está abaixo do teor de corte ao minério durante o processo de lavra. Em outras palavras, a diluição é definida como o material de baixo teor ou estéril, sem nenhum teor que entra em um fluxo de minério, reduzindo seu valor.

A adição de resíduos de rocha diminui o teor de minério e aumenta a tonelagem minerada para uma dada reserva geológica. A diluição é uma fonte de custo direto, pois o estéril é escavado, transportado, cominuído, processado e armazenado como minério. A diluição também é uma fonte de custo indireto, pois o material de diluição pode afetar adversamente as recuperações de metais e o grau do concentrado de minério (ELBROND, 1994), bem como acarretar em um incremento de contaminantes.

Segundo Jara *et al.* (2006), a diluição influencia diretamente na seletividade de uma mina, pois depende do desmonte e do equipamento utilizado na lavra. Assim, também deve-se observar que, principalmente em minas de pequeno e médio porte, as operações ocorrem de acordo com os equipamentos disponíveis e não com os ideais ou ótimos para cada caso. Outro ponto a levar em consideração nessa relação (diluição *vs* seletividade), são os aspectos geológicos, tais como irregularidades nas zonas de contato entre minério e estéril que provêm do comportamento das litologias presentes na mina.

Podemos dizer que a diluição *in situ* do calcário está relacionada com sua formação geológica e, em Bortolotto (1987), o autor coloca que o calcário pode conter impurezas, normalmente de composição silicática que formam bandas entre partes de composição carbonática uniforme, assim como partículas argilosas e silicatos, que assentaram junto com os minerais de calcita e dolomita, assim como algumas intrusões graníticas epigenéticas podem estar presentes no depósito. Esse é um fator preponderante nas jazidas de calcário de Caçapava do Sul. Essa variabilidade geológica presente na jazida pode afetar diretamente na seletividade do material no momento da lavra.

Nesse sentido, o presente trabalho foi proposto buscando estabelecer uma abordagem analítica do uso do *Scanner a Laser Terrestre 3D*, aplicado ao mapeamento dos avanços de lavra em mineração de calcário. O objetivo foi identificar e quantificar a diluição do minério presente nas bancadas, utilizando-se de ferramentas computacionais para interpretação dos dados, tridimensionais e de reflectância, das rochas presentes nas frentes de lavra.

1.1 Estado-da-arte

A minimização da diluição representa uma grande oportunidade para a melhoria da qualidade na mineração. Segundo Scoble e Moss (1994), é importante revisar as características da diluição e ficar atento aos fatores de qualidade relacionados à exploração e ao projeto de mina, pois ambos influenciam diretamente na diluição do minério.

Dagasan *et al.* (2019) realizou um estudo de diluição em depósitos de metais lateríticos e identificou grande variabilidade nos contatos geológicos, dificultando assim na escolha do tipo de lavra a ser utilizado. Neste trabalho, o autor propôs análises e estabeleceu limites aceitáveis dos minérios para implementação da lavra, limites estes que foram analisados de acordo com algoritmos estatísticos de múltiplos pontos.

As perdas e diluições de minério estão presentes em todas as etapas da mineração e, embora vários modelos possam investigar a influência da diluição, é sua quantificação que apresenta o desafio mais sério (PAKALNIS; POULIN; HADJIGEORGIOU, 1996). Visando isso, Ebrahimi (2013) apresentou uma metodologia para quantificar o fator de diluição em minas a céu aberto, propondo uma abordagem com utilização de *softwares* gerais de mineração, disponíveis na maioria das empresas de mineração.

Henning e Mitri (2007) realizaram um estudo sobre a diluição presente em mina subterrânea através de modelagem numérica com objetivo de avaliar os riscos de rompimento de material e analisar os efeitos das tensões *in situ*, bem como a geometria e orientação dos desmontes utilizados nas faces do minério.

Vongpaisal *et al.* (2009) utilizou *softwares* de modelagem 3D para prever a estabilidade do desmonte e a diluição do minério. O estudo faz parte de um projeto de pesquisa, o qual abordou modelamento 3D de falhas e deslocamentos de rochas em ambiente de mineração subterrânea, contribuindo para tomadas de decisões mais econômicas com planejamento e avaliação de um ambiente de trabalho mais seguro.

Saeedi *et al.* (2010) realizou um estudo sobre diluição em mineração *longwall* em mina de carvão em Tabas-Irã. O autor utilizou modelagem numérica bidimensional para análise da diluição, identificando assim, que os principais problemas de diluição encontrados na frente de lavra são provenientes de um teto com baixa resistência, assim ocorrendo deslocamento do material que acaba se misturando com o carvão.

Wang *et al.* (2011) utilizou modelagem 3D para calcular perdas e a diluição do minério de ouro em Yangshuo na província de Liaoning, região nordeste da china. Visando problemas práticos, como a grande carga de trabalho e dados imprecisos do método tradicional de cálculo de perdas e diluições, os autores estabeleceram modelos 3D do ambiente de mineração e conduziram os cálculos entre os modelos para obter os parâmetros de cálculo de perda e diluição. Assim, calculando a taxa de diluição e taxa de perda de minério com mais rapidez e precisão.

Como salientado anteriormente, a quantificação da diluição não é um processo trivial e, muitas vezes, a dificuldade geralmente ocorre na separação do estéril presente no minério, o qual está sendo diluído. Todavia, Butcher (2000) relata que a diluição pode ser controlada em certos patamares aceitáveis, através da implementação de técnicas e princípios de engenharia de minas mais adequados aos processos de lavra e beneficiamento de minério.

O *Scanner a Laser Terrestre 3D* possui uma ampla utilização e pode abranger diversos setores em diferentes indústrias. Como mencionado por Wutke (2006), a utilização é aplicável na engenharia industrial e na engenharia civil, com levantamentos de infraestruturas civis, arquitetura e projetos de interiores. Com um olhar voltado para a mineração, Rocha (2002) menciona que o equipamento permite realizar varreduras nas cavas de minas a céu aberto

através de levantamentos topográficos, possibilitando auxílio no controle do ângulo de talude, cubagens de material desmontado e levantamentos de estruturas geológicas, como dobras e falhas.

Segundo Gerry (2016), o uso do *scanner a laser* vai depender de como é a área que se deseja obter resultado, classificando o uso de diferentes equipamentos para diferentes áreas, sugerindo o uso de drones para pequenas áreas e centros urbanos, para grandes áreas em locais remotos o uso do levantamento por *PhotoSat* (Imagens de satélite), e para levantamentos de solo em áreas abertas e com regiões de cobertura o uso do *scanner a laser* com tecnologias LIDAR (*Light Detection and Ranging*), assim como em ambiente de mineração.

Nos últimos anos, vários pesquisadores, dentre eles Dold e Brenner (2006) e Wendt (2004) relataram investigações no uso dos *scanners* combinados com sensores de imagens. Os autores relatam que a informação 3D capturada pelo instrumento do *scanner a laser* é complementada com dados de imagem digital. Assim, devido à maior resolução, as imagens ópticas oferecem possibilidades complementares no processamento das nuvens de pontos.

Com uma aplicação diferente, Kretschmer (2004) utilizou sensores de imagens fotorealista no mapeamento do tráfego de veículos, enquanto Haala (2004) utilizou a correspondência de imagens e mapeamento de texturas para reconhecimento de espécies de árvores.

A tecnologia LIDAR presente no *scanner a laser* terrestre vem sendo utilizada desde 1995 para realização de trabalhos na área de estratigrafia de maneira qualitativa e quantitativa. Os trabalhos de Read *et al.* (1995) e Kerans e Tinker (1997) são exemplos de aplicação dessa tecnologia no âmbito da caracterização geológico-estratigráfica.

Read *et al.* (1995) examina como os ciclos de carbonato são gerados em plataformas de carbonato, tipos de ciclos de carbonato desenvolvidos, padrões de empilhamento, geometrias de margem, desenvolvimento de grau de desconformidade e padrões de empilhamento unidimensional e bidimensional, utilizando-se de estratigrafia de alta resolução e geometria do reservatório em plataformas Permianas posteriores, na Bacia Permiana do oeste do Texas.

Segundo Kerans e Tinker (1997), a estratigrafia de sequência e a caracterização de litologias torna-se fundamental na descrição geológica nas regiões petrolíferas e, devido à esmagadora massa de informações, a pesquisa sequencial-estratigráfica e de caracterização,

necessita de máxima precisão nos levantamentos e análise dos dados, necessitando concomitantemente de análises em alguns tópicos como petrofísica, geoestatística e geofísica.

Maas (2001) utilizou um helicóptero com um *laser scanner* aéreo integrado a um GPS com precisão de 1 até 2 decímetros, com objetivo de realizar mapeamento planialtimétrico do solo e propor correções de variabilidade de dados, principalmente altimétricos, entre o GPS e o *scanner*. Assim como Kilian, Haala e English (1996) realizaram um trabalho similar, envolvendo captura e avaliação de dados do *scanner a laser* aéreo com utilização de GPS de alta precisão.

O *scanner a laser* terrestre possibilita fazer varreduras de maneira a coletar e gerar informações rápidas e precisas, diminuindo consequentemente o tempo de resposta de levantamentos em inúmeras áreas como mencionado por WUTKE (2006):

- i. levantamentos topográficos em diversas condições de terrenos;
- ii. aplicabilidade na geologia, inclusive na mineração;
- iii. engenharia civil, com levantamentos de infraestruturas civis;
- iv. engenharia industrial;
- v. arquitetura e projeto de interiores;
- vi. modelagem aeronáutica, de veículos, embarcações e grandes objetos em geral.

Franceschi (2009) realizou um trabalho sobre reconhecimento de rochas sedimentares simples, constituídas principalmente por calcário, usando dados de reflectância do *scanner a laser* terrestre. Os resultados indicaram informações confiáveis sobre o teor de argila das rochas em condições de afloramento.

Como mencionado anteriormente, o *scanner a laser* também é utilizado em ambiente de mineração, podendo citar como exemplo Rocha (2002), que menciona que o levantamento topográfico em mineração com o uso do *scanner a laser* terrestre 3D possui vantagens em relação a outros sistemas de medidas topográficas, pois possibilita um maior rendimento, maior velocidade, precisão e segurança, visto que permite capturar informações topográficas em lugares inacessíveis como tetos e galerias irregulares de minas. Ele também menciona outras aplicabilidades do equipamento em ambiente de mineração, que estão descritos a seguir:

- i. auxilia no controle do ângulo de talude;
- ii. permite a cubagem de pilhas pulmão e depósitos de estéreis;

- iii. facilita o levantamento de estruturas geológicas como falhas e dobras;
- iv. realiza monitoramento de cavidades, erosões e deslizamentos;
- v. possibilita o levantamento de volumes de caçambas e conchas dos equipamentos.

Muitas empresas de mineração estão descobrindo que os *scanners a laser* terrestres fornecem um método de levantamento e monitoramento de minas que podem ajudar a aumentar a produtividade e melhorar a competitividade no mercado. Conforti (2017) utilizou dois tipos de *scanners a laser* terrestres na mineração, um *scanner laser* estático e um móvel, para comparar resultados de testes de campo em diferentes aplicações na mineração, incluindo estimativas de volumes, com o objetivo de obter o nível mais alto de precisão e a melhor cobertura de áreas inacessíveis. Ele utilizou-se de nuvens de pontos geradas e do georreferenciamento desses pontos, assim como mapas de declives e mapas de superfícies de deslocamentos em seus resultados e discussões.

Kukutsch (2015) utilizou o *scanner a laser* com objetivo de digitalização 3D em mina subterrânea de carvão para monitorar a deformação de galerias. A partir dos resultados da digitalização 3D realizada, foi possível definir e quantificar com precisão a área da galeria, controlando assim as possíveis movimentações das rochas e monitorando a deformação dos suportes de aço em formato de arco, utilizados como medida de contenção nas galerias.

Zhou (2014) desenvolveu um trabalho em uma área de mineração de carvão na China, de maneira a realizar um modelo de elevação digital da superfície do solo acima da área da mineração, utilizando dados da nuvem de pontos de um *scanner a laser* terrestre. Os resultados mostraram que as galerias apresentam um nível relativamente alto de estabilidade, e que a superfície de mineração estabelecida antes dos processos de lavra e a bacia de subsidência monitorada pós-processos podem fornecer os dados fundamentais para a reconstrução do ambiente ecológico daquela área. Enquanto Fengyun (2013) utilizou o *scanner a laser* em ambiente de mineração para elaborar uma reconstrução 3D da cava a céu aberto, monitorando a deformação dos taludes, deslizamentos de terra e auxiliando na recuperação de áreas lavradas.

Ratcliffe e Myers (2006) analisaram o uso do *scanner a laser* em mineração, destacando as principais vantagens com seu uso nesse meio, dentre elas podemos citar a facilidade de manuseio, pois o mesmo é montado e em instantes está pronto para o uso sem necessidade de calibração no local, outro aspecto relatado pelos autores é que faces, falhas e outras estruturas

geológicas não demandam marcação com tinta ou refletores, tornando assim o processo mais ágil e seguro na hora de executar os monitoramento das bancadas.

Tong *et al.* (2015) realizou uma análise comparativa envolvendo uso do *scanner a laser* terrestre com monitoramentos realizados através de aerofotogrametria, com aplicação em três áreas de minas a céu aberto no sudoeste da China, com varreduras que capturaram imagens através da aerofotogrametria e com a aquisição de nuvem de pontos capturado pelo *scanner a laser*, ambos em formato tridimensional, mapeamento e monitorando áreas de mina a céu aberto. Os resultados experimentais mostraram que, com a introdução da nuvem de pontos gerada pelo *scanner* obteve-se uma maior precisão do posicionamento geográfico das imagens de aerofotogrametria. Outra vantagem é o uso do *scanner a laser* em áreas montanhosas ou de alto risco, apresentando precisão na casa dos decímetros para os modelos de superfície digital e uma precisão de 90,67% para a classificação de cobertura em mina a céu aberto.

Little (2006) utilizou o *scanner a laser* juntamente com outras técnicas para monitorar a estabilidade de taludes em cava a céu aberto na mineração da empresa Potgietersrust Platinum Ltd. A grande preocupação era uma falha geológica presente em parte da região da cava a céu aberto, por isso a utilização do *scanner a laser* no monitoramento dessa região durou mais de três anos, assim permitindo que os trabalhos realizados na cava pudessem continuar com segurança e evitando gastos desnecessários.

Van der Merwe e Andersen (2013) realizaram um estudo com um *scanner a laser 3D* em mineração subterrânea, com objetivo de analisar a aplicação e os benefícios do uso dessa tecnologia em ambiente de mineração. Os autores relataram que o uso da técnica no subsolo pode ser comparado ao “*Google Maps*”, apresentando assim um mundo virtual do subsolo, podendo ser percorrido com relativa facilidade e reduzindo visitas desnecessárias ao local de trabalho, economizando inúmeras horas de trabalho e ainda oferecendo trabalho de precisão com economias significativas em tempo de inatividade, paradas e exposição a incidentes de segurança.

Com olhar mais voltado para o uso de técnicas de imageamento na solução de problemas mineiros, Silva e Da Luz (2009) realizaram um trabalho sobre metodologia para a determinação do teor aparente de minérios usando análise de imagens digitais. Utilizando-se de três diferentes algoritmos computacionais para detectar e quantificar características em amostras de esmeralda, manganês e itabirito. Após o uso da técnica de imageamento utilizada, os autores realizaram

uma análise estatística das amostras, avaliando o tamanho e quantificação dos grãos minerais e de seus teores. Seus resultados apontaram valores condizentes com análises químicas realizadas no mesmo material, porém de forma mais rápida e com menor custo.

Gomes e Paciornik (2013) utilizaram como técnica de imageamento a microscopia eletrônica de varredura e a microscopia óptica de luz refletida para poder identificar e discriminar minérios de ferro (hematita e magnetita), quartzo e resina epóxi. A metodologia utilizada pelos autores emprega uma rotina automática baseada em técnicas de análise de imagens e reconhecimento de padrões. Como resultado, a quantificação mineralógica obtida através das análises de imagens correspondeu com os resultados obtidos pela técnica de *Rietveld*.

1.2 Meta

Diante dos aspectos mencionados anteriormente no estado-da-arte, esta dissertação tem como meta apresentar uma metodologia de análise da diluição com utilização do *scanner a laser* terrestre e do *software Reconstructor*[®], incorporando valores de reflectância das diferentes litologias das bancadas em mineração de calcário, de maneira a separar visualmente o minério do estéril.

1.3 Objetivos específicos

Buscando atingir a meta proposta, esta dissertação contempla desde os estudos iniciais de implementação do uso do *scanner a laser* em ambiente de mineração até a análise dos resultados obtidos pelas varreduras realizadas, conforme os seguintes objetivos específicos:

- i. verificar o emprego da reflectância como parâmetro de medição da diluição das bancadas;
- ii. analisar a diluição das bancadas através do *software Reconstructor*[®];
- iii. apresentar uma metodologia alternativa para automação do cálculo da diluição para diferentes bancadas em mineração de calcário;
- iv. realizar uma análise comparativa entre os métodos de cálculos de diluição abordados pela empresa e a proposta apresentada neste trabalho.

1.4 Metodologia

Perante os objetivos propostos, a metodologia envolveu aspectos de implementação da análise da diluição presentes nas bancadas em mina a céu aberto, através do uso do *scanner a laser* terrestre, assim como a utilização do *software* para processamento e interpretação dos dados coletados e posteriormente uma metodologia alternativa para análise da diluição.

As etapas desenvolvidas, que não necessariamente seguiram uma ordem fixa e contínua, devido a imprevistos ao longo do trabalho, estão descritas a seguir:

- i. identificação de bancadas para implementação da análise da diluição;
- ii. monitoramento de bancadas através do *scanner a laser*;
- iii. processamento dos dados coletados através do *software Reconstructor*[®];
- iv. elaboração de metodologia para análise da diluição presente em cada bancada monitorada;
- v. elaboração de método alternativo para identificação da diluição através da reflectância dos pontos tridimensionais;
- vi. comparação e análise dos diferentes métodos apresentados para o cálculo da diluição;
- vii. conclusões crítico-reflexivas a respeito das metodologias utilizadas visando a estimativa da diluição.

1.5 Organização desta dissertação

No capítulo 1 são contextualizados os assuntos abordados, possibilitando uma ideia dos pontos mais relevantes que serão tratados nos próximos capítulos. São mencionados os trabalhos desenvolvidos voltados ao uso do *scanner* e suas aplicações, bem como apresentados a meta e os objetivos específicos desta dissertação, assim como a metodologia utilizada.

O capítulo 2 traz conceitos teóricos sobre os aspectos de extrema relevância para o desenvolvimento desta dissertação, assim como um aprofundamento nos temas correlacionados para produção dos resultados e uma complementação das informações fornecidas no estado-da-arte.

No capítulo 3 é apresentado o local onde foi desenvolvido o projeto, o contexto e histórico da empresa, bem como os aspectos geológicos do estudo de caso abordado neste trabalho, que foi peça fundamental nos levantamentos de dados com o *scanner a laser* terrestre.

O capítulo 4 dá sequência ao desenvolvimento do trabalho, trazendo os resultados obtidos com os monitoramentos realizados com o *scanner*, proporcionando dados informacionais e interpretativos para o cálculo da diluição presente nas bancadas analisadas. Concomitantemente, são apresentados os métodos utilizados para os cálculos e análises da diluição.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões desta dissertação, baseado nos trabalhos realizados e nos resultados obtidos. Apresentando assim, uma conclusão reflexiva a respeito do uso do *scanner a laser* e os métodos trabalhados.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são revisados os conceitos teóricos sobre os aspectos mais relevantes para o desenvolvimento desta dissertação, assim como um aprofundamento sobre a diluição e seus impactos na mineração, utilizando o *scanner a laser* como ferramenta de mapeamento da diluição presente na mina. Assim como a contextualização da diluição em avanços de lavra e a reflectância obtida dos materiais por meio do *scanner*.

2.1 Diluição

Sinclair e Blackwell (2004) afirmam que a diluição é o resultado da mistura de material não-minério com material de minério durante a exploração, geralmente levando a um aumento na tonelagem e uma diminuição do teor médio em relação às expectativas originais.

Da mesma forma, Jara (2006) coloca que a diluição se refere ao material residual (estéril) que não é separado do minério durante a operação e é extraído com minério. Este estéril é misturado com o minério e enviado para a planta de processamento. A diluição aumenta a tonelagem de minério enquanto diminui seu teor. Ainda, o autor coloca que a diluição pode ser definida como a razão entre a tonelagem de estéril enviados para a usina de beneficiamento e a tonelagem total de minérios e estéril combinados que são beneficiados.

Este entendimento, pode ser aplicado na cava a céu aberto, em material *in situ*, ou seja, a diluição de uma bancada lavrada é igual à razão entre as tonelagens das intrusões presentes na bancada (estéril) e a tonelagem total de material desmontado naquele avanço de lavra. Geralmente, a diluição (d_i) é expressa em formato percentual e deve-se levar em consideração a densidade (ρ) do material, tanto para o minério (ρ_m) quanto para o estéril (ρ_e), como mostrado na equação a seguir:

$$d_i = \left(\frac{\text{volume de estéril} \times \rho_e}{(\text{volume minério} \times \rho_m) + (\text{volume estéril} \times \rho_e)} \right) \times 100$$

Por exemplo, se 10 toneladas de estéril (ou minério abaixo do teor de corte) forem mineradas com 90 toneladas de minério, ao todo teremos 100 toneladas enviadas para o

beneficiamento, a diluição resultará em 10%. De acordo com essa definição, d_i (no caso os 10%) em uma mina, podemos sugerir como exemplo que esse valor não é economicamente rentável para ser processada para um determinado tipo de minério. Este montante d_i (10%) não deve ser enviado para o beneficiamento e ações adequadas devem ser tomadas na mina, para separá-las da alimentação no britador, tanto quanto possível.

A configuração geométrica de um corpo mineral e seu grau de distribuição espacial desempenham um papel fundamental durante a seleção do método de lavra e conseqüentemente, influencia na quantidade de diluição experimentada durante as operações. A configuração geométrica do corpo é relacionada à forma, tamanho e continuidade de um depósito, enquanto o grau de distribuição define o valor potencial do depósito (VILLAESCUSA, 1998).

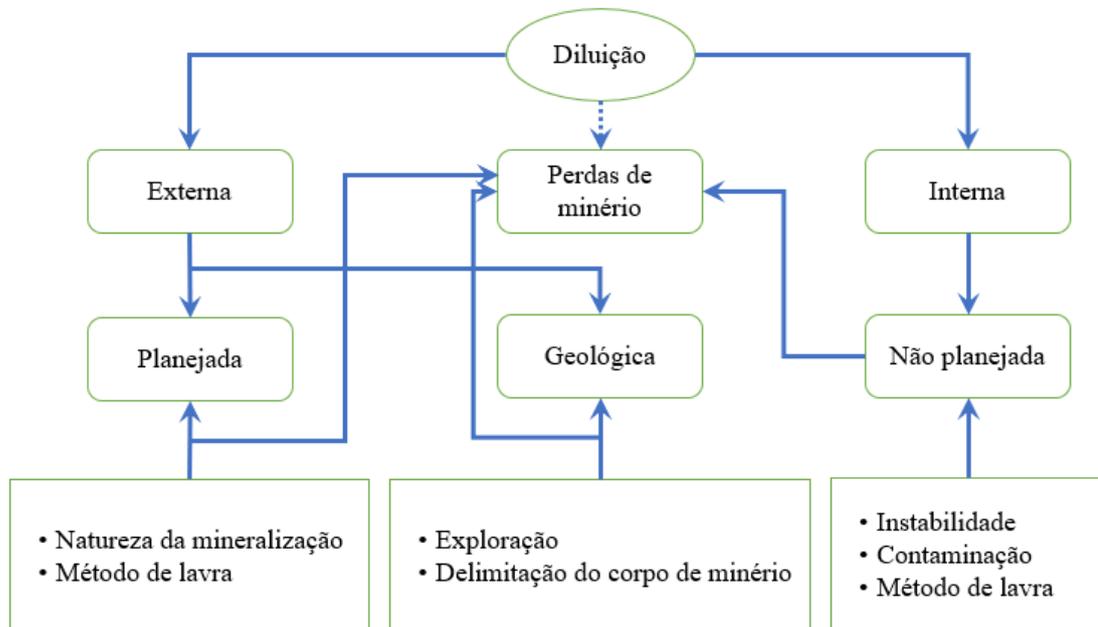
Segundo Câmara (2013), a diluição presente nos processos de lavra pode ser compreendida como a perda e/ou ganho de minério durante a lavra devido à baixa seletividade ou processos operacionais inadequados. A seguir são apresentados alguns dos fatores mais importantes que geram diluição:

- i. natureza dos contatos e limites do minério;
- ii. zonas de limite de cava;
- iii. tamanho e posição de bloco;
- iv. densidade amostral;
- v. complexidade geológica;
- vi. seletividade da lavra, tamanho de equipamento;
- vii. método de lavra e tipo de desmonte de rocha.

