



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MAPAS DE QUALIDADE DE FRENTES DE LAVRA BASEADOS EM
MODELOS DE BLOCOS, METODOLOGIA PARA APRIMORAMENTO
NA SELETIVIDADE DO MINÉRIO: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado por:

CAMILA SANDY CUNHA QUADROS

Orientador: Prof. Dr. Evaldo Raimundo Pinto da Silva (UFPA)

Coorientador: Bel. Paulo Sérgio da Costa Pinto Junior (EMPRESA)

BELÉM – PARÁ

2021



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MAPAS DE QUALIDADE DE FRENTES DE LAVRA BASEADOS EM
MODELOS DE BLOCOS, METODOLOGIA PARA APRIMORAMENTO
NA SELETIVIDADE DO MINÉRIO: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado por:

CAMILA SANDY CUNHA QUADROS

Orientador: Prof. Dr. Evaldo Raimundo Pinto da Silva (UFPA)

Coorientador: Bel. Paulo Sérgio da Costa Pinto Junior (EMPRESA)

BELÉM – PARÁ

2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Q1m Quadros, Camila Sandy Cunha.

Mapas de qualidade de frentes de lavra baseados em modelos de blocos, metodologia para aprimoramento na seletividade do minério: estudo de caso / Camila Sandy Cunha Quadros. — 2021.

xvi, 69 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Evaldo Raimundo Pinto da Silva
Coorientador(a): Prof. Paulo Sérgio da Costa Pinto Junior
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, 2021.

1. Mapas de qualidade. 2. Planejamento de lavra. 3. Seletividade do minério. 4. Controle de qualidade. 5. Modelo de blocos. I. Título.

CDD 553



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MAPAS DE QUALIDADE DE FRENTES DE LAVRA BASEADOS EM
MODELOS DE BLOCOS, METODOLOGIA PARA APRIMORAMENTO
NA SELETIVIDADE DO MINÉRIO: ESTUDO DE CASO**

Apresentado por:

CAMILA SANDY CUNHA QUADROS

Como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia, área de Geologia Econômica, linha de pesquisa em Mineração e Planejamento de lavra.

Data da aprovação: 22 / 06 / 2021

Conceito: EXCELENTE

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Evaldo Raimundo Pinto da Silva
(Orientador - UFPA)

Bel. Paulo Sérgio da Costa Pinto Junior
(Coorientador - EMPRESA)

Prof. Dr. Fábio Henrique Garcia Domingos
(Membro - UFPA)

*Aos meus pais,
Carlos e Socorro*

AGRADECIMENTOS

Neste espaço, registro meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram de alguma forma para minha trajetória até aqui:

- A Deus, por sempre me iluminar e proteger;
- Aos meus pais, Carlos e Socorro por todo amor, carinho e cuidado dedicados a mim durante toda a vida, e por serem minha base, me incentivando em todos os momentos e a cada objetivo. À minha irmãzinha Carla por estar sempre ao meu lado, me auxiliando em todos os momentos;
- Às minhas avós Neuzita e Maria, avô “Zizi” (*in memorian*), tio Nonato (*in memorian*), e a todos os meus tios, tias, primos, primas e demais familiares que sempre torceram por mim, me ajudaram e incentivaram;
- Ao meu querido e amado Marcelo Junior, por todo amor, companheirismo e apoio durante todos esses anos. E por sempre compartilhar conhecimento comigo e me tornar uma pessoa melhor. Aos seus pais Marcelo e Kátia também por sempre nos apoiarem e darem suporte nos estudos;
- À minha querida Universidade Federal do Pará (UFPA) por todas as oportunidades concedidas, tanto acadêmicas, quanto esportivas, foram de fundamental importância pra mim. Ao Instituto de Geociências e a Faculdade de Geologia, por toda infraestrutura fornecida durante a graduação em Geologia;
- Ao meu orientador Prof. Dr. Evaldo da Silva e coorientador Bel. Paulo Costa, pela oportunidade, confiança e todos os ensinamentos valiosos repassados. À banca designada para avaliar este trabalho, Prof Dr. Fábio Domingos.
- À Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão, do Instituto de Geociências da UFPA, especialmente à bibliotecária Lúcia Imbiriba, pelo auxílio e orientações quanto a formatação deste trabalho.
- À empresa onde estagiei por fornecer os dados e suporte necessários para a elaboração deste trabalho;
- Às equipes de geologia, planejamento, lavra, topografia e laboratório das minas estudadas por todo suporte, conhecimento compartilhado e amizade. Em especial para Eric, Flávio, Eliane, Wendell, Roberta, Victor, Neilton, Aricles, Viviane, Ângelo, Auricélia, Cecília, João e Fábio;
- À equipe do I³, Paulo e Adryene e ao melhor grupo de estagiários, por todo conhecimento compartilhado, oportunidades concedidas e amizade;

- Aos professores da Faculdade de Geologia e externos, por todos os ensinamentos repassados e pelas oportunidades de trabalhos e monitorias durante a graduação. Em especial para os Profs. Joelson e Vizeu, os quais tenho como exemplo pessoal e profissional. Além da Professora Dra. Rosemery, com quem tive a oportunidade de trabalhar no grupo PET-GEOLOGIA e é uma referência em liderança feminina no Curso de Geologia.

- Ao Programa de Educação Tutorial PET-GEOLOGIA, por todas as oportunidades de exercer o ensino, pesquisa e extensão durante a graduação, através de diversos eventos e projetos realizados.

- Aos funcionários do Instituto de Geociências e da Faculdade de Geologia, pela contribuição para a realização das atividades de campo durante a graduação, especialmente aos diretores, motoristas e técnicos-administrativos.

- Aos professores do curso técnico em mineração (IFPA), por despertarem em mim, ainda no ensino médio, o interesse pela mineração e geologia, por compartilharem conhecimentos e vivências. Em especial à Professora Marlis e Profs. Inaldo e Taylor Collyer (*in memoriam*). Ao Instituto Federal do Pará, instituição a qual eu tenho um carinho enorme e me possibilitou oportunidades únicas durante o curso técnico.

- Aos meus queridos amigos da geologia, em especial da turma GEO16, por todas as experiências compartilhadas durante a graduação, as quais serão lembradas com muito carinho. Em especial para Marcelo, Samu, Carlos, Brenda, Sepedinha, Eli, Uiv, Giulli, Isa, Pedrão, Pedro pipis, Kalebe, Gio, Lilian, Nívia, Pocotó, Iolanda, Cereja, Yury e João do suco;

- Aos meus amigos de longa data Isis, Pipi, Alice e Jéssica por todo apoio, carinho e incentivo. À minha amiga Sabrina por sempre estar ao meu lado, mesmo a distância;

- Ao time de voleibol feminino da UFPA, por me proporcionar momentos memoráveis, amizades e oportunidades de representar esta Universidade em várias competições;

- À Atlética Hydra e a Empresa Eldorado Jr, as quais tive a honra de participar da fundação e gestão, e pelas quais tenho um carinho especial. Obrigada a todos os amigos que compartilharam comigo estes momentos entre eventos, reuniões e competições;

Por fim, expresso minha gratidão a todos que contribuíram de forma direta e indireta à realização deste trabalho e conclusão deste curso. Muito Obrigada!

“Só uns poucos tomam, por todos os demais, o encargo nobre e pleno da responsabilidade de custodiar a escritura sagrada da Terra, de lê-la e interpretá-la, pois o enlace consciente do homem com sua estrela está confiado a uma ciência em especial, a GEOLOGIA”

Hans Closs (1885-1951)

RESUMO

Na mineração, rotineiramente são enfrentados problemas relacionados a delimitação correta de um dado corpo mineral, bem como a definição e avaliação dos parâmetros de quantitativos e qualitativos mais adequados. Dessa forma, o planejamento de lavra precisa prever qual a melhor forma de extrair um determinado bem mineral com o maior aproveitamento econômico possível da jazida. Assim, são definidas várias ferramentas da qualidade para que essas premissas sejam alcançadas. Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho consiste na elaboração de mapas de qualidade do minério nas frentes de lavra das minas, confeccionados a partir dos modelos de blocos geológicos das jazidas, baseando-se nos parâmetros tecnológicos importantes para a classificação do minério, com o intuito de auxiliar no planejamento da lavra a curto prazo, principalmente quanto ao controle de qualidade nas frentes de lavra, aumentando a seletividade do minério, a segregação de pilhas e a diminuição de perdas por contaminação ao longo do beneficiamento. O estudo em questão foi desenvolvido em duas Minas de Caulim (A e B), localizadas no município de Ipixuna do Pará, nordeste do estado do Pará, ambas pertencentes a mesma empresa. A metodologia utilizada para desenvolver esses mapas contou com emprego de dois softwares amplamente utilizados na indústria mineral, o GEOVIA Surpac e o ArcMap 10.2. Para validar se os mapas estavam aderentes a realidade foram executados trabalhos de amostragens para mensurar o quanto correlacionáveis os dados estavam. De posse dos resultados laboratoriais foram realizadas análises estatísticas bivariadas, as quais indicaram que os resultados obtidos mostram que as correlações entre os dados planejados àqueles executados estão entre 83% e 92%, denotando um nível de correlação forte a muito forte, de acordo com o coeficiente de Pearson (r). Além disso, o coeficiente de determinação (r^2) indica que no mínimo 70% a no máximo 85% das informações obtidas no modelamento teórico estão presentes da lavra da jazida, isso implica dizer que a porcentagem residual desta operação não pode ser explicada pelas variações no modelo, e é atribuída a fatores externos que podem interferir no processo. Isto permite concluir que os mapas de qualidade desenvolvidos neste trabalho, são ferramentas aplicáveis ao planejamento de lavra de curto prazo das minas A e B estudadas, com grau de variabilidade baixo, podendo assim auxiliar no controle de qualidade das frentes de lavra.

Palavras-chave: Mapas de qualidade. Planejamento de lavra. Seletividade do minério. Controle de qualidade. Modelo de blocos.

ABSTRACT

In the mining, problems are usually faced related to the correct delimitation of a determined mineral body, as well as the definition and evaluation of the most adequate quantitative and qualitative parameters. Therefore, mine planning needs to predict the best way to extract a specified mineral asset with the greatest possible economic use of the deposit. So, several quality tools are defined so that these premises are achieved. Thus, the main objective of this work is to elaborate ore quality maps in the mine faces, made from geological block models of deposits, based on important technological parameters for ore classification, with the purpose of assisting in the short-term mine planning, mainly in terms of quality control in the mine faces, increasing the selectivity of the ore, the segregation of piles and the reduction of losses due to contamination during processing. The study in question was developed in two Kaolin Mines (A and B), located in the Ipixuna do Pará city, northeast of the Pará state, both belonging to the same company. The methodology used to develop these maps relied on the use of two software quite used in the mineral industry, GEOVIA Surpac and ArcMap 10.2. To validate whether the maps were in line with reality, sampling works was carried out to measure how correlated the data were. With the laboratory results in hand, bivariate statistical analyzes were performed, which indicated that the results obtained show that the correlations between planned and executed data are between 83% and 92%, denoting a strong to very strong correlation level, according to the Pearson coefficient (r). In addition, the coefficient of determination (r^2) indicates that at least 70% to at most 85% of the planned information can be defined in the executed, this implies that the residual percentage of this operation cannot be explained by variations in the model, and it is attributed to external factors that can interfere with the process. This allows us to conclude that the quality maps developed in this work are tools applicable to the short-term mine planning of mines A and B studied, with a low degree of variability, thus being able to help in the quality control of the mine faces.

