



FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA
RELÁTORIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

**MELHORIA DO BALANÇO DE MASSA NA PLANTA DE CONCENTRAÇÃO HÚMIDA
B, OPTIMIZANDO AS AMOSTRAS DE ALIMENTAÇÃO EM COMPARAÇÃO COM O
PLANO DA MINA DA KENMARE**

Autora:

Celestina Chelly João Santos

Supervisor:

Prof. Doutor António Cumbane, Eng^o.

Maputo, Agosto de 2025



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA
RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

**MELHORIA DO BALANÇO DE MASSA NA PLANTA DE CONCENTRAÇÃO HÚMIDA
B, OPTIMIZANDO AS AMOSTRAS DE ALIMENTAÇÃO EM COMPARAÇÃO COM O
PLANO DA MINA DA KENMARE**

Autora:

Celestina Chelly João Santos

Supervisor:

Prof. Doutor António Cumbane, Engº.

Maputo, Agosto de 2025



FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que a estudante **Celestina Chelly João Santos** entregou no dia ___ / ___ / 2025 as _____ cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência _____ intitulado **Melhoria do balanço de massa na planta de concentração húmida B, otimizando as amostras de alimentação em comparação com o plano da mina da kenmare.**

Maputo, ____ de _____ de 2025

O Chefe da Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, **Celestina Chelly João Santos**, estudante do curso de **Licenciatura em Engenharia Química**, com o número de estudante **20212956**, declaro, sob compromisso de honra, que o presente trabalho intitulado **Melhoria do balanço de massa na planta de concentração húmida B, otimizando as amostras de alimentação em comparação com o plano da mina da kenmare**, é da minha inteira responsabilidade e autoria. Declaro igualmente que não constitui plágio total ou parcial de qualquer outro trabalho, e que todas as fontes utilizadas estão devidamente referenciadas.

Assumo plena responsabilidade pelas informações apresentados, estando ciente das consequências académicas previstas no regulamento disciplinar da Universidade Eduardo Mondlane, em caso de falsidade ou plágio.

Maputo, aos ____ de _____ de 2025

A Autora

Celestina Chelly João Santos

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha querida avó Celestina Cumbe, fonte de inspiração e orgulho, por me conceder o privilégio de carregar o seu nome.

Aos meus avós Inocência Jovo e Adriano Ussivane, pelo amor, incentivo e presença constante nos momentos mais importantes da minha vida.

Aos meus pais João Langa e Alcinda Ussivane, pelo incansável esforço, apoio emocional e por nunca desistirem dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, expresso a minha profunda gratidão a Deus, Jeová, pelas bênçãos, orientação e misericórdia ao longo desta jornada. Como está escrito em Salmos 103:2: **"Que a minha alma louve a Jeová, que nunca se esqueça de tudo o que ele fez."** Esta conquista é, em primeiro lugar, reflexo da sua bondade.

Agradeço de coração aos meus pais, João Langa e Alcinda Ussivane, pelo amor, pelos ensinamentos e pelo exemplo de força. A minha irmã Cleide Santos, expresso um agradecimento especial pelo exemplo de luta, determinação e liderança. Às minhas irmãs Mingda Santos, Alcinda Langa e minha tia Joana agradeço pela presença constante, pelas palavras de apoio, nos momentos mais difíceis.

Ao Professor Doutor António Cumbane, expresso o meu sincero agradecimento pela orientação paciente e dedicada, essencial para a realização deste trabalho. A todos professores meu agradecimento pelos ensinamentos ao longo da minha formação.

À empresa Kenmare, deixo o meu agradecimento pela oportunidade de desenvolver este estudo, bem como pelo acolhimento ao longo do processo. Agradeço especialmente aos profissionais Simon Blancher, Celso Xavier, Curate Gordandás, António Matsinhe, Melanie Ramos e Floid Da Vitória, cuja dedicação contribuiu significativamente para esta etapa da minha formação.

Aos colegas de caminhada académica, Isolda Muianga, Filipe Sabela, Stélio Timana, Cynthia Guilundo e Cufasse Siteo, agradeço por partilharem os desafios, as conquistas e os aprendizados deste percurso. A todos os outros colegas que, mesmo não sendo mencionados individualmente, fizeram parte desta trajectória, deixo o meu sincero obrigado.

Agradeço também aos meus avós, tios e primos pela partilha de ideias, pela presença constante e pelo apoio ao longo do caminho.

Aos amigos de sempre, Mellany Tembe, Ana Manhiça, Telma Mondlane, Ali Saide, Jaime Sérgio, Acácio Guambe e todos os demais que estiveram presentes com conselhos, palavras de ânimo e amizade verdadeira, agradeço do fundo do coração.

Por fim, agradeço a mim mesma por ter acreditado, por não ter desistido e por continuar mesmo nos dias em que me faltavam forças. Que orgulho...

EPÍGRAFO

Tudo parece impossível até que seja feito – Nelson Mandela

Que orgulho...

RESUMO

A província de Nampula destaca-se pela presença de importantes depósitos de areias pesadas, cuja exploração é feita pela Kenmare Resources PLC. Considerando o impacto desses recursos na indústria extractiva e na geração de receitas, torna-se fundamental dispor de dados fiáveis sobre o que está efectivamente ser extraído. O plano de mina baseia-se no modelo de bloco que deve reflectir as condições reais de lavra e processamento do minério. No entanto, frequentemente há discrepâncias entre o planeado e os teores obtidos em operação na Kenmare Resources PLC., na planta de concentração húmida B (*WCP-B*). Essas inconsistências afectam directamente o controlo do processo e a fiabilidade do balanço de massa. Este trabalho avaliou a representatividade do modelo de bloco em relação às amostras de alimentação da planta de concentração húmida B, com o objectivo de melhorar o balanço de massa. A relevância do tema reside na sua contribuição para optimização do beneficiamento mineral e tomada de decisões com base em dados fiáveis. A metodologia adoptada foi exploratória e quantitativa, envolvendo a recolha de dados de teores totais de minerais pesados provenientes do modelo de bloco e da planta de beneficiamento, *WCP-B*. O processo incluiu a caracterização da área minerada e das condições de amostragem em três pontos estratégicos da planta: draga, alimentação do hidrociclone de deslamagem e alimentação da espiral primária (*RSF*). Foram aplicadas ferramentas estatísticas e realizadas análises comparativas por meio de gráficos, e o cálculo da recuperação. A abordagem permitiu uma análise crítica da qualidade das amostras no processo, com foco na avaliação dos teores totais de minerais pesados, identificação de desvios sistemáticos e determinação da precisão das amostras. Os resultados revelaram discrepâncias entre os teores totais de minerais pesados do modelo de bloco e da planta de beneficiamento, *WCP-B*. A draga apresentou correlação moderada a fraca com o modelo de bloco, enquanto o ponto de alimentação hidrociclone de deslamagem apresentou correlação fraca com o modelo de bloco. A alimentação da espiral primária apresentou melhor alinhamento com o modelo de blocos, com índice de concordância de 84,3%, coeficiente de correlação de Pearson de 0,754 e coeficiente de determinação de 0,569, indicando que, apesar das limitações existentes, o modelo de bloco pode ser utilizado como referência para o teor minerado.

Palavras-chave: Kenmare Resources plc., *WCP-B*, teores, minerais pesados, amostragem, modelo de bloco, draga, plano da mina, balanço de massa, *RSF*.