Classificação da diluição

Segundo Villaescusa (1998), a diluição pode ser dividida em três categorias: diluição interna, diluição externa e perdas de minérios, como demonstrado na Figura 1. A diluição interna geralmente se refere ao material de baixo teor contido dentro do material lavrado, já a diluição externa é função do método de lavra escolhido, bem como da irregularidade do contato da rocha minério com o estéril, e perdas de minério é o material econômico que deixa de ser minerado devido a condições de lavra e operação.

Figura 1 - Classificação da diluição.



Fonte: Modificado de Villaescusa (1998).

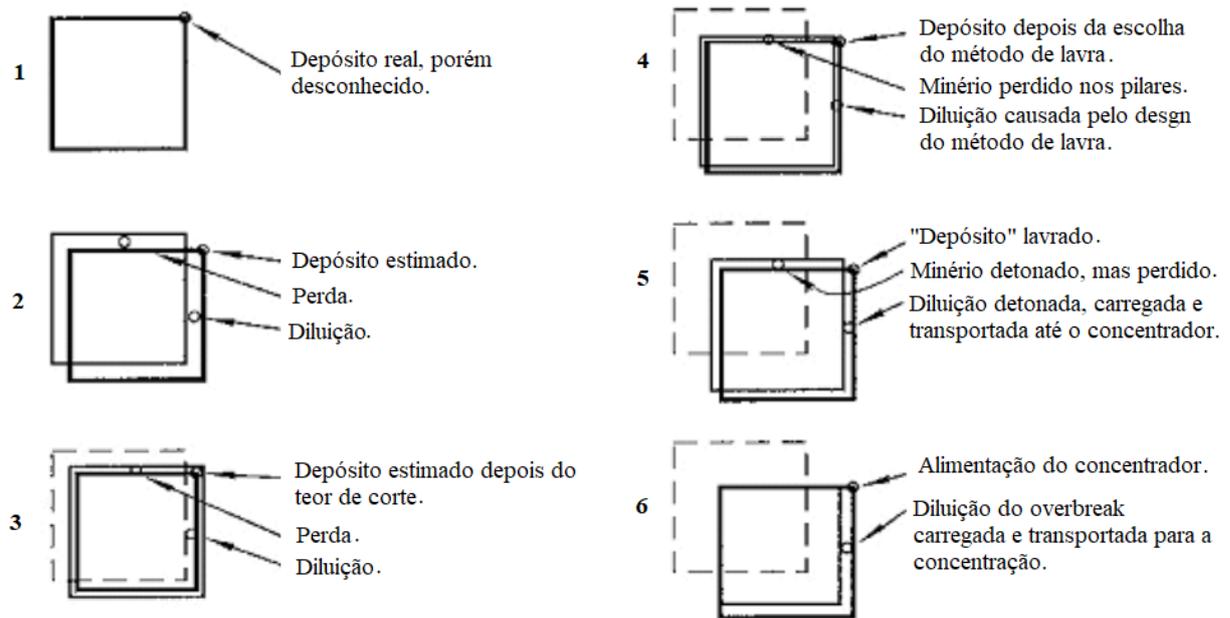
De acordo com a Figura 1, são descritos abaixo cada um dos tipos de diluição considerados pelo autor, são eles:

- i. perdas de minério: refere-se ao material econômico que é deixado no lugar em que está, devido as condições de operação ou lavra. O acúmulo de material na praça de trabalho devido à baixa fragmentação e porções não recuperáveis deixadas para manter a estabilidade de taludes, são exemplos típicos de perdas de minério;
- ii. diluição interna: geralmente refere-se ao material de baixa qualidade contido dentro dos limites da lavra do minério. Isto pode ser causado por uma definição incorreta dos contatos entre estéril e minério. Também ocorre em situações em que o método de lavra não consegue determinar uma separação precisa entre estéril e minério. Este tipo de diluição é o que possui o maior impacto nos avanços de lavra da área de estudo deste trabalho.
- iii. diluição externa: refere-se ao estéril que entra no fluxo do minério a partir de fontes situadas fora dos limites planejados da lavra. Material de baixo teor pode contaminar a bancada ou desmonte próximo a ele, assim como a contaminação a partir de aterro, são exemplos típicos de diluição externa.

A diluição geológica refere-se às perdas de rocha ou minério usadas durante as fases de exploração e delineação, onde apenas o modelo estimado do corpo pode ser feito. O modelo geológico é baseado em informações limitadas e é improvável que coincida exatamente com o

corpo real, portanto, os limites delineados do corpo provavelmente excluem o minério e incluem o estéril, como exemplificado na Figura 2. A magnitude deste problema é em função do padrão de amostragem para o tipo de mineralização em estudo. A diluição geológica pode compreender até 1/3 da diluição total dependendo da complexidade geológica original (LAPPALAINEN; PITKAJARVI, 1996).

Figura 2 - Sequência das perdas e diluição.



Fonte: Modificado de Elbrond (1994).

A Figura 2 é uma representação conceitual da diluição de minério nos vários estágios de mineração, mostrando a sequência da diluição nas diferentes fases de um projeto. Apesar de retratar um método de lavra subterrâneo, é facilmente aplicável ao método de lavra a céu aberto, pois a diluição também está presente em diversas etapas operacionais e de produção que utilizam esse método. Observe que em cada um dos estágios apresentados, algum minério é perdido e alguns resíduos são incluídos no minério. O exemplo apresentado mostra que a diluição e as perdas de minério são significativas, podendo acarretar efeitos consideráveis nos resultados econômicos durante as operações de mina.

Outra classificação relevante da diluição é apresentada por Sinclair e Blackwell (2004), os quais mencionam que se deve considerar a diluição em duas categorias: interna (material de baixa qualidade cercado por material de alta qualidade) e externa (material de baixa qualidade nas margens do material de alta qualidade). A diluição interna pode subdividida em:

- i. corpos geométricos bem definidos: é uma diluição interna geométrica resultante da presença de resíduos bem definidos dentro dos corpos em uma zona de minério;
- ii. diluição inerente: é a diluição interna resultante da diminuição da seletividade que acompanha um aumento no tamanho do bloco, usado como base para discriminar minério de estéril, mesmo quando o estéril não está presente no material.

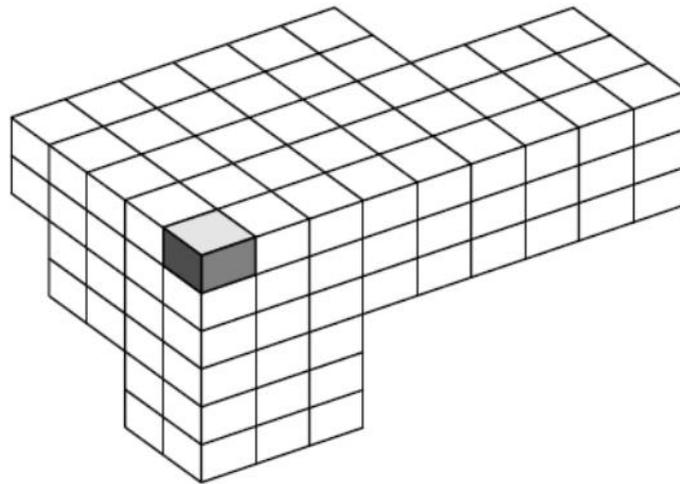
A diluição externa é o resultado da fragmentação da face da bancada nas margens de uma zona de minério. Essa diluição é geralmente significativa nos casos em que os taludes são fisicamente difíceis de manter por causa das propriedades das rochas ou onde as larguras do minério são inferiores ao mínimo da largura dos acessos na mineração.

Outro fator a ser analisado na diluição externa é o tamanho e a posição do bloco a ser minerado, pois está diretamente relacionado com os avanços de lavra que incluirão blocos subsequentes a este. Logo, a diluição é influenciada por cada um dos blocos contíguos ao bloco original. A diluição pode ocorrer devido o contato entre os blocos, quando o bloco a ser minerado estiver em contato com blocos que sejam de baixo teor ou não sejam minérios. O processo de lavra dificilmente conseguirá selecionar somente o bloco desejado sem algum vestígio dos blocos adjacentes, sendo assim de fundamental importância que o operador tenha conhecimento e controle de posicionamento do equipamento selecionado para a extração, garantindo assim o mínimo de erro possível (CÂMARA e PERONI, 2016).

Segundo Câmara (2018) a diluição e a perda de minério são fatores importantes que podem afetar os custos e a lucratividade de uma operação de mineração, diminuindo a quantidade de mineral ou metal que pode ser produzido a partir de cada tonelada de minério processado. Ao discutir a mineração a céu aberto, diluição e perda de minério são algumas vezes assumidos como fatores fixos em modelos de blocos geoestatísticos e cálculos de teores de corte, sem considerar particularidades específicas do depósito e operação. Contudo, a diluição operacional pode ser medida e controlada para melhorar a relação de tonelagem e teor entre planejamento e produção.

Sinclair e Blackwell (2004) descrevem sobre a relação dos blocos com a unidade seletiva de lavra (Figura 3), a qual visa o menor volume de teor médio que pode ser estimado por bloco, assim pode ser feita uma melhor distinção entre minério e estéril.

Figura 3 - Matriz tridimensional de blocos projetados para aproximar a geometria de um depósito mineral.



Fonte: Sinclair e Blackwell (2004).

Na Figura 3 é apresentado um bloco em relação ao seu conjunto de blocos estimados. O planejamento do tamanho do bloco é geralmente determinado pelas restrições associadas ao método de lavra a ser utilizado na operação. Alguns fatores como o espaçamento da malha do desmonte, altura da bancada e tipos de equipamentos a serem utilizados na extração do minério, devem ter uma atenção redobrada no processo de escolha de uma unidade seletiva de lavra.

Segundo Leuangthong, Neufeld e Deutsch (2003) uma boa escolha do tamanho de uma unidade seletiva de lavra pode ser obtida através de simulação condicional para gerar múltiplas realizações de teores. A proposta metodológica consiste em elaborar diferentes tamanhos de blocos de unidade seletiva de lavra e comparar com os teores e tonelagens obtidos após vários processos de tamanhos diferentes de blocos. Assim, comparando esses modelos gerados com a realidade das práticas tradicionais de controle de teores, fornecerá um tamanho de bloco de unidade seletiva de lavra mais apropriado à realidade do depósito mineral. Buscando sempre uma estimativa mais correta de massas de minério com o teor correto deste material.

2.2 Laser scanner

Nos últimos anos houve uma crescente utilização do *scanner a laser* terrestre em diversas áreas, sendo utilizado principalmente na documentação gráfica e métrica de objetos variados. O uso dessa técnica de monitoramento é consideravelmente aceito pelas empresas, pois utiliza-se de maneiras não-invasiva e não-destrutiva, assim não necessitando de contato direto com o material. O *scanner a laser* terrestre é considerado um equipamento de sensoriamento remoto,

pois consegue captar uma grande quantidade de dados com alta taxa de aquisição de uma superfície observada e, de certa forma, com grande precisão (BELLIAN *et al.*, 2005).

Segundo Tommaselli (2003), os sistemas de *scanner a laser* possuem maior velocidade de coleta e recursos de automação mais avançados do que seus antecessores, as estações totais robotizadas. O processo de varredura utilizado pelo *scanner* envolve espelhos controlados e feixe de luz *laser*, e o resultado desse processo é um conjunto de dados que correspondem aos pontos medidos na superfície do objeto. Esses resultados são demonstrados em forma de coordenadas tridimensionais, assim como também é medida nesta captura, a intensidade do sinal de retorno do feixe de luz *laser* e posteriormente armazenada na memória do equipamento. A concentração desses pontos tridimensionais denomina-se nuvem de pontos e é a sua imagem representativa que determina a distância entre os pontos coletados. A distância de coleta pode ser configurada anteriormente à varredura do *scanner a laser*, e sua configuração vai depender do tamanho do elemento que se deseja medir e da distância para o objeto que contém este elemento.

O *laser scanner* terrestre 3D possui capacidade de varreduras de pontos de interesse em um curto período, assegurando levantamentos planialtimétricos com alta qualidade e alto nível de detalhe, registrando informações digitais, possibilitando demonstrar modelos com extrema fidelidade e precisão a área a ser levantada, além de não ser necessária a utilização de alvos refletores para mapeamento dos pontos de interesse.

O mapeamento realizado pode ser georreferenciado a um sistema de coordenadas, através dos pontos mapeados tridimensionalmente (x, y, z). Utilizando-se dessa nuvem de pontos, podem ser geradas superfícies tridimensionais, curvas de nível, executar cálculos de volume e modelar estruturas. O *scanner laser* permite a realização de levantamento em áreas com geometria complexa, congestionadas ou de difícil acesso, típicas de cavas de minas a céu aberto ou galerias subterrâneas e que, associada às outras técnicas convencionais, garante a execução de trabalhos com alta qualidade, rapidez e precisão.

O *scanner a laser* terrestre 3D é montado em um tripé ou em veículos e pode digitalizar a paisagem em torno da sua localização, a varredura com o *scanner a laser* terrestre 3D captura dados espaciais pelo uso de luz *laser*. A forma, a posição e o espaço das localizações dos objetos são registrados por milhões de pontos, cada um com latitude, longitude e coordenadas de elevação (x, y, z). O modelo 3D Mine Surveying International de *scanner a laser* utilizado pelo

autor possibilita uma varredura de alta velocidade, com um campo de visão de 360° em torno do eixo horizontal e 270° em torno do eixo vertical. O *scanner a laser* é capaz de verificar qualquer estrutura dentro do campo de visão e criar um conjunto de dados completo sob a forma de uma nuvem de pontos 3D constituída por milhões de pontos de dados (VAN DER MERWE; ANDERSEN, 2013).

Os sistemas a *laser scanner* 3D possibilita a construção de modelos em três dimensões, com a utilização de *software* de modelagem 3D é possível analisar a nuvem de pontos gerada na varredura dos objetos e visualizar estruturas complexas com grande velocidade, precisão e segurança. O objeto escaneado e visualizado após o tratamento da nuvem de pontos, pode ser modelado e posteriormente ser exportado para um sistema CAD, por exemplo.

Segundo Barchik *et al.* (2007), a aplicação do *scanner a laser* terrestre 3D traz benefícios rápidos e incomparáveis quando confrontadas as técnicas tradicionais, visto que estas estão baseadas no uso de estações totais que podem apenas determinar dados pontuais. O uso do *scanner a laser* terrestre 3D vem ganhando destaque devido à grande demanda de serviços e incessante busca do homem pela agilidade e rapidez na realização destes.

Especificações técnicas do scanner a laser Stonex X300

STONEX® é o fabricante do sistema de digitalização a *laser* 3D STONEX X300. A digitalização a *laser* é um processo automático durante o qual objetos reais são pesquisados e amostrados quase completamente para determinar sua localização, tamanho, orientação e forma. O STONEX X300 determina rapidamente os resultados das medições de alta resolução em muito pouco tempo e dentro de um campo de visão de 360° na horizontal e 90° na vertical (-25° a + 65°), porém quando utilizado junto ao suporte X300 *Framework offset* pode-se alcançar um ângulo vertical de até 240°, utilizando um *laser* com comprimento de onda de 905 nanômetros (invisível), apresentando uma reflectância de 100% no branco até uma distância de 300 metros, podendo ser utilizado tanto durante o dia como à noite, pois a reflectância medida pelo equipamento é uma resposta do *laser* emitido pelo equipamento em uma determinada superfície monitorada. Estão incluídos os seguintes componentes: (i) *scanner a laser* STONEX X300; (ii) duas baterias; (iii) um carregador de bateria; (iv) um tripé e; (v) uma mala de transporte (STONEX SRL, 2015). Na Figura 4 abaixo, são apresentados todos os componentes externos do *scanner a laser* STONEX X300.

Figura 4 - Descrição dos componentes do *scanner* X300.



Fonte: Adaptado de STONEX SRL (2015).

O equipamento possui suporte a GPS RTK, o qual possui grande precisão de localização, na casa dos centímetros. Dentre outras funcionalidades, podemos destacar o suporte ao USB, assim podendo ser conectado *pen drive* diretamente no equipamento para armazenamento dos dados dos monitoramentos realizados. Durante a varredura, a janela do *laser* e as câmeras (5 Mpx) são as principais fontes de coleta de dados sobre os pontos dos objetos monitorados.

Após a montagem do equipamento em um tripé, o mesmo deve ser nivelado e, assim que concluído o nivelamento, o equipamento estará pronto para o uso. Para acessar o sistema de configurações e armazenamento do *scanner* é necessário um computador ou até mesmo um celular com rede *wi-fi*, pois o *scanner a laser* STONEX X300 possui um sistema de rede independente, o qual pode ser localizado por outros aparelhos, assim possibilitando a configuração do equipamento e o início das atividades de varredura. Na Figura 5 são

apresentadas todas as configurações prévias à varredura com o *scanner*. Podemos renomear o arquivo que será armazenado após concluído o processo, escolher o ângulo de varredura e a opção para que o equipamento faça capturas fotográficas da área monitorada. Também é possível escolher a densidade de captura de pontos da varredura: (i) fina (malha densa de pontos), (ii) padrão (malha comum de pontos) ou (iii) rápida (malha de pontos esparsa).

Figura 5 - Opções de configurações da varredura.

1. Nome da varredura
2. Modo de digitalização
3. Ângulo horizontal
4. Fotos
5. Câmera
6. Informações
7. Iniciar

Fonte: Adaptado de STONEX SRL (2015).

Na Tabela 1 são apresentados mais detalhes a respeito dos tipos de varredura e sua influência na quantidade de pontos amostrados e no tempo de varredura.

Tabela 1 - Resolução do *scanner a laser* e suas implicações.

Resolução	Total de pontos (360°H/90°V)	Espaçamento do Grid	Tempo
Fina	64000000	3,9 cm x 3,9 cm	1 h 6m 40s
Padrão	16000000	7,8 cm x 7,8 cm	0h 16m 40s
Rápida	4000000	15,7 cm x 15,7 cm	0h 4m 10s

Fonte: Modificado de STONEX SRL (2015).

Ao escolhermos o tipo de varredura a ser realizado, devemos ficar atentos ao tempo de monitoramento desejado e à densidade dos pontos que serão coletados. Podemos observar na Tabela 1 que a resolução fina apresenta a maior captura de pontos, conseqüentemente um tempo maior de varredura também será necessário, assim como o tamanho do arquivo também será maior na resolução com mais pontos captados. O ângulo de visada também influenciará na quantidade de pontos coletados, no tempo de varredura e no tamanho do arquivo armazenado na memória.

2.3 Reflectância

Segundo Meneses, Almeida e Baptista (2019), a radiação emitida pelos minerais consiste na propagação de energia de um ponto a outro, no espaço ou em um meio natural, a certa velocidade. Em sensoriamento remoto, a radiação eletromagnética é utilizada para registrar as imagens dos objetos, por meio de sensores remotos. Radiação eletromagnética é definida como a oscilação dos campos elétrico e magnético segundo um padrão harmônico de ondas, propagando-se pelo espaço vazio, na velocidade da luz de maneira espaçada repetitivamente no tempo, assim podendo ser possível a identificação da reflectância presente nesses minerais.

O conceito de reflectância é utilizado sempre que imagens são utilizadas para identificar espectralmente os materiais terrestres, como vegetação, solos ou até mesmo rochas. Essa identificação é realizada por equipamento de sensoriamento remoto, pela medição da troca de energia resultante da interação da energia contida na radiação eletromagnética de uma onda com a energia quântica contida nos átomos e moléculas que formam a matéria (MENESES; MADEIRA, 2001).

As trocas de energias eletromagnética e quântica resultam em valores de reflectância, absorvância e transmitância por comprimento de onda. Materiais sólidos como solos, rochas e vegetação não apresentam valores de transmitância nem absorvância, devido às características físicas e químicas dos materiais. Portanto, a medida realizada pelos sensores é referente à componente de radiação eletromagnética refletida, ou seja, a reflectância do objeto. Por exemplo, identificar que um determinado material possui 25% de reflectância num discreto comprimento de onda, significa dizer que este material possui 75% de absorvância, neste caso para materiais que possuem capacidade de identificação de absorvância e reflectância concomitantemente. Contudo, é importante salientar que a reflectância também depende das

propriedades espectrais do objeto, tais como a estrutura e textura de sua superfície (MENESES; ALMEIDA; BAPTISTA, 2019).

Segundo Pedrosa (2010), a reflectância é medida em porcentagem, resultado de tomada sobre o alvo, onde o comportamento espectral de diferentes tipos de rochas está associado às suas composições mineralógicas e propriedades ópticas do material envolvendo refração, reflexão e espalhamento conforme sejam as características da superfície do material. Cada rocha tem uma reflectância distinta, o que permite diferenciá-las nas imagens de mapeamento através dos pontos reflexivos, contudo o valor espectral medido quase sempre corresponde a uma mistura de radiância de materiais distintos, devido à sobreposição de materiais como solo, rochas e vegetação, assim dificultando a identificação desses materiais. Contudo, nas áreas de mineração a céu aberto, onde não há vegetação nas bancadas e poucos resíduos de solo, esses aspectos acabam favorecendo a identificação das rochas pelos espectros de reflectâncias correspondentes.

A reflectância de uma amostra específica é governada pelo ângulo de incidência, rugosidade da superfície e propriedades do material, que incluem permissividade elétrica, permeabilidade magnética e condutividade (JELALIAN, 1992). O *scanner a laser Stonex X300* utilizado neste trabalho consegue realizar este controle de incidência angular sobre o objeto escaneado de maneira automatizada.

Segundo Meneses, Almeida e Baptista (2019), quando se observa os espectros dos minerais e das rochas, nota-se que suas diferenças se sobressaem muito mais pelas formas das curvas de reflectância do que pelo número de bandas de absorção ao longo do espectro. Como consequência, as absorções se apresentam com diferentes intensidades e larguras, produzindo variação das formas dos espectros de reflectância. No intervalo do infravermelho de ondas curtas, que fica na faixa entre 400 e 2400 nanômetros, as bandas de absorção vibracionais moleculares são muito mais numerosas, estreitas e de fortes intensidades, representando assim verdadeiras assinaturas espectrais geológicas.