Keywords: Quality maps. Mine planning. Ore selectivity. Quality control. Block model.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1- Mapa de localização da área de estudo. (A) Localização do Estado do Pará no Brasil, com demarcação dos limites estaduais. (B) Localização do município de IPIXUNA do Pará no Estado do Pará, com demarcação dos limites municipais. (C) Localização das Minas A e B estudadas, ambas pertencentes ao município de IPIXUNA do Pará, nordeste do Pará. 3
- Figura 2- Mapa geológico simplificado da região onde estão inseridas as minas A e B, estudadas neste trabalho, no nordeste do estado do Pará. Fonte: Modificado de Vasquez *et al.* 2008. 11
- Figura 3- Imagens panorâmicas das minas A em (A) e da mina B em (B), ambas retratadas em 2020. Fonte: Acervo interno da empresa. 12
- Figura 4- Imagem da mina A retratando os aspectos geológicos encontrados nas minas, com as classificações comumente utilizadas pela empresa nas operações de lavra. COB = Cobertura; CCD = Camada de caulim duro; CCI = Camada de caulim intermediário; CCM = Camada de caulim macio; CAC = Camada de arenito caulinitico. Nota: Acervo interno da empresa. 14
- Figura 5- Representação simplificado do método de lavra por tiras utilizada nas minas A e B. Em (a) delimitação do corpo mineral a ser lavrado; (b) supressão vegetal e remanejamento de fauna local; (c) abertura da tira, decapeamento; formação do depósito de estéril e extração do minério; (d) avanço da lavra e abertura da tira 2; (e) avanço da lavra e preenchimento da tira 1 com o material estéril oriundo da tira 2; (f) opção 1 para preenchimento da tira final: utilizar como depósito de rejeitos da planta de beneficiamento; início da recuperação ambiental das tiras anteriores; (g) fase final de recuperação do terreno; (h) opção 2 para preenchimento da tira final: material estéril oriundo da primeira tira; (i) fase final de recuperação do terreno. Nota: Acervo interno da empresa. 15
- Figura 6- Contaminantes frequentemente observados no caulim. Em (a) mistura de hematita vermelha e goethita; (b) goethita; (c) hematita roxa e (d) anatásio (caulim cinza). Fonte: Acervo interno da empresa. 16
- Figura 7- Classificação dos tipos de minério, conforme os parâmetros qualificadores. Em (x) estão os valores de *Grit* em porcentagem e no eixo y os valores de alvura alvejada adimensionais. 17
- Figura 8- Passos para inserção e visualização do modelo de blocos. 19

Figura 9- Visualização do modelo de blocos na tela principal e seleção da opção de reblockagem.	20
Figura 10- Escolha do modelo de blocos que se deseja reblockar.	20
Figura 11- Informações originais sobre o modelo.....	21
Figura 12- Escolha das dimensões e atributos para o modelo reblockado.	22
Figura 13- Visualização do modelo reblockado.	23
Figura 14- Classificação dos tipos de minério. No eixo X estão os valores de <i>Grit</i> em porcentagem e no eixo Y os valores de alvura alvejada.	24
Figura 15- Criação da <i>constraint</i> para delimitar as camadas de minério, as quais serão classificadas.	24
Figura 16- Criação do novo atributo para inserir as tipologias.	25
Figura 17- Criação da <i>constraint</i> para definir P1.....	26
Figura 18- Atribuindo valor ao atributo criado.	26
Figura 19- Criação da <i>constraint</i> para definir P2.	27
Figura 20- Criação da <i>constraint</i> para definir P0.	27
Figura 21- Criação da <i>constraint</i> para definir P3.	27
Figura 22- Criação da <i>constraint</i> para definir EST.	28
Figura 23- Criação da <i>constraint</i> para definir ARN.....	28
Figura 24- <i>Constraint</i> para delimitar COB quanto ao tipo.....	29
Figura 25- Inserção da simbologia conforme o tipo.....	29
Figura 26- Visualização do modelo conforme as cores definidas por tipo.	30
Figura 27- Expansão da linha base da tira em 25 metros.	31
Figura 28- Salvar como arquivo <i>.str</i> o novo <i>layer</i> criado.....	31
Figura 29- Criação dos cortes (planos horizontais), a cada 2 metros.	32
Figura 30- Visualização dos cortes na tela principal.....	32
Figura 31- Criação do <i>report</i> com informações dos atributos de cada bloco vinculadas ao centroide.	33
Figura 32- Configurações para efetuar o <i>report</i> corretamente.	34
Figura 33- Seleção da <i>constraint</i> feita anteriormente, na etapa de corte.....	34
Figura 34- Ferramenta de expansão de segmento.	35
Figura 35- Criação da linha base da tira em <i>dwg</i>	35
Figura 36- Salvando projeto a partir do <i>template</i>	36
Figura 37- Passos para a visualização dos centroides exportados do Surpac, no ArcMap.	37
Figura 38- Exportação de dados <i>csv's</i> para <i>shp's</i>	38

Figura 39- Salvamento dos <i>shapefiles</i> de cada corte.	38
Figura 40- Criação da malha para os mapas (<i>fishnet</i>)	39
Figura 41- Seleção do nome e pasta onde será armazenada a malha criada.	39
Figura 42- Seleção do <i>shape</i> dos centroides e carregamento das coordenadas referentes a ele.	40
Figura 43- (A). <i>Fishnet</i> criado a partir das coordenadas dos centroides. (B) <i>Fishnet</i> criado a partir do deslocamento de 25 metros das coordenadas do centroide.	40
Figura 44- Ajustes necessários para a confecção da malha corretamente.	41
Figura 45- Visualização da malha 50 x 50 m criada.	42
Figura 46- Definição do sistema de coordenadas.	42
Figura 47- Exportação da linha base da tira de <i>dwg</i> para <i>shp</i>	43
Figura 48- Mudança de simbologia da base da tira.	44
Figura 49- Edição da malha para excluir os polígonos e pontos fora dos limites da base da tira.	44
Figura 50- Polígonos e pontos excluídos na edição.	45
Figura 51- Adição de campo para numerar blocos ordinariamente.....	45
Figura 52- Cálculo para número dos blocos.	46
Figura 53- Uso da ferramenta <i>join</i> para importar informações dos centroides para os polígonos.	46
Figura 54- Requisitos para execução do <i>join</i> . corretamente.....	47
Figura 55- Dados importados visualizados na tabela de atributos.	48
Figura 56- Edição de propriedades da simbologia.	49
Figura 57- Atribuição de cores para cada tipo conforme a paleta.	49
Figura 58- Visualização da malha com cores conforme o tipo de minério.	50
Figura 59- Inserção dos textos que serão mostrados dentro dos polígonos.	50
Figura 60- Expressão em <i>python</i> inserida para os dispor os dados ordenadamente.....	51
Figura 61- (A) Mapa de qualidade com ênfase para alguns elementos. (B) Blocos destacados mostrando os dados de interesse dentro do polígono. (C) Legenda mostrando como as informações estão dispostas dentro dos polígonos. (D) Identificação da tira e cota de onde o mapa se refere, e escala gráfica.....	52
Figura 62. Fluxograma mostrando a sequência de realização dos trabalhos de amostragem. .	53
Figura 63- Exemplificação da malha de amostragem feita com cavadeira.	54
Figura 64- Malha planejada para a amostragem com cavadeira articulada.....	54
Figura 65- Malha de amostragem planejada para a sondagem com trado mecânico.	55

- Figura 66- Diagramas de dispersão das variáveis executadas (y) em função das variáveis planejadas (x), referentes a método de amostragem com cavadeira. (A) Diagrama de dispersão do *grit*. (B) Diagrama de dispersão da alvura alvejada. 60
- Figura 67- Diagramas de dispersão das variáveis executadas (y) em função das variáveis planejadas (x), referentes a método de amostragem com trado. (A) Diagrama de dispersão do *grit*. (B) Diagrama de dispersão da alvura alvejada..... 61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resultado das análises da amostragem com utilização de cavadeira articulada, emitidas pelo laboratório.	56
Tabela 2- Resultados das análises da amostragem com utilização de trado mecânico, emitidas pelo laboratório.	57
Tabela 3- Dados comparativos de alvura alveja e <i>grit</i> entre os mapas de qualidade “AA_MQ” e “GRIT_MQ”, e os realizados operacionais “AA_RO” e “GRIT_RO” referentes a amostragem com cavadeira.....	57
Tabela 4- Dados comparativos de alvura alveja e <i>grit</i> entre os mapas de qualidade “AA_MQ” e “GRIT_MQ”, e os realizados operacionais “AA_RO” e “GRIT_RO” referentes a amostragem com trado.....	57
Tabela 5- Níveis de intensidade da correlação estatística linear (Fonte: Devore, 2006).....	58
Tabela 6- Coeficientes de correlação (r) das variáveis quanto ao método de amostragem.....	59
Tabela 7- Coeficiente de determinação (r^2) das variáveis quanto ao método de amostragem.	59

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
EPÍGRAFE	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
LISTA DE TABELAS	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 JUSTIFICATIVAS.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 CONCEITOS IMPORTANTES.....	5
2.1.1 Processo de Lavra	5
2.1.2 Planejamento Estratégico de Lavra	5
2.1.2.1 Planejamento de lavra de longo prazo	6
2.1.2.2 Planejamento de lavra de médio prazo	6
2.1.2.3 Planejamento de lavra de curto prazo	6
2.1.3 Controle de qualidade na lavra	7
2.1.4 Modelo de blocos	8
2.1.5 Seletividade e diluição do minério	8
2.1.6 Reconciliação	9
2.2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	10
2.3 MINAS ESTUDADAS	11
2.3.1 Histórico	11
2.3.2 Características do minério	13
2.3.2.1 Geologia da mina.....	13
2.3.2.2 Método de lavra: Lavra em Tiras (<i>Strip Mining</i>)	15
2.3.2.3 Características e parâmetros tecnológicos utilizados na classificação do minério.....	16
3 METODOLOGIA	18
3.1 ETAPAS UTILIZANDO O SURPAC	18
3.1.1 Reblocagem	18

3.1.2 Classificação do tipo de minério	23
3.1.3 Cortes (planos horizontais)	30
3.1.4 Reports	33
3.2 ETAPAS UTILIZANDO O ARCMAP	35
3.2.1 Fishnet	36
3.2.2 Join	43
3.2.3 Symbology	48
3.2.4 Layout	51
4 RESULTADOS	53
5 DISCUSSÕES	62
6 CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Um dos principais problemas na mineração enfrentados frequentemente por geólogos e engenheiros de minas está relacionado com a definição dos limites de um corpo mineral assim como avaliar a quantidade e a qualidade dos parâmetros de interesse (Peroni 2002). Dentre os métodos existentes para definir os limites de um dado corpo mineral, o mais utilizado é o de representação por modelo de blocos (Kim 1978). Esse método consiste em atribuir informações relevantes para cada unidade de um conjunto de blocos, como estimativa de teores, densidade, dentre outros, os quais servirão de base para os cálculos de viabilidade econômica e definição do planejamento de lavra, incluindo os parâmetros de seletividade do minério.

