

**Aplicação do six sigma no estudo de caso de uma mina de fosfato - Araxá-MG**

**Application of six sigma in the case study of a phosphate mine - Araxá-MG**

**Aplicación de six sigma en el caso de estudio de una mina de fosfato - Araxá-MG**

Recebido: 02/12/2020 | Revisado: 11/12/2020 | Aceito: 17/12/2020 | Publicado: 19/12/2020

**Lucas Redoan Cecílio Campos**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8645-9079>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: [lucas.redoan@gmail.com](mailto:lucas.redoan@gmail.com)

**Camila Nascimento Alves**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5093-7078>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: [camilanascimentoalves@gmail.com](mailto:camilanascimentoalves@gmail.com)

**Resumo**

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a aplicabilidade da metodologia Six Sigma para otimizar as atividades de gerenciamento de operações em uma mina de fosfato no município de Araxá, Minas Gerais, e assim conseguir aprimorar o modelo de blocos. Para isto, foi utilizado o modelo DMAIC - Definir, Medir, Analisar, Aprimorar e Controlar. Inicialmente foi definido a problemática e, perspectiva da pesquisa da geologia de mina. E, nas etapas posteriores foram empregadas ferramentas de melhoria contínua, como: mapa de processos, gráfico de pareto, diagrama de causa e efeito incluindo os KPI's - Indicadores-chave de Desempenho, matriz GUT - Gravidade, Urgência e Tendência e gráfico de controle, confeccionados utilizando o programa MiniTab. Os resultados apresentam a amostragem como indicador principal e desenvolve planos de ação de forma a complementar o trabalho base. Portanto, é possível entender a importância da metodologia Six Sigma aplicada na geologia de mina e sua representatividade na otimização das operações, com o uso de técnicas de melhoria contínua.

**Palavras-chave:** Mina de fosfato; Intemperismo; DMAIC; Geologia de mina; Modelo de blocos.

## **Abstract**

This work aims to present the applicability of the Six Sigma methodology to optimize operations management activities at a phosphate mine in the municipality of Araxá, Minas Gerais, and thus to improve the block model. For this, the DMAIC - Define, Measure, Analyze, Improve and Control model was used. Initially defined the problem, then the perspective of mine geology research and in the later stages, continuous improvement tools were used, such as: process map, pareto chart, cause and effect diagram including KPI's - Key Performance Indicator, GUT(Gravity, Urgency and Tendency) matrix and control chart, made using the MiniTab software. The results present sampling as the main indicator and develops action plans to complement the basic work. Therefore, it is possible to understand the importance of the Six Sigma methodology applied in mine geology and its representativeness in the optimization of operations, using continuous improvement techniques.

**Keywords:** Phosphate mine; Weathering; DMAIC; Mine geology; Block model.

## **Resumen**

Este trabajo tiene como objetivo presentar la aplicabilidad de la metodología Six Sigma para optimizar las actividades de gestión de operaciones en una mina de fosfato en el municipio de Araxá, Minas Gerais, y así mejorar el modelo de bloques. Para ello se utilizó el modelo DMAIC - Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. Inicialmente, se definió el problema y se definió la perspectiva de la investigación en geología minera. Y, en las etapas posteriores, se utilizaron herramientas de mejora continua, tales como: mapa de procesos, gráfico de Pareto, diagrama de causa y efecto incluyendo KPI's - Key Performance Indicators, matriz GUT - Gravedad, Urgencia y Tendencia y gráfico de control, hecho usando el programa MiniTab. Los resultados presentan el muestreo como indicador principal y desarrollan planes de acción para complementar el trabajo básico. Por tanto, es posible comprender la importancia de la metodología Six Sigma aplicada en geología minera y su representatividad en la optimización de las operaciones, utilizando técnicas de mejora continua.

**Palabras clave:** Mina de fosfato; Meteorización; DMAIC; Geología de mina; Modelo de bloques.

## 1. Introdução

Na estimativa de recursos minerais são utilizados modelos de blocos como ferramentas para avaliar, maximizar e otimizar os critérios econômicos, como o planejamento e controle de teor de um projeto (Vollgger et al., 2015). Todavia, a utilização de Modelos de Depósitos Minerais no Brasil tem recebido pouco incentivo em seu desenvolvimento e assim não maximizando todo o potencial representativo do local (Melfi et al., 2016).

Os modelos de blocos são desenvolvidos em ambiente computacional e representam o corpo de minério, onde cada bloco compõem um baixo volume de rocha constituída de minério e estéril (Poniewierski, 2019). Nesse processo, a fundamentação geológica depende de um conjunto de procedimentos lógicos, característico do raciocínio geológico (Frodeman, 2010).

Por conseguinte, o trabalho utiliza técnicas de melhoria contínua aplicadas ao estudo de caso da Mina F4, atual Mosaic Fertilizantes, localizada em Araxá - MG, abordando uma problemática relacionada as distintas características do minério no local, nesse caso a apatita - minério de fosfato, tanto em parâmetros mineralógicos, como químicos, existentes na região, bem como a dificuldade encontrada devido à alta variação da apatita, causada, principalmente, pelo intemperismo.

De acordo com Castiglione e Calazans (2011), a ideia de observar um conjunto de dados geológicos pode ter mais relevância em uma base com dados estruturada, podendo conseguir uma interpretação melhor e o desenvolvimento do conhecimento, utilizando principalmente, representações geoespaciais e geoinformacionais. Nesse contexto, estudos desenvolvidos para a otimização de um processo têm como base o Six Sigma, que utiliza o modelo DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) para melhoria contínua das atividades.

Essa técnica está associada a atividades estatísticas e ferramentas da qualidade (Parast, 2011). Portanto, é importante estruturar os parâmetros de influência na otimização do modelo de blocos, a partir dos dados que o geram e utilizando a técnica da gestão e qualidade adequada é possível conseguir a compreensão de modo sistemático dos dados da geologia de mina e assim apresentar parâmetros para um modelo de blocos otimizado.

A pesquisa tem como objetivo apresentar os indicadores-chave que influenciam na otimização do modelo de blocos. Para isto, existem algumas técnicas e ferramentas que são utilizadas para o desenvolvimento de um modelo de blocos, entretanto a assertividade do mesmo é um parâmetro que muitas vezes não está maximizada e, portanto, pode acontecer do

lucro operacional da empresa ser razoável. Segundo Pereira (2017), o REM (Relação Estéril/Minério) é o que determina a viabilidade econômica de uma Mina à Céu Aberto.

O intuito dessa pesquisa é avaliar as características geológicas do modelo de blocos da Mina F4 integradas a metodologia definida e assim, representando uma grande importância para a indústria da mineração, uma vez que utiliza a metodologia Six Sigma com o objetivo de estruturar as informações que influenciam no modelo de blocos, traçando planos de ação para melhoria dessa atividade e o mesmo, podendo ser utilizado para outros casos similares.

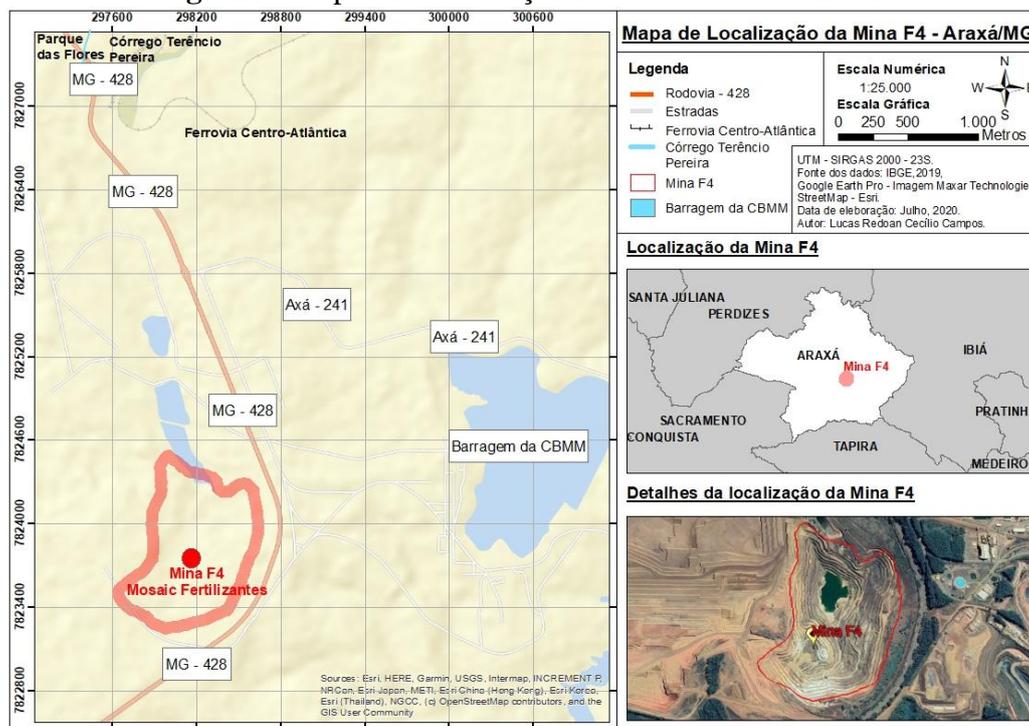
## 2. Materiais e Métodos

### 2.1 Área de Estudo

A Mina F4 (Figura 1), representada pela antiga Vale Fertilizantes, atual Mosaic Fertilizantes, local de estudo do presente trabalho, está localizada no município de Araxá - MG, Macrorregião do Alto Paranaíba, a 366km de Belo Horizonte - Minas Gerais, divisa com os municípios Sacramento, Tapira, Ibiá e Perdizes.

Geologicamente está inserida no Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro, representado pelas rochas ígneas ultramáfica metassomática, constituído também pela apatita - minério de fosfato local e pirocloro - minério de nióbio explorado na região.

**Figura 1.** Mapa de Localização da Mina F4 - Araxá/MG.



Fonte: IBGE, 2019; Google Earth Pro & StreetMap - Esri, 2020.

O local de estudo encontra-se na porção sul de Araxá, próximo a Mina do Barreiro e da CBMM, constituído por uma área de cerca de 761.364 m<sup>2</sup> e seu acesso é realizado pela rodovia MG-428.