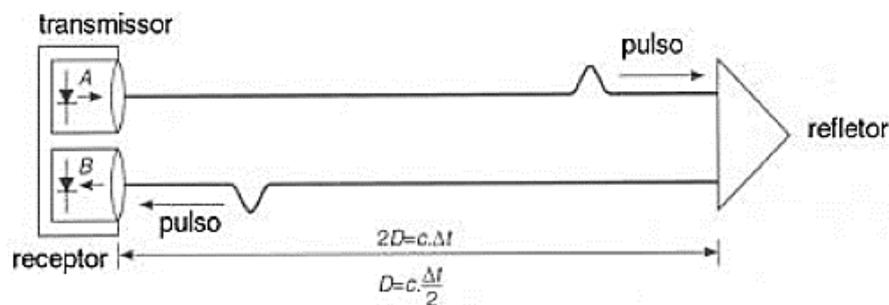
As imagens de refletividade são geradas com medida angular das coordenadas e valor de refletividade de cada ponto 3D, assim gerando uma nuvem de pontos com diferentes reflectâncias. Normalmente, a imagem de refletividade é usada para obter uma impressão foto-realista da área digitalizada. Pois condiz com a semelhança de uma foto preto e branco e, portanto, não requer muita experiência para interpretar, algumas aplicações de correspondência

de imagens e mapeamento de texturas, baseado neste tipo de imagens, são realizadas na análise de construção de tráfego (KRETSCHMER, 2004) e reconhecimento de espécies de árvores (HAALA, 2004).

Os *scanners* que utilizam tecnologia LIDAR (*Light Detection And Ranging*) possuem medição de reflectância baseados em radiação infravermelho, com comprimento de onda em torno de 900 nanômetros. Na atmosfera, a região do infravermelho entre 720 e 940 nanômetros tem baixa absorção, implicando assim o uso dessa região nos mais diversos equipamentos de medição a *laser* que utilizam infravermelho, para evitar a perda por dispersão. O feixe de luz nessa faixa é muito pequeno, é de aproximadamente $\frac{1}{4}$ do grau e sendo a precisão da casa dos milímetros. Esse pequeno feixe de luz é ideal para condições que apresentam alta umidade, alta temperatura ou até mesmo vapor de água presente na atmosfera, por ser um feixe estreito e com curto comprimento de onda (MAIA, 1999).

A tecnologia presente no *scanner a laser* STONEX X300 é denominada LIDAR (*Light Detection And Ranging*), a qual utiliza o princípio de medida de reflectância baseado em *time-of-flight* ou intervalo de tempo, assim estimando a distância através do tempo de retorno do pulso *laser*, o qual emite milhares de pulsos por segundo. Ao atingir o material rochoso, seja minério ou estéril, o pulso é difusamente refletido pelo objeto e parte dele retorna ao sistema do *scanner* com um valor de reflectância correspondente (WUTKE, 2006). Este princípio de medição de reflectância é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Princípio “*time-of-flight*”.



Fonte: Maia (1999).

O princípio *time-of-flight* calcula primeiramente o intervalo de tempo (Δt) que o sinal leva para ir do transmissor ao material rochoso e retornar ao sistema, assim realizando a medida. Com isso, o cálculo de distância (D) entre o sensor e o material é automaticamente calculado, utilizando-se a velocidade da luz ($c = 300 \times 10^3$ km/s). A utilização da constante $\frac{1}{2}$ é devido ao tempo de ida e volta do sinal do *laser*. O *scanner a laser* STONEX X300 converte o tempo, os

parâmetros de atitude do feixe e a intensidade da energia refletida pelo objeto em um valor de reflectância do material monitorado ponto a ponto (LICHTI; HARVEY, 2002).

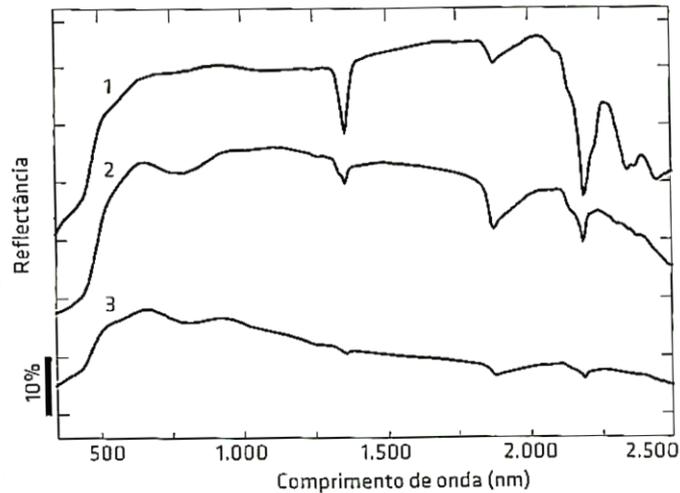
É importante mencionar que a reflectância dos materiais rochosos varia, seja em função dos diferentes comprimentos de onda ou pelas características de cada mineral. Neste tópico buscou-se salientar os diferentes aspectos influenciadores da reflectância das rochas, tais como troca de energia resultante da interação da radiação eletromagnética de uma onda com a energia quântica contida nos átomos, propriedades espectrais do objeto e teor de cada mineral presente em determinada rocha. Devido à tantas peculiaridades de identificações e classificações de fatores de reflectância, é difícil de encontrar material bibliográfico classificando diferentes rochas pelos seus aspectos de reflectância. Contudo, nos subtópicos a seguir é apresentado alguns padrões de reflectância encontrados para as rochas que se enquadram neste estudo, ou seja, algumas rochas sedimentares e metamórficas.

2.3.1 Reflectância em rochas sedimentares

As rochas sedimentares se formam na superfície da crosta terrestre sob temperaturas e pressões relativamente baixas, pela desagregação de rochas pré-existentes seguida de transporte e de deposição dos detritos. Constituem em sua formação alta porosidade e permeabilidade, com estratificação bem definida e baixa resistência mecânica. De um modo geral e amplo, as rochas sedimentares mais comuns podem ser divididas em arenosas e argilosas (detríticas) e carbonatadas (não detríticas), estas últimas subdivididas em calcários e dolomitos (CPRM, 2020).

Segundo Meneses, Almeida e Baptista (2019), as rochas detríticas apresentam baixa reflectância ao longo da variação do comprimento de onda (Figura 7).

Figura 7 - Espectros de rochas sedimentares argilosas: (1) argilito branco; (2) argilito róseo; (3) folhelho roxo.

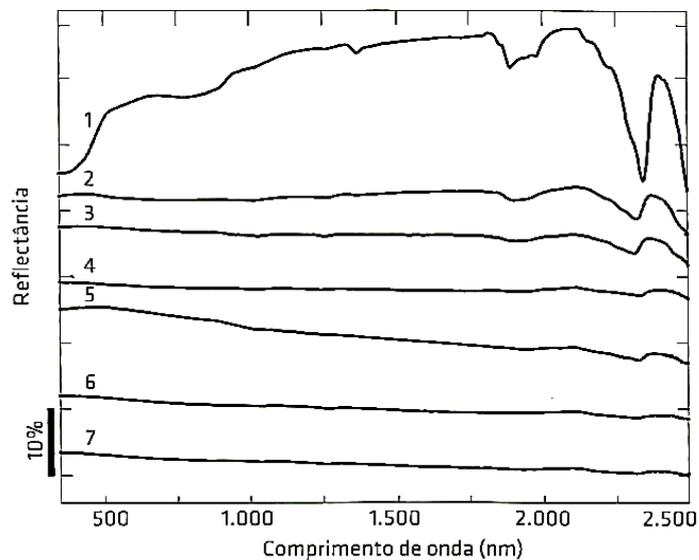


Fonte: Meneses, Almeida e Baptista (2019)

Na Figura 7 podemos observar a variação da reflectância das rochas sedimentares em relação ao comprimento de onda. A relação de porcentagem de reflectância obtida em cada comprimento de onda demonstra valores inferiores a 70% independentemente do comprimento de onda, ou seja, rochas detríticas apresenta baixa reflectância em função de suas características, composições mineralógicas e propriedades ópticas do material como mencionado anteriormente.

Já na Figura 8 podemos observar a reflectância das rochas não detríticas, ou seja, calcários e dolomitos.

Figura 8 - Espectros de rochas carbonáticas: (1) calcário argiloso; (2) doloarenito; (3) dololutito; (4) calciesparito; (5) calcilutito; (6) e (7) calcarenito.

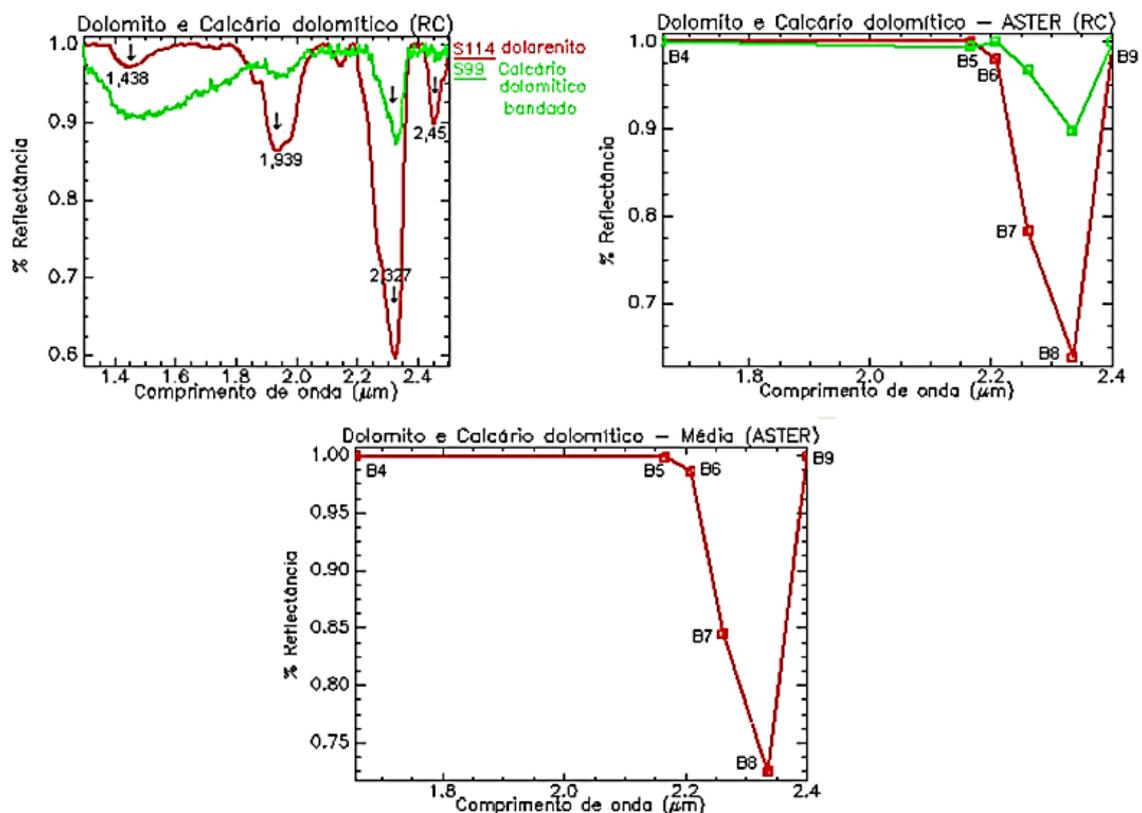


Fonte: Meneses, Almeida e Baptista (2019)

Podemos observar na Figura 8 que o calcário argiloso e o doloarenito apresentam reflectância acima de 45% apesar de ser uma reflectância relativamente baixa se sobressaem sobre as demais rochas carbonáticas.

Enquanto Pedrosa (2010) realizou estudos de comportamento espectral de rochas carbonáticas por meio de espectrorradiometria de reflectância e processamento digital de imagens, encontrando altos índices de reflectância para calcários dolomíticos e estipulando as reflectâncias das rochas em relação ao comprimento de onda como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Reflectâncias do calcário dolomítico.



Fonte: Pedrosa (2010).

Na Figura 9 podemos observar a variação da reflectância das rochas dolomito e calcário dolomítico de acordo com o comprimento de onda. As reflectâncias obtiveram valores altos acima de 80% de reflectância até um comprimento de onda de aproximadamente 2,2 micrômetros, após houve uma redução significativa da refletividade da rocha. Importante mencionar que estes comprimentos de onda não correspondem ao comprimento de onda utilizado pelo *laser scanner STONEX X300* que é de 905 nanômetros.

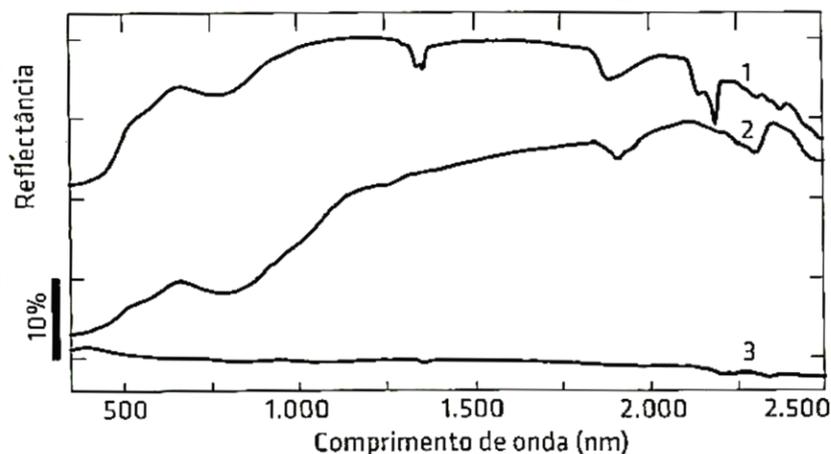
Cabe salientar que os estudos de mapeamento da reflectância das rochas geralmente são abordados por meio da variabilidade do comprimento de onda em relação a resposta de reflectância do mineral à alternância de onda incidida sobre o material rochoso. Contudo a metodologia utilizada neste trabalho apresenta uma medição pontual da reflectância baseada em um comprimento de onda fixo, ou seja, a resposta da reflectância apresentada é a porcentagem de reflectância do mineral no comprimento específico de 905 nanômetros, como já mencionado anteriormente.

2.3.2 Reflectância em rochas metamórficas

As rochas metamórficas formam-se a partir de outra rocha (sedimentar, ígnea ou metamórfica) por ação do metamorfismo. O metamorfismo é o crescimento de cristais no estado sólido, sem fusão. Ou seja, a mudança nas condições de pressão e temperatura provoca mudanças na composição mineralógica da rocha. Um calcário, por exemplo, submetido a um aumento de pressão e temperatura, transforma-se em mármore (CPRM, 2020).

Rochas metamórficas como ardósias e metassiltitos apresentam baixa reflectância devido às alterações ferruginosas presente na rocha. As rochas metamórficas como ardósias apresentam cores avermelhas e cinza-escuro pelo intenso intemperismo ferruginoso, qual promove a forte declividade da reflectância ao longo da variabilidade do comprimento de onda, como pode ser observado na Figura 10 (MENESES; ALMEIDA; BAPTISTA, 2019).

Figura 10 - Espectros de rochas metamórficas argilosas de baixo grau (fáceis xisto verde): (1) metassilito avermelhado; (2) ardósia avermelhada; (3) ardósia cinza-escuro.

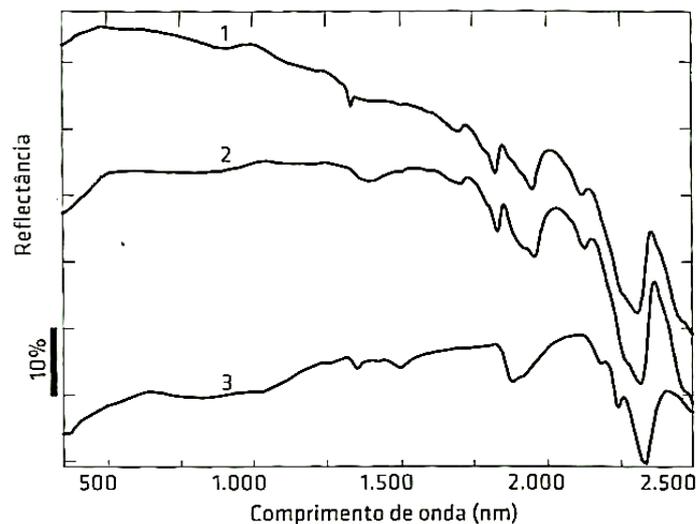


Fonte: Meneses, Almeida e Baptista (2019)

Nas rochas argilosas de baixo grau apresentada na Figura 10 observa-se uma baixa reflectância para os três tipos de rochas apresentados, essa reflectância é inferior a 40% independentemente do comprimento de onda incidido sobre o material rochoso.

Na faixa de temperatura das fácies xisto verde, os mármore formam-se da recristalização da calcita ou da dolomita, assim são caracterizados por fortes absorções do espectro de reflectância. Os mármore puros diferem dos calcários e dolomitos em suas reflectâncias Figura 11.

Figura 11 - Espectros de (1) mármore branco puro dolomítico, (2) mármore calcítico de cor bege contaminado por óxido de ferro e (3) rocha calcissilicática.



Fonte: Meneses, Almeida e Baptista (2019)

A Figura 11 apresenta maiores reflectância para comprimento de onda menores nos mármore, enquanto que para maiores valores de comprimento de onda, menor será a reflectância obtida do material rochoso. Podemos observar que para um comprimento de onda inferior a 1000nm temos uma reflectância superior a aproximadamente 65% para mármore dolomítico, ou seja, para o comprimento de onda de 905nm, utilizado pelo *scanner a laser*, os mármore dolomíticos apresentam alta reflectância enquanto as demais rochas metamórficas ou até mesmo sedimentares apresentam valores inferiores a este. Assim, podemos utilizar da análise da reflectância presente nas rochas para distingui-las.

2.4 Técnicas de imageamento para problemas mineiros

Nos últimos anos a utilização de imagens digitais vem sendo mais abordada nos mais diversos setores da indústria e proporcionando novas áreas de pesquisa na computação. Muitas

vezes presenciamos problemas difíceis de serem solucionados sem o auxílio da computação. As imagens digitais vêm como um auxílio nas análises dos mais diversos processos da indústria, substituindo as fotos convencionais, antigamente analisadas e processadas de forma manual.

A facilidade de obtenção e manuseio de dados obtidos por técnicas de imageamento proporciona um avanço tecnológico no setor industrial, contribuindo para otimização e análises mais precisas de processos industriais. O desenvolvimento de técnicas de imageamento se associa com as diversas áreas das ciências, principalmente as engenharias. Essa nova perspectiva é um dos fatores motivacionais para o desenvolvimento do presente trabalho e assim como este, outros autores também já utilizaram das técnicas de imageamento para solução de problemas em ambiente de mineração.

Nas últimas décadas a mineração tem se tornado uma das principais atividades econômicas do Brasil. Dentre as diversas minerações atualmente em funcionamento, podemos citar a produção de minério de ferro, rocha com alta concentração de óxido de ferro como magnetita e hematita, como sendo uma das mais importantes explorações minerárias. Contudo, a mineração de ferro gera impactos ao meio ambiente, tais como supressão da vegetação nativa até alterações em escoamentos subterrâneos e na qualidade da água. As pilhas de rejeitos gerados pela mineração geralmente atingem grandes volumes, enquanto há uma limitação dos recursos naturais, bem como a limitação de novas áreas para disposição de resíduos. Neste sentido, Martini *et al.* (2016) utilizou como técnica de imageamento um radar de penetração (GPR), o qual consiste em uma técnica geofísica não destrutiva de avaliação da superfície que permite a identificação de materiais enterrados e plumas de contaminação. O uso do GPR possibilita definir a existência de padrões de sedimentação na subsuperfície de rejeitos do beneficiamento de minérios. O autor utilizou a técnica de imageamento em mineração de ferro dentro de um reservatório criado pela barragem de rejeito do Diogo, em Rio Piracicaba, Minas Gerais, Brasil. Seus resultados apontaram padrões de reflexão alterados em áreas de grande concentração de hematita (60%). De maneira geral o autor considerou viável a aplicação do GPR em ambientes de depósitos rico em hematita.

A técnica baseada no uso do GPR propõe o imageamento de uma superfície de 3 a 4 metros de profundidade, sendo possível identificar fatores como batimetria, deposição do material e mudanças de padrão de reflexão. Contudo, a presença de camadas superficiais de alta condutividade impede a penetração dos sinais emitidos pelas rochas até o GPR, assim resultando em baixos valores de profundidade de penetração e resolução do sinal recebido. No

entanto, Martini *et al.* (2016) analisou a condutividade elétrica dos rejeitos e afirmou não ser um fator impactante ao uso da técnica de imageamento por GPR para obtenção das informações. De maneira complementar as informações coletadas pelo GPR realizou-se testes de composição mineralógica nas amostras de material, assim como análise do teor de umidade, condutividade elétrica, fluorescência de Raios-X e difração de Raios-X.

O teor de umidade de uma amostra consiste na relação entre o peso da água e o peso total desta amostra. O método convencional para cálculo do teor de umidade é realizado com a secagem do rejeito através de uma estufa, com temperatura aproximadamente de 110°C, no momento que a amostra apresentar peso constante, pode-se considerá-la seca. Já a condutividade elétrica é medida através do condutímetro, sendo necessário a mistura da amostra junto à água. As técnicas de imageamento por fluorescência de Raios-X e difração de Raios-X permitem a identificação de elementos presentes na amostra. Nesta técnica uma fonte de radiação gama provoca a excitação dos átomos do mineral que se pretende analisar, fazendo com que o átomo absorva energia e promova os elétrons em estado energético, com isso há uma excitação do átomo. Como a natureza tende a buscar o equilíbrio, o átomo tende a retornar ao seu estado original, ocorrendo uma emissão de energia, assim é possível identificar e quantificar o elemento baseando-se na energia liberada neste processo (SCHOLZE *et al.*, 2006).

Com um viés semelhante, Marques (2016) buscou explicitar como a técnica de imageamento com o uso do Raio-X auxilia no controle de qualidade de minério e destinação de blocos de lavra, de maneira a otimizar a destinação adequada de minério, com objetivo de controlar a qualidade de minério enviado à planta de beneficiamento, assim como o cumprimento das exigências econômicas e ambientais do empreendimento da mineração de calcário. O autor cita alguns benefícios do uso dessa técnica, tais como:

- i. a redução da quantidade de estéreis e rejeitos;
- ii. redução das áreas afetadas por deposições;
- iii. menor desgaste nos equipamentos e;
- iv. redução dos impactos ambientais.

Marques (2016) utilizou o analisador portátil XRF modelo S1 Turbo - Brucker em seu trabalho. O equipamento é de origem alemã, com aplicação em análises elementares, pesquisa de materiais, determinação e quantificação de fases cristalinas. O equipamento possibilita realizar levantamentos de informações das amostras retiradas *in situ*, ou seja, a análise da amostra pode ser realizada *in loco*, otimizando o tempo de resposta do que se procura analisar.

O equipamento comporta uma biblioteca de mais de 400 tipos de liga, assim possibilitando a identificação de ligas metálicas e análise química elementar, levando cerca de um segundo para identificação do material analisado e três segundos para uma análise completa através do ensaio analítico. Seu padrão de funcionamento é por excitação do átomo através de incidência de radiação gama, como explicado anteriormente.

O beneficiamento de minérios é um setor em constante desenvolvimento na indústria de mineração, pois afinal os recursos minerais estão se tornando cada vez mais escassos, e consequentemente temos que tirar o melhor proveito do que extraímos com o menor custo possível. Neste sentido, alguns autores detêm um olhar mais voltado às técnicas de imageamento para um melhor aproveitamento dos recursos minerais nas usinas de beneficiamento, realizando trabalhos de imageamento para aprimoramentos e complementações em análises de todos os processos envolvidos nesta etapa.

A flotação é um dos processos utilizados na etapa de beneficiamento de minérios. O objetivo deste processo geralmente é induzir um concentrado de uma determinada substância mineral a qual está diluída no minério bruto juntamente com outros minerais desnecessários ao objetivo do beneficiamento. O processo de flotação consiste na formação de uma polpa aquosa do minério após a britagem do minério bruto, sujeitando a polpa a flutuação como espuma. Para auxiliar no processo uma substância química conhecida como “coletor” é incorporado à polpa de minério, que em virtude de suas propriedades químicas e físicas, absorverá seletivamente os minerais de interesse e flutuarão nessa polpa, assim podendo ser coletado um concentrado do minério de interesse. Contudo, a seletividade completa em relação aos minerais é difícil de alcançar e frequentemente várias flotações sequenciais são necessárias antes de um grau de concentrado desejável (GRIFFITH; PARKINSON, 1975).