ABSTRACT

The province of Nampula stands out for its significant deposits of heavy mineral sands, exploited by Kenmare Resources PLC. Considering the impact of these resources on the extractive industry and revenue generation, it is essential to have reliable data on what is actually being extracted. The mine plan is based on the block model, which should reflect the real mining and processing conditions. However, discrepancies often arise between the planned grades and those obtained during operations at Kenmare Resources PLC, in the Wet Concentration Plant B (WCP-B). These inconsistencies directly affect process control and the reliability of the mass balance. This study evaluated the representativeness of the block model in relation to feed samples from the Wet Concentration Plant B, with the objective of improving the mass balance. The relevance of this topic lies in its contribution to the optimization of mineral beneficiation and decision-making based on reliable data. The methodology adopted was exploratory and quantitative, involving the collection of total heavy mineral grade data from the block model and from the beneficiation plant (WCP-B). The process included the characterization of the mined area and sampling conditions at three strategic points of the plant: the dredge, the desliming cyclone feed, and the rougher spiral feed (RSF). Statistical tools were applied, and comparative analyses were performed using graphs and recovery calculations. This approach enabled a critical analysis of sample quality in the process, focusing on evaluating total heavy mineral grades, identifying systematic deviations, and determining sample precision. The results revealed discrepancies between the total heavy mineral grades from the block model and those from the beneficiation plant (WCP-B). The dredge showed a moderate to weak correlation with the block model, while the desliming cyclone feed point showed a weak correlation. The rougher spiral feed exhibited better alignment with the block model, with a concordance index of 84.3%, a Pearson correlation coefficient of 0.754, and a determination coefficient of 0.569, indicating that, despite existing limitations, the block model can be used as a reference for mined grade control.

Keywords: Kenmare Resources plc., WCP-B, grades, heavy minerals, sampling, block model, dredge, mine plan, mass balance, RSF.

ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES.....	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Estudo do Problema.....	2
1.2. Objectivos	3
1.2.1. Objectivo geral.....	3
1.2.2. Objectivos específicos	3
1.3. Justificativa.....	4
1.4. Metodologia.....	4
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1. Areias Pesadas	6
2.2. Extracção de Areias Pesadas por Dragagem Hidráulica em Leitos Submersos .	6
2.3. Concentração das Areias Pesadas	8
2.4. Balanço de Massa.....	10
2.5. Plano da Mina	11
2.5.1. Modelo de bloco	11
2.6. Amostragem.....	12
2.6.1. Avaliação do Plano de Amostragem.....	13
2.7. Métodos Estatísticos	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1. Área de Estudo	15
3.1.1. Características da zona minerada	15
3.2. Colecta de Dados.....	17
3.2.1. Teores totais de minerais pesados derivados do modelo de bloco	17
3.2.2. Teores totais de minerais pesados da planta de beneficiamento	20

3.3. Método de comparação e avaliação do modelo de bloco	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1. Comparação do Modelo de Bloco e da Draga	26
4.2. Comparação do Modelo de Bloco e da <i>DCyF</i>	28
4.3. Comparação do Modelo de Bloco e da <i>RSF</i>	30
4.4. Análise Crítica entre o Modelo de Bloco e Teor Reportado	32
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	35
5.1. Conclusões	35
5.2. Recomendações	36
6. BIBLIOGRAFIA	37
APÊNDICES	40
ANEXOS	63

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

%	Porcentagem
A	Alimentação da draga
cm	Centímetro
$DCyF$	<i>Desliming Hydrocyclone Feed</i> (Alimentação do hidrociclone de deslamagem)
E	Alimentação da espiral
F	Concentrado
g/cm ³	Gramas por metros cúbicos
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
HMC	Heavy Mineral Concentrate (Concentrado de Minerais Pesados)
k	Índice que varia de 1 até n
LST	<i>Lithium heteropolytungstates</i> (heteropolitungstatos de lítio)
mm	Milímetro
n	Número de amostra
Q_k	Caudal mássico
R	Rejeito
R_p	Recuperação da planta
R_s	Recuperação das espirais
RSF	<i>Rougher Spiral Feed</i> (Alimentação da espiral primária)
S	Desvio padrão
S^2	Variância
t/h	Toneladas por hora
U_k	Teor do modelo de bloco
$\bar{U}_k$	Teor médio do modelo de bloco
$WCP-B$	<i>Wet Concentration plant B</i> (Planta de concentração húmida B)

$\bar{x}$	Média
x_A	Fracção da alimentação da draga
x_E	Fracção da alimentação da espiral
x_F	Fracção do concentrado
x_k	Fracção mássica
x_R	Fracção do rejeito
Y_k	Teor da amostra (Draga, <i>RSF</i> , <i>DCyF</i>)
$\bar{y}$	Teor médio das amostras (Draga, <i>RSF</i> , <i>DCyF</i>)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução mensal dos teores totais de minerais pesados na amostragem da planta beneficiamento e no modelo de bloco	2
Figura 2: Areia pesada, em Pilivili	6
Figura 3: Draga Dreide, em Pilivili	7
Figura 4: Sistema de rastreio da draga dreide, mine view.	8
Figura 5: Separação gravítica por meio de LST	9
Figura 6: Espirais concentradoras da WCP-B, em Pilivili	10
Figura 7: Modelo de blocos conceitual	12
Figura 8: Planta de concentração húmida B (WCP-B), Pilivili	15
Figura 9: Mapa geológico com unidades litológicas dos blocos, WCP-B	16
Figura 10: Características das partículas extraídas nas unidades litológicas durante a classificação granulométrica	17
Figura 11: Visualização da localização geoespacial da draga no Canary software	18
Figura 12: Visualização da quantidade de material minerado pela draga, em termos de fluxo mássico, no <i>OpsData-MIS software</i>	18
Figura 13: Visualização do mapa geológico com os blocos e canais de lavra e mapa geológico teores de minerais pesados	19
Figura 14: Fluxograma da WCP-B com destaque para os pontos de amostragem utilizados no estudo	20
Figura 15: Válvula de amostragem da draga	21
Figura 16: Válvula de amostragem da DCyF	22
Figura 17: amostrador automático da RSF	22
Figura 18: Visualização dos resultados laboratoriais integrados ao sistema OpsData, referentes aos teores da planta de beneficiamento	23
Figura 19: Distribuição de teores totais de minerais pesados no modelo de blocos e nas amostras da draga.	26
Figura 20: Dispersão dos teores totais de minerais pesados do modelo de bloco com as amostras colectadas da draga.	27
Figura 21: Distribuição de teores totais de minerais pesados no modelo de bloco e nas amostras da DCyF	28
Figura 22: Dispersão dos teores totais de minerais pesados do modelo de bloco com as amostras colectadas na DCyF.	29

Figura 23: Distribuição de teores totais de minerais pesados no modelo de bloco e nas amostras da RSF	31
Figura 24: Dispersão dos teores totais de minerais pesados comparando do modelo de bloco com as amostras colectadas na RSF	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Interpretação dos valores do Coeficiente de correlação de Pearson (r)	24
Tabela 2: Correlação e concordância entre o modelo de bloco e a draga	27
Tabela 3: Correlação e concordância entre o modelo de bloco e a $DCyF$	29
Tabela 4: Correlação e concordância entre o modelo de bloco e a RSF	32
Tabela 5: Comparação entre o teor médio do modelo de bloco e o teor médio reportado	33
Tabela 6: Análise comparativa da recuperação da planta usando o modelo de bloco e o teor reportado	33

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Moçambique apresenta elevada geodiversidade e um grande potencial de recursos geológicos. Na província de Nampula, especialmente na região de Moma, existem depósitos de areias pesadas, incluindo um dos maiores depósitos mundiais de minerais de titânio, cuja extração é realizada pela empresa Kenmare Resources (Peixoto et al, 2015).

A mina começou a operar em 2007, produzindo concentrados de minerais pesados, que contém os minerais de titânio, tais como a ilmenita, rutilo e zircão, que são utilizados como matéria-prima para produzir pigmento de dióxido de titânio (Kenmare Resources plc, 2025).