## **2.2 Parâmetros Fisiográficos**

Segundo Rocha (2008), a fisiografia geral do município de Araxá é representada pelos respectivos parâmetros:

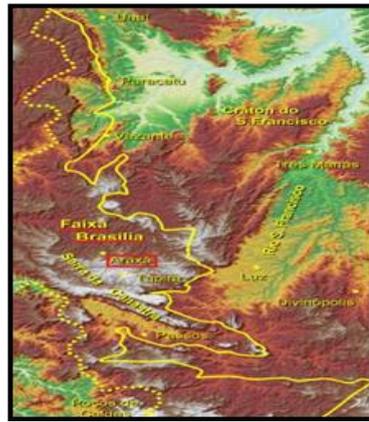
- Topografia: influenciado pelos aspectos morfoestruturais, a topografia predominante varia com altitudes de 900 a 1100m, com algumas exceções na parte sul, onde apresentam altitudes maiores que 1100m e na região norte onde as altimetrias são menores que 900m.
- Declividade: Cerca de 66,17% da área é caracterizada como suave-ondulado a ondulado, com porções representativas de 25,20% de plano a suave-ondulado e por fim cerca de 8,63% fortemente-ondulado (Brito, 2001).
- Hidrografia: composto por inúmeros córregos, Araxá está na divisa entre a Bacia do Rio Paranaíba e Rio Grande, tendo toda a rede hidrográfica do município fragmentada em 10 sub-bacias hidrográficas.
- Clima: representado por um clima subtropical úmido e temperatura média de 21°C.
- Solo e Vegetação: predominância de Latossolo Vermelho-amarelo com elevada quantidade de alumínio e vegetação típica de campo e cerrado.

## **2.3 Contexto Geológico**

### **2.3.1 Faixa Brasília**

A Faixa Brasília (Figura 2), pertencente ao neoproterozoico, possui 1200Km de comprimento e 300Km de largura, podendo ser fragmentada nos setores, meridional e setentrional, se estende nas porções do estado de Minas Gerais, Tocantins e Goiás (Uhlein et al., 2012).

**Figura 2.** Modelo digital de terreno (MDT) da Faixa Brasília Meridional.

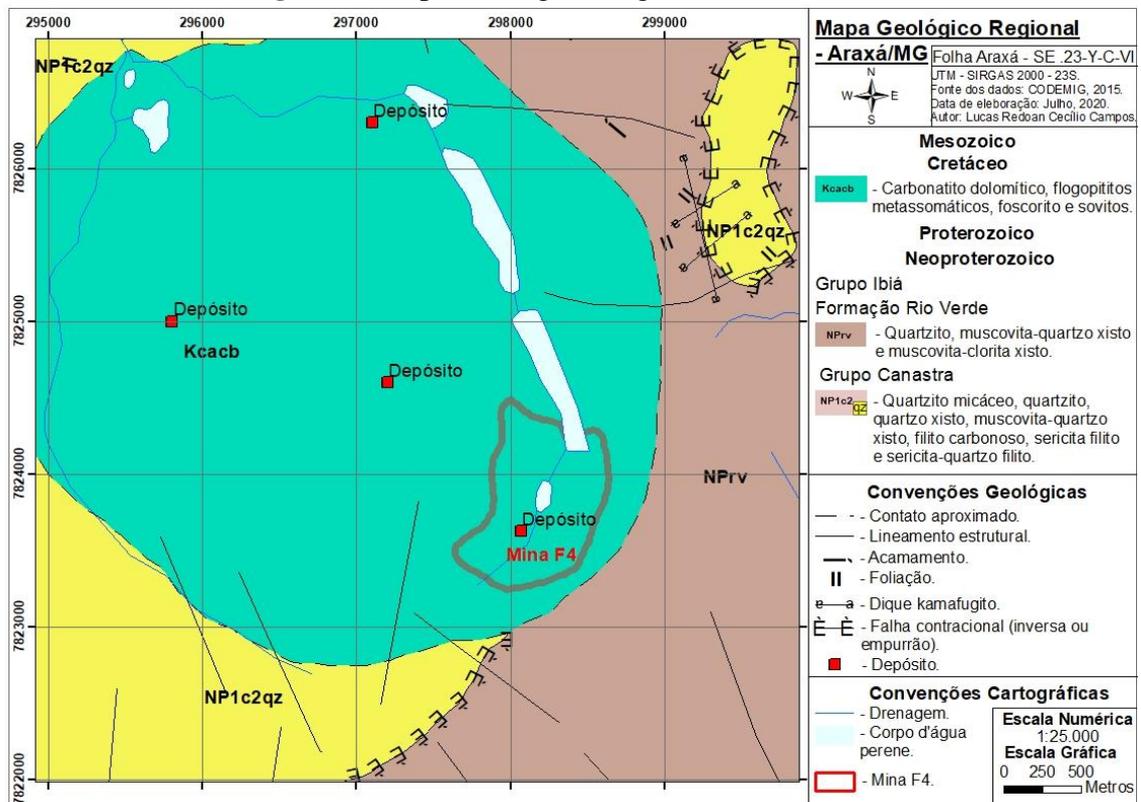


Fonte: Adaptado de Pinto & Silva (2014) e Valeriano et al. (2004).

A área de estudo do presente trabalho, está localizada na parte meridional da faixa e apesar de ter uma evolução tectônica similar a setentrional, a porção meridional apresenta características naturais e divergentes do outro setor (Dardenne, 2000).

Dessa forma, o conjunto metassedimentar da Faixa Brasília, porção meridional, é constituída por alguns grupos, pertencentes a região de estudo e estão expostos no mapa geológico (Figura 3).

**Figura 3.** Mapa Geológico Regional de Araxá/MG.



Fonte: Adaptado de CODEMIG (2015).

### 2.3.2 Grupo Canastra

O Grupo Canastra em conjunto com o Grupo Ibiá compõe a *nappe* da Sinforma Araxá, dobra localizada na parte sul da Faixa Brasília (Dias et al., 2011).

Esse grupo, é constituído de uma sequência de rochas metassedimentares, representadas por filitos, quartzitos e rochas carbonáticas (Dardenne, 2000). As características predominantes são: filitos com coloração prateada, com exceção quando intemperizado, pois a coloração se torna avermelhada e quartzitos com granulometria fina a média, sendo importante relatar a variação da espessura dessas rochas, desde a porção norte até a sul, onde deve ter acontecido encurtamento crustal (Pereira et al., 1994).

### 2.3.3 Grupo Ibiá

#### 2.3.3.1 Formação Rio Verde

As rochas classificadas como calcixistos (Figura 4) da Formação Rio Verde, localizados na porção sudoeste de Araxá são encontrados menos alterados nos afloramentos em leitos de drenagens, pedreiras e na região é comum estarem sobre uma capa de intemperismo, e essa rocha, denominada também de clorita-muscovita-quartzo xisto se expõe nos locais com cores variando de verde acinzentado a cinza prateado, aspecto laminado e quando intemperizada apresentam coloração rosa com bandamento branco (Dias et al., 2011).

**Figura 4.** Xisto cinza(a), xisto esverdeado(b) e xisto rosa, intemperizado(c).



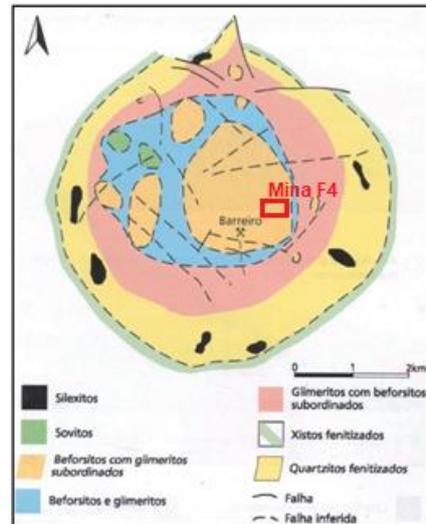
Fonte: Dias et al. (2011).

#### 2.3.4 Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro

As rochas classificadas como dolomita-carbonatitos (beforsitos), foscorito(rocha com apatita, magnetita, carbonato e flogopita) e glimeritos (carbonatitos constituídos

essencialmente por flogopita) fazem parte do Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro e possuem uma estrutura circular (Issa Filho, Lima & Souza, 1984), conforme exposto no mapa geológico do complexo (Figura 5).

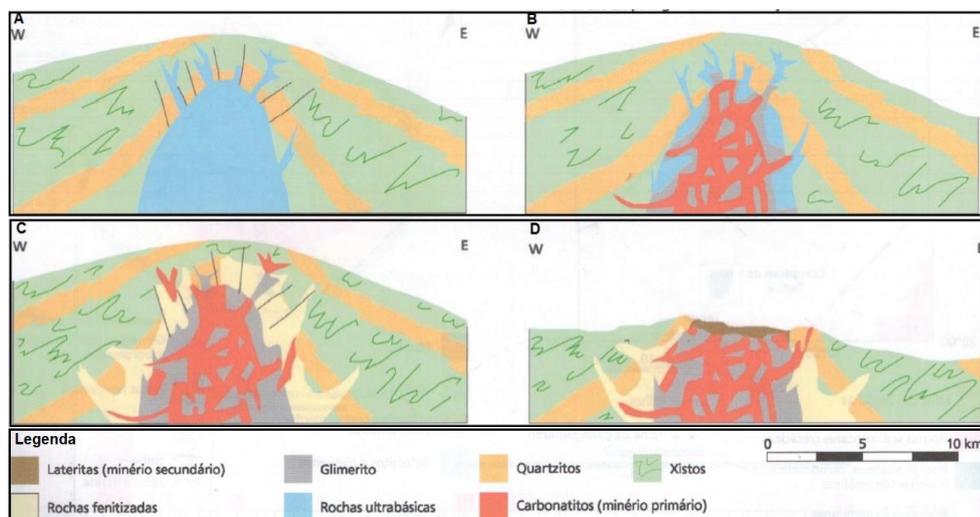
**Figura 5.** Mapa Geológico do Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro - Araxá/MG.



Fonte: Adaptado de Biondi (2015).

A área de estudo (poligonal vermelha), faz limites com as rochas abordadas no mapa geológico e a evolução geológica do complexo (Figura 6) é proveniente da intrusão das rochas ultrabásicas e dos carbonatitos (Biondi, 2015).

**Figura 6.** Sistema de evolução do Complexo Carbonatítico de Araxá. A - Intrusão de Rochas ultrabásicas, B - Intrusão de carbonatitos, C - Glimeritização das ultrabásicas e D - Cobertura Laterítica (Nb, P e ETR).