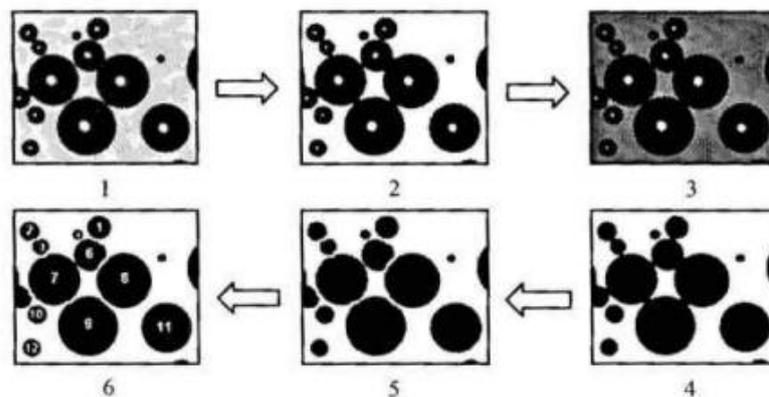
Rodrigues *et al.* (2004) teoriza o processo de flotação como sendo um processo físico-químico complexo onde inúmeras variáveis afetam a sua eficiência, tais como o diâmetro médio e a distribuição de tamanho de partículas e bolhas, são variáveis físicas de maior impacto no processo de flotação. Visando os problemas apresentados o autor desenvolveu uma técnica de imageamento baseada no conceito de captura visual de bolhas, combinando microscopia e análise de imagem digital. A técnica consiste em coletar as bolhas que ascendem em uma coluna em acrílico até a câmera especial usada na obtenção das imagens. As bolhas captadas permaneciam estabilizadas em uma célula plana disposta na horizontal. O autor menciona que

a técnica de imageamento utilizada contribuiu para minimizar diversos problemas nas capturas de bolhas em movimento, tais como:

- i. foco;
- ii. iluminação;
- iii. velocidade de obturação e;
- iv. sobreposição de bolhas.

A coluna de acrílico apresentava 200 cm de altura e 72 mm de diâmetro, já o ponto de amostragem ocorria 80 cm acima do ponto de geração das bolhas. No momento que as bolhas atingiam o nível de captura desejado, o processo era interrompido, assim as bolhas permaneciam aprisionadas na célula podendo então realizar o imageamento através de imagens de captura. As imagens digitais foram capturadas através de uma máquina fotográfica digital (Sony – DSC S75) acoplada a um *stereo* microscópio (Zeiss – Stemi SV 11). Juntamente a captura das fotos foi utilizado iluminação por fibra ótica (iluminação fria), sendo que a célula foi iluminada com luz transmitida, pois por meio desta técnica obtêm-se imagens de excelente contraste. A Figura 12 demonstra as etapas de processamento das imagens capturadas.

Figura 12 - Etapas de processamento realizadas até a identificação e análise dos objetos.



Fonte: Rodrigues *et al.* (2004)

Na Figura 12 são apresentadas as etapas de processamento, as quais consistem em:

- i. (1) conversão para tons de cinza (256 tons – 8 bits);
- ii. (2) limiarização;
- iii. (3) edição do fundo;
- iv. (4) subtração das imagens 2 e 3 (para preenchimento do interior das bolhas);
- v. (5) segmentação (“watershed”) e;
- vi. (6) identificação e análise dos objetos.

A técnica desenvolvida possibilitou identificar diferentes tamanhos de bolhas em diferentes sistemas de geração de bolhas, apresentando vantagens que auxiliam na compreensão e melhoria do processo de flotação de elementos poluentes com microbolhas ou multibolhas e na flotação de finos e ultrafinos de minérios, minimizando os problemas de sobreposição e velocidade de obturação, assim como melhorando a iluminação e o contraste na captura das bolhas pela técnica de imageamento.

A mineração de calcário é uma importante área dentro das indústrias presentes na região, não só para o município de Caçapava do Sul, como para o estado do Rio Grande do Sul. A produção de calcário abrange diversos usos de seu produto os quais vão desde a agricultura, através do calcário moído como corretivo de acidez do solo, até construção civil, com a utilização da cal. Contudo, diante das litologias presentes na região e dos processos necessários para a destinação final dos produtos, as etapas de exploração e beneficiamento deste minério tendem a ser rigorosas, sendo necessários cuidados aos métodos de desmonte e principalmente no beneficiamento deste material.

A exemplo desses cuidados Santos (2018) propôs uma medida alternativa ao processo de cata manual na classificação do ROM, realizando um estudo avaliativo sobre a performance da tecnologia de separação baseada em sensores, em uma mina a céu aberto de calcário no município de Caçapava do Sul – RS. A técnica de imageamento utilizada pelo autor seguiu as seguintes etapas:

- i. utilização de drone, gerando um modelo virtual de afloramento, o qual possibilitou a identificação de pontos de amostragem representativas;
- ii. preparação das amostras, através de britagem e peneiramento;
- iii. testes de separação baseada em sensores, com utilização de Raio-X e Câmera CCD;
- iv. caracterização do material por meio de moagem e análise química.

A utilização do drone DJI, modelo Phantom 4 com câmera FC330 acoplada, possibilitou a captura de imagens para obtenção de um modelo tridimensional das frentes de lavra, visando um reconhecimento da área para coleta de amostras que contemplasse todas as variantes de minério e estéril da cava. Após a etapa de amostragem o autor realizou a preparação das amostras e posteriormente a aplicação da separação baseada em sensores, com utilização de Raio-X e da Câmera CCD presentes no equipamento *Sorter*, modelo COMEX Lab-Sorter MSX-400-VL-XR-3D[®], de fabricação polonesa. A identificação das amostras através do captor de raios-X se deu pelo reconhecimento da densidade atômica das partículas. Já a utilização do

sensor óptico, através da Câmera CCD, converte as intensidades de luz captadas em sinais mensuráveis eletronicamente (SANTOS, 2018). Na etapa das análises química, as amostras coletadas foram analisadas de acordo com os índices de recuperação mássica e metalúrgica e outros indicadores como: acurácia, sensibilidade, especificidade. Após os trabalhos realizados nas etapas mencionadas o autor relatou que a utilização do sensor de raios-X não demonstrou afinidade para classificar os materiais em teste, todavia o sensor óptico se mostrou aplicável em todas as situações testadas, apresentando recuperações entre 35% e 98%, de acordo com a condição e a granulometria da alimentação.

É importante conhecermos o minério que abastece a usina de beneficiamento para termos um maior controle do que produzimos ou até mesmo dos gastos em investimentos na exploração e no beneficiamento. Para modelamento e avaliação do desempenho dos equipamentos é necessário a realização de curvas granulométricas de alimentação e até mesmo conhecimento do fluxo do produto em etapas de britagem. Neste sentido, Silva (2014) utilizou técnicas de imageamento na determinação da granulometria de ROM e britagem por meio de análises de imagens, em minério de ferro, na Mina de Conceição, no município de Itabira, Minas Gerais.

A determinação da curva granulométrica é uma representação da granulometria presente em uma determinada amostra, por meio de uma curva. A granulometria pode ser compreendida como a distribuição da diversidade de tamanhos dos grãos, sendo expressa em porcentagem, relacionando a distribuição de tamanhos com a porcentagem de ocorrências destes tamanhos. Como exemplo podemos citar o peneiramento como técnica de determinação de curva granulométrica. Silva (2014) fotografou pilhas de material desmontado na lavra e nas correias com material britado na planta. Com as imagens em mãos, realizou análises das granulometrias desses materiais através do reconhecimento visual e uso dos *softwares Fiji e AutoCAD*, os quais possibilitaram identificar as dimensões dos materiais presente na pilha de minério e na correia transportadora. A autora classificou o material como passante e retido em malhas desde 160x80cm até 5x2,5cm. As curvas granulométricas obtidas para o ROM mostraram que apenas 5% do material está retido em 1m, indicando que a frente de lavra amostrada atende às especificações técnicas dos equipamentos de britagem primária. A metodologia implementada por técnica de imageamento demonstrou-se de grande valia, uma vez que fornecem dados de granulometria do material nas diversas etapas da mineração, sendo um método não invasivo e não destrutivo, podendo ser realizados para os mais diversos tamanhos de amostras.

Segundo Guisado-pintado, Jackson e Rogers (2019) *scanners a laser* e drones estão entre os melhores equipamentos para reconhecimento de processos dinâmicos da superfície da terra, incluindo informações espaciais. Desenvolvimentos recentes em tecnologia de sensores, permitem adquirir dados espaciais de alta resolução na topografia da superfície terrestre. Os *scanners a laser* possuem grande precisão e confiabilidade na captura dos dados em relação ao drone, porém demandam mais tempo de execução e apresentam dificuldades de mapeamento em formas de relevo complexas, pois geram espaços vazios não captados. Já os drones apresentam maior rapidez na captura de dados principalmente em áreas mais extensas, porém a uma resolução e precisão menor que os *scanners a laser* (ROK KAMNIK; MATJAŽ NEKREP PERC; DARJA TOPOLŠEK, 2020).

CAPÍTULO 3

3 APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo é apresentado o estudo de caso e a contextualização do local onde foi desenvolvido o projeto, bem como os aspectos geológicos mais relevantes da região onde se encontra o depósito, objeto deste estudo.

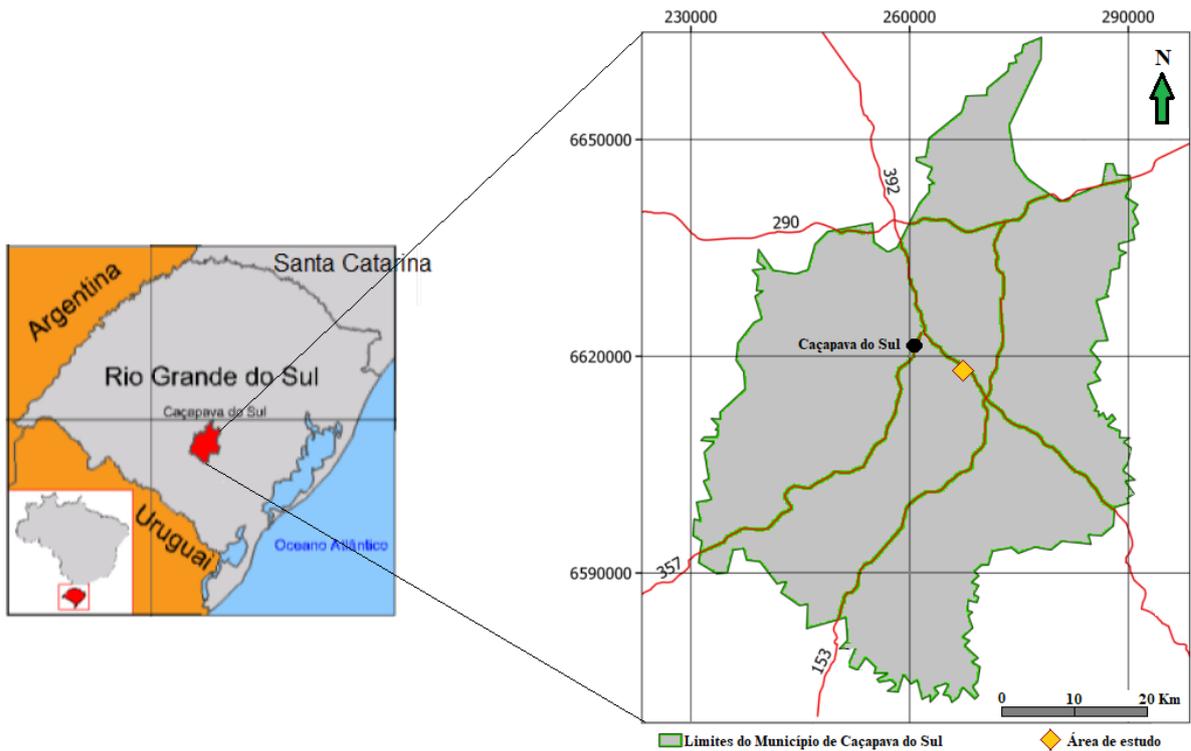
3.1 Localização e histórico da empresa

O estudo foi realizado em mineração de calcário na empresa Dagoberto Barcellos situada às margens da BR 392, localizada a 10 km da sede do município, na região das Caieiras, no município de Caçapava do Sul (Figura 13), distante a aproximadamente 262 km da capital do estado, Porto Alegre. A região do município de Caçapava do Sul está localizada na chamada Zona da Campanha do estado do Rio Grande do Sul.

Segundo Dagoberto Barcellos (2009), as atividades de mineração da empresa Dagoberto Barcellos iniciaram-se em 6 de abril de 1918, por Dagoberto Fontoura de Barcellos sob a forma de empresa individual, sendo esta, uma das primeiras organizações industriais no ramo da mineração de rocha calcária e fabricação de cal virgem para construção civil de Caçapava do Sul. Em 1952, Dagoberto constitui uma organização empresarial em nome do coletivo, sob a razão social de Dagoberto F. de Barcellos & Cia Ltda., logo, em 1958, amplia suas instalações industriais e monta o primeiro sistema de moagem de calcário. Inicia em fins de 1977, a implantação da fábrica de cal virgem e hidratada, para atender as exigências da indústria da construção civil.

No ano de 1982 começa a inovação de todo o processo produtivo com a instalação de britadores primários de maior eficiência e capacidade, construção de silo graneleiro para estocagem de calcário, com capacidade de 22.500 toneladas, e montagem de fornos para a queima da cal, com capacidade de produzir diariamente 120 toneladas. Em 1997, atendendo a necessidade das grandes construtoras, passou a produzir argamassa industrializada, em maio de 2003, em um processo que envolveu todos os gestores e colaboradores, a Dagoberto Barcellos S/A recebeu a certificação ISO 9001 (DAGOBERTO BARCELLOS, 2009).

Figura 13 - Mapa de localização e situação.



Fonte: Autor.

A empresa utiliza o método de lavra em cavas, geralmente com bancadas que variam de 5 a 15 metros e inclinações de face de taludes médias de 75° . Primeiramente é feito a decapagem do material de interesse, removendo os estéreis que são constituídos por solo orgânico, argilas, rochas graníticas, diabásios e xistos. Logo após é feita a perfuração com auxílio de perfuratrizes pneumáticas, seguindo um conjunto de furos que obedecem a uma malha e inclinações predefinidas e, posteriormente, os furos são carregados com explosivo, emulsão ou ANFO, encartuchados ou a granel, em diferentes combinações, juntamente com seus respectivos acessórios necessários para detonação. O índice utilizado como parâmetro de qualidade do mármore é o poder de neutralização (PN) e a identificação das bancadas para desmonte é baseada nos testes prévios PN, visando o destino do material (Cal e Calcário) e a separação em campo é feita pelo conhecimento dos supervisores da mineração e dos operadores de máquinas. Por fim, o minério desmontado é carregado nos caminhões por uma escavadeira ou pá-carregadeira e é transportado até a unidade de beneficiamento.

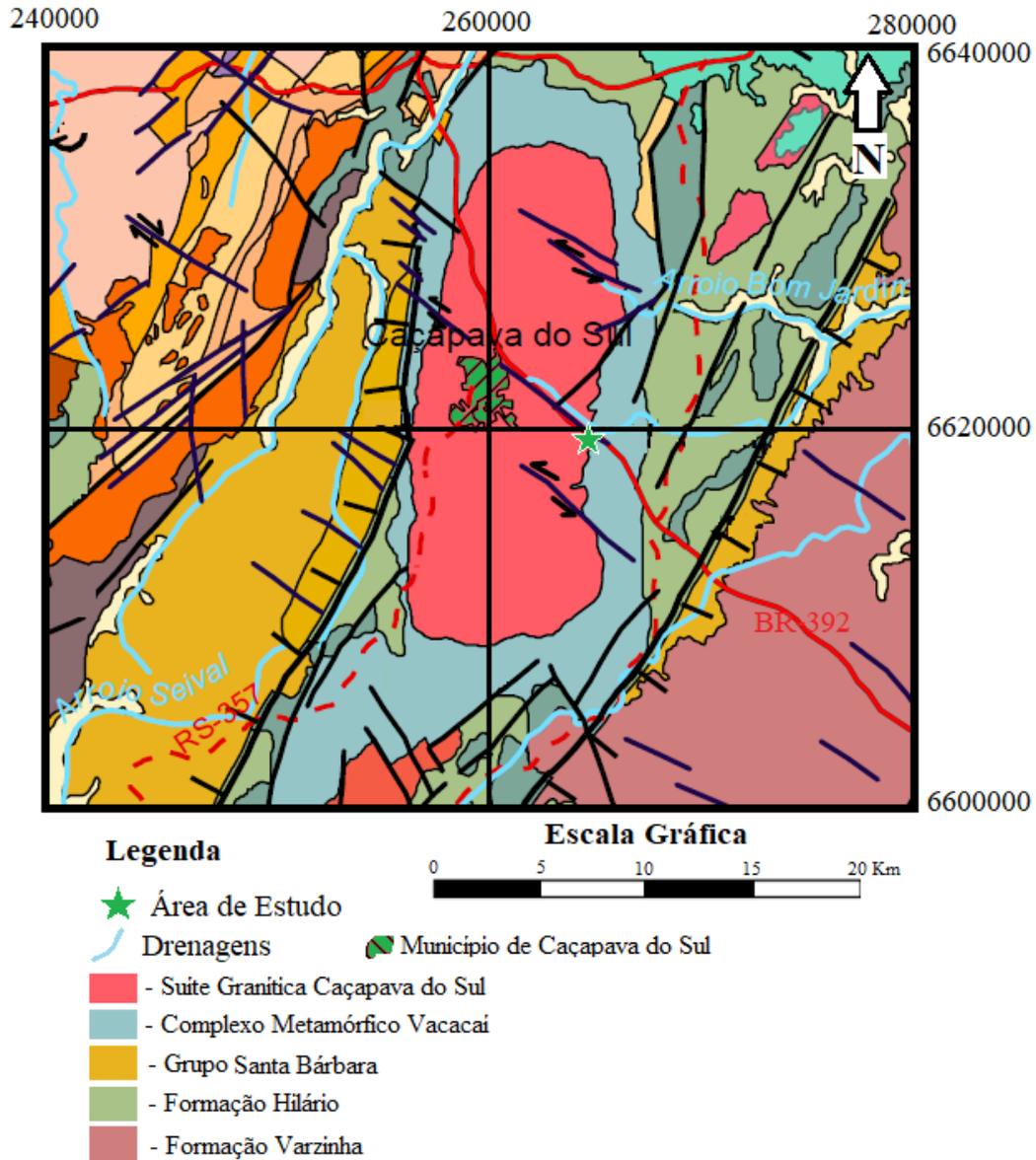
3.2 Geologia regional

A região onde se encontra o município de Caçapava do Sul é formada por uma estrutura tectônica de escala crustal que secciona o território do município na direção NE-SW. Essa estrutura tectônica separa o domínio Santana da Boa Vista com o domínio São Gabriel. O domínio Santana da Boa Vista é uma região de terrenos Paleoproterozoicos, com cobertura supracrustal mais jovem, localizados mais a leste da estrutura tectônica. Já o domínio São Gabriel é uma região de associações ígneas e metamórficas juvenis do Neoproterozoico, localizadas mais a oeste da estrutura tectônica (CHEMALE, 2000). Há um aporte de unidades sedimentares e vulcanogênicas espessas presente na região, depositadas na transição do Neoproterozoico ao Paleozóico inferior e vinculadas aos domínios da Bacia do Camaquã (PAIM; CHEMALE; LOPES, 2000; BORBA, 2006).

O município de Caçapava do Sul está inserido no Planalto Sul-Riograndense, contendo áreas de relevo dissecado em colinas, áreas de topo plano, interflúvios tabulares, encostas íngremes, cornijas e cristas. Ao norte do município são encontradas serras e morros alongados, com solos rasos e afloramentos de granitos e riolitos, enquanto mais ao sul encontra-se a presença de cerros ruiformes designados pelo termo regional “guaritas” (JUSTUS; MACHADO; FRANCO, 1986).

A área de estudo está inserida na Suíte Granítica Caçapava do Sul (SGCS), localizada no Escudo Sul-Riograndense. A Suíte Granítica Caçapava do Sul, com idade aproximada de 540 Ma, é constituída principalmente por sienogranito, contornando e intrudindo monzogranito a allanita granodiorito, médio a fino, dominante na porção central, com foliação protomilonítica ao longo das bordas do corpo granítico. Como podemos observar na Figura 14, a SGCS possui uma forma de corpo elíptico com o eixo maior orientado na direção N-S, com cerca de 25 km de extensão. Esta compreende dois corpos graníticos intrusivos no Complexo Metamórfico Vacacaí, sendo que este complexo forma um cinturão metamórfico no entorno da SGCS (PORCHER *et al.*, 2000).

Figura 14 - Mapa geológico regional simplificado.



Fonte: Adaptado de CPRM (2019).

O aporte da região de Caçapava do Sul detém uma derivação mantélica juvenil associada à Orogenia Brasileira que se expande ao longo da América do Sul. A área é delimitada por duas estruturas fundamentais: a zona de cisalhamento transpressivo NW no sentido sul/sudoeste, e a zona de cisalhamento Caçapava do Sul, no sentido leste/sudoeste (SILVA *et al.*, 2005; LENA *et al.*, 2014; HARTMANN *et al.*, 2016).

Presente na região encontram-se duas importantes bacias hidrográficas rio-grandenses: (i) a bacia do rio Jacuí, ao norte, que recebe as águas e sedimentos dos arroios Santa Bárbara e Irapuá e; (ii) a bacia do rio Camaquã, ao sul, que recebe o aporte dos arroios Lageado, Passo

da Areia e João Dias. Os cursos d'água presente nessas bacias apresentam vegetação ripária alternando entre campos e florestas, com diversas espécies endêmicas e ameaçadas de extinção, caracterizando um dos os principais ecossistemas da região (GUADAGNIN; LARocca; SOBRAL, 2000; BORBA; SOUZA, 2010).

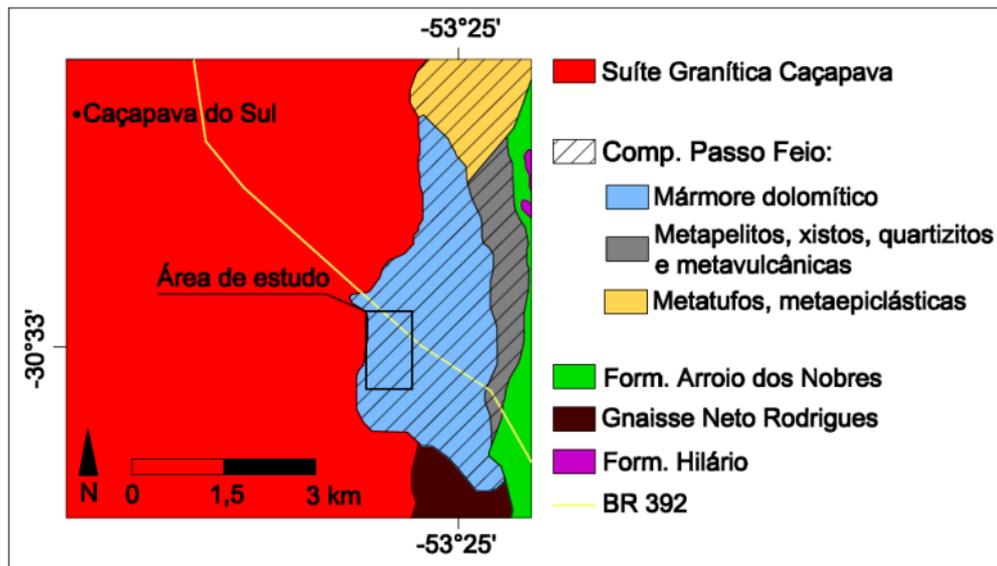
Os mármores dolomíticos, assim como suas encaixantes singenéticas, estão presentes no Complexo Metamórfico Vacacaí, na região de Caçapava do Sul. HOERLLE (2010) e FABRIS (2015) denominaram essa região de Complexo Metamórfico Passo Feio. Segundo BITENCOURT (1983) esse complexo metamórfico constitui uma espessa sequência disposta em estrutura antiformal parcialmente arrasada, em cuja porção mais interna se encontra o complexo granítico, com toda sequência intensamente deformada, sendo a superfície regionalmente dobrada penetrativa, metamórfica e espacialmente concordante em todos os tipos litológicos.