A Kenmare Resources faz extração usando como uma das técnicas a dragagem em lagoas artificiais, para escavar areias, onde as dragas efectuem escavação conforme o plano de lavra, que é desenvolvido a partir do modelo de bloco. Este modelo de bloco estima a distribuição espacial e os teores dos minerais presentes na jazida, orientando a extração de forma a garantir que a quantidade e a qualidade do material escavado estejam alinhadas com os objectivos operacionais e produtivos estabelecidos no plano da mina.

Uma vez estabelecido o plano da mina, espera-se que a alimentação da planta de beneficiamento reflecta com precisão os parâmetros planeados, tanto em termos de quantidade e qualidade do material. A inexistência dessa correspondência gera inconsistências que comprometem o balanço de massa e a eficiência operacional. Na Kenmare, especificamente na planta de concentração húmida B (*WCP-B*), têm-se verificado discrepâncias entre os teores previstos no modelo de blocos e os obtidos na alimentação da planta de beneficiamento. O presente estudo tem como objectivo investigar os factores que podem estar impactar essa diferença entre os teores previstos no modelo de bloco e os efectivamente obtidos na alimentação da planta de beneficiamento. Neste estudo, serão controlados e analisados os processos de amostragem, assim como outros factores operacionais que possam influenciar a representatividade dos teores e comprometer o balanço mássico. A abordagem visa

garantir maior fiabilidade na gestão da produção e na reconciliação entre os teores do modelo de bloco e os resultados obtidos na planta de beneficiamento.

1.1. Estudo do Problema

O balanço de massa em plantas de beneficiamento mineral é essencial para garantir a eficiência operacional e a qualidade do produto final. Na mina de Moma, a planta de concentração húmida B (*WCP-B*), processa minerais pesados cuja alimentação deve reflectir os teores totais de minerais pesados previstos para o modelo de bloco, que serve como base para o plano da mina. Contudo, evidenciam-se discrepâncias sistemáticas entre os teores totais de minerais pesados, previstos para o modelo de bloco e os teores totais de minerais pesados da alimentação da *WCP-B*, planta de beneficiamento.

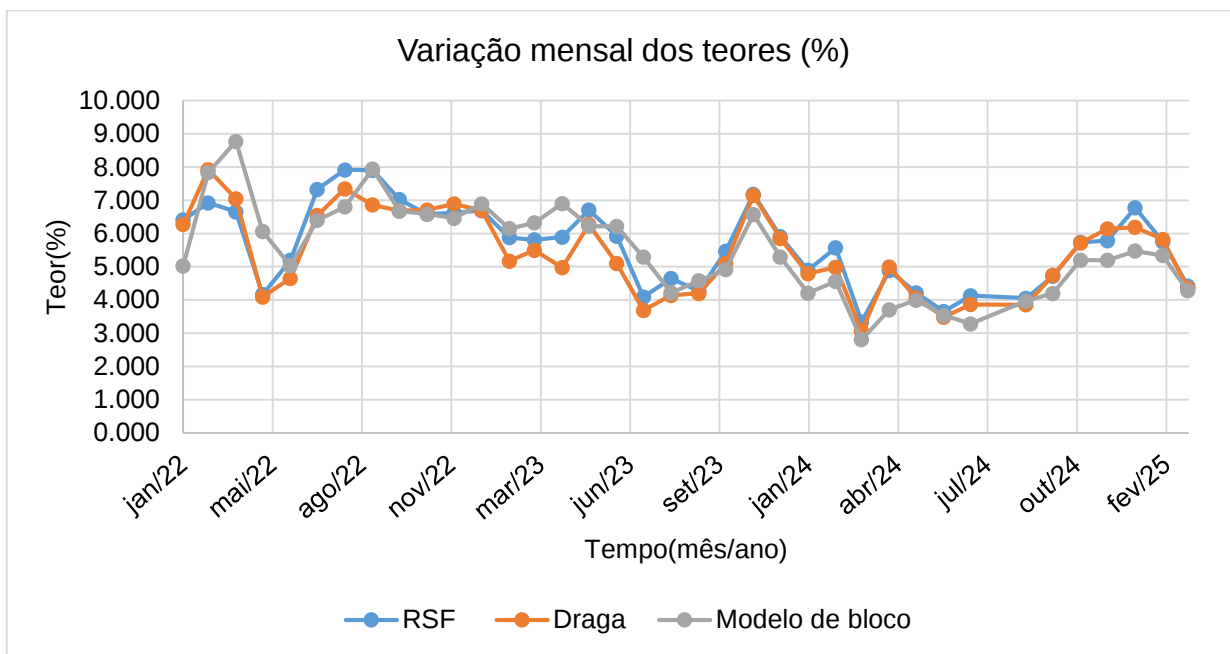


Figura 1: Evolução mensal dos teores totais de minerais pesados na amostragem da planta de beneficiamento e no modelo de bloco

Fonte: Adaptado de Xavier (2025).

Esta figura apresenta a variação dos teores (%) totais de minerais pesados obtidos nas amostras da planta de beneficiamento, comparados com os teores previstos no modelo de bloco, evidenciando os desvios mensais ao longo do período.

Estas divergências comprometem a representatividade das amostras e dificultam a correcta reconciliação dos teores entre o plano da mina e a operação da planta. A

ausência de alinhamento entre o modelo de bloco e a alimentação da planta compromete a precisão do balanço de massa, fundamental para o monitoramento e otimização do processo.

Diante deste cenário, surgem questões fundamentais para a análise do problema:

- Será que as amostras do modelo de bloco são realmente representativas do minério que está sendo processado na planta de beneficiamento, *WCP-B*?
- De que forma as variações no teor do minério minerado pela draga, da alimentação da espiral primária (*RSF*) e do modelo de bloco afectam a precisão do balanço de massa da planta de beneficiamento?

A compreensão e resposta a essas questões são essenciais, pois contribuem directamente para a melhoria do balanço de massa, uma vez que a representatividade e a precisão das amostras influenciam directamente o cálculo dos fluxos de massa ao longo do processo de beneficiamento.

1.2. Objectivos

1.2.1. Objectivo geral

- Avaliar a representatividade das amostras de teor do modelo de bloco em relação ao teor minerado (draga) e ao teor da *RSF*

1.2.2. Objectivos específicos

- Comparar a correlação de teores entre o modelo de bloco e os teores minerados (draga);
- Comparar a correlação de teores entre o modelo de bloco e os teores da alimentação do hidrociclone de deslamagem (*DCyF*);
- Comparar a correlação de teores entre o modelo de bloco e os teores da alimentação da espiral primária (*RSF*);
- Identificar desvios que contribuem para a discrepância entre o modelo de bloco e o teor reportado;
- Avaliar a viabilidade de utilizar os teores do modelo de bloco como teores minerados.

1.3. Justificativa

A eficiência da planta de concentração húmida B (*WCP-B*) depende directamente da qualidade das informações fornecidas pelo modelo de bloco, especialmente no que diz respeito ao teor total de minerais pesados (*THM*). Contudo, discrepâncias recorrentes entre os teores previstos pelo modelo de bloco e os resultados obtidos nas amostras do minério processado indicam possíveis falhas na representatividade das estimativas geológicas. Essas inconsistências comprometem o balanço de massa, dificultam o rastreio do minério ao longo do processo e prejudicam a tomada de decisões operacionais e estratégicas, impactando negativamente a eficiência da lavra e do beneficiamento. Neste contexto, o presente estudo justifica-se pela necessidade de melhorar a fiabilidade do modelo de bloco como ferramenta preditiva no âmbito da *WCP-B*. Ao investigar a correlação entre os teores estimados pelo modelo de bloco e os teores processados em pontos da planta como a draga, a alimentação do hidrociclone de deslamagem (*DCyF*) e a alimentação da espiral primária (*RSF*) torna-se possível identificar os principais factores que causam desequilíbrios no sistema, permitindo propor melhorias nos processos de amostragem e no controlo de qualidade dos dados. Além disso, a optimização da reconciliação mina-planta gerada por este estudo contribui para o uso mais eficiente do recurso mineral, reduzindo perdas e aumentando a produtividade, aspectos fundamentais para a sustentabilidade económica da operação. Portanto, esta investigação possui relevância tanto prática quanto científica, pois apoia o desenvolvimento de métodos mais rigorosos de amostragem, controlo de qualidade e validação do modelo de bloco, fomentando a melhoria contínua da eficiência e competitividade da cadeia mineral em Moçambique.