Segundo Godoy (1997), o objetivo principal da lavra seletiva é reduzir a diluição de minério. A capacidade seletiva na lavra inclui parâmetros críticos como: controle geológico e estrutural do depósito; teores de corte praticados; grau de continuidade do minério; dimensões e capacidade seletiva dos equipamentos de lavra e taxa de produção requerida. Esses parâmetros determinam as dimensões das unidades seletivas de lavra ou blocos de lavra, nos quais é possível separar material estéril de minério (Hartman & Mutmansky 2002, Câmara 2013).

O estudo em questão foi desenvolvido em duas minas (A e B), localizadas no município de Ipixuna do Pará – PA (Figura 1), nordeste do Pará, ambas pertencentes a mesma empresa. Nas duas minas desse estudo, o minério lavrado é o Caulim, uma rocha composta por silicatos hidratados de alumínio, como a caulinita e a haloisita, e que é comumente utilizado em uma grande variedade de produtos, com destaque para o seu uso na fabricação de papéis comuns e revestidos, cerâmicas e refratários (Luz & Lins 2005). O depósito mineral está inserido geologicamente na Formação Ipixuna, a qual é formada por argilitos, arenitos finos a médio, moderadamente selecionados, essencialmente caulínicos, atribuídos a um sistema deposicional formado por um complexo fluvial na base que grada verticalmente para um complexo estuarino no topo (Kotschoubey *et al.* 1996).

O método de exploração utilizado nas minas supracitadas é o método de lavra em tiras (*strip mining*), o qual consiste em remover o minério por tiras retangulares, seguido pela deposição do material estéril na cava da tira lavrada anteriormente (Hartman & Mutmansky 2002). Dessa forma, é possível uma recuperação quase imediata da área degradada, além de evitar o acúmulo de grandes depósitos de material estéril, como ocorre na lavra por bancadas, tendo por fim um resultado ambientalmente e economicamente positivo.

Na mineração, o planejamento da lavra é considerado uma das etapas essenciais para todo o empreendimento. Ele é considerado um roteiro para a elaboração da evolução operacional na mina, desde a sua implantação até o seu término, passando pelas diversas etapas de desenvolvimento. Assim, é possível prever com devida antecedência os meios necessários e os recursos financeiros para a consecução desse planejamento. O planejamento da lavra deve ser constantemente atualizado, visando adequar as condições planejadas à situação real da mina e para isso, existe o controle de qualidade que tem a função de garantir que o material produzido esteja de acordo com os padrões de qualidade da empresa (Juran 2009).

Nas minas, a rotina de controles de qualidade é baseada na coleta de amostras e análise do minério nas pilhas, o qual permite verificar se o material extraído atende as especificações de qualidade previstas, no entanto, a maioria das vezes o processo de amostragem não é eficiente, o que interfere na qualidade do minério enviado para a planta de beneficiamento. Diante dessa problemática, esse trabalho enfocou na produção de mapas de qualidade do minério nas frentes de lavra, a fim de evitar problemas na fase de processamento mineral. De posse desses mapas, será possível melhorar o controle de qualidade do minério, além de aumentar a seletividade da lavra, promovendo sua maior previsibilidade. Para a elaboração dos mapas de qualidade foram utilizados softwares comumente recorridos na geologia e planejamento de mina, GEOVIA Surpac e o ArcMap.

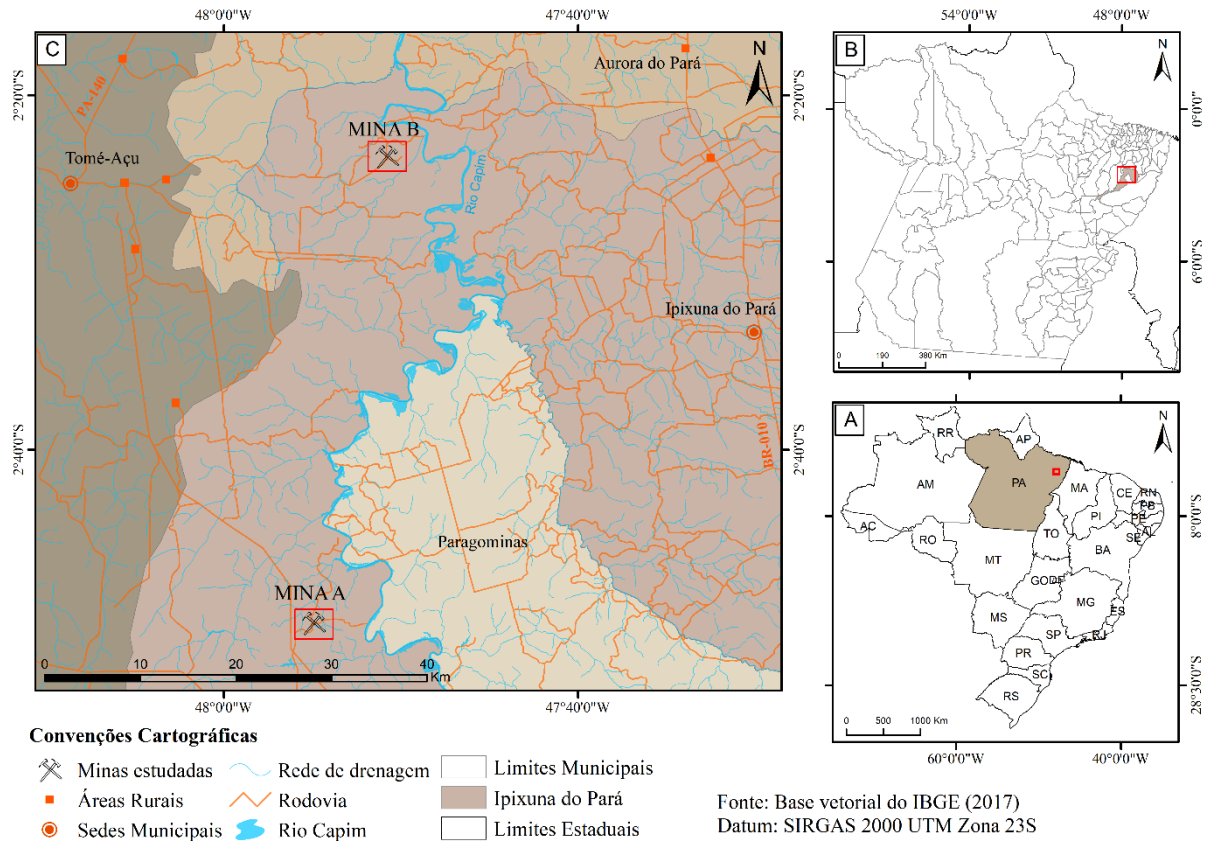


Figura 1- Mapa de localização da área de estudo. (A) Localização do Estado do Pará no Brasil, com demarcação dos limites estaduais. (B) Localização do município de Ipixuna do Pará no Estado do Pará, com demarcação dos limites municipais. (C) Localização das Minas A e B estudadas, ambas pertencentes ao município de Ipixuna do Pará, nordeste do Pará.

1.2 JUSTIFICATIVAS

Na rotina do planejamento de lavra de curto prazo de uma jazida, mensalmente é realizado o processo de reconciliação, o qual consiste em comparar a quantidade e os valores de minério estimados pelo modelo teórico de blocos com as quantidades e valores de minério efetivamente lavrados e beneficiados. Este processo visa observar e constatar o nível de correlação entre o planejamento e a produção. Nas duas minas onde este estudo foi realizado, constatou-se algumas inconsistências entre valores estimados pelo modelo de blocos e os valores efetivamente lavrados. Esta situação permitiu verificar que dentre as variáveis envolvidas no processo, a seleção do minério estava ocorrendo de forma inadequada, causando assim, problemas na qualidade do minério processado na planta de beneficiamento.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é a elaboração de mapas de qualidade do minério nas frentes de lavra das minas de caulim A e B, utilizando-se o modelo de blocos geológico das jazidas, com intuito de auxiliar o planejamento da lavra de curto prazo e, em última análise, otimizar o beneficiamento do minério.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEITOS IMPORTANTES

2.1.1 Processo de Lavra

De acordo com o Código da Mineração (Decreto-Lei Nº 227, de 28 de fevereiro de 1967), a lavra mineral é definida como um conjunto de operações coordenadas visando o aproveitamento de uma jazida mineral, englobando tanto a etapa de extração quanto a de beneficiamento das substâncias minerais (Brasil 1967). Para Hartman & Mutmansky (2002), a lavra é constituída por processos, ocupações e pela indústria voltada para a extração de minerais da crosta terrestre. Segundo Curi (2014), o processo de lavra é dividido em 3 etapas, sendo elas: o planejamento da lavra, implantação e produção. A primeira etapa tem como objetivo avaliar e estudar as melhores condições operacionais, visando o melhor beneficiamento do minério, a maior redução de custos e o maior lucro (Davis & Newman 2008). A implantação, por sua vez, consiste na projeção da mina e na construção de toda a estrutura necessária para suportar a atividade mineira, resultando, por fim, na produção do minério (Curi 2014). Dentre as três etapas, o planejamento da lavra pode ser considerado como o mais importante e com maior risco associado em um projeto de mineração (Curi 2014, Sepuldeva 2019).

2.1.2 Planejamento Estratégico de Lavra

O planejamento da lavra não é uma tarefa fácil e requer uma estratégia previamente estabelecida para determinar o melhor projeto e sequenciamento da lavra (Silva 2008). Com o planejamento estratégico de lavra objetiva-se maximizar o rendimento econômico a longo prazo, obedecendo às restrições técnicas, operacionais, ambientais e de segurança (Silva 2008). Para que um empreendimento mineiro atinja seu máximo potencial é necessário avaliar todas as situações, riscos e incertezas, com o intuito de assegurar a fidelidade da execução do projeto em relação ao planejamento (Potvin 2006). Os riscos estratégicos podem e devem ser avaliados e controlados em cada projeto, como ressalta Silva (2008), dentre eles destacam-se os riscos geológicos, riscos geomecânicos, riscos de engenharia, riscos ambientais, riscos sócio-políticos, e riscos administrativos e gerenciais.

Para Curi (2014), o planejamento da lavra de minas tem a função de antever possíveis situações e proporcionar meios adequados para a consecução do projeto. Assim, ele pode ser considerado como um roteiro para a elaboração da evolução operacional na mina, desde a sua implantação até o seu término. Segundo este mesmo autor, o planejamento de lavra se baseia

em planos com finalidades e naturezas diferentes e classificados, em termos gerais, como planos de longo, médio e curto prazos.

2.1.2.1 Planejamento de lavra de longo prazo

Segundo Lopes (2019), o planejamento de longo prazo, conhecido por planejamento estratégico ou plano de exaustão da mina, tem por objetivo avaliar a exequibilidade de um projeto de mineração. Nele são criados planos de ações, iniciativas e objetivos a longo prazo, organizados em ordem de prioridade e que servirão de guia geral para a produção durante o período de funcionamento da mina (Alves 2020). Para que isso ocorra, devem ser considerados todos os cenários possíveis que permitam a extração do minério e alcançar os objetivos da empresa. Nesta situação estão inclusas a cubagem da reserva economicamente lavrável, a determinação da quantidade de estéril a ser separado do minério, a definição dos limites da cava final, as obras de construção permanente, as vias de acesso, a pilha de estéril, o plano de recuperação da área lavrada, dentre outros.