3.3 Geologia local

A área de estudo está inserida no Complexo Metamórfico Passo Feio o qual é composto por mármores dolomíticos, metapelitos, xistos, quartzitos e outras rochas, como pode ser observado na Figura 15. Segundo BAPTISTA (2015) a área apresenta ainda mais litologias como quartzitos feldspáticos, calcário marmorizado, granitos e metabásicos. Algumas rochas como carbonato, quartzo e clorita apresentam-se intercalados por xisto. Em alguns locais foram identificadas intrusões de corpos diabásicos e apófises graníticas, contudo o xisto é mais encontrado como capa após o solo, já as argilas e o granito como lapa, enquanto o contato mármore-granito ocorre através de uma superfície bem definida. Outro fato importante a ser considerado é que, algumas vezes, o granito incorpora verdadeiros bolsões de mármores em seu interior, o que exige um bom controle de sondagem para um melhor planejamento.

Na região de Caçapava do sul, o solo é classificado como Podzólico (horizonte A seguido de horizonte B textural, com nítida diferença entre os horizontes, apresenta horizonte B de cor avermelhada até amarelada). São eutróficos e distróficos (solos de fertilidade alta e moderada), textura média cascalhenta e argilosa, com relevo ondulado e forte ondulado, com pequenas variações ao longo da região, devidos a erosões e outros processos geológicos que podem acabar influenciando na formação do solo (IBGE, 2019).

Figura 15 - Mapa geológico da área de estudo.



Fonte: SANTOS (2018), *apud* CPRM (2017).

Como pode ser observado na Figura 15, a área de estudo encontra-se predominantemente sobre a região de mármore dolomítico, devido ao metamorfismo sobre a rocha calcária. Apesar das rochas encontradas na área de estudo serem mármore e não calcários, tradicionalmente na região ele é chamado de calcário e, por isso, também será adotado no presente trabalho o termo calcário quando se tratar de mármore dolomítico.

Segundo BRANDÃO e SCHOBENHAUS (1997) a sedimentação de calcários ocorre devido a processos químicos e bioquímicos em ambiente marinho de águas rasas. Os processos químicos transformam bicarbonato que está presente na água em íons de carbonato através de remoção do CO_2 da água, assim favorecendo a precipitação do calcário. Além do processo químico envolvido na formação do calcário, podemos dizer que o pH da água do mar, a temperatura e a claridade são alguns fatores que também contribuem para a formação de carbonatos. Os autores também mencionam mais aspectos influenciados na formação do calcário tais como: (i) aumento da temperatura; (ii) evaporação intensa; (iii) influxo de águas supersaturadas até regiões onde nucleadores ou catalizadores de CaCO_3 estejam presentes; (iv) ascensão marinha de zonas de alta pressão para zonas de baixa pressão; (v) mistura de água rica em CO_3 e baixo Ca^{2+} com água do mar; (vi) processos orgânicos; (vii) ação bacteriana com produção de amônia; (viii) elevação do pH e; (ix) incremento na concentração de carbonatos e, principalmente, a remoção de CO_2 pela fotossíntese.

Segundo SAMPAIO e ALMEIDA (2005), os calcários são rochas sedimentares compostas, basicamente, por calcita (CaCO_3), já os dolomitos são também rochas sedimentares compostas, basicamente, pelo mineral dolomita ($\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$), ambos os calcários são considerados as rochas carbonatadas mais comercializadas em todo mundo. A calcita apresenta maior valor econômico, logo, os pesquisadores realizam análises químicas, difração de raios X e microscopia eletrônica para diferenciar e classificar essas rochas carbonáticas.

Na área de estudo predominam estruturas geológicas complexas, com presença de intrusões devido ao alto grau de fraturamento do maciço rochoso, predominantemente no mármore dolomítico. Essas fraturas, também consideradas como falhas, dão origem a mineralizações cupríferas na região, denominadas de Sistema de Falhas Irapuá. Conseqüentemente essas mineralizações que percolam o mármore dolomítico, atribuem características específicas as rochas ali presentes, como por exemplo a coloração dos calcários, que por sua vez tem ocorrência em tons de branco, cinza e rosa, devida à presença em maior ou menor grau destes contaminantes silicáticos intrusivos (ALANO, 1974).

Porém as fraturas vão muito além das simples características visuais dos calcários, essas fraturam interferem diretamente no planejamento do plano de fogo, pois no momento de detonação da bancada o gás liberado pelo explosivo se dissipa entre essas fraturas, assim afetando diretamente o desempenho do plano de fogo e a fragmentação do material. Conseqüentemente o desmonte é prejudicado não somente pela presença de “matacos” como pela dificuldade de seletividade do material pós desmonte, ou até mesmo no planejamento pré-desmonte, pois a diluição das rochas presentes na bancada podem sofrer alterações em uma diluição pós-desmonte, devido ao deslocamento de rochas desnecessárias, porém detonadas devido a percolação dos gases pelas fraturas.

CAPÍTULO 4

4 AVALIAÇÃO DA DILUIÇÃO POR TÉCNICAS DE IMAGEAMENTO

O presente capítulo dá sequência ao desenvolvimento do trabalho, trazendo os resultados obtidos com os monitoramentos realizados com o *scanner a laser* terrestre, proporcionando dados informacionais e interpretativos para o cálculo da diluição presente nas bancadas analisadas. Também são discutidos os métodos utilizados, bem como analisados os resultados e suas relações entre bancadas.

4.1 Obtenção dos resultados

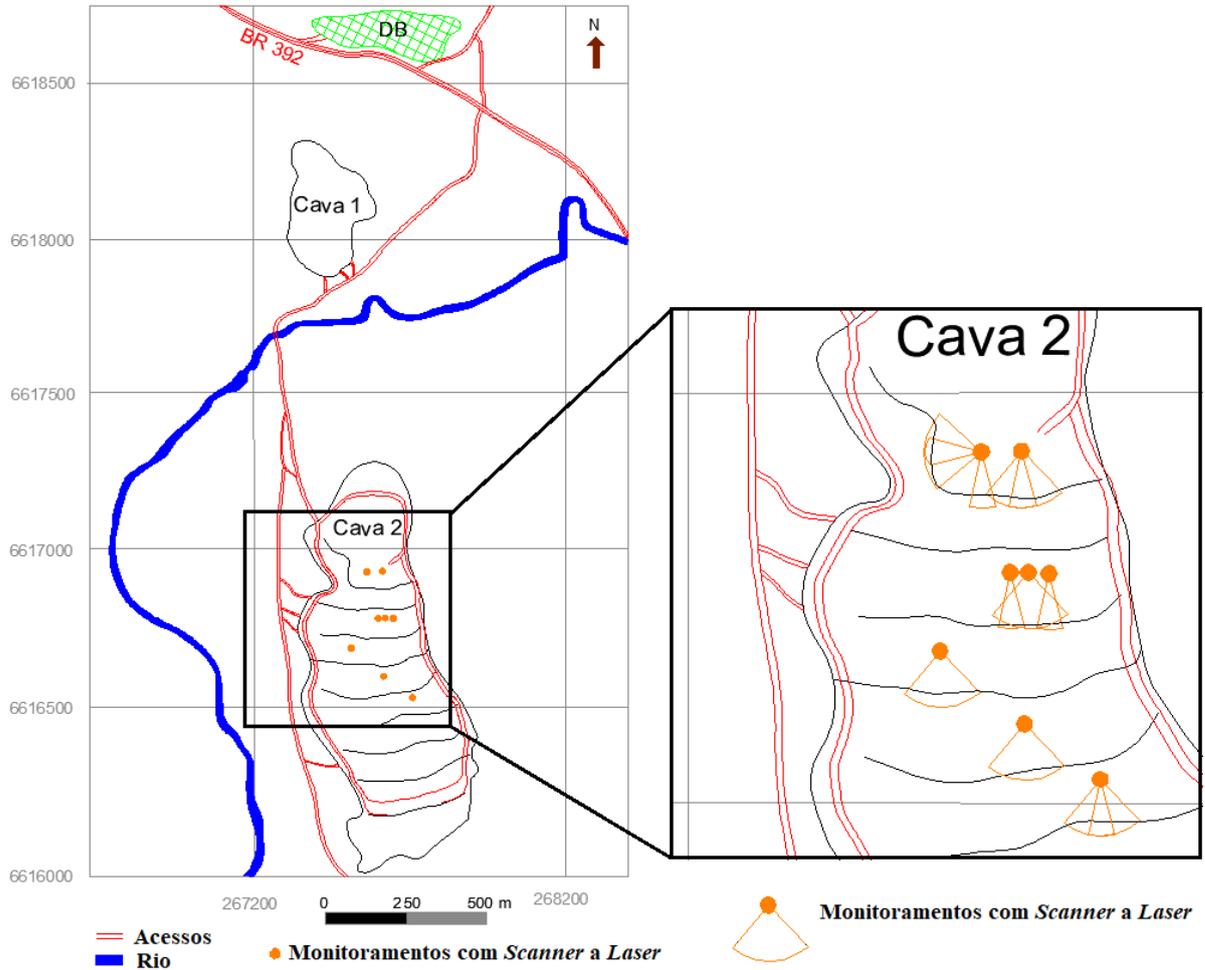
Conforme salientado no Capítulo 2, o *laser scanner* possui como características importantes sua capacidade de varreduras de pontos de interesse em um curto período e seu alto nível de detalhe, possibilitando a obtenção de modelos precisos e com alto grau de detalhamento em cada varredura.

Desta forma, durante a fase experimental deste trabalho, foram realizadas uma série de levantamentos exploratórios, ao longo de 2019, com o intuito de familiarizar-se com o equipamento, com a área de estudo e, principalmente, com o *software* a ser utilizado para o pós-processamento, análise e interpretação dos dados obtidos. Nesta etapa, foram realizadas aproximadamente 20 varreduras com o equipamento e posteriormente, em 2020, foram realizados cerca de mais 5 levantamentos. Os levantamentos aqui contabilizados são representativos do uso do *scanner a laser* no mapeamento da bancada, ou seja, a cada varredura corresponde um monitoramento; logo, algumas vezes, mais de uma varredura foi realizada no mesmo dia. No entanto, os seguintes contratempos implicaram em demora para a realização dos levantamentos: mau tempo predominante na região, de junho a setembro de 2019, prejudicando a realização de trabalhos de campo, indisponibilidade da empresa para liberar o acesso à área, assim como problemas de logística de transporte de equipamento e pessoal.

Os principais pontos de monitoramento das bancadas são apresentados na Figura 16. O objetivo desses levantamentos foi capturar as faces das bancadas para posteriormente analisar a diluição, realizando varreduras extensas cobrindo toda a bancada e posteriormente varreduras com menor ângulo, em faixas específicas das bancadas, com diferentes situações de

heterogeneidade litológica e estrutural, visando verificar a sensibilidade do equipamento na distinção dos tipos litológicos pela análise da reflectância do material *in situ*.

Figura 16 - Mapa dos pontos de instalação e varredura com o *scanner a laser*.



Fonte: Autor.

Conforme mencionado anteriormente, os primeiros monitoramentos realizados foram mais com caráter experimental e exploratório, com o intuito de mapear a frente de lavra. Contudo, na sequência das varreduras com o *laser scanner* terrestre (Figura 17) pôde-se ter um grande aproveitamento das imagens, as quais são analisadas nos tópicos a seguir.

Figura 17 - Varredura da face da bancada por meio da utilização do *laser scanner* STONEX X300.



Fonte: Autor.

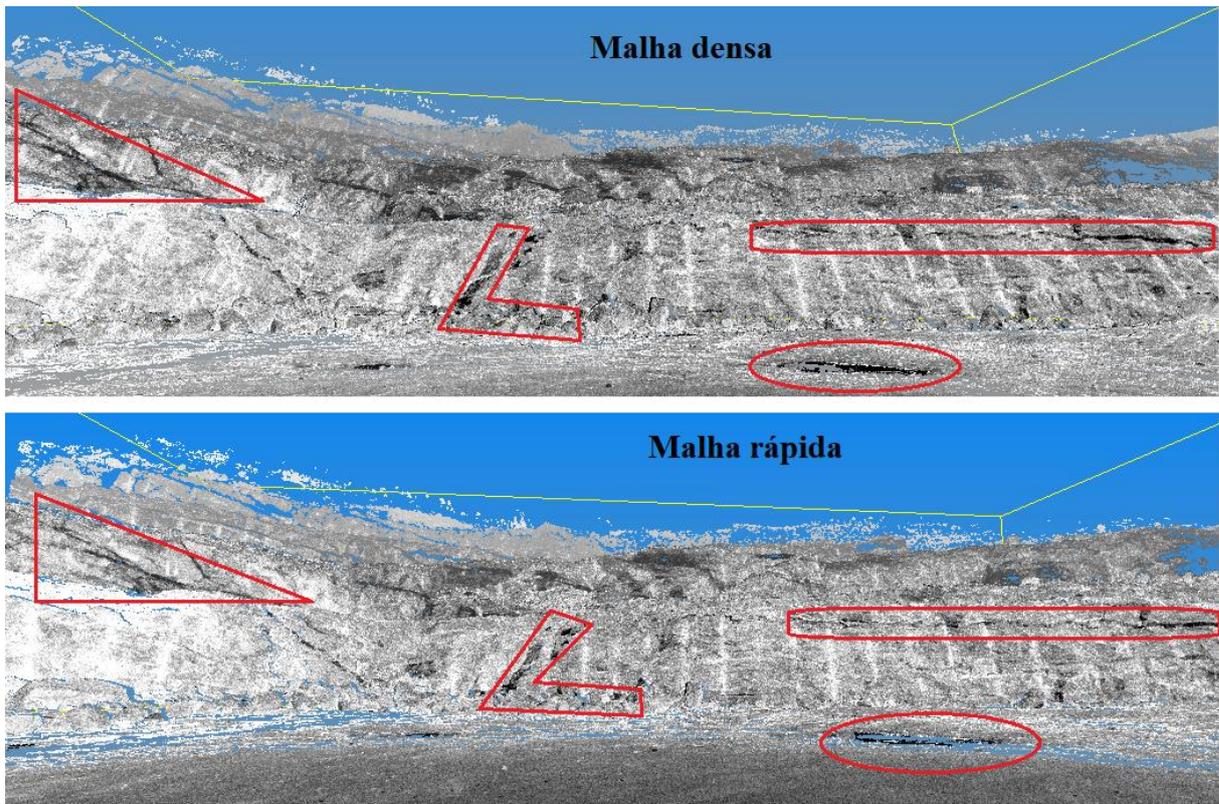
4.2 Análise e discussões dos resultados

4.2.1 Análise da reflectância na área do estudo

Neste tópico será abordada a viabilidade da utilização da técnica de imageamento utilizada como suporte ao trabalho desenvolvido, buscando parametrizar valores de reflectância tanto do calcário quanto das intrusões, ou seja, definindo limites de corte de reflectância que demonstrem a distinção entre minério e estéril. Desta forma, os valores de reflectância limite encontrados por esta metodologia serão utilizados como parâmetro para uma proposta de método alternativo para cálculo da diluição, que será apresentado no tópico 4.2.4.

Primeiramente foi realizada uma análise da distribuição dos valores de reflectância dentro de um determinado comprimento de onda do espectro eletromagnético, que para este caso corresponde aos 905 nanômetros, em relação à malha de pontos obtidas pelo *scanner*, ou seja, utilizando uma varredura com configuração densa (mais pontos) e uma configuração rápida (menos pontos), como mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Comparação das reflectâncias em diferentes malhas.



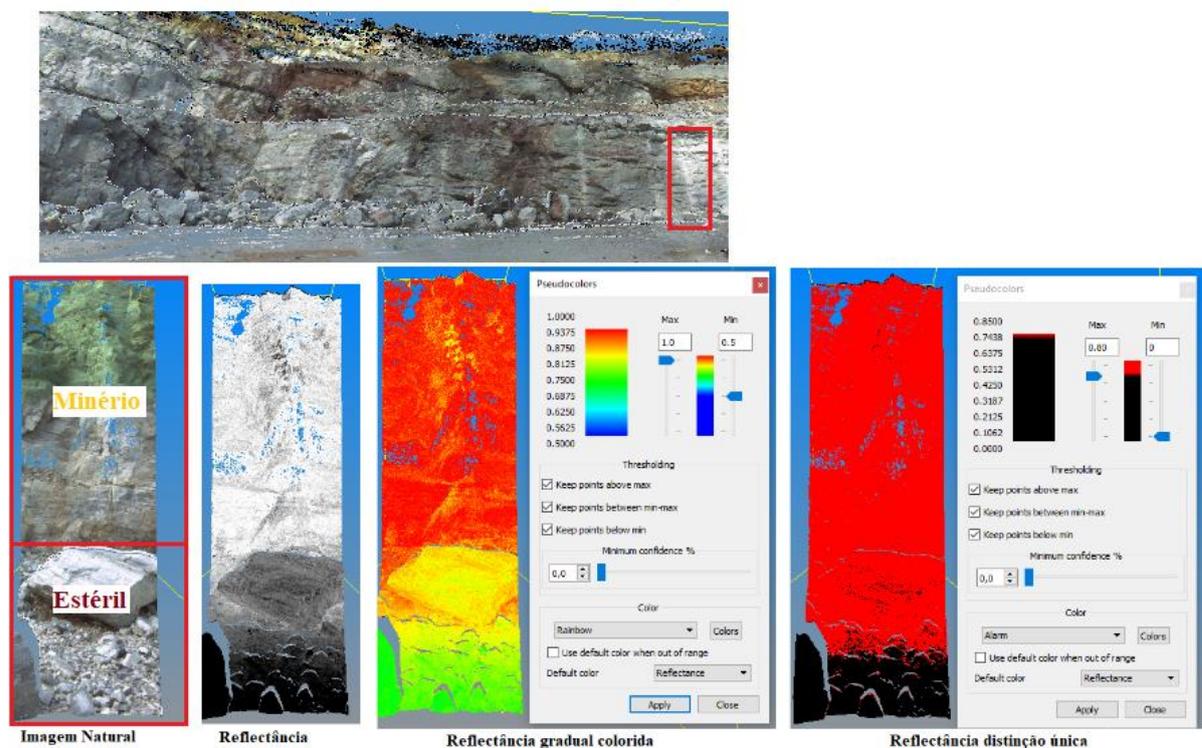
Fonte: Autor, *software Reconstructor*[®].

Na Figura 18 estão destacados em vermelho os pontos mais relevantes de identificação das litologias, assim como outros diversos locais na imagem também apresentam semelhanças entre si. As imagens de varredura do *scanner* apresentaram reflectâncias similares, independentes da configuração, ou seja, tanto na malha densa como na malha rápida, os pontos de reflectância são apresentados nas mesmas regiões com os mesmos valores, assim diferenciando as litologias presentes na bancada. A grande diferença fica restrita à quantidade de pontos visíveis na imagem, pois a malha rápida apresenta muito menos pontos do que a malha densa, assim resultando em alguns espaços vazios em determinados locais da imagem, ou até mesmo ao movimentar a nuvem de pontos no *software Reconstructor*[®].

A reflectância interpretada pelo *software* corresponde a uma variação em porcentagem, ou seja, a reflectância varia de 0 a 1. Essa reflectância capturada pelo *scanner* corresponde a um valor pontual de acordo com a emissão de radiância da rocha em relação ao comprimento de onda emitido pela luz *laser* do *scanner* STONEX X300, essa luz infravermelha possui um comprimento de onda de 905 nanômetros e é invisível ao olho humano.

Uma análise mais pontual foi realizada buscando identificar mais precisamente e numericamente os valores de reflectância para poderem ser usados nos próximos tópicos destes resultados. A Figura 19 demonstra varreduras restritas, com pequeno ângulo de abertura de levantamento em relação à bancada total, com o objetivo de verificar a efetividade das medidas de reflectância como critério para categorizar as diferentes litologias em diferentes situações, tais como, presença de litologias com cores ou texturas muito semelhantes ou muito distintas, bem como com diferentes características estruturais, como grau de fraturamento ou alteração.

Figura 19 – Levantamentos de reflectâncias em faixas restritas nas bancadas de calcário.



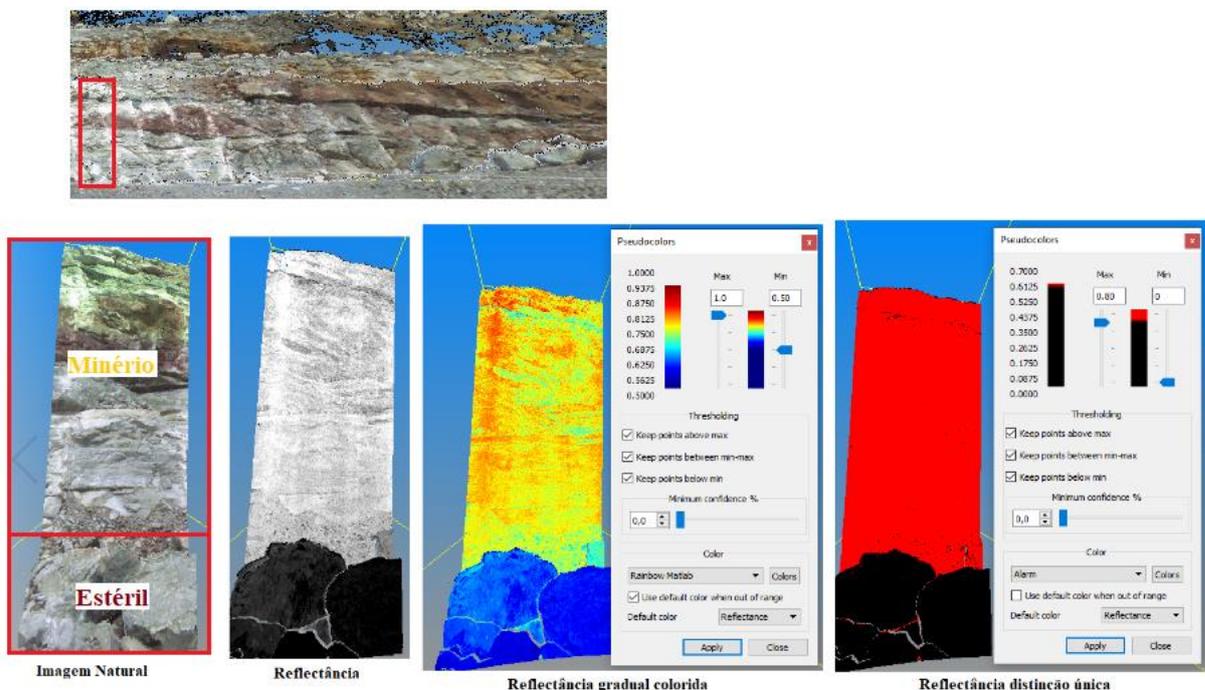
Fonte: Autor, *software Reconstructor*®.