1.4. Metodologia

A metodologia utilizada para a elaboração deste relatório envolveu inicialmente uma revisão de literatura direccionada à colecta e organização dos conhecimentos teóricos sobre amostragem e operações beneficiamento mineral. Em seguida, foi realizada a observação detalhada dos métodos de amostragem, análise das características das amostras, avaliação dos equipamentos utilizados na colecta, e análise de mapas geológicos da área em estudo. O estudo abrangeu o modelo de bloco, as amostras provenientes da draga, da alimentação do hidrociclone de deslamagem e da alimentação

da espiral primária da planta de beneficiamento. A pesquisa foi conduzida na planta de concentração húmida B, nas instalações da Kennmare Resources PLC, em Pilivili, na província de Nampula, durante um período de 40 dias, entre 1 de março e 9 de abril. Os dados dos teores referentes à alimentação da planta foram extraídos do *Opsdata*, enquanto dados dos teores do modelo de bloco foram extraídos por meio do *Canary*, *Opsdata-MIS*, complementando as informações com os mapas geológicos e seguidos por um balanço de massa para determinação do teor diário. A etapa final consistiu na análise estatística detalhada dos dados colectados.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Areias Pesadas

Areia é qualquer material composto por grãos soltos e pedregosos entre 1/16 mm e 2 mm de diâmetro (Miedema, 2013). Areias pesadas são grãos que se encontram nas rochas de forma acessória, cuja densidade é superior a $2,9 \text{ g/cm}^3$, ou seja, é superior à do quartzo ($2,65 \text{ g/cm}^3$) e à dos feldspatos ($2,56\text{-}2,76 \text{ g/cm}^3$), figura 2.

As areias de minerais pesados são depósitos sedimentares de minerais densos que se acumulam com areia, silte e argila em ambientes costeiros, formando localmente concentrações econômicas dos minerais pesados. Esse tipo de depósito é a principal fonte de matéria-prima de titânio para a indústria de pigmentos de dióxido de titânio (TiO_2), através da recuperação dos minerais ilmenita ($\text{Fe}_2^+\text{TiO}_3$), rútilo (TiO_2) e leucoxênio (um produto de alteração da ilmenita). Areias de minerais pesados também são a principal fonte de zircônio (ZrSiO_4) e seu óxido de zircônio, e outros minerais pesados produzidos como coprodutos a partir de alguns depósitos são silimanita/caulinita, estaurolita, monazita e granada (Van Gosen et al, 2014).



Figura 2: Areia pesada, em Pilivili

2.2. Extração de Areias Pesadas por Dragagem Hidráulica em Leitos Submersos

A extração de minerais pesados pode ser realizada através de métodos como a mineração a céu aberto ou a dragagem. A dragagem mineral é realizada em locais onde

se pretende extrair materiais valiosos, como minerais pesados, do fundo de rios, lagos ou outros corpos d'água. Este método permite a remoção directa de minérios contidos nos sedimentos subaquáticos e é amplamente utilizado em operações de mineração aquática. (Correia, 2025).

O método de dragagem é caracterizado por um sistema de bombeamento que promove a sucção da polpa formada na superfície de ataque do leito submerso. Algumas dragas contam ainda com um dispositivo mecânico colocado na extremidade das tubulações de fundo, e que atua como elemento desagregador do material na superfície de contacto, facilitando assim a formação da polpa que é movimentada pelo bombeamento. Nestes casos, é passível considerar que se trata de um sistema misto, ou seja, desagregação mecânica com transferência de polpa por acção de força de sucção (Tanno & Sintonia, 2003).



Figura 3: Draga Dreide, em Pilivili

Algumas dragas estão equipadas com o sistema de rastreio por *GPS*, através do *MineView*, que permite identificar com precisão a sua localização durante a operação de lavra. O *GPS* integrado fornece coordenadas em tempo real, visualizadas directamente no *software*, o que facilita o acompanhamento da movimentação da draga sobre a jazida. Este rastreio contínuo assegura maior controlo sobre as zonas lavradas e serve de base para registar a trajectória da produção ao longo do tempo.

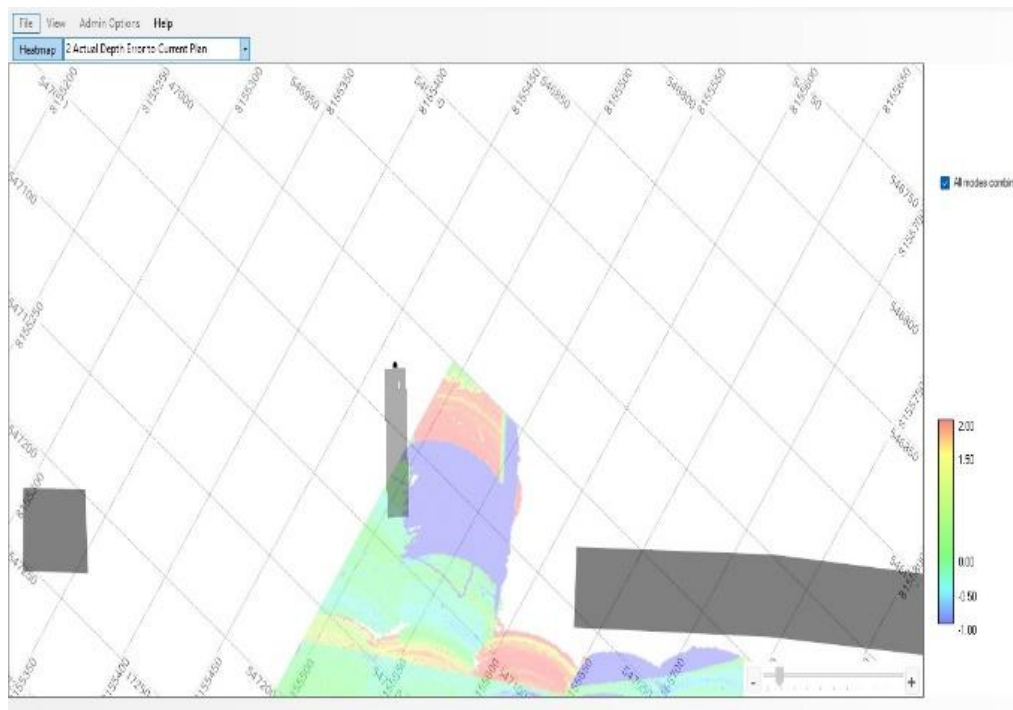


Figura 4: Sistema de rastreio da draga dreide, *mine view*

Fonte: Vitória (2025).

2.3. Concentração das Areias Pesadas

As operações de concentração e separação selectiva de minerais ocorrem com base nas diferenças de propriedades entre os minerais de interesse e os minerais de ganga, o que permite a sua separação e aproveitamento industrial (Da Luz et al., 2010).

De acordo com (Da Luz et al., 2010), a separação dos minerais pesados da ganga é realizada por concentração gravítica, processo baseado na diferença de densidades entre os minerais. Após essa separação, obtêm-se os teores totais de minerais pesados (*THM*), correspondentes à soma de todos os minerais pesados presentes na amostra.

Em escala laboratorial, recorre-se frequentemente ao uso de líquidos densos como o heteropolitungstato de lítio (*LST*), que permitem separar os minerais mediante o seu comportamento de flutuação ou sedimentação. Estes ensaios são fundamentais para a caracterização preliminar do minério e para a determinação da eficiência do processo em condições controladas.