2.1.2.2 Planejamento de lavra de médio prazo

O planejamento de lavra a médio prazo tem a função de prever fatores que possam intervir na lavra do minério, assim como realizar revisões no planejamento de longo prazo, de modo a adaptar o plano às condições atuais e de média duração da mina, proporcionando seu funcionamento adequado. Condições como variações nos teores do minério podem variar ao longo do corpo mineralizado, assim como o preço do minério pode variar com o tempo e por isso o planejamento estratégico a longo prazo precisa ser constantemente revisado (Lopes 2019).

2.1.2.3 Planejamento de lavra de curto prazo

Por último, o planejamento de curto prazo tem por objetivo elaborar estratégias visando atender objetivos específicos, baseado em decisões econômicas ou operacionais, exequível em um curto período de tempo para o funcionamento da mina (Alves 2020). No plano de curto prazo, obtém-se maiores informações sobre o depósito, avaliam-se as restrições operacionais, condições da lavra e do terreno, desempenho dos equipamentos, condições das vias acessos, etc. Esta coleta informações é necessária para a tomada de decisões à médio e longo prazos,

antecipando informações básicas sobre o minério, produção diária e de funcionamento de cada equipamento (Lopes 2019).

2.1.3 Controle de qualidade na lavra

Na lavra, o controle de qualidade tem a função de garantir que o material produzido esteja de acordo com os padrões de qualidade da empresa (Juran 2009). Esse processo visa identificar e medir diferenças entre o desempenho atual de uma lavra com o que foi planejado, por meio do monitoramento do minério, comparações e planejamentos (Faria Jr. 2010). Os métodos de controle de qualidade podem variar de acordo como particularidades de cada empreendimento como o tipo de minério, modificações no entendimento do corpo mineralizado, modificações e/ou melhorias nas operações e nos equipamentos utilizados, fatores externos e ambientais, dentre outros. A presença dessas particularidades em cada empreendimento, torna o controle de qualidade um processo dinâmico que precisa constantemente atualizado, por meio de observações e adaptações (Juran 2009).

Um dos controles de qualidade comumente utilizados é o de coleta de amostras em pilhas e análise do minério na frente de lavra, o qual permite verificar se o material extraído atende as especificações de qualidade previstas. Outras técnicas podem ser aplicadas, como o mapeamento da frente de lavra, em vista de complementar e melhorar o controle da qualidade do minério.

Uma amostra representa um subconjunto de uma população que se deseja estudar (Yamamoto & Ladim 2013). A coleta de amostras e os métodos de amostragem, por sua vez, tem a função de selecionar um material representativo que reproduza a distribuição e a variabilidade espacial, como tamanho, número de pontos de dados e distribuição dos pontos em determinado domínio de uma população (Yamamoto & Ladim 2013). Segundo estes autores, a amostragem pode ser dividida em 3 tipos; aleatória simples, aleatória estratificada e sistemática. Na amostragem aleatória simples todos os elementos da população têm probabilidade igual de pertencer à amostra e todas as amostras possíveis tem probabilidades iguais de ocorrer (Bussab & Bolfarine 2005). A amostragem aleatória estratificada é frequentemente realizada em um conjunto onde a população pode apresentar subpopulações. Nessa amostragem é feita uma subdivisão da região de estudo em células (ou estratos) de dimensões fixas e a amostra é coletada aleatoriamente dentro de um dos estratos (Yamamoto & Ladim 2013). Por fim, a amostragem sistemática é feita quando todos os elementos da população estão ordenados e a

retirada dos elementos da amostra é feita periodicamente. Na prática, essa amostragem é feita nos nós de uma malha regular previamente definida (Yamamoto & Ladim 2013).

2.1.4 Modelo de blocos

Na mineração, um dos principais problemas enfrentados por geólogos e engenheiros, em relação ao controle de qualidade, está relacionado a definição dos limites reais (em comparação com o projetado) do corpo mineralizado (Peroni 2002).

A representação do corpo mineralizado por modelo de blocos vem se mostrando como uma ferramenta importante capaz de auxiliar na resolução desse problema. Esse método consiste em dividir o corpo mineral em pequenos blocos conceituais, e para cada bloco são inseridos atributos, como estimativa de teores, dimensões, densidade e outros dados relevantes, aplicados como base para cálculos de viabilidade econômica (Kim 1978, Peroni 2002, Torres 2018).

Cada bloco pode ser projetado de acordo com o preço do minério e o custo do processo de produção, adquirindo um valor monetário (ganho ou perdas). Essas relações econômicas e de produção faz com que as informações dos blocos sejam constantemente modificadas e atualizadas (Peroni 2002). A partir disso, o modelo de blocos se torna uma ferramenta imprescindível para tomada de decisões de qual bloco deve ser lavrado ou não, permitindo prever os parâmetros de seletividade do minério e definir o planejamento de lavra (Torres 2018).

2.1.5 Seletividade e diluição do minério

No processo de lavra, a seletividade é definida como o processo de separação do minério de interesse do material estéril. Na mineração, a lavra seletiva visa reduzir a diluição de minério, e sua capacidade seletiva inclui parâmetros como: controle geológico e estrutural do depósito; teores de corte praticados; grau de continuidade do minério; dimensões e capacidade seletiva dos equipamentos de lavra e taxa de produção requerida (Godoy 1997). Esses parâmetros determinam as dimensões das unidades seletivas de lavra ou blocos de lavra, nos quais é possível separar material estéril de minério (Câmara 2013).

Para Jara *et al.* (2006), ao planejar os métodos de seletividade de um minério, é necessário analisar 4 efeitos principais comumente observados. O primeiro está relacionado a distribuição estatística das amostras que serão utilizadas como referência para a representação do corpo mineralizado e no qual influenciam diretamente na estimativa do volume de minério.

O segundo efeito está relacionado a margem de erro, para mais ou para menos, do volume estimado em relação ao volume real do corpo mineralizado. O terceiro efeito está relacionado as restrições da geometria e aos limites do corpo. E, por último, está o efeito de diluição.

A diluição é definida como a mistura do minério com a rocha estéril que não foram segregados durante a extração do primeiro (Crawford 2004, Jara *et al.* 2006, Zhao & Niu 2020). Quando não planejada, a diluição induz a perda da qualidade do minério e o encarecimento da produção). A diluição é fortemente dependente do equipamento utilizado na lavra, do método de desmonte utilizado e na regularidade das zonas de contato entre o minério e o estéril (Jara *et al.* 2006, Câmara 2013, Zhao & Niu 2020).

Segundo Crawford (2004) e Câmara (2013), a diluição pode ser de origem interna ou externa, relacionados a fatores geológicos e/ou operacionais, como variações litológicas/estruturais do corpo mineralizado e dificuldade de separação de material estéril do minério, devido a relação do minério com a rocha encaixante, devido a erros na classificação do minério, devido a execução do processo de lavra, dentre outros. Para contorna esses problemas, geralmente são adotados valores arbitrários para o cálculo da diluição, no entanto, a falta de uma metodologia neste cálculo pode induzir a uma sequência de erros que podem resultar em perda do minério em grandes quantidades (Câmara 2013).

Zhao & Niu (2020) argumentam que uma previsão acurada e eficiente da diluição de um minério pode servir de guia para a produção, otimizando a lavra e aumentando a qualidade do minério e o controle da produção. Para Câmara (2013), uma forma bastante eficaz de identificar a diluição durante o processo de lavra é a partir da verificação da aderência de reconciliação entre os valores planejados e executados.

2.1.6 Reconciliação

É definida como a comparação entre duas medidas ao longo de uma sequência de lavra, podendo ser a comparação entre uma estimativa teórica, a partir de modelos teóricos, com uma medida prática, obtida a partir da produção *in situ* (Fouet *et al.* 2009). Na prática, ela frequentemente consiste em comparar as quantidades e teores de minério estimados (por meio dos modelos de blocos) com as quantidades e teores de minério efetivamente lavrados (Câmara 2013). Nos últimos anos, este método vem se mostrando como uma ferramenta importante para o controle de qualidade da lavra, visto que grandes variações entre os valores planejado e medido podem indicar a presença de problemas na operação e que podem afetar toda a cadeia

produtiva (Câmara 2013). O reconhecimento e estudo dessas diferenças permite realizar um planejamento adequado visando a otimização de todo o processo produtivo.

2.2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A área de estudo fica localizada na região do Rio Capim, leste do estado do Pará. Ela está inserida na porção leste da Bacia do Marajó, mais especificadamente na Sub-bacia de Cameté (Figura 2). A geologia da região é representada por rochas sedimentares das formações Itapeucu, Ipixuna e Barreiras, além de coberturas representadas pelos sedimentos Pós-Barreiras e pela Argila de Belterra. A Formação Itapeucu é constituída por arenitos arcoseanos, de granulometria média a grossa, com porções conglomeráticas e lentes de material pelítico, estratificados e depositados em ambiente transicional, com influência de lagunas, canais fluviais e de maré (Vasquez *et al.* 2008). A Formação Ipixuna é constituída por arenitos e argilitos caulinitizados, depositados em ambiente marinho transicional no Cretáceo Superior (Kotschoubey *et al.* 1996, Santos Jr. & Rossetti 2003). A Formação Barreiras, por sua vez, é constituída por arenitos, argilitos e conglomerados de cores variegadas, depositados em um ambiente litorâneo-transicional com influência de maré (Rossetti 2006). As coberturas são representadas principalmente pelos sedimentos pós-barreiras, de idade plio-pleistocênicas, ocorrendo sobrepostos discordantemente sobre a Formação Barreiras.