Na Figura 19 utilizou-se de diferentes ferramentas de análise de reflectância para identificação das menores variabilidades de calcário presente nesta varredura. A “imagem natural” presente na Figura 19 realça a realidade encontrada *in situ* do material de acordo com o visível, já a reflectância apresentada em tons de cinza consegue diferenciar as litologias independente das cores das rochas ou da luz solar, enquanto a reflectância apresentando cores de forma gradual possibilita manusearmos um cursor buscando identificar a variação da reflectância nos diferentes calcários presente nessa varredura. Já a reflectância com distinção única possibilita de maneira mais pontual identificar quando a variação da reflectância está associada ao minério ou ao estéril, ou seja, na imagem os 0,80 (80% de reflectância) identificam

o contato considerado para separação entre calcários e estéreis, acima dos 0,80 são calcários e abaixo são estéreis não aproveitáveis no beneficiamento.

De acordo com SANTOS (2018) os calcários encontrados na região das caieiras apresentam diferentes colorações, dentre elas os tons de branco, cinza e rosa, com a presença de contaminantes silicáticos, na forma de bandamentos predominantemente esverdeados. Na Figura 19 pôde ser observado esses tons diferentes de calcário, assim como na Figura 20, a qual traz outro exemplo de análise da reflectância, demonstrando o mesmo método de análise em uma bancada diferente com maior variabilidade na coloração dos calcários.

Figura 20 - Reflectâncias referente a distintas cores do calcário.



Fonte: Autor, *software Reconstructor*[®].

Na Figura 20 também se utilizou de diferentes meios de reflectância para identificação das menores variabilidades de calcário presente nesta varredura. A “imagem natural” presente nesta figura é composta por uma maior gama de coloração de calcários distintos, já a reflectância demonstra que independente da coloração o calcário apresenta a mesma capacidade de reflectância, ou seja, a coloração não interfere na análise pelo método utilizando o *scanner a laser*. Já a reflectância apresentando cores de forma gradual demonstrou claramente que o material ao pé da bancada é um estéril, enquanto há uma pequena variabilidade espalhada de forma uniforme na bancada. A reflectância com distinção única correspondeu com a imagem de reflectância em tons de cinza, com valores de corte de 0,80 (80% de reflectância)

identificando a divisão considerada para separação dos calcários e dos estéreis, acima dos 0,80 são calcários e abaixo são estéreis não aproveitáveis no beneficiamento.

De acordo com a análise destes resultados e o estudo bibliográfico apresentado no Capítulo 3 item 2.3 que trata sobre reflectância, estipulou-se a reflectância para minério sendo valores maiores ou iguais que 0,8. Já para valores menores que 0,8 serão considerados intrusões. Estes valores de corte serão utilizados como base para o item 4.2.4 dos resultados, onde será implementada uma proposta alternativa para automação do cálculo de diluição. Apesar da baixa variabilidade entre as malhas densa e rápida, neste estudo todas as análises executadas utilizaram varredura com malha densa.

4.2.2 Análise da diluição utilizando software *Reconstructor*[®]

Utilizou-se a nuvem de pontos gerada nos processos de varredura no *software Reconstructor*[®], para precisão construtiva em modelagem 3D dos pontos obtidos. O *scanner a laser* realiza um mapeamento tão denso de pontos que a imagem gerada se assemelha muito a uma foto, quando o *zoom* é aplicado pode-se perceber os inúmeros pontos coletados milimetricamente.

Ao longo de 2019 e 2020 as atividades envolvendo o *scanner a laser* foram dedicadas ao mapeamento, interpretação e análise da diluição frente às bancadas de avanço na mineração de calcário. O modelo tridimensional composto pela nuvem de pontos pode ser trabalhado em formato que possibilita a identificação do estéril e do minério através da reflectância (Figura 21) ou mesmo de maneira colorida naturalmente pelo ambiente.

Figura 21 - Bancada de avanço de lavra representada pela nuvem de pontos de reflectância.



Fonte: Autor, *software Reconstructor*[®].

A reflectância auxilia na diferenciação das litologias através da reflectância natural de cada rocha. Assim como a visualização natural da cor ambiente das rochas, a reflectância apresentada pelo *software* possibilita fazer recortes mais precisos nas estruturas geológicas presentes na imagem, além de servir como parâmetro para uma definição quantitativa da diluição. A reflectância utilizada neste estudo conteve o espectro do visível (RGB, 380nm a 740 nm) e a reflectância em determinado comprimento de onda de 905 nm. O RGB apresenta cores ambientes naturais de cada objeto, enquanto o comprimento de onda de 905 nm apresenta tonalidades de cinza em sua variação na identificação da reflectância dos objetos escaneados.

Assim, enquanto para litologias com contatos bruscos a distinção entre as mesmas é mais direta, em litologias com contatos gradacionais a definição de minério e estéril é em grande parte baseada em critérios mais empíricos e baseados na experiência, o que pode levar a resultados controversos em termos de diluição.

A seguir será apresentado duas situações de cálculo de diluição através do *software Reconstructor*[®]. Foram analisadas diversas bancadas, contudo serão explicitadas neste tópico dois exemplos, pois a maneira de calcular a diluição é facilmente reproduzida para as mais diversas situações. Utilizando-se dos monitoramentos com o *scanner* pode-se calcular as áreas de diversas formações geológicas com diferentes irregularidades, inclusive da bancada como um todo, como demonstrado na Figura 22.

Figura 22 - Bancada de avanço de lavra com sua respectiva área.

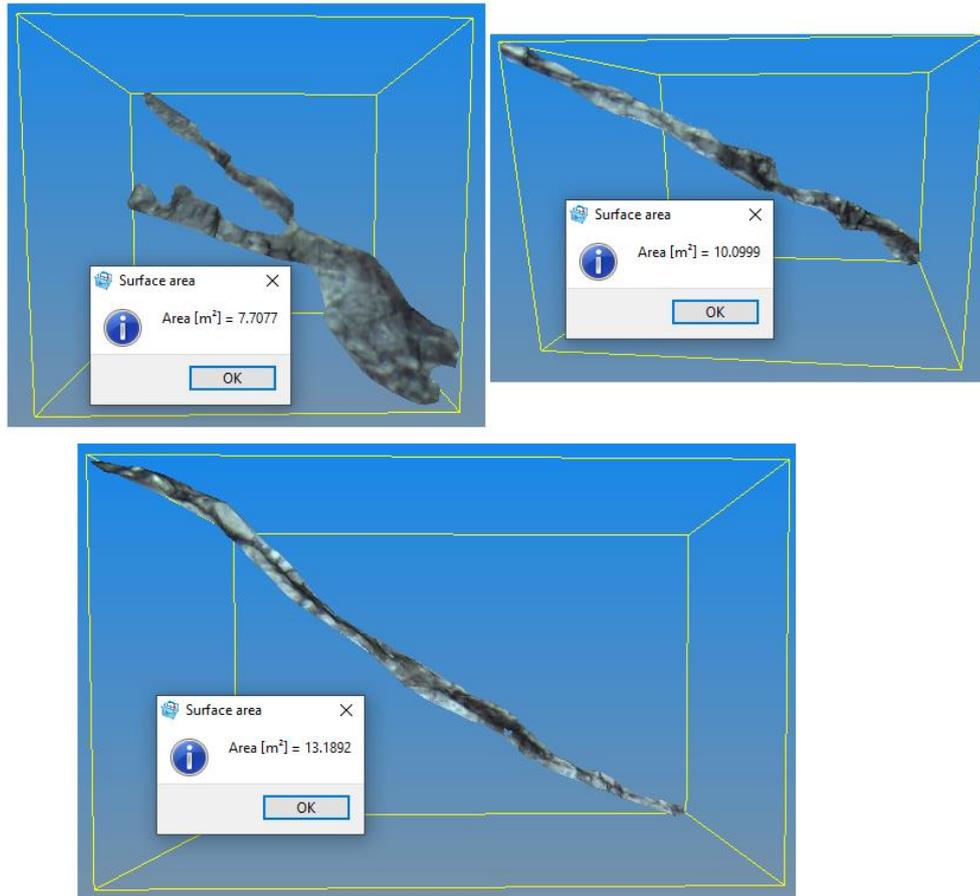


Fonte: Autor, *software Reconstructor*[®].

O recorte é realizado manualmente através do *software Reconstructor*[®], podendo ser visualizado e comparado também com modelos de reflectância, para obtenção de maior precisão na identificação das litologias. Assim consegue-se obter um recorte manual, tanto no minério como do estéril, de maneira mais precisa possível.

Posteriormente é identificado e separado o estéril do minério e calculado suas respectivas áreas, como mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Recorte das intrusões (estéril) e suas respectivas áreas.



Fonte: Autor, *software Reconstructor*®.

Sabendo as áreas das intrusões e da bancada total, podemos calcular a relação de diluição presente na bancada tanto em área como em volume, acrescentando o avanço realizado na bancada de acordo com a malha do plano de fogo. Para esta situação apresentada o avanço nessa bancada foi de 4 metros, essa distância é estimada, afinal é praticamente impossível conseguir um avanço exato e proporcional em toda a bancada após o desmonte com explosivos.

Foi realizado o monitoramento do pré e pós desmonte nas bancadas visando o reconhecimento das estruturas geológicas da face em relação ao avanço do desmonte. Porém o modelamento 3D dos avanços não foi possível por motivo de *software*, pois demanda muito do computador e infelizmente os computadores que temos na universidade não suportavam trabalhos com bancos de dados simultâneos. Entretanto foi observado que para as bancadas utilizadas neste estudo as estruturas geológicas permaneciam semelhantes após o avanço de 4m.

Desta forma foi utilizado em todos os trabalhos a relação das áreas das faces das bancadas com os respectivos avanços de 4 metros devido aos avanços causados pelo desmonte. Assim, podemos realizar os cálculos como apresentado logo abaixo.

Para a área de minério temos a área total menos a área das intrusões:

$$\text{Área Minério} = 538,87 \text{ m}^2 - 31,00 \text{ m}^2$$

$$\text{Área Minério} = 507,78 \text{ m}^2$$

Para calcularmos o volume de minério na bancada detonada teremos:

$$\text{Volume Minério} = 507,78 \text{ m}^2 \times 4 \text{ m}$$

$$\text{Volume Minério} = 2031,12 \text{ m}^3$$

Para averiguarmos a diluição ocorrida na bancada, aplicamos a relação do volume de estéril pelo volume total (minério + estéril), ambos multiplicados por 100 para obter um resultado em porcentagem, ou seja:

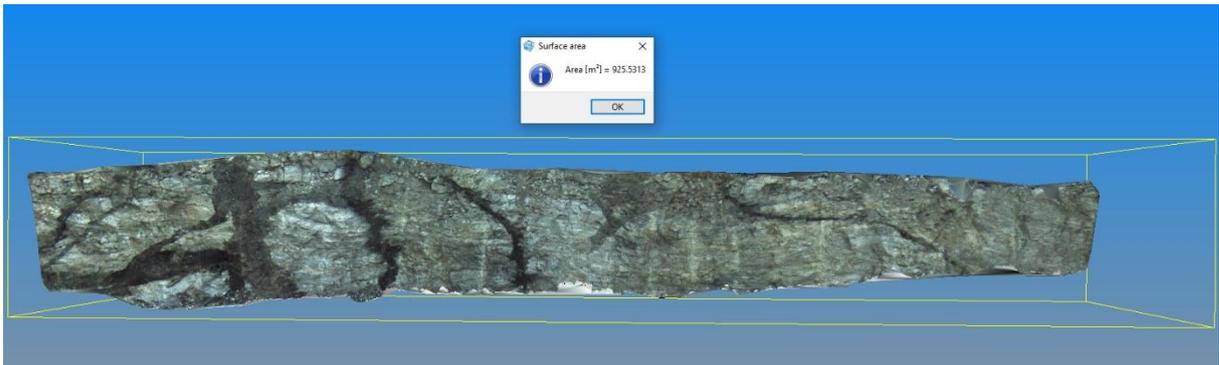
$$\text{Diluição} = \left(\frac{(31,00 \text{ m}^2 \times 4 \text{ m})}{(538,87 \text{ m}^2 \times 4 \text{ m})} \right) \times 100$$

$$\text{Diluição} = 5,75 \%$$

Com isso podemos correlacionar o fator diluição com outros aspectos referentes ao desmonte de rochas, como adequar o plano de fogo e/ou até mesmo verificar o custo x benefício dos desmontes em relação ao aumento do fator de diluição.

A próxima bancada apresentada possui uma extensão maior na horizontal, porém uma altura menor em relação a bancada anterior (Figura 24).

Figura 24 - Bancada de avanço de lavra com sua respectiva área.



Fonte: Autor, *software Reconstructor*®.

Podemos observar que a bancada possui diversas intrusões (estéril) e, com o auxílio do *software* e da análise da reflectância, foi possível realizar os recortes destas intrusões e suas respectivas áreas como mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Intrusões e suas respectivas áreas.



Fonte Autor, *software Reconstructor*®.

Assim como na bancada anterior, sabendo as áreas das intrusões e da bancada total, podemos calcular a relação de diluição presente na bancada tanto em área como em volume, acrescentando o avanço realizado na bancada de acordo com a malha do plano de fogo, que para essa bancada também foi de 4 metros. Assim, podemos realizar os cálculos como apresentado logo abaixo.

Para a área de minério temos a área total menos a área das intrusões:

$$\text{Área Minério} = 925,53 \text{ m}^2 - 131,35 \text{ m}^2$$

$$\text{Área Minério} = 794,18 \text{ m}^2$$

Para calcularmos o volume de minério na bancada detonada teremos:

$$\text{Volume Minério} = 794,18 \text{ m}^2 \times 4 \text{ m}$$

$$\text{Volume Minério} = 3176,72 \text{ m}^3$$

Novamente, averiguarmos a diluição ocorrida na bancada aplicando a relação do volume de estéril pelo volume total (minério + estéril):

$$\text{Diluição} = \left(\frac{(131,35 \text{ m}^2 \times 4 \text{ m})}{(925,53 \text{ m}^2 \times 4 \text{ m})} \right) \times 100$$

$$\text{Diluição} = 14,19 \%$$

A diluição apresentada nesta bancada é um pouco maior se comparada com a bancada anterior (diluição de 5,75%), resultado de um maior número de intrusões nesta bancada, o qual poder ser visivelmente identificado nas figuras apresentadas. A presente proposta de cálculo e análise da diluição pode ser feita para as mais diversas bancadas, proporcionando assim um maior conhecimento sobre a diluição presente na bancada em lavra, conseqüentemente auxiliando nos processos pré-desmonte, com planejamento do plano de fogo e dimensionamento da frota, assim como no pós-desmonte no controle do material e da tonelagem de minério e estéril realmente contida em determinada bancada.

Visando a validação da metodologia apresentada buscou-se realizar uma análise da diluição utilizada pela empresa, nas bancadas onde se realizou os monitoramentos. Na próxima etapa é realizada uma análise comparativa da diluição calculada neste trabalho com auxílio do *software Reconstructor*[®] e pelo método utilizado pela empresa.

4.2.3 Análise comparativa da diluição obtida através do scanner a laser e do método utilizado pela empresa.

Foram utilizadas duas bancadas nessa análise comparativa, não tendo sido possível realizar a análise com mais bancadas por representar um esforço maior por parte da empresa, devido à logística, organização de processo e pessoal para cálculo da diluição, processo que não é executado de maneira sistemática, além de outro fator dificultador que foi a ausência de balança, pois a mesma encontrava-se danificada.

Desta forma, para efeito de comparação, o corpo técnico da empresa forneceu os valores de diluição da empresa calculados a partir da quantificação da proporção entre minério e estéril *in situ* em cada bancada, por meio da análise de fotografias, medidas em campo e pela distribuição da malha de perfuração, formando um modelo 3D no *software AutoCad*. Esta etapa foi denominada análise do material *in situ*. Posteriormente, em etapa denominada análise do material desmontado, considerou-se o material carregado nos caminhões após o desmonte e mistura das rochas existentes (diluição). Para tal, foram contabilizadas as cargas de material oriundas do desmonte, que foram enviadas ou ao britador ou ao bota-fora, de acordo com a análise do operador de máquinas. Esta análise gera um erro intrínseco relacionado a este fator humano na seleção do minério e consequentemente na diluição calculada pela empresa em relação às cargas contabilizadas.

As bancadas com análise da diluição realizadas pela empresa, assim como as estimativas contabilizadas das cargas de material oriundas do desmonte, são apresentadas em toneladas como pode ser observado na Tabelas 2, onde consta o valor em tonelagem do material referente à bancada denominada bancada do “X” e, posteriormente, seus resultados são comparados com a diluição calculada pelo *software Reconstructor*[®]. Devido à ausência da balança, as cargas foram contabilizadas baseando-se na capacidade dos caminhões para as duas bancadas de estudo neste tópico, tanto para o minério quanto para o estéril.

Tabela 2 -Tonelagem de material carregado da bancada do "X" baseado nas cargas dos caminhões.

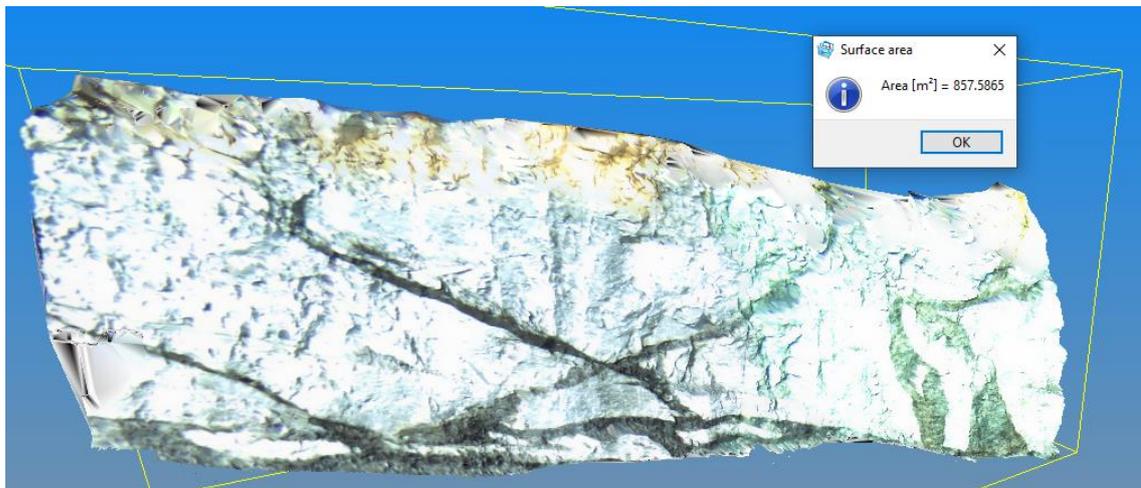
Bancada do X	Julho	
	Cargas	Toneladas
Bancada total	388,00	8738,53
Minério	364,00	8207,90
Estéril	24,00	530,63

Fonte: Autor.

Através dos resultados fornecidos pela empresa, foi possível calcular a diluição em função das toneladas de material, dividindo a tonelagem de estéril pela tonelagem total (minério + estéril). Assim, a diluição encontrada através das toneladas calculadas pela empresa correspondeu a cerca de 0,0607, ou seja 6,07% de diluição presente nesta bancada. Os dados de tonelagem de material foram fornecidos pela empresa, considerou-se incluída a densidade no cálculo da diluição para esta situação pois a mesma apresentava valores em tonelagem. Já para situações posteriores foi acrescentado o fator de densidade em função dos dados trabalhados serem representados em volume.

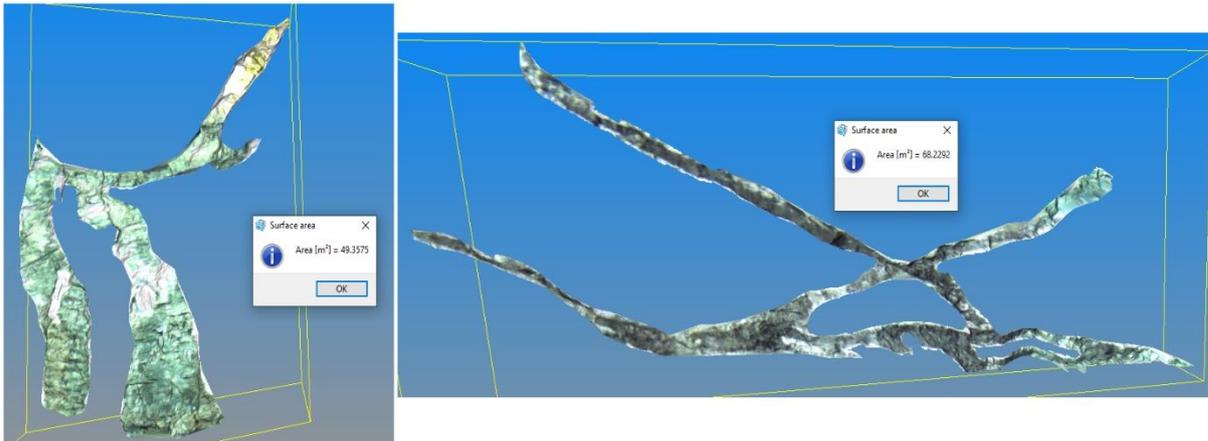
De acordo com as Figuras 26 e 27 podemos calcular a diluição da bancada do “X” e até mesmo a tonelagem extraída dessa bancada, assim obtendo valores para diluição através dos recortes de intrusões e da área total da bancada, ambos calculados pelo autor deste trabalho através do *software Reconstructor*[®] e, posteriormente, podemos realizar os cálculos de tonelagem de minério e de estéril.

Figura 26 - Bancada do “X” com sua respectiva área total.



Fonte Autor, *software Reconstructor*[®].

Figura 27 - Intrusões presentes na bancada do “X” e suas respectivas áreas.



Fonte: Autor, *software Reconstructor*®.

Para a área de minério temos a área total menos a área das intrusões:

$$\text{Área Minério} = 857,59 \text{ m}^2 - 111,59 \text{ m}^2$$

$$\text{Área Minério} = 746,00 \text{ m}^2$$

Para calcularmos o volume de minério na bancada detonada teremos:

$$\text{Volume Minério} = 746,00 \text{ m}^2 \times 4 \text{ m}$$

$$\text{Volume Minério} = 2984,00 \text{ m}^3$$

Aplicando a relação do volume de estéril pelo volume total (minério + estéril), ambos multiplicados por 100 para obter um resultado em porcentagem, obtemos:

$$\text{Diluição} = \left(\frac{(111,59 \text{ m}^2 \times 4 \text{ m})}{(857,59 \text{ m}^2 \times 4 \text{ m})} \right) \times 100$$

$$\text{Diluição} = 13,01 \%$$

Para comparação com os dados fornecidos pela empresa, faz-se necessário a conversão dos metros cúbicos de material para tonelagem. Essa conversão leva em consideração as densidades do material, ou seja, utilizaremos a densidade aproximada da rocha calcária (mármore) como sendo $2,7 \text{ t/m}^3$ *in situ*, para unidades de minério, e para unidades de estéril uma densidade aproximada de $2,5 \text{ t/m}^3$ *in situ*, pois o material estéril possui variabilidade entre quartzitos, xistos e outros apresentados na geologia local no Capítulo 3. As densidades

utilizadas neste trabalho seguiram estudos como SAMPAIO e ALMEIDA (2005) e BRITANITE (2020).