Figura 5: Separação gravítica por meio de *LST*

Em escala industrial, algumas industriais a separação gravítica é realizada em espiras concentradoras. A espiral concentradora é construída na forma de um canal helicoidal curvo de secção transversal aproximadamente semicircular modificada (Haldar, 2018, tradução nossa).

De acordo com (Holland-Batt, 1995, tradução nossa), O padrão geral de fluxo em uma espiral consiste em um componente de fluxo primário (para baixo) com uma circulação secundária (transversal) superposta. O fluxo secundário surge da maior retardação friccional nas camadas mais baixas do fluxo primário em comparação com as camadas superiores e consiste em um fluxo para fora na região superior e um fluxo para dentro na região inferior, sendo os termos para dentro e para fora definidos como movimento em direcção ou afastando-se da coluna central da espiral.

Este comportamento está intrinsecamente relacionado à acção conjunta de forças gravitacionais, que impulsionam o fluido para baixo ao longo da calha, e forças centrífugas, resultantes da curvatura da espiral, que tendem a empurrar as partículas mais densas para a parede externa. Esses fenômenos físicos, associados à diferença de atrito entre as camadas do fluido, são fundamentais para a eficiência da separação gravítica neste tipo de equipamento (Haldar, 2018, tradução nossa).



Figura 6: Espirais concentradoras da WCP-B, em Pilivili

2.4. Balanço de Massa

Um aspecto importante de qualquer estudo de processamento mineral é uma análise de como o material é distribuído sempre que fluxos se dividem ou se combinam. Esse conhecimento é essencial ao fazer estudos de plantas em operação. Esses cálculos são conhecidos como balanço de material ou massa e é baseado no princípio da conservação da matéria (Kelly & Spottiswood, 1982, tradução nossa). De forma geral:

$$\text{Entrada} - \text{Saída} = \text{Acúmulo}$$

Em um sistema contínuo em estado estacionário, não há acúmulo, assim, a relação se reduz a:

$$\text{Entrada} = \text{Saída}$$

$$A = F + R \quad (1)$$

$$A \times x_A = F \times x_F + R \times x_R \quad (2)$$

Uma característica vital das separações de processamento mineral é que elas nunca são perfeitas, sempre há perdas que se considera uma parte do produto valioso na corrente de resíduos, e sempre há uma parte do resíduo (ou minerais de ganga) na corrente valiosa. Para descrever adequadamente a extensão da separação, dois parâmetros são comumente considerados: recuperação e teor (Kelly & Spottiswood, 1982, tradução nossa).

- A recuperação mede o quão efectivamente o separador extraiu o minério valioso contido na corrente de entrada. A recuperação é definida por:

$$\text{Recuperação da planta}(R_P) = \frac{x_F \times F}{x_A \times A} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Recuperação das espirais}(R_S) = \frac{x_F \times F}{x_E \times E} \times 100 \quad (4)$$

- O teor é uma medida da qualidade de qualquer corrente, idealmente, a corrente do produto valioso deve ser de alta qualidade. Assim, o teor de qualquer fluxo é definida por:

$$\text{Teor}(\%) = \frac{\text{massa de valor no fluxo}}{\text{massa de valor e resíduos no fluxo}} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Teor}(\%) = \frac{\sum_{k=1}^n Q_k x_k}{\sum_{k=1}^n Q_k} \times 100\% \quad (6)$$

2.5. Plano da Mina

O plano da mina é um documento elaborado pelo engenheiro de planeamento que utiliza o modelo de bloco para avaliar e valorizar os recursos minerais disponíveis, determinar a extensão final da lavra e definir uma estratégia de lavra que resulte em um cronograma de produção para toda a vida útil da mina (Emery & Séguret, 2019, tradução nossa).

2.5.1. Modelo de bloco

O modelo de bloco constitui uma representação tridimensional do corpo de minério, construída pela divisão do depósito em pequenos blocos que permitem descrever com maior detalhe as variações geológicas. O domínio abrange um bloco que comporte todo o depósito mineral.

O modelo de bloco é a base para projectos de planeamento de lavra. Este modelo divide o corpo de minério juntamente com o estéril em um conjunto de blocos organizados de forma sistemática no espaço (Souza, 2013).

Segundo (Yamamoto, 2001), modelagem de blocos, permitindo o armazenamento de uma grande variedade de atributos e variáveis, como litologia, teores de minerais, densidade, informações geotécnicas ou informações hidrogeológicas entre muitas outras.

Teor estimado no modelo de bloco é determinado a partir de dados de sondagem e modelagem geoestatística (Curi, 2014).

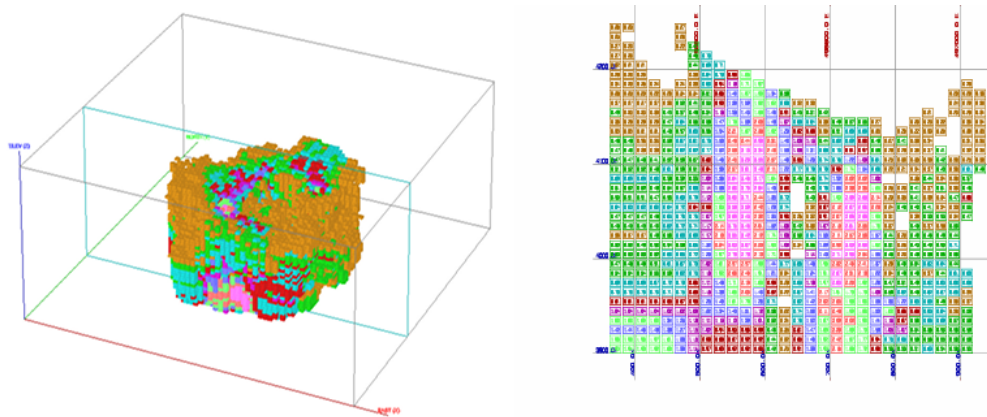


Figura 7: Modelo de blocos conceitual

Fonte: Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul (2025).

2.6. Amostragem

Quando se busca obter informações sobre uma determinada população, utiliza-se a amostragem, que consiste em seleccionar uma porção representativa do total de material, tornando a análise mais prática e eficiente em termos de tempo e recursos (Da Luz et al., 2010).

A amostragem é essencial, especialmente na avaliação de depósitos minerais, no controlo de processos e na comercialização de produtos. Quando realizada de forma inadequada, pode gerar perdas significativas ou distorções nos resultados, trazendo consequências técnicas imprevisíveis. Trata-se de uma das operações mais complexas da mineração e metalurgia, sujeita a múltiplos tipos de erro (Da Luz et al., 2010).

A amostragem é definida como um procedimento para seleccionar uma amostra de indivíduos ou subgrupos de uma população maior, sendo útil para determinados tipos de pesquisa (Bhardwaj, 2019, tradução nossa).

A amostragem permite obter informações sobre o minério, como teor, granulometria e composição química, que são essenciais para orientar decisões relativas à exploração, ao beneficiamento e ao transporte do material (Da Luz et al., 2010).

Amostra – é uma porção representativa do total de material a ser amostrado, e o método de colecta precisa assegurar que ela reflecta adequadamente as características de interesse do conjunto (Da Luz et al., 2010).

Incremento - corresponde a uma porção representativa de material retirada do total a ser amostrado, com o objectivo de compor a amostra final (Da Luz et al., 2010).

2.6.1. Avaliação do Plano de Amostragem

É recomendável implementar procedimentos de avaliação do plano de amostragem, como a inserção de pontos de inspecção intermediários, para assegurar que o processo está de acordo com o planeado. Essas medidas podem reduzir ou até eliminar possíveis erros, incluindo troca indevida de amostras ou contaminação do material (Da Luz et al., 2010).