Fonte: Biondi (2015).

O processo intempérico e a erosão sobre as rochas alcalinas gerou um manto de intemperismo, resultando no enriquecimento residual de minerais e posteriormente, foram representados com quantidades de minério equivalente a 414 Mt de minério com 3,3% de  $P_2O_5$ , 546.000t com 4,4% de  $TR_2O_3$  e 462 Mt com 2,5% de  $Nb_2O_5$  (Biondi, 2015).

### **2.3.5 Mina de Fosfato - F4**

De acordo com Braga (2015), na Mina F4 é comum o processo de lavra ter enfoque em áreas com tipos de solos alterados, pois as reservas de fosfato, típico da região do Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro são mais expressivas nos locais onde apresentam alteração dos carbonatitos, e esses estão vinculados com a apatita.

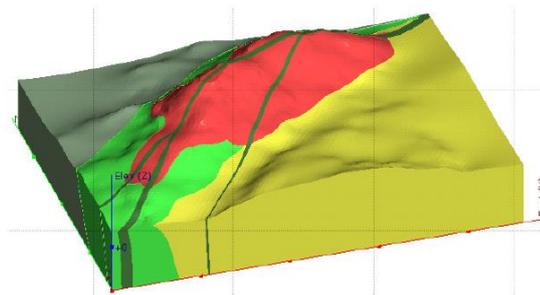
Sendo assim, os materiais e depósitos minerais lateríticos/supergênicos podem ser provenientes do manto de intemperismo(alterita) e são constituídos por minerais primários e secundários (Teixeira et al., 2009).

## **2.4 Construção do Modelo de Blocos**

### **2.4.1 Modelo Geológico de Curto Prazo**

A busca por informações geológicas sobre a estrutura e composição de uma área em subsuperfície está crescendo com o passar do tempo e em conjunto disso o desenvolvimento de modelos geológicos 3D vem sendo mais requisitado (Jorgensen et al., 2015). O percurso de aquisição de dados para o modelo é feito pelo mapeamento geológico, sendo utilizado escalas maiores para entender o contexto da região, escalas menores para compreender o processo mineralizador local, através da coleta e análise de amostras, confecção de mapas, seções geológicas-estruturais limitadas, bem como processos de investigação direta (Biondi, 2015). Na figura 7 consta um exemplo de um modelo de blocos 3D.

**Figura 7.** Modelo Geológico 3D desenvolvido no software LeapFrog Geo.

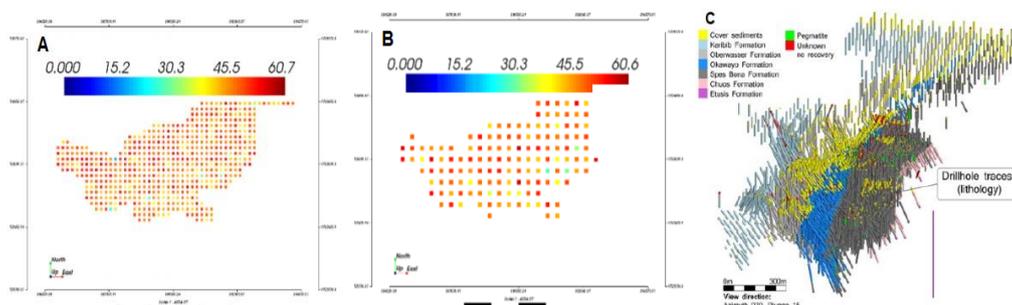


Fonte: Aranz, (2016).

Os modelos de blocos são representações digitais do mundo real em profundidade e possui propriedades geológicas proveniente dos dados inseridos (Thornton, Mariethoz & Brunner, 2018). Alguns desses parâmetros são: litologia, profundidade e teor de minério, propriedades metalúrgicas, posição do furo de sondagem, química, dentre outros dados que são disponibilizados, e tem como objetivo avaliar a viabilidade do depósito mineral e posteriormente a definição da reserva mineral (Vale, 2017).

No desenvolvimento das atividades para detalhar o minério em profundidade é programado uma malha de sondagem, alocando a mesma sobre os materiais de interesse e em seguida definindo os locais onde o “Nó da Malha” vai estar e assim realizando o furo de sonda sobre os pontos estabelecidos (Silva, 2019). Esses furos são executados de acordo com seus intervalos e os espaçamentos são definidos com base no tipo de minério a ser pesquisado (Vale, 2017). A figura 8 representa um modelo de malhas de sondagens com comprimentos e larguras diferentes, bem como furos de sondagem.

**Figura 8.** (a) malha de sondagem de 200x200m, (b) malha de sondagem de 400x400m e (c) sondagem realizada sobre os pontos de uma determinada malha de sondagem.



Fonte: Adaptado de Silva (2020) & Vollgger, et al. (2015).

A partir do modelo de blocos desenvolvido, proveniente de um modelo geológico, é possível realizar a lavra, empregando um algoritmo matemático construído por Lerchs e Grossmann em 1965, cujo objetivo era realizar a otimização da atividade de lavra, utilizando uma projeção matemática dos blocos que realiza a diferença entre o valor total de minério a ser explorado e o custo total de extração do estéril e do minério, fazendo com que resulte em um conjunto de blocos (Figura 9) com valores positivos e negativos e a lavra por sua vez, é realizada sobre os blocos positivos pois os mesmos possuem viabilidade econômica frente ao estéril (Silva, et al., 2020).

**Figura 9.** Modelo de Blocos com o corpo de minério delimitado.



Fonte: Adaptado de Lerchs e Grossmann (1965).

## 2.5 Geoestatística

### 2.5.1 Amostra e Processos de Amostragem

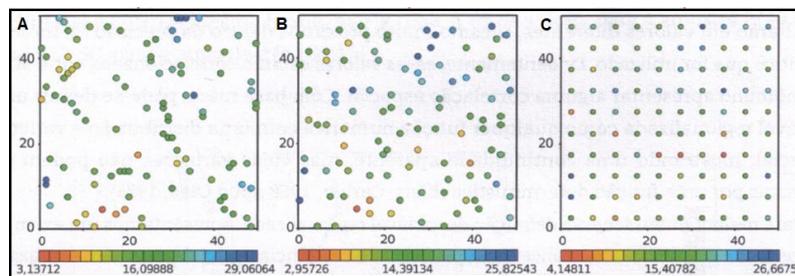
Na estimativa de recursos minerais é importante a caracterização de todo o domínio geológico e dessa forma a amostragem é necessária e responsável em apresentar dados sobre a geometria do corpo, massa e teor de minério (Yamamoto & Landim, 2015). Portanto, a atividade de amostragem está atrelada ao controle de qualidade (Grigorieff, Costa & Koppe, 2002).

O mapeamento das frentes de lavra, que busca a coleta de amostras representativas para futuros testes é de grande importância, pois com a aquisição de novos dados (mineralógicos, físicos e químicos) da amostra, o banco do modelo pode ser atualizado, simbolizando um importante aprimoramento do suporte amostral (blocos) (Costa et al., 2001). Esse suporte tem um papel fundamental na estimativa do teor de minério e parâmetros relacionados a geologia, pois o aumento ou redução do suporte influencia na estimativa do teor (Pereira, 2017). Dessa forma, o aumento do tamanho do suporte amostral, influencia na diminuição da variação do minério (Parker, 1979).

O suporte amostral deve ter como base o espaçamento entre os pontos da malha de amostragem, para assim, estabelecer dimensões ótimas. Segundo Yamamoto & Rocha (2017), as dimensões dos blocos devem ser iguais a metade da distância que separa os pontos da malha de amostragem, e representaria, no mínimo um ponto de amostragem no interior do bloco e assim forneceria maior qualidade a atividade.

No planejamento da amostragem é definido um método de coleta, o qual deve ser escolhido de acordo com a região e a partir dos métodos existentes (Figura 10): aleatória simples(a), estratificada(b) e sistemática(c) (Yamamoto & Landim, 2015).

**Figura 10.** Métodos de amostragem: aleatória simples(a), estratificada(b) e sistemática(c).



Fonte: (Yamamoto & Landim, 2015).

O método de maior assertividade é o sistemático, pois a malha desenvolvida é regular e isso faz com que ocorra uma otimização na coleta de amostras, todavia não é possível realizar esse procedimento de amostragem todas as vezes, pois depende de fatores geográficos da região de estudo (Yamamoto & Landim, 2015).

## 2.5.2 Erros de Amostragem

Existem critérios e cálculos para avaliar os erros de amostragens (erro total de amostragem, erro de amostragem e erro de preparação) conforme teoria de Pierre Gy (Goes, Luz & Possa, 2010). Além disso, existe uma conexão entre a teoria de Pierre Gy e as ferramentas existentes na geoestatística, o qual um trabalho pode ser melhor interpretado com a complementação do outro (François-Bongarçon, 2004).

Utilizando estudos geoestatísticos, em específico da krigagem - técnica utilizada na estimativa de teores de minério, é possível, a partir de pontos com teores definidos de um local, realizar inferências espaciais em áreas não conhecidas, próximas a esse espaço e assim estabelecendo os valores de teores de pontos adjacentes, mas não conhecidos. (Mello, 2004). Assim, o uso de técnicas geoestatísticas tem auxiliado na diminuição dos erros de

amostragem. A seguir, descrevem-se alguns algoritmos amplamente utilizados na modelagem geológica de blocos.

A ferramenta mais comum é a modelagem explícita e consiste no processo manual da modelagem de cada contato que forma o corpo do minério (Cowan et al., 2003). No entanto, com o surgimento da modelagem implícita os procedimentos manuais estão sendo menos utilizados, pois essa ferramenta, através de algoritmos computacionais realiza toda a conexão dos contatos de forma automática e vem substituindo a digitalização manual (Silva, 2015).

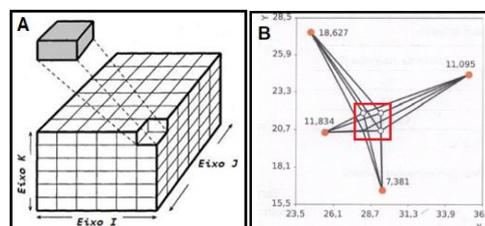
### 2.5.3 Krigagem Ordinária

#### 2.5.3.1 Krigagem de Blocos e Técnica ANOVA

A Krigagem Ordinária é um método de estimativa que utiliza um conjunto de dados para estimar um valor inexplorado em um determinado ponto (Conde & Yamamoto, 2017). Dessa forma, no ramo da mineração a ideia é definir o teor de minério existente em cada bloco (Figura 9-a) com o objetivo de atingir a demanda da produção estabelecida no período (Yamamoto & Landim, 2015).