Para calcularmos o volume em toneladas de minério na bancada detonada teremos:

$$\text{Tonelagem de Minério} = 2984,00 \text{ m}^3 \times 2,7 \text{ t/m}^3$$

$$\text{Tonelagem de Minério} = 8056,8 \text{ toneladas}$$

Para calcularmos o volume em toneladas de estéril na bancada detonada teremos:

$$\text{Tonelagem de Estéril} = 446,36 \text{ m}^3 \times 2,5 \text{ t/m}^3$$

$$\text{Tonelagem de Estéril} = 1115,90 \text{ toneladas}$$

Ao todo nesta bancada obteve-se uma tonelagem total de 9172,7 toneladas de material. Visando estas tonelagens podemos recalcular a diluição em função disso, como segue:

$$\text{Diluição} = \left(\frac{(1115,90 \text{ ton})}{(9172,7 \text{ ton})} \right) \times 100$$

$$\text{Diluição} = 12,16 \%$$

Cabe salientar que nesta bancada, quando detonada, parte do material provindo do desmonte foi lançado na praça a jusante referente à bancada inferior, ou seja, parte no material não pôde ser contabilizado pela empresa como sendo exatamente desta bancada. Acredito que este seja um dos fatores que possibilitaram essa discrepância nas tonelagens encontradas entre o método pela empresa e o método utilizando o *scanner a laser*. Contudo a diluição encontrada através das tonelagens calculadas pela empresa correspondeu a cerca de 6,07% enquanto a diluição calculada através *software Reconstructor*[®] levando em consideração a tonelagem chegou a 12,16%, mais que o dobro encontrado pela empresa. A diluição menor encontrada pela empresa pode ter sido devido à formação de repé na bancada, afinal há uma quantidade significativa de material estéril presente nesta porção da bancada. Com a formação do repé esse material ficou *in situ*, logo não foi contabilizado para o cálculo de tonelagem como estéril, gerando assim uma menor diluição e conseqüentemente um valor discrepante ao apresentado através da varredura com o *scanner a laser*.

Já na Tabela 3 consta o valor em tonelagem do material referente a bancada denominada bancada Fontinha e, posteriormente, são comparadas com a diluição calculada através do *software Reconstructor*[®].

Tabela 3 - Tonelagem de material carregado da bancada Fontinha baseado nas cargas dos caminhões.

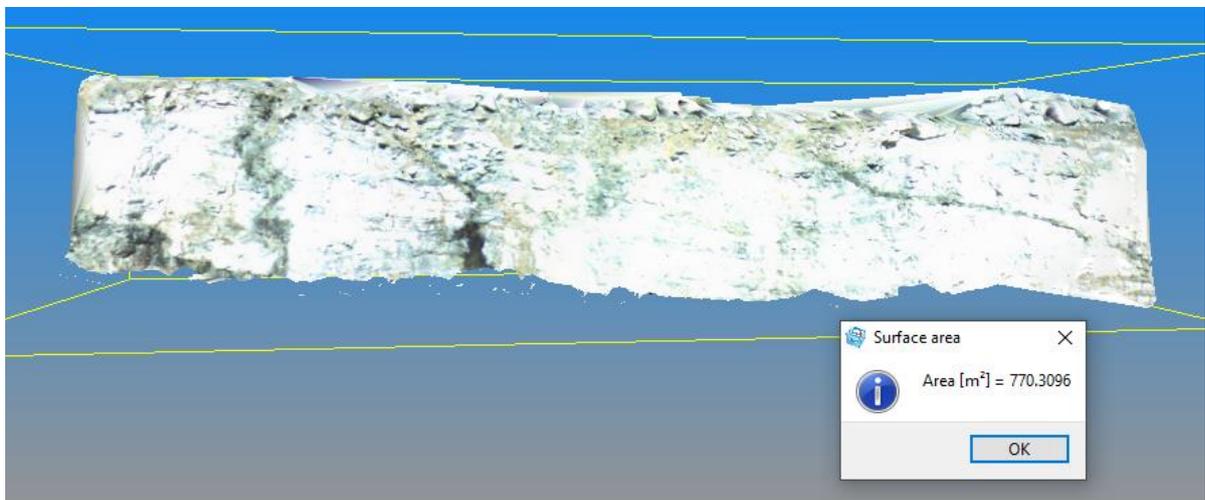
Bancada Fontinha	Maio/Junho	
	Cargas	Toneladas
Bancada total	392,00	8549,26
Minério	347,00	7552,06
Estéril	45,00	997,21

Fonte: Autor.

Da mesma forma como demonstrado anteriormente calcula-se a diluição, que para esta bancada correspondeu a cerca de 0,1166, ou seja 11,66% de diluição presente nesta bancada.

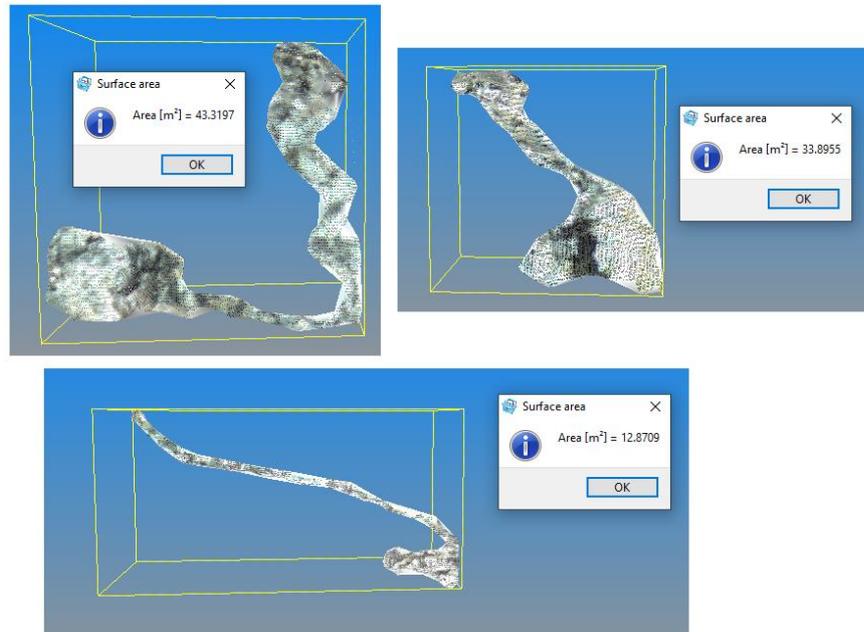
De acordo com as Figuras 28 e 29 podemos calcular a diluição da bancada Fontinha e até mesmo a tonelagem extraída dessa bancada, assim obtendo valores para diluição, tonelagem de minério e de estéril.

Figura 28 - Bancada Fontinha com sua respectiva área total.



Fonte: Autor, *software Reconstructor*[®].

Figura 29 - Intrusões presentes na bancada Fontinha e suas respectivas áreas.



Fonte: Autor, *software Reconstructor*®.

Para a área de minério temos a área total menos a área das intrusões:

$$\text{Área Minério} = 770,31 \text{ m}^2 - 90,09 \text{ m}^2$$

$$\text{Área Minério} = 680,22 \text{ m}^2$$

Para calcularmos o volume de minério na bancada detonada teremos:

$$\text{Volume Minério} = 680,22 \text{ m}^2 \times 4 \text{ m}$$

$$\text{Volume Minério} = 2720,88 \text{ m}^3$$

Para averiguarmos a diluição ocorrida na bancada aplicamos a relação do volume de estéril pelo volume total (minério + estéril), ambos multiplicados por 100 para obter um resultado em porcentagem, ou seja:

$$\text{Diluição} = \left(\frac{(90,09 \times 4) \text{ m}^2}{(770,31 \times 4) \text{ m}^2} \right) \times 100$$

$$\text{Diluição} = 11,70 \%$$

A diluição apresentada nesta bancada resultou em 11,7 %, ou seja, a cada unidade de minério temos 11,7 % dessa unidade em estéril.

Assim como para bancada anterior, nessa bancada foi necessário a conversão dos metros cúbicos de material para tonelagem. Essa conversão leva em consideração as densidades do material, ou seja, utilizaremos a densidade aproximada da rocha calcária (mármore) como sendo 2,7 para unidades de minério e para unidades de estéril uma densidade aproximada de 2,5, as quais já foram utilizadas anteriormente.

Para calcularmos o volume em toneladas de minério na bancada detonada teremos:

$$\text{Tonelagem de Minério} = 2720,88 \text{ m}^3 \times 2,7 \text{ t/m}^3$$

$$\text{Tonelagem de Minério} = 7346,376 \text{ toneladas}$$

Para calcularmos o volume em toneladas de estéril na bancada detonada teremos:

$$\text{Tonelagem de Estéril} = 360,36 \text{ m}^3 \times 2,5 \text{ t/m}^3$$

$$\text{Tonelagem de Estéril} = 900,9 \text{ toneladas}$$

Ao todo nesta bancada obteve-se uma tonelagem total de 8247,276 toneladas de material. Visando estas tonelagens podemos recalcular a diluição em função disso, como segue:

$$\text{Diluição} = \left(\frac{(900,90 \text{ ton})}{(8247,276 \text{ ton})} \right) \times 100$$

$$\text{Diluição} = 10,92 \%$$

Nesta bancada obteve-se resultados semelhantes, tanto nas tonelagens de minério como na própria diluição da bancada. A diluição encontrada através das tonelagens calculadas pela empresa correspondeu a cerca de 11,66% enquanto a diluição calculada pelo *software Reconstructor*[®] levando em consideração a tonelagem chegou a 10,92%, ou seja, valores muito próximos independentemente do método de análise da diluição. Esses valores próximos provavelmente ocorreram devido esta ser uma bancada de praça principal, ou seja, o lançamento provindo do desmonte não foi dispersado em outras bancadas. Outro fator é que nessa bancada

não houve repés, conseqüentemente a contabilização de tonelagens correspondeu aos valores encontrados através da varredura da face da bancada pelo *scanner a laser*.

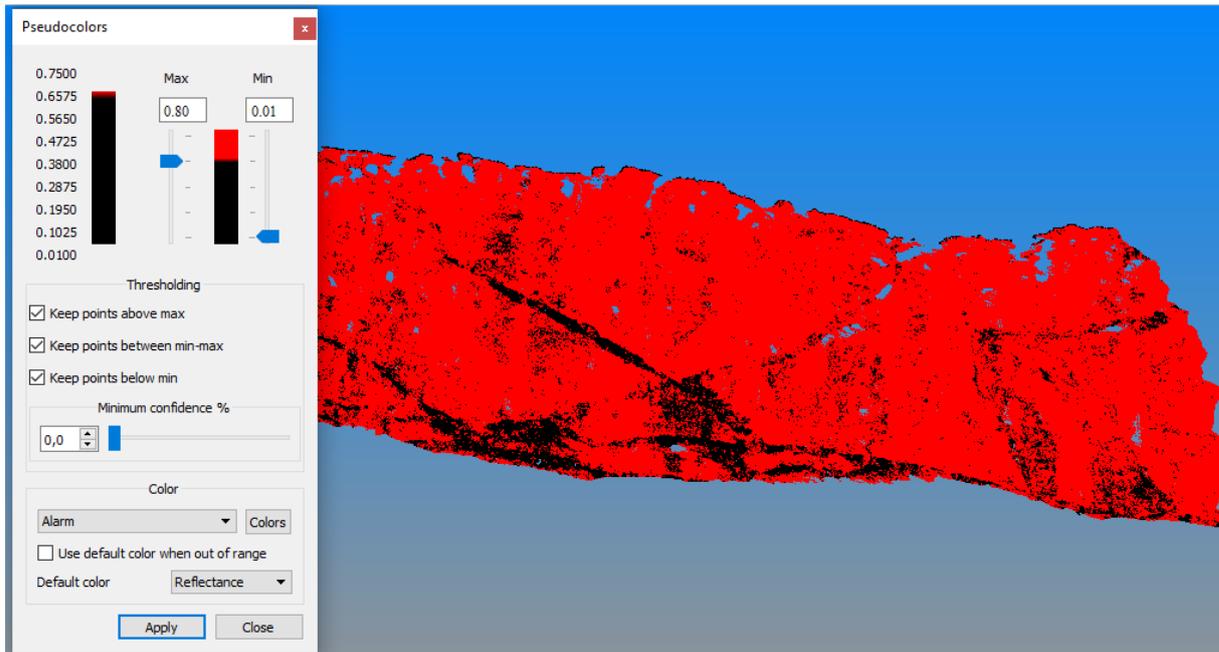
4.2.4 Análise dos resultados através de metodologia alternativa de automação do cálculo de diluição

A partir dos resultados obtidos nos tópicos anteriores e com o objetivo de otimizar a quantificação da diluição presente nas bancadas de avanços de lavra, desenvolveu-se uma metodologia que automatizasse esse processo de categorização das litologias entre minério e estéril com a conseqüente avaliação da diluição.

Utilizando-se do *software Surfer*, buscou-se elaborar uma planilha que mapeasse automaticamente os valores das áreas representativas de cada ponto de reflectância e calculasse a diluição em função desses pontos de reflectância obtidos através do *scanner a laser*. A opção pelo *software Surfer* foi tomada em função da capacidade de suportar a quantidade de pontos que compõe uma nuvem de levantamento em sua tabela. No quesito aplicação de fórmulas o Excel é melhor, contudo, sua capacidade de linhas suporta no máximo um valor 1.048.576, ou seja, caso o banco de dados seja menor que esse valor pode-se utilizar o Excel como meio para os cálculos apresentados a seguir. Todavia, caso necessário trabalhar com mais pontos, pode-se utilizar o *software Surfer*.

A seguir é apresentada na Figura 30 a definição de limite entre minério e estéril baseada na análise da reflectância realizada no tópico 4.2.1, assim como a definição do valor de 0,8 como divisor entre essas duas classificações do material *in situ*. Já a Figura 31 apresenta as colunas necessárias para realização dos cálculos até chegamos à diluição da bancada, considerando suas dimensões.

Figura 30 - Reflectância por distinção única da bancada do “X”.



Fonte: Autor, software Reconstructor®.

Figura 31 - Planilha com os cálculos de análise da diluição da bancada do “X”.

Surfer - [bancada do x surfer*]

File Edit View Format Data Tools Window Help

X: 0 Y: 0 W: 0 H: 0

Plot1 bancada do x surfer*

	N9			D	E	F	G	H	I	J	K
	A	B	C								
1	Bancada do X										
2	X	Y	Z	Reflectância	área por ponto	Classificação	Minério (área)	Estéril (área)	Área total	Área estéril	Diluição (%)
3	-5,048	33,095	13,337	0,575891	15,21	estéril	0	15,21	27153348	3737811,9	13,765654839
4	-5,034	33,096	13,336	0,557137	15,21	estéril	0	15,21			
5	-5,022	33,099	13,337	0,555169	15,21	estéril	0	15,21			
6	-5,073	33,085	13,319	0,545342	15,21	estéril	0	15,21			
7	-5,06	33,093	13,321	0,599573	15,21	estéril	0	15,21			
8	-5,048	33,097	13,322	0,637781	15,21	estéril	0	15,21			
9	-5,035	33,099	13,322	0,692561	15,21	estéril	0	15,21			
10	-5,022	33,099	13,321	0,626078	15,21	estéril	0	15,21			
11	-5,008	33,099	13,32	0,556863	15,21	estéril	0	15,21			
12	-4,852	33,165	13,337	0,569009	15,21	estéril	0	15,21			
13	-4,841	33,181	13,343	0,555886	15,21	estéril	0	15,21			
14	-4,84	33,221	13,359	0,596918	15,21	estéril	0	15,21			
15	-4,83	33,247	13,368	0,609918	15,21	estéril	0	15,21			
16	-4,811	33,254	13,37	0,572381	15,21	estéril	0	15,21			
17	-5,079	33,086	13,304	0,547387	15,21	estéril	0	15,21			
18	-5,06	33,089	13,304	0,632914	15,21	estéril	0	15,21			
19	-5,054	33,092	13,305	0,689235	15,21	estéril	0	15,21			
20	-5,041	33,096	13,306	0,755032	15,21	estéril	0	15,21			
21	-5,028	33,097	13,306	0,758618	15,21	estéril	0	15,21			
22	-5,015	33,099	13,306	0,68191	15,21	estéril	0	15,21			
23	-5,003	33,105	13,307	0,574746	15,21	estéril	0	15,21			
24	-4,99	33,107	13,307	0,552407	15,21	estéril	0	15,21			
25	-4,97	33,11	13,307	0,587274	15,21	estéril	0	15,21			
26	-4,957	33,11	13,307	0,601373	15,21	estéril	0	15,21			
27	-4,944	33,114	13,307	0,596094	15,21	estéril	0	15,21			

Fonte: Autor, software Surfer.

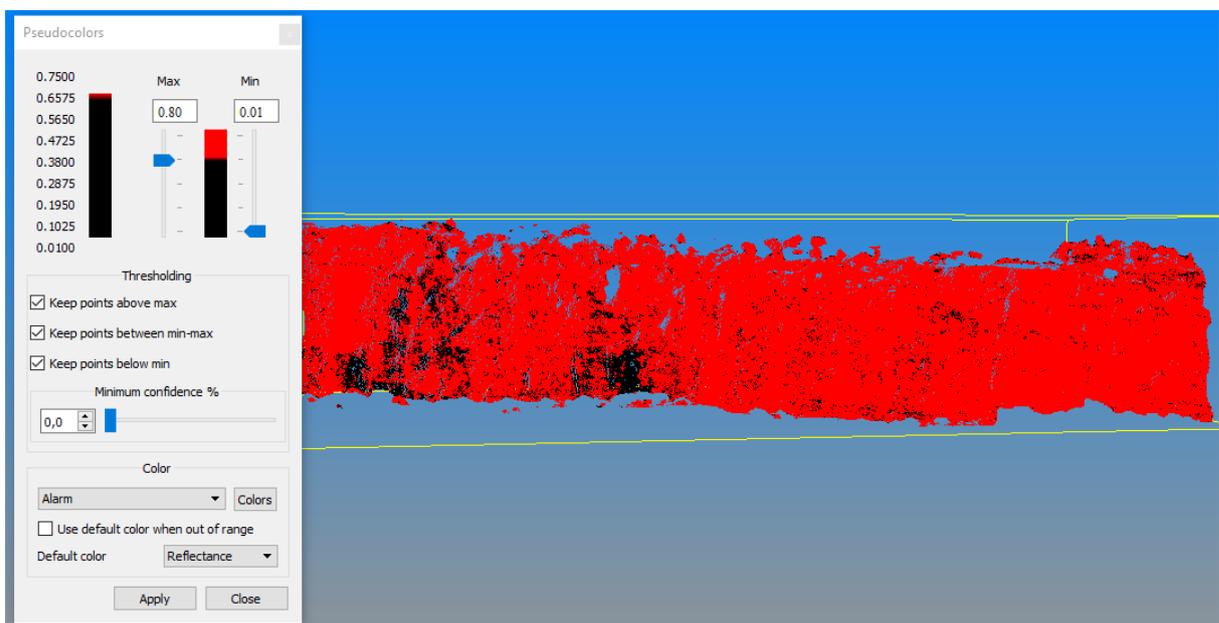
Primeiramente, os pontos de reflectância são identificados automaticamente por suas coordenadas, como mostrado nas três primeiras colunas da planilha (A, B, C). A 4ª coluna, ou seja, coluna D, é o valor de reflectância de cada ponto determinado e medido pelo *scanner* a

laser. As colunas seguintes (E, F, G, H, I, J e K) são calculadas através de equações matemáticas específicas ao que se deseja, ou seja, nas colunas E, F, G e H são usadas equações condicionantes, de maneira a identificar a reflectância do ponto por meio de um condicionante específico, como exemplo podemos citar a porcentagem de reflectância do ponto; conseqüentemente, essa porcentagem servirá como critério de categorização entre minério ou estéril e, assim, podemos obter a área de influência de cada ponto, lembrando que a área representativa de cada ponto foi apresentada no Capítulo 2 deste trabalho, ou seja, sabemos o espaçamento do grid então sabemos qual a área de influência correspondente.

A partir dos resultados das áreas dos minérios e dos estéreis, podemos calcular a diluição presente na face da bancada e, em seguida, podemos acrescentar os avanços específicos de cada bancada para obtermos os valores em volumes, assim como utilizarmos da conversão para tonelagem para obtermos valores em massa do total de minério e/ou estéril. É importante salientar que na medida que temos esse valores de diluição presente na face da bancada, o pequeno avanço, sendo ele proporcional em toda bancada, não influenciará na diluição pré-calculada, ou seja, a diluição da face será a mesma diluição depois de realizada a conversão para o volume de material desmontado.

As Figuras 32 e 33 a seguir representam a mesma abordagem para a bancada da Fontinha. Na Figura 32 é utilizado o padrão de 0,8 de reflectância como limite entre o que é minério e o que é estéril e na Figura 33 são apresentados os cálculos até a diluição.

Figura 32 - Reflectância por distinção única da bancada da Fontinha.



Fonte: Autor, *software Reconstructor*®.

Figura 33 - Planilha com os cálculos de análise da diluição da bancada da Fontinha.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Bancada	Fontinha									
2	X	Y	Z	Reflectância	Área por ponto	Classificação	Minério (área)	Estéril (área)	Área total	Área estéril	Diluição (%)
3	52,403	-8,476	8,466	0,844099	15,21	minério	15,21	0	3056084,5	340171,65	11,130963492665
4	52,396	-8,518	8,466	0,836637	15,21	minério	15,21	0			
5	52,388	-8,558	8,466	0,811688	15,21	minério	15,21	0			
6	52,395	-8,443	8,421	0,808225	15,21	minério	15,21	0			
7	52,383	-8,494	8,421	0,808347	15,21	minério	15,21	0			
8	52,384	-8,537	8,422	0,79321	15,21	estéril	0	15,21			
9	52,377	-8,578	8,422	0,808316	15,21	minério	15,21	0			
10	52,38	-8,621	8,424	0,802518	15,21	minério	15,21	0			
11	52,382	-8,663	8,425	0,783688	15,21	estéril	0	15,21			
12	52,391	-8,707	8,428	0,756771	15,21	estéril	0	15,21			
13	51,636	-7,284	8,233	0,725246	15,21	estéril	0	15,21			
14	51,655	-7,328	8,237	0,791897	15,21	estéril	0	15,21			
15	52,4	-8,392	8,378	0,808164	15,21	minério	15,21	0			
16	52,377	-8,43	8,376	0,835782	15,21	minério	15,21	0			
17	52,369	-8,471	8,375	0,786587	15,21	estéril	0	15,21			
18	52,372	-8,514	8,377	0,79559	15,21	estéril	0	15,21			
19	52,365	-8,555	8,377	0,769757	15,21	estéril	0	15,21			
20	52,368	-8,597	8,378	0,815549	15,21	minério	15,21	0			
21	52,379	-8,642	8,381	0,805081	15,21	minério	15,21	0			
22	52,38	-8,684	8,382	0,775128	15,21	estéril	0	15,21			
23	51,593	-7,216	8,183	0,710903	15,21	estéril	0	15,21			
24	51,605	-7,259	8,186	0,738155	15,21	estéril	0	15,21			
25	51,618	-7,302	8,188	0,791547	15,21	estéril	0	15,21			
26	51,623	-7,345	8,19	0,779843	15,21	estéril	0	15,21			
27	51,647	-7,389	8,195	0,76347	15,21	estéril	0	15,21			
28	52,381	-8,41	8,333	0,825544	15,21	minério	15,21	0			

Fonte: Autor, *software Surfer*.

A utilização das equações matemáticas nesta bancada seguiu as mesmas abordadas na bancada do “X”, assim obtendo uma diluição de 11,13% na bancada da Fontinha, sendo um resultado aproximado ao encontrado através do *software Reconstructor*[®] que foi de 11,70% e ao resultado encontrado pela empresa que ficou próximo a 11,66%. No entanto, a bancada do “X” resultou em uma diluição de 13,76% pelo cálculo realizado através do *software Surfer*, sendo um resultado aproximado ao encontrado através do *software Reconstructor*[®] que foi de 13,01%, porém distante do resultado encontrado pela empresa que ficou próximo a 6,07%. Ou seja, o método utilizado neste tópico corrobora em favor do cálculo realizado pelo *software Reconstructor*[®], tornando-o assim mais confiável.