Uma amostragem adequada não pode basear-se apenas no julgamento ou na experiência prática do operador. É essencial aplicar a teoria da amostragem, considerando os diferentes tipos de erros que podem surgir durante o processo.(Da Luz et al., 2010).

Segundo (Braga et al., 2007, p.12), “ a amostragem pode ser feita manual ou automaticamente. Os resultados obtidos com amostragem automática são mais confiáveis que aqueles oriundos da amostragem manual, embora seja esta mais utilizada em tratamento de minérios. As técnicas de amostragem manual podem ser realizadas com materiais em movimento ou estáticos. Embora sejam largamente utilizadas na indústria mineral, são técnicas pouco recomendáveis, uma vez que estão usualmente associadas a uma série de pequenos erros, tais como:

- (i) variação no intervalo de tempo de colecta das amostras ou incrementos;
- (ii) variação na velocidade de colecta dos incrementos;
- (iii) perda de partículas durante a colecta dos incrementos;
- (iv) contaminação por material diferente e heterogeneidade do material;
- (v) segregação localizada do material. ”

2.7. Métodos Estatísticos

A estatística permite tomar decisões fundamentadas mesmo na presença de incertezas e variações nos dados. Sem essas variações, não seria necessário aplicar métodos estatísticos, pois uma única observação forneceria todas as informações desejadas. A estatística fornece métodos para organizar, resumir e interpretar dados de forma a extrair conclusões confiáveis (Devore, 2006).

A distribuição de frequência dos dados pode-se obter algumas estatísticas que caracterizam numericamente o estudo. Essas estatísticas permitem estudar propriedades da população em termos do valor médio medido e como os demais se distribuem em torno desse valor. Alguns parâmetros estatísticos mais importantes usados no tratamento das amostras são a média, a variância e o desvio padrão (Curi, 2014):

- A média ($\bar{X}$) - corresponde a uma medida de tendência central ou esperança matemática dos dados;

$$\bar{X} = \frac{\sum_{k=1}^n X_k}{n} \quad (7)$$

- A variância (S^2) - estima a dispersão dos valores medidos com base em um conjunto de amostras em torno da sua média;

$$S^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2}{n-1} \quad (8)$$

- O desvio padrão (S) - é igual à raiz quadrada da variância e é também um modo de medir a dispersão dos valores em torno de sua média;

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (9)$$

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são descritos os procedimentos adoptados neste estudo, sendo a colecta de amostras realizada de acordo com os protocolos padronizados da Kenmare.

3.1. Área de Estudo

A presente pesquisa foi desenvolvida na empresa Kenmare Resources plc., na planta de concentração húmida B (WCP-B), situada em Pilivili, província de Nampula, em Moçambique. Esta planta integra o complexo mineiro de areias pesadas, cuja operação está localizada próxima à linha costeira do Oceano Índico. A WCP-B é responsável pelo processamento inicial do minério extraído, concentrando os minerais pesados por meio de processos de separação gravítica, com destaque para o uso de hidrociclones de deslamagem e espirais concentradoras. O teor reportado na WCP-B é obtido a partir de amostras colectadas durante a operação de lavra utilizando o ponto de amostragem da draga. As amostras são processadas e analisadas em laboratório para determinação do teor totais de minerais pesados (*THM*).



Figura 8: Planta de concentração húmida B (WCP-B), Pilivili

3.1.1. Características da zona minerada

Durante o período analisado, a extracção do minério ocorreu desde o bloco 521, canal 6, até ao bloco 527, canal 4, com excepção do bloco 526, canal 8. O material proveniente

dessa zona é composto, em sua maioria, por *sand clay*, uma lama arenosa formada por partículas finas e coesivas, com elevada capacidade de retenção de humidade.

Em menor proporção, observa-se a presença da *brown layer*, uma camada compacta e dura e com teor de minerais pesados. A presença dessas duas unidades litológicas influencia directamente a composição granulométrica e a variação dos teores obtidos ao longo do período de operação da planta.

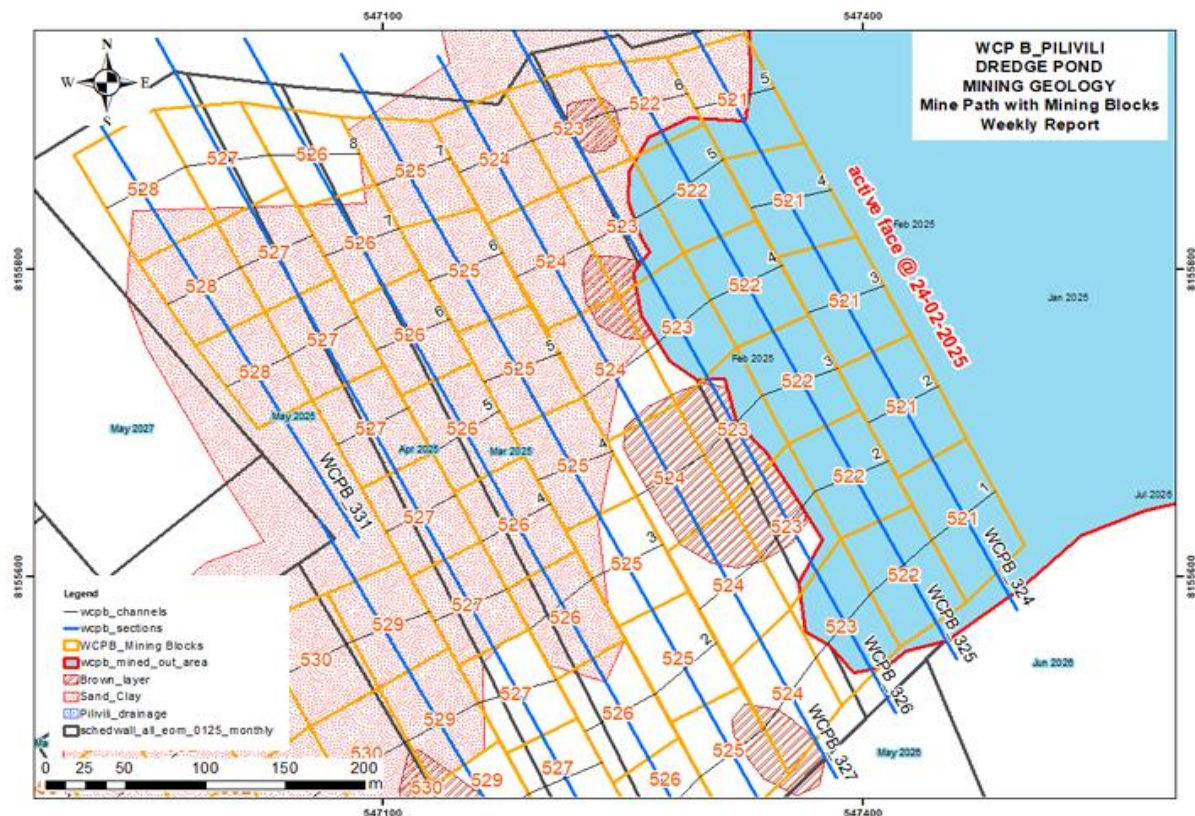


Figura 9: Mapa geológico com unidades litológicas dos blocos, WCP-B

Fonte: Xavier (2025).

Os minerais extraídos nas unidades litológicas *sand clay* e *brown layer* apresentam uma distribuição granulométrica variável, reflectindo a natureza heterogênea do depósito. O diâmetro das partículas observadas ao longo do período analisado variou desde fracções finas, típicas de lama (inferiores a 0,075 mm), até partículas agregadas com teor mineral com dimensões superiores, atingindo cerca de 32 cm nos blocos. Pode-se observar, na Figura 10, partículas que variam das mais finas às mais compactas.