A Krigagem de blocos (Figura 11) é uma alternativa eficiente proveniente da krigagem ordinária para melhoria da estimativa do teor do bloco, sendo que o teor contido no bloco é estimado com base em fragmentos existentes no próprio bloco e dessa forma o valor do teor estimado tem maior precisão (Conde & Yamamoto, 2017).

**Figura 11.** Modelo de Blocos (a) e (b) desenvolvimento do teor médio do bloco de acordo com os pontos associados a estimativa utilizada pelo método de krigagem de bloco.



Fonte: Adaptado de

Yamamoto e Rocha (2017) e Yamamoto e

Landim (2015).

Para atribuir maior assertividade a krigagem de blocos, a técnica ANOVA (Análise de Variância) pode ser utilizada no intuito de verificar a diferença existente entre as médias e se os parâmetros definidos influenciam na variável, fazendo com que ocorra um entendimento

sobre os dados, definindo assim informações significativas e possíveis erros de experimento (Custódio et al., 2011).

## **2.6 Estratégia Aplicada no Modelo de Blocos**

### **2.6.1 Six Sigma**

O Six Sigma é uma metodologia que foi desenvolvida em 1980 pela empresa Motorola e tem como objetivo realizar um conjunto de práticas que garantem uma melhoria nos processos (Pirasteh & Fox, 2010).

Logo, segundo McCarthy e Stauffer (2001), o Six Sigma é a metodologia com maior poder de desenvolver mudanças significativas nos processos dos serviços e produtos de uma empresa.

De acordo com Pacheco (2014), a metodologia sigma ( $\sigma$ ) é representada por 3,4 defeitos por milhão de oportunidades (Tabela 1) e esse processo é determinado pelo desvio padrão. Essas 3,4 peças por defeito a cada milhão de peças verificadas é o que é realizado para um processo ser denominado Six Sigma (Cabral et al., 2019).

Apesar disso, as empresas consideram normais quando um processo é classificado como nível sigma 3 ou 4, mesmo sabendo que isso resulta entre 6,2 mil e 67mil problemas por milhão de oportunidades (Pinho et al., 2020).

Dessa forma, quanto menor for o desvio padrão, melhor será a assertividade do trabalho, devido a menor variação dos resultados e conseqüentemente diminuirá as falhas na atividade (Trad & Maximiano, 2009).

A tabela 1 representa cada nível sigma( $\sigma$ ), o que significa que quanto maior for o nível sigma, menos defeitos existe no processo e assim maior é a qualidade.

**Tabela 1.** Escala do Six Sigma.

| Nível Sigma ( $\sigma$ ) | Nível de Qualidade (%) | Taxa de erro (%) | Defeitos por milhão de oportunidades | Custo da não qualidade (%) do faturamento) |
|--------------------------|------------------------|------------------|--------------------------------------|--|
| 1                        | 30,90                  | 69,10            | 691,462                              | Não se aplica                              |
| 2                        | 69,10                  | 30,90            | 308,538                              | Não se aplica                              |
| 3                        | 93,30                  | 6,70             | 66,807                               | 25 a 40                                    |
| 4                        | 99,38                  | 0,62             | 6,21                                 | 15 a 25                                    |
| 5                        | 99,977                 | 0,023            | 233                                  | 5 a 15                                     |
| 6                        | 99,99966               | 0,00034          | 3,4                                  | <1   |

Fonte: Adaptado de Harry e Schroeder (2000).

O projeto é considerado 6 Sigma, quando o processo tiver 99,99966% de perfeição e assim garantindo uma mínima taxa de erro na atividade. Esse maior nível de qualidade que fornece projetos 6 sigma é essencial no aumento do lucro de empresas de mineração, principalmente quando estamos lidando com modelos de blocos, pois cada teor específico do bloco influencia no resultado final do modelo.

Assim, segundo Pacheco (2014), para implementar o Six Sigma deve ser desenvolvido etapas para a melhoria contínua das atividades e estas envolvem alguns modelos, como é o caso do DMAIC - *Define(a)*, *Measure(b)*, *Analyze (c)*, *Improve(d)* e *Control (e)*.

Essa metodologia tem como objetivo alcançar as metas estratégicas de uma empresa e para isso, são seguidas 5 etapas que orientam a execução das atividades para obter soluções na melhoria de um produto ou processo existente (Reis, Carvalho & Euzébio, 2017).

As fases são estabelecidas para aperfeiçoar os processos existentes e devem ser seguidas de acordo com as etapas.

- (a) - Definir: identificação do problema.
- (b) - Medir: mensurar o desempenho do processo.
- (c) - Analisar: identificar a causa e efeito do problema.
- (d) - Aprimorar: fornecer soluções ao problema.
- (e) - Controlar: utilizar ferramentas de monitoramento no processo.

## **2.7 Materiais**

### **2.7.1 Base de Dados**

Os materiais utilizados neste trabalho, foram adquiridos através de relatórios técnicos, artigos científicos, livros, pesquisas bibliográficas nacionais e internacionais.

Os mapas utilizados no referencial teórico foram modificados e confeccionados na escala de 1:25.000, utilizando o *software* ArcGis 10.5 da empresa *Esri*. Os dados referentes ao mapa de localização foram retirados da base do IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística do ano de 2019 e as informações geológicas da CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais de 2015. Ademais, a imagem de satélite inserida no mapa de localização foi retirada do *Google Earth Pro*, do CNES - Centro Nacional de Estudos Espaciais Francês em 2020.

O *software* estatístico MiniTab é um programa pago que possui 1 mês de licença gratuita para trabalhos acadêmicos e tem como objetivo fornecer ferramentas para realizar análises estatísticas. Esse aplicativo foi utilizado no resultado do trabalho, para a organização e aplicação de ferramentas na definição dos parâmetros de influência dos indicadores do modelo de blocos.

A partir dos dados dos resultados do mapeamento de mina da dissertação de mestrado da autora - Silvânia Alves Braga(2015), o qual apresentou um trabalho sobre a krigagem dos indicadores aplicada a modelagem das tipologias de minério fosfatados da Mina F4, foi possível realizar um estudo com os dados mineralógicos das amostras e técnicas associadas, utilizando os mesmos como base para confecção do gráfico de pareto, diagrama de causa e efeito e gráfico de controle, ferramentas importantes inclusas na aplicação do Six Sigma. Ademais, foram utilizados a matriz GUT e KPI's para melhoria das atividades da geologia de mina.

## **2.8 Metodologia**

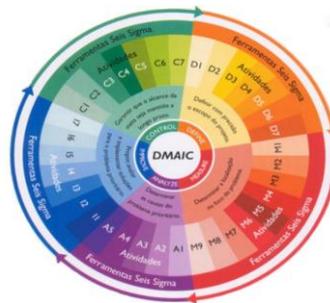
### **2.8.1 Six Sigma e Aplicação do Ciclo DMAIC**

A aplicação do Ciclo DMAIC (Figura 12), tem como base trabalhos de Werkema (2004), Mccarthy e Stauffer (2001), (Cabral et al., 2019), Harry e Schroeder (2000), Pacheco (2014), Parast (2011), Parasteh e Fox (2011), dentre outros autores, abordando de forma representativa a aplicação da ferramenta. De acordo com Pereira et al. (2018) a metodologia

abordada é de natureza quali-quantitativa, pois contém uma estrutura quantitativa fundamentada pela atividade estatística proveniente de dados e qualitativa pois possui complemento de citações literais.

Portanto, o Ciclo DMAIC foi empregado sobre as informações fornecidas pelos resultados dos dados químicos e mineralógicos, alocando os mesmos no *software* MiniTab. Na etapa 1 foi possível definir a problemática, meta a ser alcançada, clientes afetados e impacto do projeto, utilizando o mapeamento de processos (ferramenta utilizada para detalhar a ação das atividades da geologia de mina) como base e na etapa 4 a aplicação da matriz GUT (Gravidade, Urgência e Tendência). Já o MiniTab, foi utilizado para desenvolver o gráfico de Pareto na etapa 2, diagrama de causa e efeito na etapa 3 e gráfico de controle na etapa 5.

**Figura 12.** Modelo DMAIC de forma detalhada.

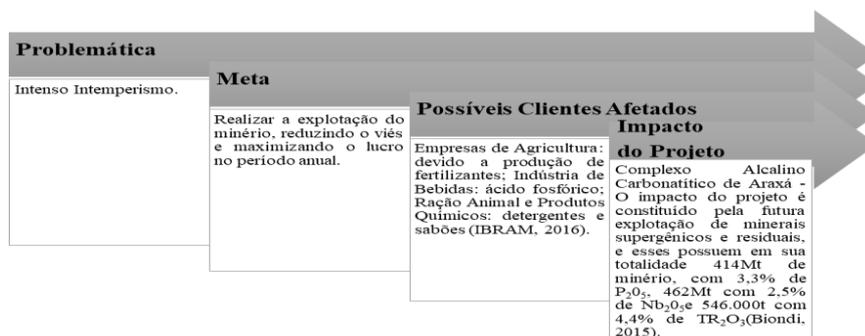


Fonte: Werkema, (2004).

### 2.8.1.1 Definição dos Parâmetros de Estudo

O presente fluxograma (Figura 13), foi utilizado para representar as etapas que foram seguidas para entender de forma sistêmica a área de estudo e o mapa dos processos para detalhar o desenvolvimento das atividades propostas. Na primeira etapa foi definido a problemática, seguido pela meta, clientes afetados e impacto do projeto e no mapeamento dos processos as principais atividades a serem executadas.

**Figura 13.** Fluxograma do projeto da mina.



Fonte: Autores.

### **2.8.1.2 Mensurar o Processo Base**

Na avaliação das amostras foram importados no *software* MiniTab os dados mineralógicos correspondentes aos 5 blocos analisados.

Para averiguar a concentração química dos blocos, foram utilizados gráficos de pareto, com o intuito de entender a ordem de prioridades dos elementos abundantes contidos em cada bloco e assim determinar a constituição do minério de interesse e seus contaminantes.