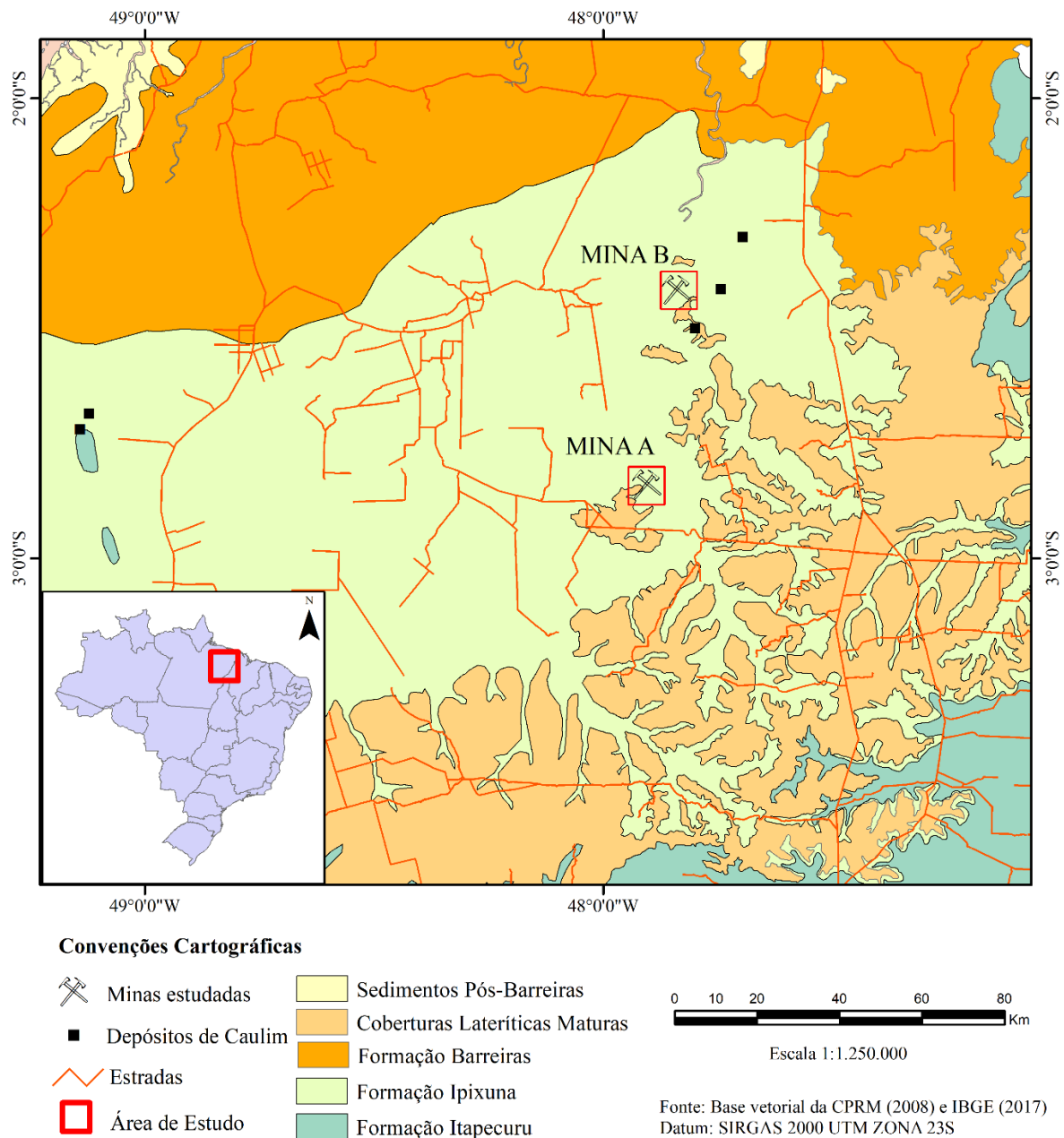


Figura 2- Mapa geológico simplificado da região onde estão inseridas as minas A e B, estudadas neste trabalho, no nordeste do estado do Pará. Fonte: Modificado de Vasquez *et al.* 2008.

2.3 MINAS ESTUDADAS

2.3.1 Histórico

A produção de caulim na região do Rio Capim é datada desde os anos 90, com a instalação e produção nas minas de A e B (Figura 3) (Farias 2009). Em 2010, no entanto, a Mina A foi adquirida pelo Grupo em que a Mina B já pertencia, com a aquisição dos direitos

minerários da mina, da planta de beneficiamento e do porto de escoamento (Brasil Mineral 2010).



Figura 3- Imagens panorâmicas das minas A em (A) e da mina B em (B), ambas retratadas em 2020. Fonte: Acervo interno da empresa.

Atualmente, a mina A produz aproximadamente 600 mil toneladas de material extraído na mina (*Run of Mine – ROM*), com 350 mil toneladas de produto final e correspondente a 1/3 da produção total da empresa. Já a mina B é responsável por 1.200 mil toneladas de material *ROM* e 700 mil toneladas de produto final (Xavier & Costa 2019).

segmentadas a cada 2 metros, variando de 12 a 16 kg. No mapa a seguir (Figura 65), estão visualizados os blocos amostrados, os furos planejados e executados e a topografia anterior a execução dos furos.

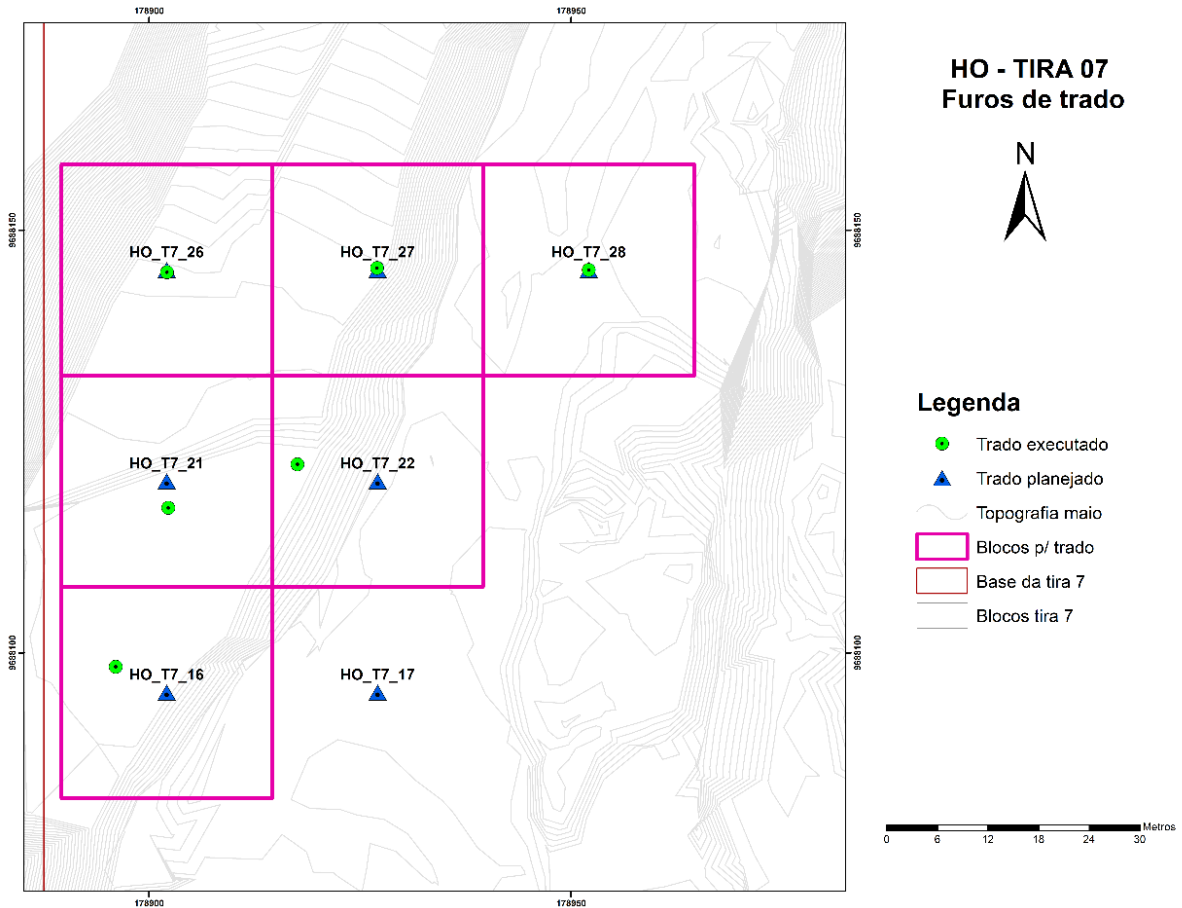


Figura 65- Malha de amostragem planejada para a sondagem com trado mecânico.

Após a coleta das amostras, estas foram conduzidas ao galpão para sua preparação, e desta forma, submetidas aos processos de secagem (em estufa durante 12 horas), britagem (em britador de rolos), homogeneização e quartejamento (com auxílio do quarteador tipo Jones, também conhecido como divisor de rifles). Ao término deste processo, uma alíquota de 4 kg, representando cada bloco com 2 metros de espessura, foi encaminhada ao laboratório da própria mineradora para análises dos fatores relevantes.

Dentre os parâmetros analisados no laboratório, um dos mais importantes quando se trata da mineração de Caulim é a alvura, a qual é calculada baseada na reflectância apenas de radiação nos comprimentos de onda próximos à 457 nm (faixa do azul), enquanto que a brancura considera a reflectância em toda a região do visível, de 400 a 700 nm (Jordan 1996). Dessa forma, a alvura alvejada é medida após a amostra passar por todas as etapas de

beneficiamento e sofrer alvejamento químico com utilização do ditionito de Sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$). Nesta reação ocorre a lixiviação dos minerais deletérios a base de Ferro, o que não acontece com o TiO_2 , devido a sua não-reatividade com o ditionito, sendo este o principal fator para perdas de alvura no caulim. Neste caso, a amostra em polpa recebe uma solução com o ditionito fica sobre agitação durante um determinado tempo, depois é filtrada e seca para a análise de alvura. Portanto, tem-se que a alvura é uma razão entre a luz emitida e a luz refletida pela superfície coberta pelo material que se quer avaliar, constituindo uma grandeza adimensional, a qual é medida no aparelho chamado espectrofotômetro.

As análises de Fe_2O_3 e TiO_2 são realizadas em um aparelho de fluorescência de raios-X. Enquanto, para quantificar o *grit* são utilizadas peneiras de 325# ou 0,041 mm, isto significa que o *grit* representa a massa siltosa e arenosa maior que 41 micrômetros retida nessas peneiras, ou seja, 45% de *grit*, diz respeito a 45% da massa total acima de 41 μm .

O PSD – *Particle Size Distribution* – representa a curva formada pela distribuição granulométrica de uma determinada amostra, medida quando as partículas passam por um feixe de ondas eletromagnéticas de alta frequência, no aparelho denominado *Sedigraph*, assim este equipamento retorna os valores estatísticos para uma faixa granulométrica de 20 a 0,5 micrômetros. Para as análises do caulim em questão a medição da faixa granulométrica de 2 μm é a mais pontuada, portanto é chamado aqui de PSD 2, o percentual de partículas menores que 2 μm . Por exemplo, quando o resultado da amostra aponta 70% para o PSD 2, tem-se que 70% das partículas dela são menores que 2 micrômetros.

Todas as análises mencionadas anteriormente foram executadas para todas as amostras deste trabalho. Entretanto, apenas os parâmetros relacionados a alvura alvejada e ao *grit* são considerados para a classificação dos tipos de minérios, portanto serão estes os mais analisados e discutidos. As tabelas 1 e 2 abaixo mostram os resultados das análises das amostragens realizadas, emitidas pelo laboratório das minas.

Tabela 1- Resultado das análises da amostragem com utilização de cavadeira articulada, emitidas pelo laboratório.

Identificação	Cota	Dens. (g/ml)	Grít (%)	Alvura crua	PSD (%<2 μm)	Fe_2O_3 (%)	TiO_2 (%)	Alvura alvejada
B-22-1	32-30	1,278	33,5	82,85	58,7	0,50	0,96	88,67
B-23-1	32-30	1,296	38,5	77,57	58,0	0,60	0,85	88,79
B-24-1	32-30	1,306	34,5	77,10	57,0	0,65	0,83	88,57
B-25-1	32-30	1,300	27,4	74,91	61,2	0,61	0,86	88,29
B-26-1	32-30	1,294	29,5	76,82	56,2	0,61	0,96	87,75
B-27-1	32-30	1,300	41,6	81,10	59,3	0,48	0,84	88,82

Tabela 2- Resultados das análises da amostragem com utilização de trado mecânico, emitidas pelo laboratório.