Nos blocos da WCP-B utilizados no plano da mina, o teor do material a ser extraído não se limita apenas aos teores determinados pelo modelo de bloco. É prática adicionar um volume de material contendo minerais pesados na frente de lavra, tais como aquelas decorrentes do derramamento durante transporte do material e da movimentação do minério, bem como o material contaminado ou misturado que pode ser encontrado durante o processo, denominado *spillage*.



Figura 10: Características das partículas extraídas nas unidades litológicas durante a classificação granulométrica

3.2. Colecta de Dados

Os dados de teores totais de minerais pesados, utilizados neste estudo, foram obtidos a partir de duas fontes principais: o modelo de bloco geológico do depósito mineral e as amostras colectadas nas diferentes correntes de alimentação da planta de beneficiamento.

3.2.1. Teores totais de minerais pesados derivados do modelo de bloco

Os teores do modelo de bloco utilizados neste estudo foram obtidos com dados provenientes de *softwares* especializados que integram a localização geoespacial, tempo, os fluxos mássicos das zonas mineradas e os dados dos mapas geológicos contendo informações de teores totais de minerais pesados.

- **Canary software**

O *Canary software* foi utilizado para extrair dados geoespaciais da zona minerada pela draga, registrando informações detalhadas sobre o bloco, o canal e o período de tempo em que a extracção do minério ocorreu.

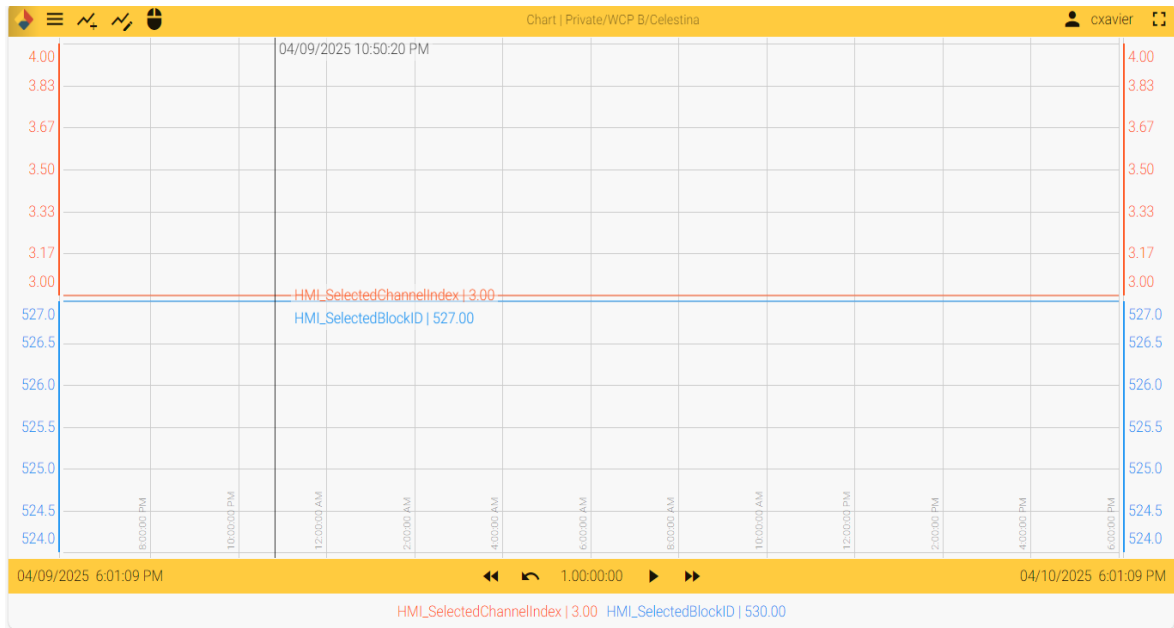


Figura 11: Visualização da localização geoespacial da draga no *Canary software*

- **Opsdata-MIS Software**

Opsdata-MIS

Data entry Reporting Tags Historians Messenger Admin Tools CXavier

Data entry Search...

WCP B : Tonnages

9 April 2025 (Wednesday)

Updated on 20 May 2025 at 17:47

Time from	Time to	Deidre tonnes (t)	Deidre cutter pressure (bar)	DM tonnes (t)	Rougher feed (t)	HMC tonnes (t)	PD pumping tonnes (t)	Updated by	Update time
06:00	07:00	528.9	43.9	0.0	721.9	44.8	0.0	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 07:04
07:00	08:00	1,297.3	67.3	0.0	1,093.9	42.8	0.0	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 08:05
08:00	09:00	2,760.2	96.6	0.0	2,224.3	67.6	0.0	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 09:01
09:00	10:00	982.1	76.3	0.0	1,052.1	56.6	0.0	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 10:06
10:00	11:00	0.0	44.6	0.0	0.0	0.0	0.0	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 11:12
11:00	12:00	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 12:01
12:00	13:00	897.4	57.9	0.0	649.8	21.3	0.0	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 13:06
13:00	14:00	2,920.4	82.1	0.0	2,300.7	119.5	0.0	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 14:01
14:00	15:00	1,138.7	53.9	0.0	998.5	63.1	0.0	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 15:05
15:00	16:00	0.0	34.7	0.0	0.0	4.9	0.0	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 16:01
16:00	17:00	0.0	34.8	0.0	20.1	0.5	0.0	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 17:02
17:00	18:00	0.0	34.8	0.0	0.0	0.0	0.0	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 18:02
18:00	19:00	0.0	34.9	0.0	0.0	0.0	0.0	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 19:01
19:00	20:00	0.0	34.9	0.0	0.0	0.0	8.8	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 20:04
20:00	21:00	0.0		0.0	0.0	0.0	0.1	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 21:01
21:00	22:00	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 22:03
22:00	23:00	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-09 23:06
23:00	00:00	0.0		0.0	0.0	0.0	80.2	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-10 00:00
00:00	01:00	0.0		0.0	0.0	0.0	106.3	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-10 01:04
01:00	02:00	1,506.0	79.3	0.0	1,173.2	68.2	109.5	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-10 02:09
02:00	03:00	2,869.2	75.2	0.0	2,453.9	139.7	104.9	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-10 03:02
03:00	04:00	2,911.3	93.9	0.0	2,399.4	127.6	106.9	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-10 04:06
04:00	05:00	3,047.3	92.9	0.0	2,634.8	151.8	97.6	WCP B historian (Canary) [HST-WCPB]	2025-04-10 05:01

Opsdata-MIS 3.9.20.30638
© 2025 Vidal Software Solutions

Figura 12: Visualização da quantidade de material minerado pela draga, em termos de fluxo mássico, no *Opsdata-MIS software*

O *Opsdata-MIS* software foi utilizado para extrair dados de fluxo mássico em diferentes localizações geoespaciais, por meio do monitoramento em tempo real das quantidades de material minerado. Esse sistema integra o registro temporal, possibilitando a associação precisa entre o instante de extracção fornecido pelo *Canary* software e os valores de fluxo mássico correspondentes a cada localização.

- **Mapa geológico**

O mapa geológico foi analisado com base nos registros do caminho de lavra (*Mine Path*), associados aos blocos minerados e aos dados de teores totais de minerais pesados, permitindo a obtenção dos teores efectivamente minerados em cada localização geoespacial identificada como minerada, a partir das coordenadas fornecidas pelo *Canary* software.