### **2.8.1.3 Análise dos Processos e Classificações Definidas**

Nessa etapa são definidos os fatores e processos de influência na avaliação do modelo de blocos e foi utilizado o diagrama de causa e efeito (*ishikawa*) para tal atividade.

O diagrama foi utilizado com o objetivo de organizar as atividades, de modo a maximizar a visão sobre as classificações dos materiais e suas resultantes. Assim, com os parâmetros organizados foi possível definir os KPIs - *Key Performance Indicator* (Indicadores-chave de Desempenho).

### **2.8.1.4 Planos e Tarefas de Otimização**

Na otimização das tarefas de influência no modelo de blocos, os parâmetros foram separados de acordo com sua respectiva representatividade. Foi utilizado a Matriz GUT (Gravidade, Urgência e Tendência) para a classificação de prioridades.

Essa ferramenta apresenta a análise de 3 fatores (Gravidade, Urgência e Tendência), definindo um valor de 1 a 5, conforme demonstrado na Tabela 2, para os parâmetros escolhidos (Behr, Moro & Estabel, 2008).

**Tabela 2.** Matriz GUT.

| Nota | Gravidade          | Urgência                 | Tendência             |
|------|--------------------|--------------------------|-----------------------|
| 1    | Sem gravidade      | Pode esperar             | Não mudar nada        |
| 2    | Pouco grave        | Pouco urgente            | Piorar em longo prazo |
| 3    | Grave              | O mais rápido possível   | Piorar em médio prazo |
| 4    | Muito grave        | É urgente                | Piorar em curto prazo |
| 5    | Extremamente grave | Precisa ser resolvido já | Piorar rapidamente    |

Fonte: Adaptado de Behr, Moro e Estabel, 2008.

Ademais, foram sugeridos os planos de ação associados a amostragem, locomoção de contatos estéril/minério, manto de intemperismo e método de krigagem, levando em consideração o resultado da Matriz GUT.

### **2.8.1.5 Controle do Processos Base**

Nessa última fase, foi desenvolvido no MiniTab o gráfico de controle relacionado a percentagem mineralógica existente nos 5 blocos e foram calculados a média e desvio padrão.

O gráfico de controle teve ênfase na amostragem, pois é a base do modelo de blocos e foi resultante da ferramenta matriz GUT, o qual classificou a amostragem como maior prioridade.

## **3. Resultados e Discussão**

### **3.1 DMAIC Aplicado no Estudo de Caso**

#### **3.1.1 Define - Intemperismo**

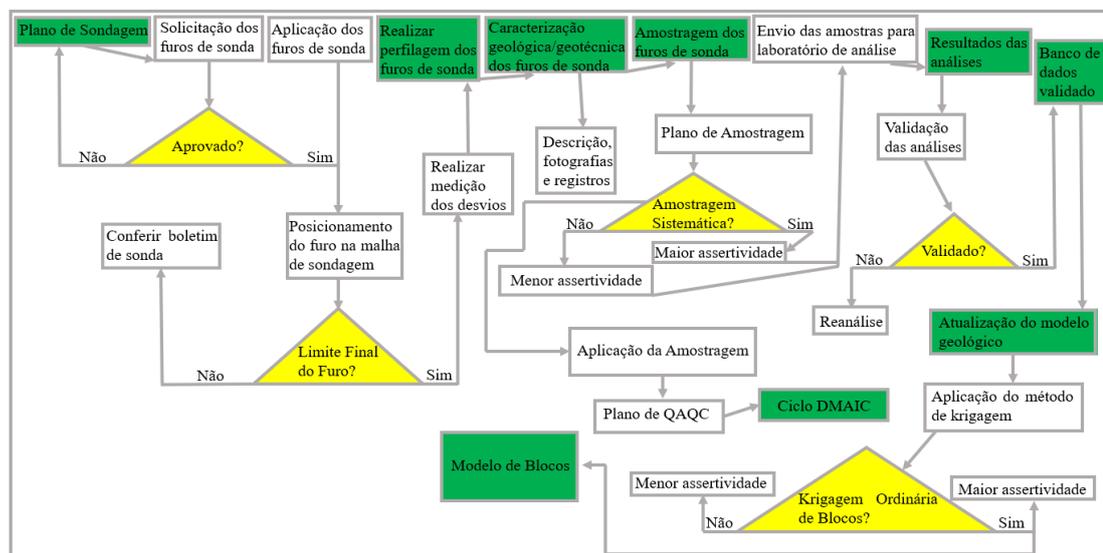
O carbonatito pertence ao complexo alcalino de Araxá e juntamente com os foscoritos são as rochas principais da mina de fosfato, principalmente devido à grande parte de seus constituintes serem carbonatos e estes possuem maior facilidade em se alterarem, e por esse quesito, é um dos motivos no qual é possível realizar a lavra. A grande questão é que a

atuação do intemperismo resultou em perfis lateríticos, sendo concentrado os minerais resistentes, tais como apatita e pirocloro, sendo ambos minérios lavráveis (Biondi, 2015).

Devido a apatita ser um mineral resistente, o processo intempérico resultou na concentração residual do minério de fosfato. Portanto, o mapeamento da mina e as atividades de lavra foram realizadas nos locais das zonas alteradas (Braga, 2015). Dessa forma, com o foco do mapeamento de mina em área alteradas, a identificação inicial das amostras acaba sendo mais demorada.

O mapeamento de processos (Figura 14) da geologia de mina representou os trabalhos a serem executados para otimizar os parâmetros influentes no modelo de blocos, mesmo com a dificuldade na análise das amostras de campo, devido ao intenso intemperismo local.

**Figura 14.** Mapa de processos da geologia de mina.



Fonte: Autores.

Os procedimentos da geologia de mina, conforme demonstra o fluxo da Figura 14, relata as atividades dentro desse tema. Iniciando pelo plano de sondagem, passando por geofísica (perfilagem), caracterização do material, amostragem até chegar na validação de todos os dados. A validação foi possível devido a aplicação do DMAIC e assim pode ser utilizado ferramentas que irão viabilizar o modelo de blocos.

### 3.1.2 Measure - Gráficos de Pareto dos Minerais por Amostra

Os dados mineralógicos das amostras colocados no MiniTab resultaram no gráfico de Pareto. Os gráficos (Figuras 15 a 17) mostram a percentagem de influência que cada mineral apresentou em seus respectivos blocos.

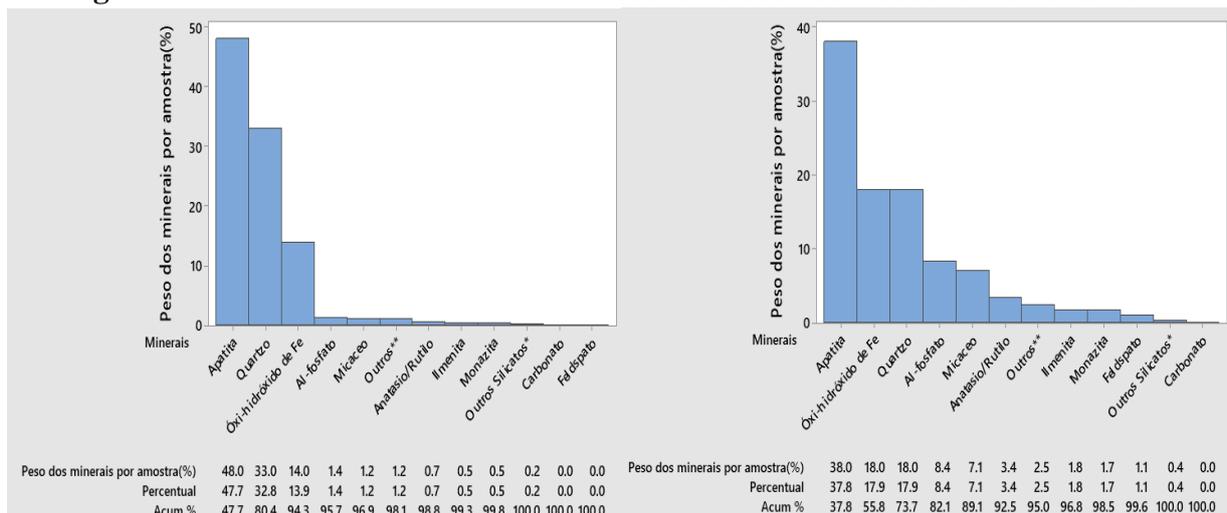
É notado que no bloco 13-316 a apatita, mineral de interesse, apresentou 70% de abundância, seguido pelo bloco 13-151 com 48%, bloco 13-321 43%, bloco 13-152 38% e bloco 13-157 29%. Esses gráficos (Figuras 15 a 17) sequenciam os principais minerais das amostras dos blocos, representando após o mineral de interesse(apatita), alguns contaminantes, caso do óxido-hidróxido de ferro e quartzo, aparecendo em maior concentração percentual nas amostras.

Essas representações auxiliam no entendimento dos minerais de interesse contidos na área e de seus contaminantes. Todavia, de acordo com Braga (2015), devido a informação de poucas amostras, não é possível ter dados mais bem especificados. No entanto, pode auxiliar no entendimento de características do próprio mapeamento.

Pesquisas semelhantes mostram que a maior concentração de  $P_2O_5$  ocorre nas rochas alteradas, caso do foscorito e dolomita carbonatita, constituindo teor com variação de 6,29% a 16,22%, o que expõem que essas rochas são os protominérios mais relevantes e conseqüentemente o minério de interesse qualitativo, não aflora apenas nos locais de maior concentração da apatita, o mesmo pode ser encontrado também nas porções onde existem quantidades expressivas de carbonatos (Grasso, 2015).