Identificação	Cota	Dens. (g/ml)	Grit (%)	Alvura crua	PSD (%<2 µm)	Fe₂O₃ (%)	TiO₂ (%)	Alvura alvejada
B-16-1	32-30	1,298	33.1	84.99	62.5	0.55	0.93	88.78
B-16-2	30-28	1,300	50.1	83.02	60.5	0.55	1.1	87.68
B-16-3	28-26	1,256	64.4	78.55	61.9	0.52	0.75	88.31
B-21-1	32-30	1,312	31.2	84.07	60.8	0.54	0.89	88.69
B-21-2	30-28	1,306	50.7	83.42	60.4	0.53	1.15	87.73
B-22-1'	32-30	1,326	27.5	85.85	61.8	0.56	0.87	88.70
B-22-3	28-26	1,296	63.3	85.26	64.9	0.39	0.67	89.88
B-26-1'	32-30	1,306	26.6	84.33	60.1	0.61	0.94	88.85
B-26-2	30-28	1,300	48.5	84.15	60.8	0.58	1.03	88.16
B-27-2	32-30	1,298	36.1	84.45	63.0	0.58	0.99	88.53
B-27-3	30-28	1,292	51.1	84.08	62.9	0.54	1.05	88.29
B-28-1	26-24	1,240	69.9	77.06	70.1	0.58	0.81	88.04

Na tabela 1 estão exibidos os resultados de 6 amostras, coletadas na mesma cota e referentes a primeira amostragem com uso de cavadeira articulada. Na segunda tabela são mostrados os resultados de 12 amostras, coletadas em cotas diferentes, a partir de 6 furos com trado mecânico.

Os resultados das análises, quanto aos parâmetros necessários para categorização do tipo de minério estão dispostos nas tabelas 3 e 4 a seguir, bem como os valores estimados nos mapas de qualidade para cada um dos blocos e cortes. Esta comparação entre os resultados planejados e executados é crucial para determinar a aderência a metodologia desenvolvida neste trabalho e quantificar os desvios inerentes a mesma.

Tabela 3- Dados comparativos de alvura alveja e *grit* entre os mapas de qualidade “AA_MQ” e “GRIT_MQ”, e os realizados operacionais “AA_RO” e “GRIT_RO” referentes a amostragem com cavadeira.

Identificação	Cota	AA_MQ	GRIT_MQ	AA_RO	GRIT_RO
B-22-1	32-30	88.51	39.41	88.67	33.50
B-23-1	32-30	88.14	42.55	88.79	38.50
B-24-1	32-30	88.43	35.37	88.57	34.50
B-25-1	32-30	88.47	35.45	88.29	27.40
B-26-1	32-30	88.71	37.15	87.75	29.50
B-27-1	32-30	88.08	44.88	88.82	41.60

Tabela 4- Dados comparativos de alvura alveja e *grit* entre os mapas de qualidade “AA_MQ” e “GRIT_MQ”, e os realizados operacionais “AA_RO” e “GRIT_RO” referentes a amostragem com trado.

Identificação	Cota	AA_MQ	GRIT_MQ	AA_RO	GRIT_RO
B-16-1	32-30	88.92	49.41	88.78	33.1
B-16-2	30-28	88.20	58.26	87.68	50.1
B-16-3	28-26	88.85	65.66	88.31	64.4
B-21-1	32-30	88.78	35.55	88.69	31.2
B-21-2	30-28	88.45	54.86	87.73	50.7
B-22-1'	32-30	89.01	41.73	88.70	27.5

Identificação	Cota	(conclusão)			
		AA_MQ	GRIT_MQ	AA_RO	GRIT_RO
B-22-3	28-26	89.43	71.40	89.88	63.3
B-26-1'	32-30	88.70	36.75	88.85	26.6
B-26-2	30-28	88.67	51.66	88.16	48.5
B-27-2	32-30	88.92	35.35	88.53	36.1
B-27-3	30-28	88.40	49.24	88.29	51.1
B-28-1	26-24	88.73	71.21	88.04	69.9

Com base nos resultados obtidos foi possível realizar uma análise estatística bivariada entre as informações do modelo de blocos e as obtidas por meio das amostragens executadas. A ideia de que as variáveis estão correlacionadas é evidente, contudo, o quão determinístico o dado planejado se apresenta sobre o dado real necessita ser calculado. Para tal, os métodos estatísticos de regressão linear, correlação e diagrama de dispersão são aplicáveis, dado que os resultados mostram uma tendência linear entre si e são correlacionáveis.

Baseado no coeficiente de correlação de Pearson (r), calculado pela fórmula matemática abaixo:

$$r = \frac{cov(x, y)}{\sqrt{var(x) \cdot var(y)}} = \frac{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})(yi - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (yi - \bar{y})^2}}$$

Na equação acima, r é igual a covariância de x e y , dividido pelo desvio padrão de x multiplicado pelo de y , que desenvolvendo da origem a fórmula de somatórias ao lado.

O coeficiente r assume valores entre -1 e 1, sendo que quanto mais próximo de -1 tem-se uma correlação negativa perfeita, quanto mais próximo de 1 tem-se uma correlação positiva perfeita e quanto mais próximo de 0, significa que as duas variáveis não são correlacionáveis linearmente. A partir da definição de r é possível determinar o nível de intensidade da correlação, conforme mostra a tabela 5.

Tabela 5- Níveis de intensidade da correlação estatística linear

r (+ ou -)	Definição
0.00 a 0.19	Correlação muito fraca
0.20 a 0.39	Correlação fraca
0.40 a 0.69	Correlação moderada
0.70 a 0.89	Correlação forte
0.90 a 1.00	Correlação muito forte

Fonte: (Devore 2006).

Com o auxílio do programa *Microsoft Excel*, este coeficiente é calculado rapidamente pela fórmula “=CORREL”. Assim, tem-se que os coeficientes ρ para os parâmetros analisados são:

Tabela 6- Coeficientes de correlação (r) das variáveis quanto ao método de amostragem.

	Cavadeira		Trado	
	Grit	AA	Grit	AA
Coefficiente r	0.8659	-0.8383	0.9251	0.8693

Dessa forma, pode-se assegurar que o *grit* e a alvura alvejada na amostragem com cavadeira articulada, tem correlação forte com os valores estimados nos mapas de qualidade, em porcentagem seria 86.6% e 83.8% de correlação, respectivamente. Enquanto, a alvura alvejada e *grit* na amostragem com trado mecânico tem correlação muito forte e forte, de 92.5% e 86.9% respectivamente, com os dados estimados nos mapas de qualidade.

Há ainda o coeficiente de determinação (r^2), o qual varia de 0 a 1 e resulta da elevação do coeficiente de correlação ao quadrado, e também pode ser denotado pela fórmula:

$$r^2 = 1 - \frac{SQE}{SQT}$$

Em que:

SQE = Soma dos quadrados dos erros, desvios ou resíduos

SQT = Soma dos quadrados totais

O r^2 pode ser interpretado como uma proporção da variabilidade em uma variável que pode ser explicada pela variabilidade da outra, ou seja, como a proporção da variação em y pode ser explicada pelo modelo de regressão linear simples.

Dessa forma, com o auxílio do programa *Microsoft Excel*, os coeficientes de determinação são rapidamente calculados pela fórmula “=RQUAD”. Assim, tem-se que os coeficientes para as variáveis envolvidas neste trabalho são:

Tabela 7- Coeficiente de determinação (r^2) das variáveis quanto ao método de amostragem.

	Cavadeira		Trado	
	Grit	AA	Grit	AA
Coefficiente r^2	0.7498	0.7027	0.8559	0.7557

Com isto, pode-se afirmar que a variabilidade no *grit* real, pelo método de cavadeira, é explicada 75% pelo *grit* planejado, assim como a alvura alvejada é determinada 70.2% pela do

modelo. Para o trado, os valores encontrados foram maiores, 85.6% para do *grit* e 75.6% para a alvura alvejada.

Os resultados da amostragem com cavadeira articulada estão plotados nos diagramas de dispersão abaixo. No diagrama na figura 12.A, está retratada uma correlação linear positiva forte entre o GRIT_MQ (mapa de qualidade) e GRIT_RO (realizado operacional), isto implica interpretar que à medida que o x aumenta, y também aumenta proporcionalmente. Quanto ao diagrama da figura 12.B, pode-se afirmar que as alvuras estão correlacionadas de forma linear negativa forte, isto é, estão inversamente proporcionais.

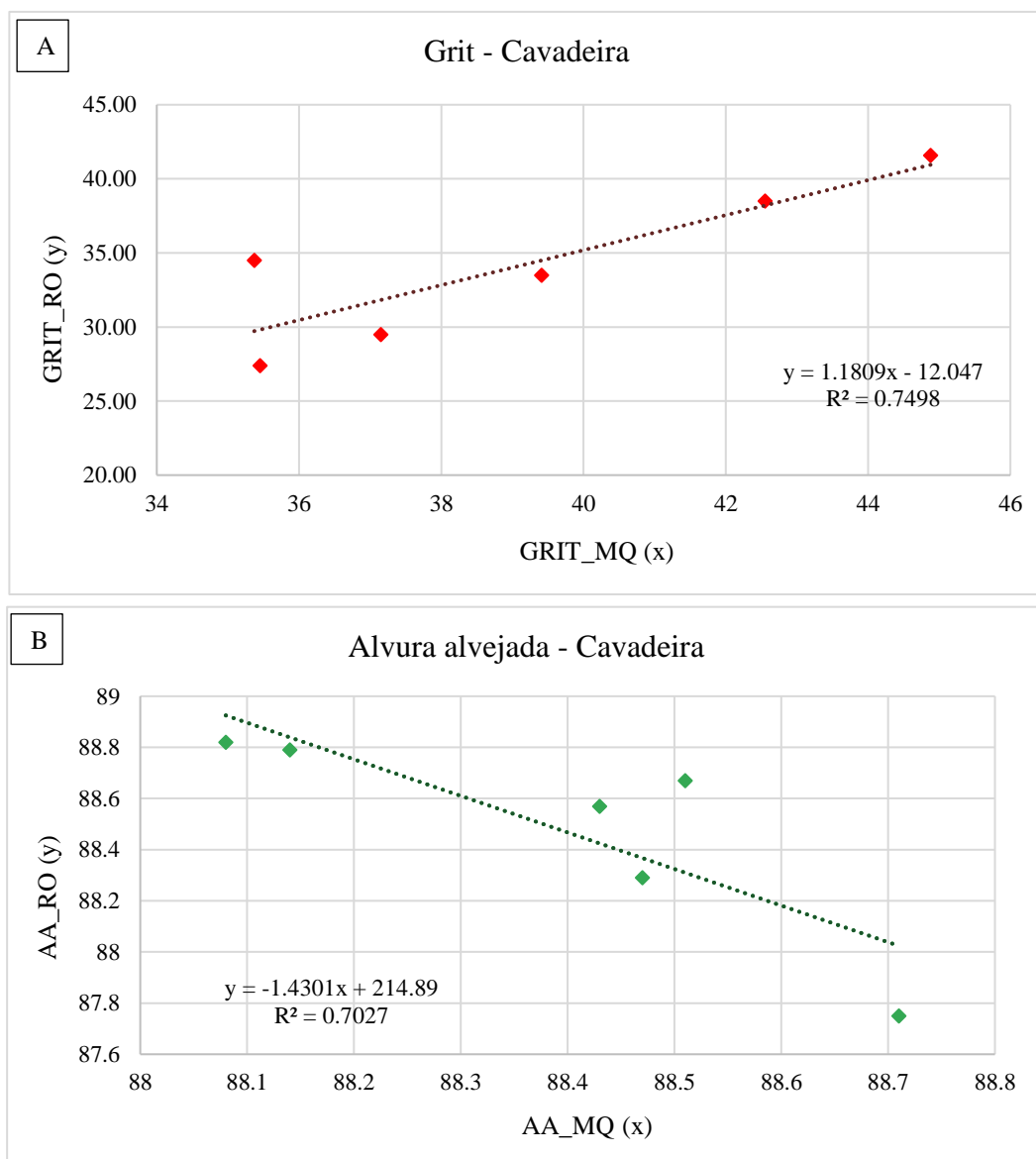


Figura 66- Diagramas de dispersão das variáveis executadas (y) em função das variáveis planejadas (x), referentes a método de amostragem com cavadeira. (A) Diagrama de dispersão do *grit*. (B) Diagrama de dispersão da alvura alvejada.