A ideia central da metodologia apresentada neste tópico foi propor essa análise e cálculos de diluição por meio alternativo ao uso do *software Reconstructor*[®], visto que o mesmo demanda de um computador mais potente para se trabalhar, enquanto a metodologia alternativa para automação do cálculo de diluição utilizando o *software Surfer* é bem mais leve, exigindo menos do computador, com configuração mínima sugerida de um processador de 3^o geração compatível com intel i3 ou equivalente, memória ram de 4Gb e sem a necessidade de placa de vídeo, assim possibilitando trabalhar com milhares de pontos de reflectância, além de não exigir que o operador domine ferramentas de desenho do *software* ou necessite tomar decisões nem

sempre triviais no momento de interpretar e modelar as envoltórias dos corpos de estéril e minério. Caso seja necessário utilizar o *software Reconstructor*[®] recomenda-se uma configuração mínima de um processador de 9^o geração compatível com intel i7 3.4 GHz ou equivalente, memória ram de 8Gb e placa de vídeo Ge Force GTX 1650 ou equivalente além de uma capacidade maior de armazenamento.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões desta dissertação, baseado nos trabalhos realizados e nos resultados obtidos, assim como feitas algumas considerações finais e sugeridas propostas de estudos futuros que vierem a utilizar o *scanner a laser* em ambiente de mineração.

5.1 Sumário dos resultados obtidos

Os resultados demonstraram que os valores obtidos de diluição através do *software Reconstructor*[®] são confiáveis, os métodos de análise através do *software* proporcionam grande precisão no reconhecimento das áreas de minérios e estéril. Além da técnica de imageamento por cor ambiente também temos a presença da reflectância, um parâmetro quantitativo que demonstra valores em forma de cores para nos auxiliar na identificação das litologias, assim, eliminando em parte o caráter empírico e subjetivo associado com a definição visual de contatos litológicos e definição das envoltórias de estéril e minério.

Os valores de diluição obtidos nas bancadas da Fontinha e do “X” são sumarizados na Tabela 4, a seguir:

Tabela 4 - Resultados das diluições calculadas por diferentes métodos.

Diluição Bancada do X			Diluição Bancada Fontinha		
Empresa	<i>Reconstructor</i> [®]	Método Alternativo	Empresa	<i>Reconstructor</i> [®]	Método Alternativo
6,07%	12,16%	13,76%	11,66%	10,92%	11,13%

Fonte: Autor.

Percebeu-se que para a bancada do “X” houve uma discrepância maior que o dobro entre os valores de diluição encontrados pela empresa e os valores encontrados pelos *softwares* utilizados, o que pode ter ocorrido devido à detonação de parte superior de outra bancada concomitante à bancada monitorada. Como parte do material desta bancada foi lançado na bancada inferior e o repé formado, acarretou-se um cálculo impreciso em relação ao real volume da bancada monitorada. Por outra perspectiva, podemos dizer que o método utilizado pela empresa nos cálculos dos volumes não proporciona a precisão e a confiabilidade dos métodos utilizados através do *software Reconstructor*[®] e da metodologia alternativa para automação do cálculo da diluição utilizando o *software Surfer*. A empresa não utilizou a balança para pesar as cargas, pois estava danificada, assim como as medições e cálculos da diluição realizados pela

empresa utilizaram o *software AutoCad*, o qual não demonstra valores de reflectância dos materiais como os outros dois *softwares* utilizados neste trabalho.

Já para na bancada Fontinha, a análise comparativa apresentou diluições muito semelhantes ao método utilizado pelas três técnicas. Contudo cabe salientar que os métodos por desenho das envoltórias são empíricos, já o método alternativo classifica minério e estéril de maneira quantitativa, pela análise da reflectância, então não está sujeito a critérios subjetivos associados com a experiência do responsável pela definição, além de não requerer um *software* específico de desenho ou modelamento. Outro aspecto dessa aproximação entre as diluições está no fato de que a bancada se encontra na praça principal, ou seja, não houve lançamento de material em bancada inferior, assim como também não houve desmonte de bancada superior, acarretando um maior controle, por parte da empresa, do material detonado.

5.2 Proposta metodológica

A proposta metodológica apresentada neste trabalho estabeleceu-se nos embasamentos teóricos sobre a técnica de utilização do *Scanner a Laser* e do *software Reconstructor*[®], assim como as práticas com o equipamento e trabalhos realizados nas mais diversas áreas.

O uso do *Scanner a Laser* e do *software Reconstructor*[®] vão muito além do apresentado nesta metodologia. Contudo o grande enfoque deste trabalho está na análise da diluição através da reflectância dos materiais, pois demonstra valores reais das litologias encontradas em ambiente de mineração, proporcionando estratégias de identificação e distinção entre minério e estéril.

O presente trabalho apresentou uma ideia central abordada por duas metodologias alternativas de cálculo e análise da diluição, onde ambas levam em consideração a reflectância dos materiais presentes nas bancadas. Essa reflectância é natural de cada mineral, assim podemos diferenciar o minério do estéril e proporcionar uma relação de diluição *in situ* em qualquer bancada, tornando assim um trabalho vantajoso para empresa, favorecendo um conhecimento maior sobre sua jazida e até mesmo um controle mais específico nos avanços de lavra de cada bancada e para uma diluição extremamente difícil de ser gerenciada como neste estudo de caso sobre o calcário (mármore) de Caçapava do Sul.

A diluição é um dos fatores mais importantes a serem analisados em ambiente de mineração, pois através de seu reconhecimento devemos adequar o plano de fogo, definir a frota e o destino do material detonado nas cavas. A diluição tem impacto direto na economia da

empresa, afetando assim toda sua estrutura comercial, ou seja, uma diluição muito grande pode acarretar gastos desnecessários, perda de mercado e impacto de longo prazo no funcionamento da empresa. Cabe a empresa conhecer sua jazida, estudar sua diluição e os impactos que ela causa, assim como planejar o futuro da empresa de maneira consciente e perspicaz.

5.3 Recomendações

Através dos estudos já realizados e da proposta metodológica abordada neste trabalho, consegue-se visualizar inúmeras oportunidades de implementação do *scanner a laser* e das técnicas de interpretação da reflectância no reconhecimento de litologias.

Além da análise da diluição a empresa pode realizar um mapeamento completo de suas cavas com o *scanner a laser*, visando um reconhecimento da jazida e das litologias presentes nela, identificando suas diluições para poder adequar um planejamento de longo prazo condizente com a realidade.

Sabe-se que diversos fatores influenciam na exploração de minérios, contudo pode-se utilizar o *scanner a laser* em diferentes setores da mineração além da análise da diluição, algumas recomendações do uso do equipamento são apresentadas abaixo:

- i. auxílio da caracterização e identificação estratigráfica das litologias presente na jazida e em seu entorno, com o auxílio da reflectância dos minerais captada pelo equipamento;
- ii. mapeamento do terreno e das cavas pré e pós desmonte, através de reconhecimento da topografia desses ambientes;
- iii. mapeamento das vias de acessos e das estruturas prediais da empresa, controlando dimensões mínimas necessárias ao tráfego de veículos e reconhecimento 3D do ambiente da empresa, favorecendo assim possíveis alterações e planejamento futuros em função da estrutura arquitetônica da empresa.

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, poderiam ser implementadas computacionalmente, rotinas para automatização do processo de classificação da litologia e cálculo de diluição em uma linguagem de programação, de maneira a eliminar a necessidade de pré e pós processamento dos levantamentos obtidos pelo *laser scanner*. Uma rotina que tivesse como *input* o arquivo bruto do levantamento, com a reflectância associada à nuvem de pontos e que, como *output*, fornecesse um arquivo de saída com as categorias de minério e

estéril já definidas além da diluição estimada, de maneira expedita, seria de extrema utilidade para as empresas.

Neste trabalho foi utilizado o comprimento de onda do visível (RGB, 380-740nm) e infravermelho de onda curta de 905nm no auxílio dos recortes das litologias. Poderia ser investigada a apresentação de diferentes comprimentos de onda, mas isso demandaria nova pesquisa complementar e a realização de testes de veracidade para implementação de novas técnicas, assim como a metodologia apresentada nesta dissertação.

CAPÍTULO 6

6 REFERÊNCIAS

ALANO, M. A. V. **Pesquisa de calcário: relatório final**. Inédito. Caçapava do Sul, 1974.

BAPTISTA, Candido Francisco de Avila. **Metodologia de avaliação de impactos ambientais para o sistema de gestão ambiental proposto pela NBR ISO 14001:2004 – estudo de caso mina do mangueirão**. Caçapava do Sul - RS. Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, Campus Caçapava do Sul. Mestrado em Tecnologia Mineral, 2015.

BARCHIK, Evandra *et al.* **Aplicação do Scanner Terrestre ILRIS – 3D no Ramo da Mineração**. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3631-3635.

BELLIAN, Jerome A.; KERANS, Charles; JENNETTE, David C. **Digital Outcrop Models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling**. Journal of Sedimentary Research, v. 75, n. 2, p. 166-176, 2005.

BITENCOURT, M. F. **Metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS: geologia e relações com o corpo granítico**. Simpósio Sul-brasileiro de Geologia, v. 1, p. 37-48, 1983.

BORBA, Andre Weissheimer de. **Evolução geológica da "Bacia do Camaquã"(Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul-riograndense, RS, Brasil): uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica**. Porto Alegre, Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 110p, 2006.

BORBA, A.W.; SOUZA, L.F. **The Pampa of southernmost Brazil: a region requiring geoconservation and geopark strategies**. In: European Geoparks Conference, Lesvos, Abstracts. p. 147. Grécia, 2010.

BORTOLOTTI, O. J. **Petrografia dos mármore de Caçapava do Sul**. Ciência e Natura: V. 9 - p. 37-65, (1987).

BRANDÃO, W.; SCCHOBEMHAUS FILHO, C. **Geologia dos calcários e dolomitos**. BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. Principais Depósitos Mineraiis do Brasil, Brasília, v. 4, 1997.

BRITANITI. **Eblasting Pocket Guide**: tabelas – densidade média dos materiais. Disponível em: <<http://www.integracenter.com.br/portfolio/britanite/densidade.html>>, acesso em 19 de abril de 2020.

BUTCHER, R. J. **Dilution control in Southern African mines**. In: Proceedings, MassMin 2000 Conference. Australasian Institute of Mining and Metallurgy. p. 113-118, 2000.

CÂMARA, Taís Renata. Sistematização do cálculo de diluição e perdas operacionais para reconciliação de teores e massas em larva a céu aberto. Dissertação de Mestrado - UFRGS, Porto Alegre, 2013.

CÂMARA, Taís Renata; PERONI, Rodrigo de Lemos. **Quantifying dilution caused by execution efficiency**. REM-International Engineering Journal, v. 69, n. 4, p. 487-490, 2016.

CÂMARA, Taís Renata *et al.* **Controlling operational dilution in open-pit mining**. Mining Technology, v. 128, n. 1, p. 1-8, 2018.

CHEMALE, F. Jr. **Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense**. In: Holz, M. & De Ros, L.F. (Eds.) Geologia do Rio Grande do Sul, Edições CIGO/UFRGS, pp.13-52, 2000.

CONFORTI, D. Optech Incorporated. **Using Static and Mobile Laser Scanners to Measure and Manage Open Pit Mines**. Open Pit Mine Surveying. ILRIS Application Note: IL – 004, REV A. Canada, 2017.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Mineraiis: Serviço Geológico do Brasil. **Gestão estratégica da geologia, da mineração e transformação mineral**. Carta de integração geológico-geofísica, escala 1:100.000, Folha SH.22-Y-A-V Caçapava do Sul. CPRM: 2017.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Mineraiis: **Serviço Geológico do Brasil**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Geologia/Geologia-Basica/Cartografia-Geologica-Regional-624.html>>, acesso em 27 de maio de 2019.

DAGASAN, Yasin *et al.* **Pilot point optimization of mining boundaries for lateritic metal deposits: Finding the trade-off between dilution and ore loss.** *Natural Resources Research*, v. 28, n. 1, p. 153-171, 2019.

DAGOBERTO BARCELLOS. *Balanco social*, Caçapava do Sul, 2009.

DA SILVA, Luiz Carlos *et al.* **The Neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections: a zircon-based U–Pb geochronologic subdivision for the Brasiliano/Pan-African systems of orogens.** *Precambrian Research*, v. 136, n. 3-4, p. 203-240, 2005.

DIAKITE, O. **Ore Dilution In Sublevel Stopping;** *Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, PhD Theses*, pp. 36-38. Montreal, 1999.

DOLD, Christoph; BRENNER, Claus. **Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data.** *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives* 36, v. 36, p. 78-83, 2006.

EBRAHIMI, Anoush. **The importance of dilution factor for open pit mining projects.** In: *Proceedings of the 23rd World Mining Congress*. 2013.

ELBROND, J. **Economic Effect of Ore Losses and Rock Dilution;** *CIM Bulletin*, Vol 87, nº 978, pp.131-134. 1994.

FABRIS, Juliano. **Avaliação qualitativa das diferentes variedades de mármore da região de Caçapava do Sul como matéria-prima para a produção de corretivos de acidez dos solos e cal.** *Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul*, 2015.

FENGYUN, Gu; HONGQUAN, Xie. **Status and development trend of 3D laser scanning technology in the mining field.** In: *2013 the International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2013)*. Atlantis Press, 2013.

FRANCESCHI, Marco *et al.* **Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner.** *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, v. 64, n. 6, p. 522-528, 2009.

GERRY, M. President PhotoSat. **Leaders in Satellite Surveying for Mining and Energy.** Vancouver, British Columbia, Canada, 2016.

GOMES, Otávio da Fonseca M.; PACIORNIK, Sidnei. **Caracterização quantitativa de minério de ferro por microscopia co-localizada**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 6, n. 2, p. 91-95, 2013.

GRIFFITH, Robert M.; PARKINSON, Christopher. **Materiais e processos para flotação de substâncias minerais**. Patente US n. 3.929.629, 30 dez. 1975.

GUADAGNIN, D.L.; LAROCCA, J.; SOBRAL, M. **Flora vascular de interesse para a conservação na bacia do arroio João Dias: avaliação ecológica rápida**. In: Ronchi, L.H. (Org.). As Minas do Camaquã: um estudo multidisciplinar - Meio Ambiente, História, Geologia, Pedologia, Biologia, Arquitetura, Direito. São Leopoldo: Editora da Unisinos, pp. 71-84, 2000.

GUISADO-PINTADO, Emilia; JACKSON, Derek WT; ROGERS, David. **3D mapping efficacy of a drone and terrestrial laser scanner over a temperate beach-dune zone**. Geomorphology, v. 328, p. 157-172, 2019.

HAALA, Norbert *et al.* **Combination of terrestrial laser scanning with high resolution panoramic images for investigations in forest applications and tree species recognition**. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, n. 5/W16, 2004.

HARTMANN, Leo A.; LOPES, William R.; SAVIAN, Jairo F. **Integrated evaluation of the geology, aerogammaspectrometry and aeromagnetometry of the Sul-Riograndense Shield, southernmost Brazil**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 88, n. 1, p. 75-92, 2016.

HENNING, John G.; MITRI, Hani S. **Numerical modelling of ore dilution in blasthole stopping**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 44, n. 5, p. 692-703, 2007.

HOERLLE, Guilherme Sonntag. **Variedades de Mármore de Caçapava do Sul: Aspectos Petrográficos e Genéticos**. Salão de Iniciação Científica (22.: 2010 out. 18-22: Porto Alegre, RS). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Diretoria de Geociências** – DGC. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos.html>>. Acesso em 15/09/2019.

JARA, R. M. *et al.* **Block size selection and its impact on open-pit design and mine planning.** Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v. 106, n. 3, p. 205-211, 2006.

JELALIAN, A. **Laser Radar Systems.** Artech House Radar Library. Artech House, Incorporated. Boston, 1992.

JUSTUS, J.O.; MACHADO, M.L.A.; FRANCO, M.S.M. **Geomorfologia. In: Levantamento de Recursos Naturais.** v. 33, Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 e SI.22. Rio de Janeiro, SEPLAN - IBGE, pp. 313-404, 1986.

KERANS, Charles; TINKER, Scott W. **Sequence Stratigraphy and Characterization of Carbonate Reservoirs:** SEPM, Short Course, no. 40, 130 p, 1997.

KILIAN, J. HAALA, N. ENGLICH, M. Capture and evaluation of airborne laser scanner data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing,** v. 31, p. 383-388, 1996.

KRETSCHMER, Uusula. *et al.* **Traffic construction analysis by use of terrestrial laser scanning.** In: Proceedings of the ISPRS Working Group VIII-2 Laser scanners for forest and landscape assessment. 2004.

KUKUTSCH, Radovan *et al.* **Possibility of convergence measurement of gates in coal mining using terrestrial 3D laser scanner.** Journal of sustainable mining, v. 14, n. 1, p. 30-37, 2015.

LAPPALAINEN, P.; PITKAJARVI, J. **Dilution control at Outokumpu mines.** In: Conference Series- Australasian Institute of Mining & Metallurgy. 1996. p. 25-29.

LENA, Luis Otávio Fortes de *et al.* **The evolution of the Neoproterozoic São Gabriel juvenile terrane, southern Brazil based on high spatial resolution U-Pb.** Precambrian Research, v. 247, p. 126-138, 2014.

LEUANGTHONG, Oy; NEUFELD, Chad; DEUTSCH, Clayton V. **Optimal selection of selective mining unit (SMU) size**. University of Alberta, Alberta, 2003.

LICHTI, Derek D.; HARVEY, B. R. **The effects of reflecting surface material properties on time-of-flight laser scanner measurements**. tc, v. 2, p. 1, 2002.

LITTLE, M. J. **Slope monitoring strategy at PPRust open pit operation**. In: Proceedings of the international symposium on stability of rock slopes in open pit mining and civil engineering. Johannesburg: Southern African Institute of Mining and Metallurgy. p. 211-230, 2006.

MAAS, Hans-Gerd. **On the use of pulse reflectance data for laserscanner strip adjustment**. INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, v. 34, n. 3/W4, p. 53-56, 2001.

MAIA, Túle Cesar Barcelos. **Estudo e análise de poligonais segundo a NBR 13.133 e o sistema de posicionamento global**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1999.

MARQUES, Renato da Silva. **Metodologia para controle de qualidade de minério e destinação de blocos de lavra usando raios-x**. Dissertação de mestrado. Mestrado em tecnologia Mineral – Unipampa, 2016.

MARTINI, Rachel Jardim *et al.* **Deposição de rejeitos de minério de ferro em reservatórios: uma aplicação do método GPR**. Revista Ambiente & Água, v. 11, n. 4, p. 878-890, 2016.

MENESES, Paulo R.; MADEIRA NETTO, J. da S. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Editora Universidade de Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001.

MENESES, Paulo Roberto; DE ALMEIDA, Tati; BAPTISTA, Gustavo Macedo De Mello. **Reflectância dos materiais terrestres**. Oficina de Textos, 2019.

PAIM, P.S.G.; CHEMALE, F. Jr.; LOPES, R.C. **A Bacia do Camaquã**. In: Holz, M. & De Ros, L.F. (Eds.) Geologia do Rio Grande do Sul, Edições CIGO/UFRGS, pp. 231-274, 2000.

PAKALNIS, R. C.; POULIN, R.; HADJIGEORGIOU, J. **Quantifying the cost of dilution in underground mines**. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. p. 233^a, 1996.

PEDROSA, Sandra Aparecida. **Discriminação espectral de variações faciológicas de carbonatos por meio de espectrorradiometria e imagens aster na região da Serra do Ramalho-BA.** Brasília -DF, 2010.

PORCHER, Carlos Alfredo *et al.* **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil.** Ministério de Minas e Energia, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM. Cachoeira do Sul, Folha SH.22-Y-A. Brasília, Distrito Federal, 2000.

RATCLIFFE, Simon; MYERS, Andrew. **Laser Scanning in the Open Pit Mining Environment A Comparison with Photogrammetry.** I-SiTE Product Development White Paper, 2006.

READ, J. Fred *et al.* **Milankovitch Sea-Level Changes, Cycles, and Reservoirs on Carbonate Platforms in Greenhouse and Ice-house Worlds:** SEPM, Short Course no. 35, 147 p, 1995.

ROCHA, A. C. P. **Aplicações do Scanner a Laser I-SITE para Levantamentos Topográficos.** R. Esc. Minas, Ouro Preto, p.307-311, 2002.

RODRIGUES, Rafael Teixeira *et al.* **Nova técnica para avaliação da distribuição de tamanho de bolhas na flotação.** Anais XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Florianópolis, Brasil. Vol. 2, pg 79-86, 2004.

ROK, Kamnik; MATJAŽ, Nekrep Perc; DARJA, Topolšek. **Using the scanners and drone for comparison of point cloud accuracy at traffic accident analysis.** Accident Analysis & Prevention, v. 135, p. 105391, 2020.

SAEEDI, G. *et al.* **Numerical modelling of out-of-seam dilution in longwall retreat mining.** International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 47, n. 4, p. 533-543, 2010.

SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de. **Calcário e dolomito.** CETEM/MCT, Rochas e Minerais Industriais, 2ª Edição. pp 327-391, 2005.

SANTOS, Evandro Gomes dos. **Análise da performance dos sensores óptico e por transmitância de raios-x no processo de classificação de calcário em mina de Caçapava do Sul/RS.** Dissertação de mestrado. Mestrado em tecnologia Mineral – Unipampa, 2018.

SCHOLZE, F.; BECKHOFF, B.; KOLBE, M.; KRUMREY, M.; MÜLLER, M.; ULM, G. **Detector calibration and measurement of fundamental parameters for X-ray spectrometry.** *Microchimica Acta*, 155(1-2), 275-278.2006.

SCOBLE, M. J.; MOSS, A. **Dilution in underground bulk mining: implications for production management.** Geological Society, London, Special Publications, v. 79, n. 1, p. 95-108, 1994.

SILVA, André C.; DA LUZ, José AM. **Determinação do teor aparente de minérios usando análise de imagens digitais.** Rev. Esc. Minas vol.62 no.1 Ouro Preto Jan./Mar. 2009.

SILVA, Christiane R. da. **Determinação de granulometria de rom e britagem por análise de imagens.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

SINCLAIR, Alastair J.; BLACKWELL, Garston H. **Applied mineral inventory estimation.** Cambridge University Press, 2004.

STONEX SRL. **Stonex X-300.** Especificação do equipamento. Itália, 2015.

TOMMASELLI, A. M. G. **Um Estudo Sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3D a Curta Distância.** GEODÉSIA Online - Revista da Comissão Brasileira de Geodésia. 4 / 2003 [ISSN 1415-1111].

TONG, Xiaohua et al. **Integration of UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning for the three-dimensional mapping and monitoring of open-pit mine areas.** Remote Sensing, v. 7, n. 6, p. 6635-6662, 2015.

VAN DER MERWE, J. W., ANDERSEN, D. Campbell. **Applications and benefits of 3D laser scanning for the mining industry.** Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v. 113, n. 3, 2013.

VILLAESCUSA, E. **Geotechnical design for dilution control in underground mining.** Mine Planning and Equipment Selection, p. 141-149, 1998.

VONGPAISAL, S. *et al.* **New 3D engineering curves for predicting stope stability and mining dilution in longitudinal blasthole mining operations.** International Journal of Mining, Reclamation and Environment, v. 23, n. 2, p. 92-102, 2009.

WANG, Weijing *et al.* **Calculation and management for mining loss and dilution under 3D visualization technical condition.** In: 2011 International Conference on Management and Service Science. p. 1-8. IEEE, 2011.

WENDT, A. **On the automation of the registration of point clouds using the metropolis algorithm.** International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 35, p. 106-111, 2004.

WUTKE, J. D. **Métodos para avaliação de um sistema Laser Scanner Terrestre. Dissertação de mestrado.** Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, setor Ciências da Terra, 2006.

ZHOU, Dawei *et al.* **GPS/terrestrial 3D laser scanner combined monitoring technology for coal mining subsidence: a case study of a coal mining area in Hebei, China.** Natural hazards, v. 70, n. 2, p. 1197-1208, 2014.