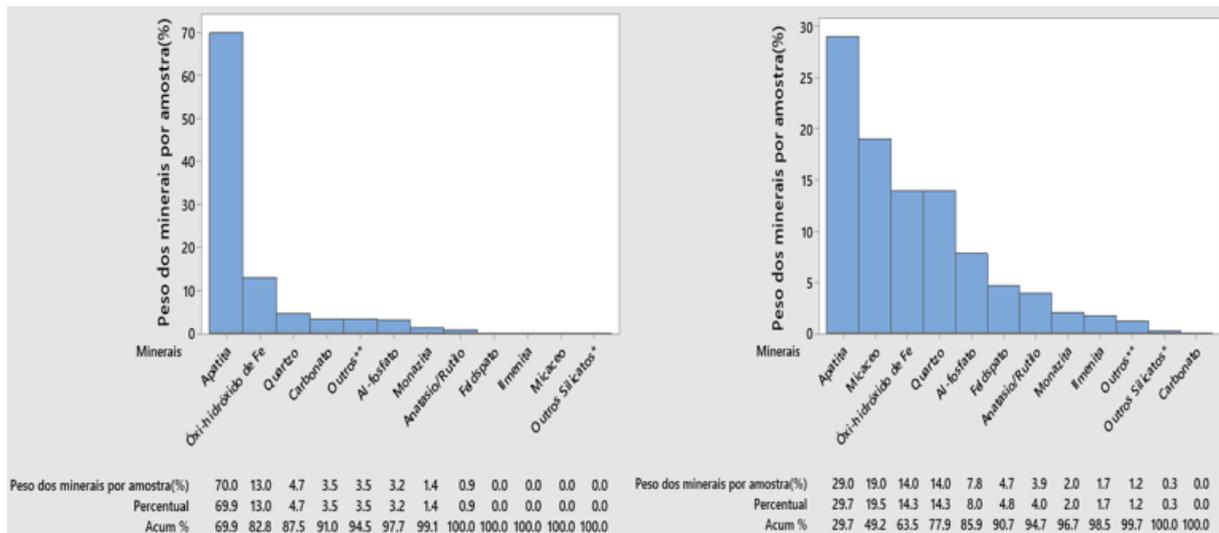
Dessa forma, utilizando o gráfico de pareto foi possível ter uma assertividade maior sobre o percentual mineralógico das amostras e assim colocando o foco no que realmente impacta no projeto.

**Figura 15.** Gráfico de Pareto dos Minerais Constituídos nos Blocos 13-151 e 13-152.



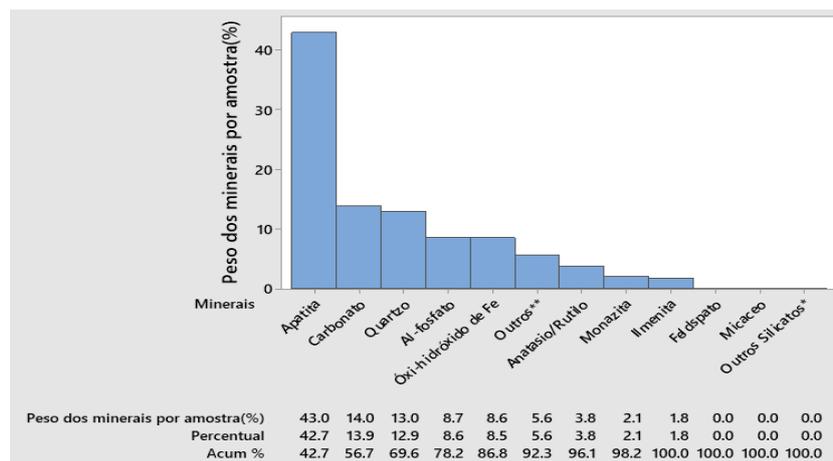
Fonte: Autores.

**Figura 16.** Gráfico de Pareto dos Minerais Constituídos nos Blocos 13-157 e 13-316.



Fonte: Autores.

**Figura 17.** Gráfico de Pareto dos Minerais Constituídos no Bloco 13-321.



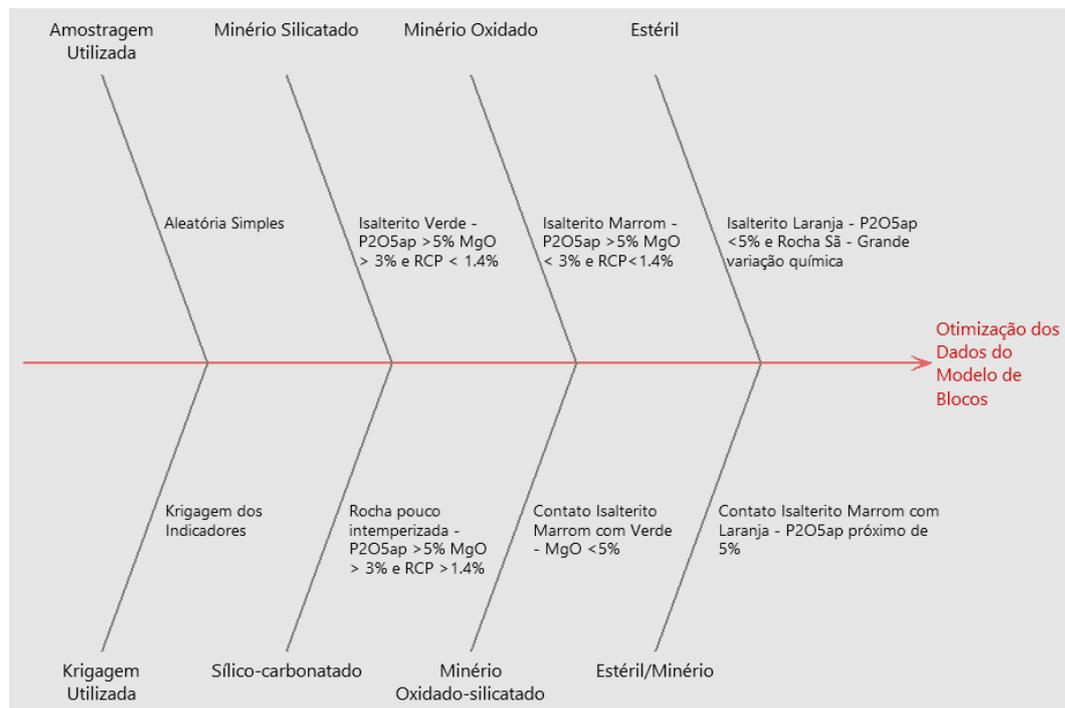
Fonte: Autores.

### 3

#### 3.1.3 Análise - Análise de Atividades da Geologia de Mina

O conjunto das 8 categorias estabelecidas na porção superior e inferior do diagrama (Figura 18) mostram a relação entre o trabalho realizado ou classificado (causa) com o seu resultado - efeito (linha vermelha). Dessa forma, são estabelecidos os *Key Performance Indicator* - Indicadores-chave de Desempenho. Esses indicadores estão integrados com o diagrama e representam a causa da escolha de uma atividade de acordo com sua categoria definida, para fins de melhoria do modelo.

**Figura 18.** Diagrama de Causa e Efeito e KPI das atividades com influência ao modelo.



Fonte: Autores.

É notado que os dados categorizados influentes na otimização do modelo são específicos da atividade executada e definidos como KPIs, conforme classificados:

- Amostragem: aleatória simples.
- Minério Silicatado: isalterito verde ( $P_2O_{5ap} > 5\%$   $MgO > 3\%$  e  $RCP < 1.4\%$ ).
- Minério Oxidado: isalterito marrom ( $P_2O_{5ap} > 5\%$   $MgO < 3\%$  e  $RCP < 1.4\%$ ).
- Estéril: isalterito laranja ( $P_2O_{5ap} < 5\%$ ).
- Krigagem: estimativa de recursos utilizando krigagem por indicadores.
- Sílico-carbonatado: rocha pouco intemperizada ( $P_2O_{5ap} > 5\%$   $MgO > 3\%$  e  $RCP > 1.4\%$ ).
- Minério Oxidado-silicatado: contato isalterito marrom com verde ( $MgO < 5\%$ ).
- Estéril/Minério: contato isalterito marrom com laranja ( $P_2O_{5ap}$  próximo de 5%).

A definição do método utilizado para casos de krigagem e amostragem e a classificação estabelecida para o teor de cada parâmetro classificado é o que irá determinar a assertividade da otimização do modelo e conseqüentemente definindo melhor o modelamento do REM e assim maximizando o lucro.

O estudo de Passos et al. (2010) relata um caso que ocorreu um erro de estratégia e a atividade de mina utilizou como base um modelo geológico de blocos que não apresentava representatividade no todo e considerou os limites da área como estéril, devido ao não conhecimento adequado do local e assim o que poderia ter sido denominado minério com a mistura (*blending*) do material das extremidades, acabou sendo considerado como estéril e o

mesmo sendo removido, resultando em um prejuízo de aproximadamente 100 milhões de reais.

### 3.1.4 *Improve* - Otimização de Tarefas Atrreladas ao Modelo de Blocos

Na otimização do modelo de blocos é apresentado como matriz de priorização (Tabela 3) os parâmetros que são a base da geologia de mina. Os aspectos definidos aplicados na ferramenta utilizada mostram a ordem de priorização das atividades, relatando as respectivas prioridades em ordem de importância: amostragem, locomoção de contatos estéril/minério, manto de intemperismo e método de krigagem.

**Tabela 3.** Resultado da Matriz GUT

| MATRIZ GUT                                       |           |          |           |                       |                         |
|--|-----------|----------|-----------|-----------------------|-------------------------|
| Dificuldades/Melhorias                           | Gravidade | Urgência | Tendência | Resultado (G x U x T) | Sequência de Atividades |
| <b>A - Amostragem</b>                            | 5         | 5        | 5         | 125                   | 1°                      |
| <b>B - Método de Krigagem</b>                    | 2         | 3        | 2         | 12                    | 4°                      |
| <b>C - Locomoção de Contatos Estéril/Minério</b> | 4         | 4        | 4         | 64                    | 2°                      |
| <b>D - Manto de intemperismo local</b>           | 4         | 3        | 4         | 48                    | 3°                      |

Fonte: Autores.

Na execução dos planos de ação são levados em consideração a ordem estabelecida pela Matriz GUT.

- Melhoria A(1°): o trabalho apresentou 3 tipos de técnicas de amostragem que podem ser aplicadas. Nesse caso, foi utilizado a aleatória simples, todavia, apesar de gastar um maior tempo, poderia ser utilizada a amostragem sistemática, pois amostragem seria realizada de modo regular, aumentando a precisão dos dados amostrados, e assim, como é a base dos dados do modelo, resultaria em maior precisão no modelo de blocos. Ademais, caso a sistemática não fosse possível devido a fatores de acesso e geografia local, poderia utilizar o método estratificado, resultando ao menos em uma malha semirregular (Yamamoto & Landim, 2015).