Nos resultados da amostragem com trado, nota-se que os valores são mais aderentes ao planejado. Na figura 13.A, a linha de tendência das estimações mostra uma correlação linear positiva muito forte entre o *grit* e na figura 13.B, há uma correlação linear forte entre os dados de alvura alvejada.

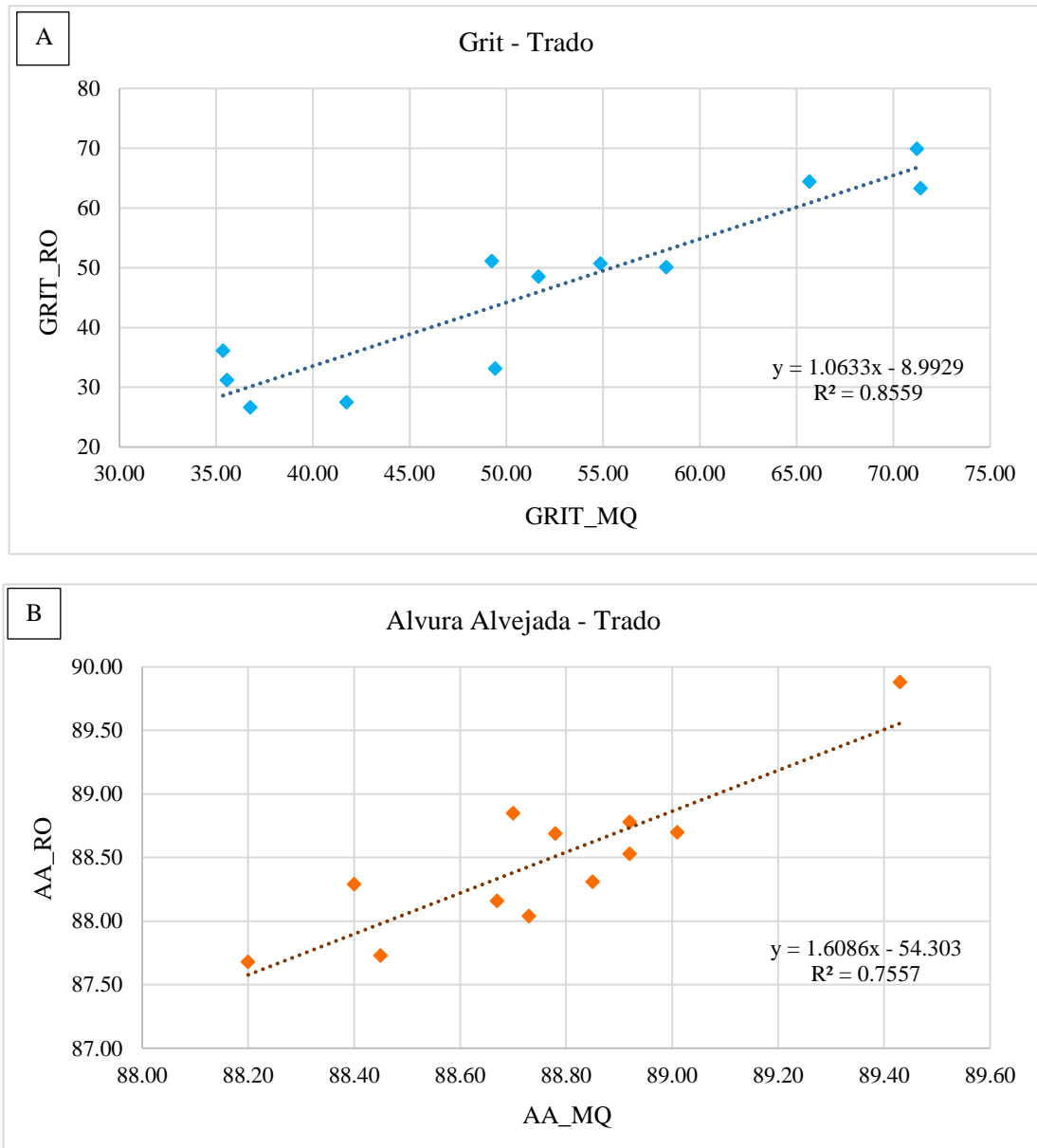


Figura 67- Diagramas de dispersão das variáveis executadas (y) em função das variáveis planejadas (x), referentes a método de amostragem com trado. (A) Diagrama de dispersão do grit. (B) Diagrama de dispersão da alvura alvejada.

5 DISCUSSÕES

Os mapas de qualidade constituem uma representação em duas dimensões do banco de dados tridimensional que é o modelo de blocos geológico. Ao longo do processo de desenvolvimento desta ferramenta, surgiram diversas adaptações visando adequá-la da melhor forma à utilização das partes interessadas. Neste caso, os supervisores e equipes de lavra, das quais foram emitidos *feedbacks* positivos sobre a função orientativa dos mapas de qualidade durante a execução do processo de exploração. Desta forma, denota-se que o ganho qualitativo deste produto cartográfico para as atividades de lavra foi alcançado, expressado pela sua boa receptividade e efetiva utilização. No entanto, foram realizadas campanhas de amostragem como incremento na validação dos resultados.

No processo de amostragem de materiais heterogêneos, como rochas, o erro amostral é intrínseco, mesmo quando o protocolo amostral empregado é teoricamente correto e perfeitamente executado (Gy 1982). Desta maneira, todos os métodos terão seu percentual de erro associado. Os métodos utilizados para realização das amostragens relatadas neste trabalho, são largamente praticados em solos e rochas brandas. Contudo, dada a diferença entre as sistemáticas, ambos possuem resultados divergentes, principalmente em relação a recuperação e contaminação das amostras. Neste caso, o método utilizado, o qual apresenta maior recuperação e menor contaminação consiste na sondagem com trado mecânico. Isto significa que os resultados referentes a este método possuem maior confiabilidade, por incorporar menor quantidade de erros sistemáticos ao processo de amostragem.

Os dados amostrais obtidos por meio do procedimento com cavadeira articulada, mostram que há uma correlação forte dos resultados planejados nos mapas de qualidade, com as análises dos blocos coletados em campo. Contudo, por este método apresentar maiores vieses o coeficiente de determinação indicou que aproximadamente 75% do valor do *grit* obtido na realidade estava concordante com o *grit* mostrado nos mapas, os demais 25% são variações que podem ocorrer por conta de outros fatores. O mesmo vale para a alvura alvejada, a qual apresenta 70% de aderência com os dados estimados no modelo de blocos.

Em contrapartida, os dados amostrais obtidos pelas análises das amostras feitas com trado mecânico mostram melhor aderência aos valores inseridos nos mapas de qualidade. Os coeficientes de determinação para os parâmetros avaliados indicaram, em torno de 85% e 75% de acertabilidade entre os resultados amostrados e propostos pelo modelo.

Os fatores associados aos desvios dos resultados podem estar relacionados a própria metodologia empregada para realizar a amostragem, como já mencionado anteriormente.

Fatores topográficos como, deslocamento das coordenadas dos furos, variações de cota e delimitação do intervalo amostral também podem contribuir para os erros. Além disso, a presença de água a partir de algumas cotas mais baixas, também interfere na recuperação das amostras, e conseqüentemente nos seus resultados. Os desvios inerentes ao processo de preparação e análise das amostras são atribuídos tanto aos valores estimados nos mapas de qualidade, quanto aos valores medidos nas amostragens, logo não são tão relevantes pra explicar a variações existentes.

O método de sondagem rotativa diamantada *wireline* é utilizado nas campanhas de sondagem exploratórias até malhas de pré-produção de 35 x 35 m, nas minas. O indicador de recuperação dos furos feitos por este equipamento está em torno de 92%, pois além do método propiciar uma boa recuperação são utilizados insumos no processo, os quais permitem com que as amostras sejam melhores recuperadas. Após a validação dos dados obtidos pela sondagem, descrição e análise das amostras, o modelo de blocos da jazida é confeccionado e o método de estimativa geoestatística utilizado, é a krigagem ordinária, aceito atualmente como o melhor método de estimativa linear não enviesado. Ademais, os dados de reconciliação dos últimos meses das minas mostram que o valores de *grit* e alvura alvejada da alimentação do processo, ou seja, medidos na primeira etapa de beneficiamento estão oscilando em torno de 4 a 7% para o *grit* e -0.1 a -0.3% para a alvura alvejada em termos de desvios entre o determinado pelo modelo de blocos e o realizado operacional. Estes resultados corroboram com a ideia de que o modelo geológico ainda está mais aderente a realidade do processo do que as amostragens feitas para validação dos mapas, o que pode também ser explicado pelo método de sondagem e estimativa utilizados, haja vista que a amostragem realizada neste trabalho foi em pequena escala.

No processo de reblocagem, quanto maior o redimensionamento dos blocos, mais estes variam do modelo de blocos original que possuem dimensões de 0.5 x 0.5 x 0.5 m. Dessa forma, a amostragem realizada nos blocos de 50 x 50 x 2 m (cavadeira) tendem a estar mais longe do real do que a amostragem nos blocos de 25 x 25 x 2 m (trado), constituindo também, um fator que proporciona maior variação entre os resultados.

6 CONCLUSÕES

Os mapas de qualidade como representação planimétrica do modelo de blocos se mostraram uma ferramenta com boa aceitabilidade pelos utilizadores, gerando ganhos qualitativos por promoverem uma melhor localização e georreferenciamento das atividades de lavra. Com as amostragens realizadas tornou-se exequível a confirmação das informações previstas no modelo e representadas nos mapas. Baseando-se nesses dados amostrais e estatísticos estudados, foi possível calcular qual a correlação entre os dados planejados, com as informações dadas como reais, obtidas a partir das campanhas de amostragens realizadas.