- Melhoria C(2°): a locomoção dos contatos deve ser realizada de forma rápida e assertiva, para assim não atrasar as atividades de lavra. Dessa forma, uma comunicação eficiente entre laboratórios de análise das amostras e o responsável pela tarefa resultaria em uma melhor performance. De acordo com Costa et al., (2001) para atualizar esses contatos geológico-tipológico é necessário ter os dados topográficos, informações das amostras de geologia de mina e dados complementares para assim realizar os ajustes nas seções.

- Melhoria D(3°): na atividade de mina é notado que o manto de intemperismo local da Mina F4 é um obstáculo no mapeamento, uma vez que o material alterado deve ser classificado, como realmente foi no estudo, porém é gasto mais tempo na sua identificação. Nessa perspectiva, o trabalho utilizou o mapeamento por contatos, sendo bastante importante, mas uma alternativa eficiente e complementar na tarefa seria a utilização do mapeamento por seções transversais ao longo de caminhamentos em linhas, uma vez que se desenha seções ao longo dos caminhos no próprio campo e dessa forma é identificado as possíveis problemáticas (Lisle, Brabham & Barnes, 2014).

- Melhoria B(4°): a krigagem utilizada no estudo foi por indicadores, o qual foi definido um teor de corte para o minério e nesse processo, os dados foram codificados em 0 ou 1, de acordo com o grau de confiança definido. Sendo assim, se tem noção dos parâmetros de uma amostra, mas não de seu entorno por completo. Portanto, é sugerido a complementação da utilização da krigagem ordinária de blocos para se obter maior acurácia no modelo, uma vez que fragmentando o bloco em pontos podemos ter uma estimativa média de teor do bloco (Yamamoto & Landim, 2015).

### **3.1.5 Control - Monitoramento das Amostras Significativas**

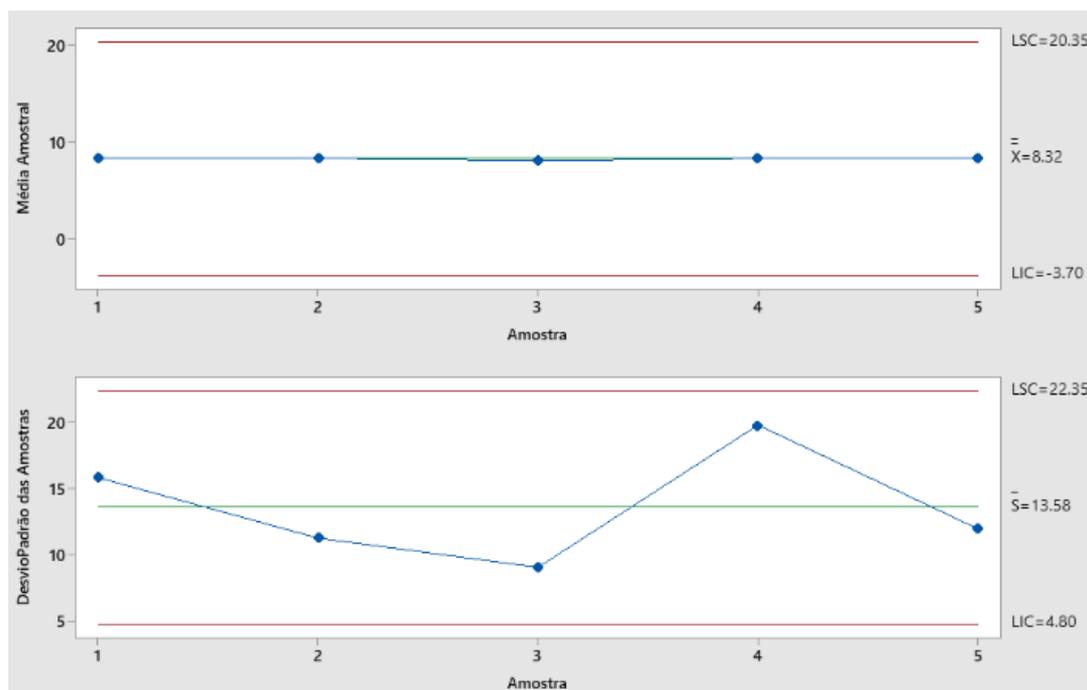
No monitoramento das amostras são utilizados os gráficos de controle (Figura 19). É notado que os gráficos são divididos em 2 seções, média amostral e desvio padrão das amostras, sendo limitadas pelas linhas superiores e inferiores de controle (linhas em vermelho). Os gráficos possuem como dados 5 variáveis contínuas, representadas pela percentagem mineralógica dos elementos. A maior concentração contida nas amostras é a apatita, seguido pelo quartzo e óxido-hidróxido de ferro. Em vista disso, o aumento ou diminuição desses elementos nas amostras irá causar uma significativa variação na média e no desvio padrão.

A primeira representação é específica da média das amostras dos 5 blocos estudados, resultando em 8,32. Isso significa que a média das amostras coletadas estão em seguimento da

linha média (linha verde), o qual podemos dizer que a estimativa da média do processo acontece de forma padrão e está sobre controle estatístico, pois em relação à média não ocorre tanta variação na coleta das amostras.

No entanto, o segundo gráfico é relacionado ao desvio padrão que cada um dos 5 blocos obteve como resultado. É entendido que, o desvio amostral médio é igual a 13,58, sendo maior do que a própria média, o que significa que os dados estão variando muito e é comprovado pelo fato da apatita, quartzo e óxido-hidróxido de ferro serem percentagens maiores nas amostras do que os outros elementos contidos como: minerais micáceo, feldspato, al-fosfato, anatasio/rutilo, monazita, ilmenita, carbonato, outros silicatos e outros. Sendo assim, os gráficos de controle auxiliam no monitoramento da variação do comportamento de um determinado processo e nesse caso, é a amostragem (Schlieper, 2007).

**Figura 19.** Gráfico de controle da concentração mineralógica das amostras.



Fonte: Autores.

#### 4. Conclusão

A aplicação da metodologia Six Sigma, utilizando o modelo DMAIC e o *software* estatístico MiniTab, serviu para o entendimento mais aprofundado da geologia da mina e desenvolvimento de planos de ação.

A etapa 1 apresentou o foco do estudo, definindo a problemática relacionada ao intemperismo, metas de otimização do modelo de blocos com prazo de 1 ano e impacto do

projeto sobre o complexo alcalino carbonatítico de Araxá, área da mina e de seu entorno, com foco no minério de interesse, tendo como representativa 414Mt de minério com teor de 3,3% de  $P_2O_5$ .

Na fase 2, foi possível entender o comportamento da mineralogia e seus contaminantes nos blocos, o qual apresentou a ordem de prioridade relacionada aos minerais, sendo a apatita com maior concentração e foco de exploração, obviamente porque as amostras foram coletadas nos locais de representatividade do minério e posteriormente a classificação dos contaminantes, caso do quartzo e do óxido-hidróxido de ferro, tendo em vista que a apatita além de ser encontrada livre, a mesma é encontrada junto com outros minerais.

Já na fase 3, foi analisado os processos que influenciam na otimização do modelo de blocos, definindo categorias de classificação com base na bibliografia e dados disponíveis. Portanto, o minério/estéril foi classificado de acordo com os a representatividade dos solos (isalterito laranja, verde e marrom), seus contatos e as rochas pouco intemperizadas, sendo que o minério de maior exposição é o oxidado devido a maior concentração de apatita e baixa dos contaminantes, MgO (Óxido de Magnésio), óxido-hidróxido de ferro e RCP (Relação  $CaO/P_2O_5$ ). Ademais, a técnica de amostragem e krigagem utilizada foram revisadas e apresentadas sugestões complementares para tal atividade, sendo definida a importância da krigagem ordinária de blocos e amostragem sistemática. Integrado a esse contexto e estudos bibliográficos foi escolhido a amostragem, krigagem, locomoção de contatos estéril/minério e manto de intemperismo local como os indicadores-chave para o sucesso do empreendimento.

A penúltima etapa, consistiu em elaborar planos de ação para os KPIs escolhidos e utilizando a Matriz GUT foi possível definir as atividades mais relevantes para otimização do modelo, caso da amostragem. Dessa forma, foi sugerido a priorização da técnica de amostragem sistemática e de último caso a estratificada, fazendo que no mínimo a malha das amostras fiquem semirregulares, uma vez que teria maior representatividade nas atividades de modelagem posteriores.

A última atividade consistiu em entender o comportamento dos dados da amostragem, visto que faz parte dos KPIs e foi a tarefa a ser priorizada na Matriz GUT, devido ser a base dos dados do modelo de blocos. É entendido que poucas amostras não devem representar o todo, mas auxilia no entendimento do todo, uma vez que se tem noção da concentração base da mineralogia e assim os elementos dos blocos tiveram concentração bem parecida com os seus respectivos elementos dos outros blocos, tendo como destaque a apatita, seguida pelo quartzo e óxido-hidróxido de ferro.

Vale ressaltar, que a média não é um bom parâmetro para estimativa devido aos *outliers*, mas nesse caso, não estamos estimando algo e sim entendendo o comportamento da amostragem na área de estudo e analisado sua influência no modelo blocos. Portanto, a utilização do gráfico de controle foi importante para o entendimento da variação mineralógica na área de estudo, e entendido que, as amostras apresentam um determinado padrão em relação a seus próprios elementos, todavia quando verificado o desvio do todo é notado uma grande variação, principalmente pelo fato da existência da apatita, quartzo e óxido-hidróxido de ferro terem mais abundância do que os outros 9 elementos.

Por fim, é relevante que se leve em conta a importância e aplicabilidade do modelo DMAIC para trabalhos que utilizem como base dados numéricos, a fim de se entender melhor a problemática a ser solucionada. Além das ferramentas citadas neste trabalho, existem outras atreladas ao modelo DMAIC, tais como: histograma, boxplot, estatística descritiva, mapa de raciocínio, teste de hipóteses, Kaizen e OCAP, o qual podem ser implementadas nas 5 etapas do método e devem trazer bons resultados para trabalhos futuros.

## Referências

Aranz, G. (2016). Leapfrog geo.

Behr, A., Moro, E. L. D. S., & Estabel, L. B. (2008). Gestão da biblioteca escolar: metodologias, enfoques e aplicação de ferramentas de gestão e serviços de biblioteca. *Ciência da Informação*, 37(2), 32-42.