De modo geral, os modelos de blocos das jazidas estudadas são gerados a partir da interpolação por krigagem ordinária, dos dados obtidos por meio das campanhas de sondagens rotativas com malha até 35 x 35 metros. A confecção dos mapas de qualidade é executada a partir desses dados interpolados e redimensionados. Para atestar a previsibilidade dos mapas gerados, as amostragens com cavadeira articulada e trado mecânico foram planejadas e executadas nas frentes de lavra. E a partir das análises estatísticas dos resultados laboratoriais dessas amostras constatou-se que, dada a correlação entre as variáveis e a tendência linear dos resultados plotados em diagramas de dispersão, os conceitos de regressão são estatisticamente aplicáveis. Portanto, tem-se que, as correlações entre os dados planejados e executados está entre 83% e 92%, denotando um nível de correlação forte a muito forte, de acordo com o coeficiente de Pearson. Além disso, o coeficiente de determinação indica que no mínimo 70% a no máximo 85% das informações do planejado podem ser definidas no executado, isso implica dizer que a porcentagem residual desta operação não pode ser explicada pelas variações no modelo, e é atribuída a fatores externos que podem interferir no processo.

Vale ressaltar que a amostragem realizada para validar este trabalho, ocorreu com um pequeno intervalo amostral. Além disso, para os mapas de qualidade ficarem mais assertivos depende diretamente do que está previsto no modelo de blocos. Desta maneira, as reconciliações apresentam fundamental importância para adequar o modelo teórico a realidade.

Dessa forma, pode-se concluir que os mapas de qualidade desenvolvidos neste trabalho, são ferramentas simples e aplicáveis ao planejamento de lavra de curto prazo das minas A e B estudadas, com grau de variabilidade baixo e aceitabilidade elevada, tanto como ferramenta de visualização cartográfica, quanto a assertividade dos resultados, podendo assim auxiliar no controle de qualidade das frentes de lavra e promover uma maior previsibilidade e seletividade do minério, principalmente em relação ao estéril interno, diminuição a diluição. E ainda possibilitando uma melhor formação das pilhas de minério, assegurando que as etapas de

beneficiamento sejam alimentadas com material seguindo os parâmetros tecnológicos e econômicos da jazida.

REFERÊNCIAS

- Alves J.L.O. 2020. *Uso de grids não-estruturados no planejamento de lavra de curto prazo*. Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 82 p.
- Brasil Mineral. 2010. *Imerys compra 86,2% da PPSA*. IBRAM. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/imerys-compra-862-da-ppsa/>. Acesso em 25/05/2021.
- Brasil. 1967. Código da Mineração. *Decreto-Lei N° 227*, de 28 de fevereiro de 1967. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del0227compilado.htm. Acesso em: 24/05/2021.
- Bussab W. & Bolfarine H. 2005. *Elementos de amostragem*. São Paulo, Edgar Blucher, 290 p.
- Câmara T.R. 2013. *Sistematização do cálculo de diluição e perdas operacionais para reconciliação de teores e massas em lavra a céu aberto*. Dissertation, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, 89p.
- Costa M.L., Sousa D.J.L., Angélica R.S. 2009. The contribution of lateritization processes to the formation of the kaolin deposits from eastern Amazon. *Journal of South American Earth Sciences*, **27**: 219–234.
- Crawford G.D. 2004. Dilution and ore recovery. *Pincock Perspectives*, **60** (4): 487-490.
- Criscuolo P.S.R. 2008. Beneficiamento do caulim duro das bacias dos rios Capim e Jari através do processo de agregação seletiva. Dissertation, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 80 p.
- Curi A. 2014. *Minas a céu aberto: planejamento de lavra*. São Paulo, Oficina de Textos.
- Davis G.A. & Newman A.M. 2008. Modern strategic mine planning. In: Australian Mining Technology Conference. *Proceedings*[...]. Carlton, Australia. p. 129-139.
- Devore J. L. 2006. *Probabilidade e estatística para engenharia e ciências*. Tradução Joaquim Pinheiro Nunes da Silva. São Paulo, Pioneira Thomson; Learning.
- Faria Jr Agenor de. 2010. *Aprimoramento no controle de qualidade do minério no planejamento de lavra de curto prazo: estudo de caso*. Dissertation, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 140p.
- Farias J.O.G. 2009. *Relatório técnico 39 – perfil do Caulim*. Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010 - 2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Ministério de Minas e Energia. 61 p.
- Fouet T., Riske R., Morley C., Cook A. Conti D., Centofanti J. 2009. Standardising the reconciliation factors required in governance reporting. In: 7th International Mining Geology Conference. Austrália, *Proceedings*[...]. p. 127-139.
- Gy P. 1982. *Sampling of particulate materials - theory and practice*. 2. ed. Amsterdam, Elsevier.

Godoy M.C. 1997. *Minimização de perdas em operações de lavra seletiva incorporando a incerteza da estimativa no controle de teores*. Dissertation, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, 91p.

Gonçalves I.G. 2009. *Determinação da concentração de contaminantes no caulim através da teoria de Kubelka-Munk*. Dissertation, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 45 p.

Hartman H.L. & Mutmanský J.M. 2002 *Introductory mining engineering*. New York, John Wiley and Sons, Inc. 570 p.

Jara R.M., Coubl, A., Emery X., Magri E.J., Ortiz J.M. 2006. Block size selection and its impact on open-pit design and mine planning. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, : 205-212.

Jordan B. 1996. Brightness: basic principles and measurement. *In: Dence C. W. & Reeve D. W. (ed.). Pulp bleaching: principles and practice*. Atlanta, TAPPI, p. 695-716.

Juran J.M. 2009. *A qualidade desde o projeto: os novos passos para o planejamento da qualidade em produtos e serviços*. São Paulo, Cengage Learning, 551p.

Kim Y.G. 1978. Open pit limit analysis. *In: Weiss A. (ed.). Computer methods for the 80's in the mineral industry*. [S.l.], SME-AIME, p. 297-303.

Kotschoubey B., Trukenbrodt W., Hieronymus B. 1996. Depósitos de caulim e argila “semi-flint” no noroeste do Pará. *Rev. Bras. Geoc.*, **26**:71-80.

Lopes R.A.F. 2019. *Planejamento de lavra a céu aberto*. Material de apoio. Curso de Especialização em Lavra de Minas a céu aberto, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 48 p.

Luz A. B. & Lins F. A. F. 2005. *Rochas & minerais industriais: usos e especificações*. Rio de Janeiro, CETEM/MCT.

Macêdo Filho G., Alfonso P., Souza J. C. 2012. *Lavra em tiras – uma alternativa econômica e ambiental na mineração de gipsita no Pólo Gesseiro do Araripe*. *In: Congresso Brasileiro de Mina à Céu Aberto. Anais[...]*. Belo Horizonte, IBRAM com a UFMG.

Murray H.H., Alves C.A., Bastos C.H. 2007. Mining, processing and applications of the Capim Basin kaolin, Brazil. *Clay Minerals*, **42**: 145–151

Mussel W.N., Murad E., Criscuolo P.S.R., Pinheiro P.G., Fabris J.D. 2008. Variation of mineralogy during the beneficiation of Capim kaolin from Pará, Brazil. *Clay Minerals*, **43**: 381–391.

Peroni R.L. 2002. *Análise de sensibilidade do sequenciamento de lavra em função da incerteza do modelo geológico*. PhD Theses, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 143 p.

Potvin Y. 2006. Strategic versus tactical approaches in mining. *In: Australian Center for Geomechanics. International Seminar, Proceedings[...]* 20 p.

- Pruett R.J. 2016. Kaolin deposits and their uses: Northern Brazil and Georgia, USA. *Applied Clay Science*, **131**: 3-13.
- Rossetti D.F. 2004. Paleosurfaces from northeastern Amazonia as key for reconstructing paleolandscapes and understanding weathering products. *Sedimentary Geology*, **169**: 151-174.
- Rossetti D.F. 2006. Evolução sedimentar miocênica nos Estados do Pará e Maranhão. *Geol. USP, Sér. Cient.*, São Paulo, **6** (2): 7-18.
- Rossetti D.F. & Santos Jr. A.E.A. 2006. Analysing the origin of upper cretaceous-? Lower tertiary Rio Capim semi flint kaolin (Para State, Brazil) under a sedimentologic perspective. *Sedimentary Geology*, **186**: 133-144.
- Sabedot, S.; Kautzmann, R.M.; Petter, C.O.; Sampaio, E.C.H. 2014. Minerais contaminantes do caulim da mina Ipixuna, no estado do Pará: características e interferências no beneficiamento mineral. *Holos*, Ano 30, **3**, Edição Especial, XXV ENTMME / VII MSHNT, p. 349-357.
- Santos Jr. A.E. & Rossetti D.F. 2003. Paleoambiente e estratigrafia da Formação Ipixuna, área do Rio Capim, Leste da sub-bacia de Cameté. *Revista Brasileira de Geociências*, **33** (3): 313-324.
- Santos Jr. A.E.A., Rossetti D.F., Murray H.H., 2007. Origins of the Rio Capim kaolinites (northern Brazil) revealed by delta 18O and delta D analyses. *Applied Clay Science*, **37**: 281-294.
- Santos E., Scorzelli R.B., Bertolino L.C., Alves O.C., Munayco P. 2012. Characterization of kaolin from the Capim River region — Brazil. *Applied Clay Science*, **55**: 164-167.
- Sepuldeva F.J.P. 2019. *Planejamento estratégico de minas a partir de um modelo geo-mínero-metalúrgico*. Monografia, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade de Ouro Preto, Ouro Preto, 64 p.
- Silva N.C.S. 2008. *Metodologia de planejamento estratégico de lavra incorporando riscos e incertezas para obtenção de resultados operacionais*. PhD Theses, Escola Politécnica de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, São Paulo, 124 p.
- Sousa D.J.L. 2000. *Caracterização geológica, mineralógica, química e física do Caulim da Mina RCC – rio Capim Caulim (PA)*. Dissertation, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 119p.
- Torres A. *Desenho de polígonos e sequenciamento de blocos de minério para planejamento de curto prazo procurando estacionarização dos teores*. Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 102 p.
- Varela J.J., Gliese R., Petter C.O., Peixoto C.A. 2005. Controle de qualidade no processamento de polpas de caulim utilizando propriedades óticas. *REM Revista Escola de Minas*, **58** (3): 201-206.

Vasquez M.L, Sousa C.S., Carvalho J.M.A. 2008. *Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Pará, escala 1:1.000.000*. Programa Geologia do Brasil, Integração, atualização e difusão de dados da geologia do Brasil. Mapas Geológicos Estaduais. CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

Xavier M.E.S. & Costa M.L 2019. Visita às minas de fosfatos, caulim e bauxita na região nordeste do estado do Pará, Brasil. *Boletim do Museu de Geociências da Amazonia*, Ano 6 (2). Disponível em: <http://gmga.com.br/03-visita-as-minas-de-fosfatos-caulim-e-bauxita-na-regiao-nordeste-do-estado-do-para-brasil/>. Acesso em 25/05/2021.

Yamamoto J.K. & Ladim P.M.A. 2013. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo, Oficina de Textos, 215 p.

Yu Y., Denga K., Luob Y., Chenc S., Zhuanga H. 2018. An improved method for long-term stability evaluation of strip mining and pillar design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 107: 25–30.

Zhao X. & Niu J. 2020. Method of predicting ore dilution based on a neural network and its application. *Sustainability*, 12: 1-23.