Biondi, J.C. (2015). Sistema endomagmático. *Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros*, 2, 75-78.

Braga, S. A. (2015). Krigagem dos indicadores aplicada a modelagem das tipologias de minério fosfatados da mina F4.

Brito, J. L. S. (2001). *Adequação das potencialidades do uso da terra na Bacia do ribeirão Bom Jardim no Triângulo Mineiro (MG): Ensaio de Geoprocessamento (Doctoral dissertation)*.

Cabral, A. J. C., Duarte, C. N., Adriano, J. F., Adriano, J. F., & da Silva, T. M. (2019). Proposta de aplicação da metodologia dmaic e pensamentos sistêmicos para melhoria contínua em uma empresa de envase de água mineral do interior de goiás: um estudo de caso. *Revista GeTeC*, 8(21).

Castiglione, L. H. G., Calazans, P. M. P., & Vale, S. A. (2011). A constituição de uma base de dados geográficos para apoio a estudos geológicos: aspectos epistemológicos e práticos. *Anais do*, 15.

CODEMIG, C. D. D. E. D. & CPRM, S. G. D. B. Minas Gerais. (2014). *Relatório Técnico*.

Conde, R. P., & Yamamoto, J. K. (2017). Avaliação de reservas por métodos computacionais: um estudo de caso na Mina de Canoas 2 (PR). *Revista Brasileira de Geociências*, 26(1), 35-42.

Costa, A. G. D., Costa, F. J. O., Bonfioli, L. E., & Rodrigues, M. (2001). Geologia de mina na Samarco Mineração: um suporte ao planejamento de curto prazo/controlado de qualidade, com ênfase no controle mineralógico e na previsibilidade do comportamento dos tipos de minério no processo. *Anais do III Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro*, 10.

Cowan, E. J., Beatson, R. K., Ross, H. J., Fright, W. R., McLennan, T. J., Evans, T. R., ... & Oshust, P. A. (2003, November). Practical implicit geological modelling. In *Fifth international mining geology conference* (pp. 17-19). Australian Institute of Mining and Metallurgy Bendigo, Victoria.

Custódio, M. A., Neto, A. F., Costa, A. F. B., & Torres, G. L. (2011). Aplicação da ANOVA para Análise e Modelagem da Tensão de Ruptura de um Perfil Cilíndrico Pultrudado. *Seleção Documental: Inteligência Artificial e novas Tecnologias*, (23), 5-13.

Dardenne, M. A. (2000, August). The Brasília fold belt. In *Tectonic Evolution of South America. 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro* (Vol. 231, p. 263).

Silva, G. F. (2019). Avaliação da produtividade da sondagem rotativa manual e mecânica na pesquisa de argila bentonita.

Dias, P.H.A., Chaves, M.L.S.C.C., Andrade, K.W & Noce, C.M (2011). Projeto Alto Paranaíba - Folha São Gotardo.

Dias, P. H. A., Noce, C. M., Pedrosa-Soares, A. C., Seer, H. J., Dussin, I. A., de Morisson Valeriano, C., & Kuchenbecker, M. (2011). O Grupo Ibiá (Faixa Brasília Meridional): evidências isotópicas Sm-Nd e U-Pb de bacia colisional tipo flysch. *Geonomos*.

François-Bongarçon, D. (2004). Theory of sampling and geostatistics: an intimate link. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 74(1), 143-148.

Frodeman, R. (2010). O raciocínio geológico: a geologia como uma ciência interpretativa e histórica. *Terræ Didactica*, 6(2), 85-99.

Goes, M. A. C. D., Luz, A. B. D., & Possa, M. V. (2010). Amostragem. CETEM/MCT.

Grasso, C. B. (2015). Geologia e geometalurgia dos minérios de fosfato na base do manto de intemperismo da mina do Barreiro, Araxá.

Grigorieff, A., Costa, J. F. C., & Koppe, J. (2002). O problema de amostragem manual na indústria mineral. *REM: Revista Escola de Minas*, 55(3), 229-233.

Harry, M., & Schroeder, R. (2000). *Six Sigma: The breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations*.

IBRAM, I.B.M. (2016). *Panorama da Mineração de Minas Gerais*.

Issa Filho, A., Lima, P. R. A. S., & Souza, O. D. (1984). Aspectos da geologia do complexo carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG, Brasil. CBMM (Ed.), *Complexos Carbonatíticos do Brasil: Geologia*. CBMM, São Paulo, 20-44.

Jorgensen, F., Hoyer, A. S., Sandersen, P. B., He, X., & Foged, N. (2015). Combining 3D geological modelling techniques to address variations in geology, data type and density—An example from Southern Denmark. *Computers & Geosciences*, 81, 53-63.

Lerchs, H., & Grossmann, L. F. (1965). Optimum design of open-pit mines. *Transactions, Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, Montreal, Canada*, v. LXVIII, p.17-24.

Lisle, R. J., Brabham, P. J., & Barnes, J. W. (2014). Mapeamento Geológico Básico: Guia Geológico de Campo. Bookman Editora.

McCarthy, B. M., & Stauffer, R. (2001, December). Enhancing six sigma through simulation with igrafx process for six sigma. In *Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference (Cat. No. 01CH37304)* (Vol. 2, pp. 1241-1247). IEEE.

Melfi, A. J., Misi, A., Campos, D. D. A., & Cordani, A. G. (2016). Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios. *Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências*.

Mello, J. M. D. (2004). *Geoestatística aplicada ao inventário florestal* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Pacheco, D. A. D. J. (2014). Teoria das Restrições, Lean Manufacturing e Seis Sigma: limites e possibilidades de integração. *Production*, 24(4), 940-956.

Parast, M. M. (2011). The effect of Six Sigma projects on innovation and firm performance. *International Journal of Project Management*, 29(1), 45-55.

Parker, H. (1979). Geostatistics. 5. Volume-variance relationship-useful tool for mine planning. *E&MJ-Engineering and Mining Journal*, 180(10), 106.

Passos, A. O., Sahão, H., & de Tomi, G. (2010). Gestão sistêmica na mineração. In *Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração* (p. 65).

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFSM. Disponível em: [https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic\\_Computacao\\_MetodologiaPesquisa-Cientifica.pdf](https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_MetodologiaPesquisa-Cientifica.pdf).

Pereira, L. F., Dardenne, M. A., Rosière, C. A., & Pedrosa-Soares, A. C. (1994). Evolução geológica dos grupos Canastra e Ibia na região entre Coromandel e Guarda-Mor, MG. *Geonomos*.

Pereira, P. E. C. (2017). Estimativa de recursos minerais e otimização de cava aplicados a um estudo de caso de uma mina de calcário.

Pereira, T. F. (2017). Proposta de retomada e expansão para uma mina de calcário.

Pinho, F. C., dos Santos Vilela, A., de Barros, J. G. M., de Almeida, M. D. G. D., de Souza Sampaio, N. A., & de Jesus Silva, J. W. (2020). Proposta de melhoria da qualidade com a implantação da metodologia Seis Sigma. *Research, Society and Development*.

Pinto, C. P., & Silva, M. D. (2014). Mapa geológico do estado de Minas Gerais, escala 1: 1.000. 000. *Belo Horizonte, CPRM-Serviço Geológico do Brasil*.

Pirasteh, R. M., & Fox, R. E. (2010). *Profitability with No Boundaries: Optimizing Toc and Lean-Six Sigma*. Quality press.

Poniewierski, J. (2019). *Block Model Knowledge for Mining Engineers - an Introduction*.

Reis, L. A., de Carvalho Santana, A., & Euzébio, T. A. M. (2017). Aplicação de Dmaic Seis Sigma na Melhoria de Desempenho de Malhas de Controle em uma Planta de Processamento de Minério de Ferro.

Rocha, M. B. B., & Seer, H. J. (2008). Fisiografia e uso da terra no município de Araxá, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Cartografia*, 60(2).

Schlieper, A. D. (2007). Aplicação da metodologia Six Sigma na área de TI em empresas de serviços. *Monografia do curso de pós-graduação Latu Sensu da PUC-SP*.

Silva, C. J. E. (2020). Influência do espaçamento da malha de sondagem na incerteza da declaração do recurso mineral.

Silva Maureira, D. A. (2015). Enhanced geologic modeling with data-driven training images for improved resources and recoverable reserves.

Silva, P. H. M., dos Anjos Silva, M., & Souza, F. R. (2020). Impacto econômico da lavra de barragens. *Research, Society and Development*.

Teixeira, W., Fairchild, T.R., Toledo, M.C.M, & Taioli, F. (2009). *Decifrando a Terra*. São Paulo: Companhia Editora Nacional.

Thornton, J. M., Mariethoz, G., & Brunner, P. (2018). A 3D geological model of a structurally complex Alpine region as a basis for interdisciplinary research. *Scientific data*, 5(1), 1-20.

Trad, S., & Maximiano, A. C. A. (2009). Seis sigma: Fatores críticos de sucesso para sua implantação. *Revista de administração contemporânea*, 13(4), 647-662.

Uhlein, A., Fonseca, M. A., Seer, H. J., & Dardenne, M. A. (2012). Tectônica da faixa de dobramentos Brasília - setores setentrional e meridional. *Geonomos*.

Vale. (2017). Curso de Mineração - Básico Módulo II: Geologia de Mina e Operações de Lavra.

Valeriano, C. D. M., Dardenne, M. A., Fonseca, M. A., Simões, L. S. A., & Seer, H. J. (2004). A evolução tectônica da Faixa Brasília. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. BECA, 575-592.

Vollgger, S. A., Cruden, A. R., Ailleres, L., & Cowan, E. J. (2015). Regional dome evolution and its control on ore-grade distribution: Insights from 3D implicit modelling of the Navachab gold deposit, Namibia. *Ore Geology Reviews*, 69, 268-284.

Werkema, M. C. C. (2004). *Criando a cultura seis sigma*. Werkema Editora.

Yamamoto, J. K., & Landim, P. M. B. (2015). *Geoestatística: conceitos e aplicações*. Oficina de textos.

Yamamoto, J. K., & da Rocha, M. M. (2017). Revisão e recomendações para o cálculo e classificação de reservas minerais. *Revista Brasileira de Geociências*, 26(4), 243-254.

**Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito**

Lucas Redoan Cecílio Campos 60%

Camila Nascimento Alves 40%