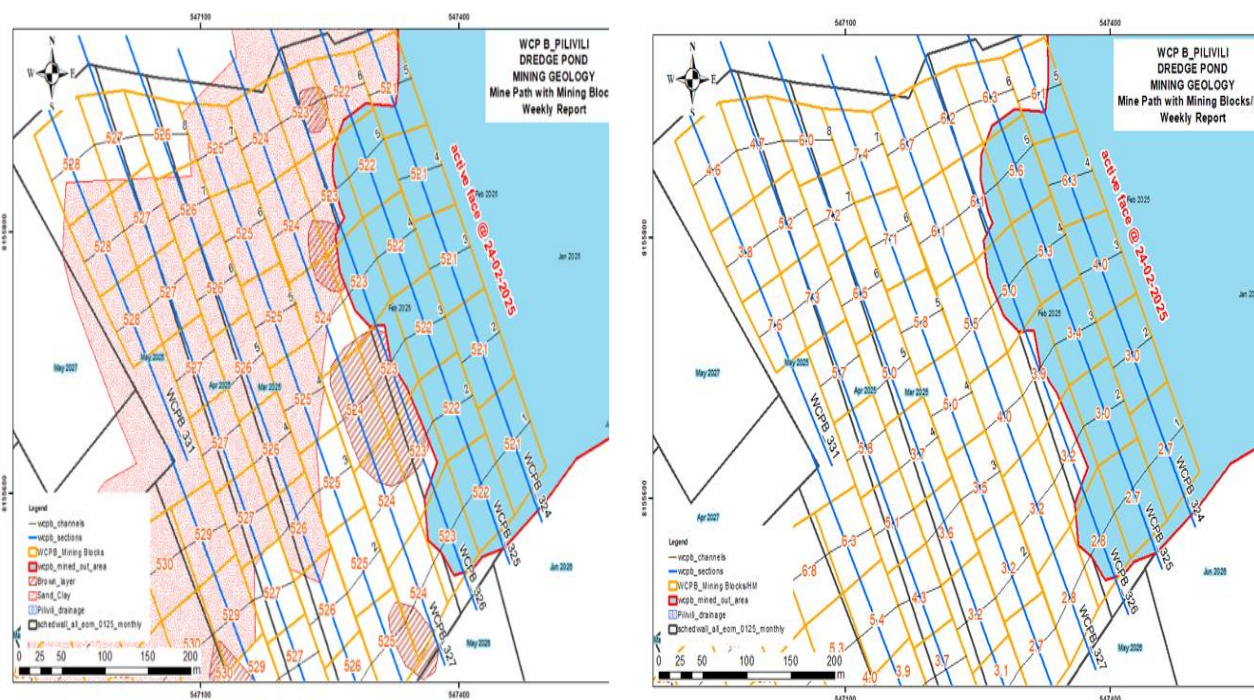


Figura 13: Visualização do mapa geológico com os blocos e canais de lavra e mapa geológico teores totais de minerais pesados

Fonte: Xavier (2025).

O cálculo dos teores totais de minerais pesados é realizado após a colecta e integração dos dados provenientes dos *softwares* *Canary* e *Opsdata-MIS*, bem como da análise do mapa geológico. Considerando que a draga opera em diferentes localizações

geoespaciais ao longo do tempo, torna-se necessário aplicar o balanço de massa diário, tendo em conta o bloco minerado em cada intervalo tempo para a determinação dos teores totais de minerais pesados, por meio da seguinte expressão:

$$\text{Teor}(\%) = \frac{\sum_{k=1}^n Q_k x_k}{\sum_{k=1}^n Q_k} \times 100\% \quad (10)$$

3.2.2. Teores totais de minerais pesados da planta de beneficiamento

Os dados da planta de beneficiamento foram obtidos por meio do *software Opsdata*, integrados aos resultados das análises laboratoriais realizadas nas amostras colectadas ao longo do processo.

- **Colecta de Amostras**

As amostras foram colectadas seguindo o plano operacional da planta, e foram obtidas de três pontos na planta de beneficiamento:

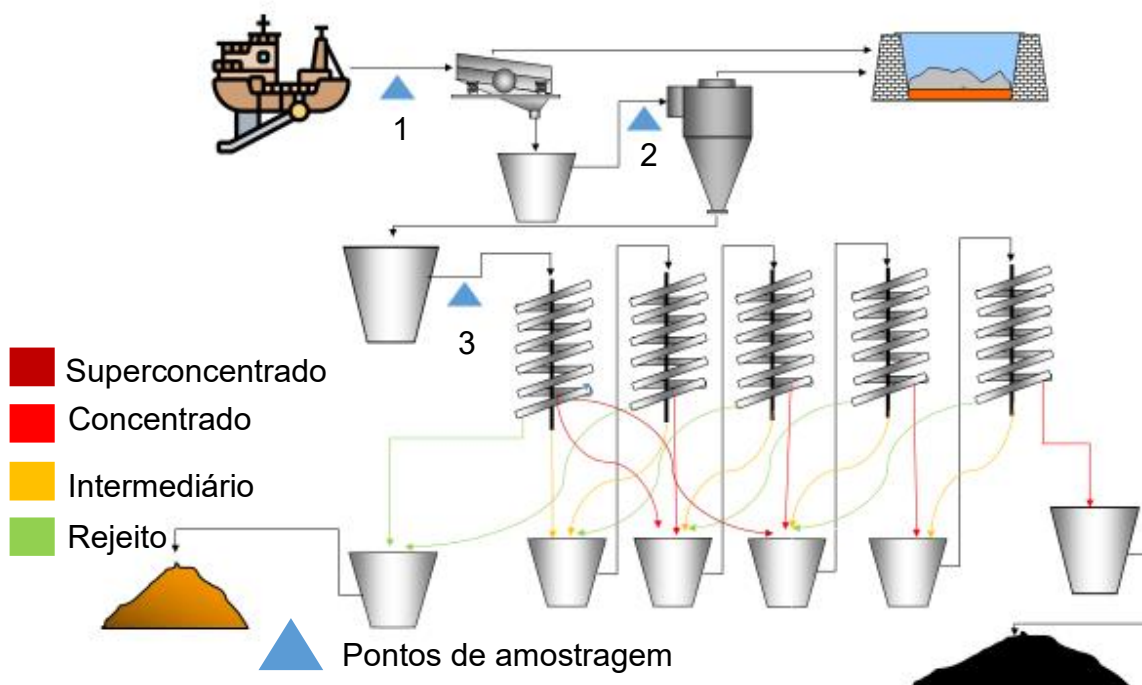


Figura 14: Fluxograma da WCP-B com destaque para os pontos de amostragem utilizados no estudo

1. Amostrador da draga - neste ponto foi colectada a amostra do minério succionado directamente pela draga, representando o material bruto extraído da frente de lavra, o qual é posteriormente direccionado ao processo de classificação granulométrica em malhas de 5 mm;

2. Amostrador da alimentação do hidrociclone de deslamagem (*DCyF*) - neste ponto foi colectada a amostra que representa o material passante obtido no processo de classificação granulométrica em malhas de 5 mm, o qual é, posteriormente, direccionado ao hidrociclone de deslamagem, responsável pela remoção das partículas finas;
3. Amostrador da alimentação da espiral primária (*RSF*) - neste ponto foi colectada a amostra que representa o material deslamado e direccionado ao circuito de separação gravítica, realizado por meio de espirais.

- **Condições do Processo de Amostragem**

Durante o desenvolvimento deste estudo, as condições observadas para o processo de amostragem foram as seguintes:

1. **Ponto de amostragem na draga:** A amostragem foi realizada manualmente, por meio de uma válvula de amostragem instalada na tubagem da linha de sucção da draga, a qual possui diâmetro aproximado de 64 cm. Essa válvula apresenta um diâmetro interno de 4 cm e está conectada a um tubo auxiliar com 5,5 cm de diâmetro interno.



Figura 15: Válvula de amostragem da draga

2. **Ponto de amostragem na alimentação do hidrociclone de deslamagem (*DCyF*):** O amostrador automático deste ponto encontrava-se inactivo no período de colecta. Por esta razão, a amostragem foi realizada de forma manual, numa válvula de

amostragem com diâmetro interno de 4 cm, conectada a um tubo de 5,5 cm de diâmetro interno.



Figura 16: Válvula de amostragem da *DCyF*

3. **Ponto de amostragem da alimentação da espiral primária (*RSF*):** A amostragem foi realizada no amostrador automático, conectado a um tubo auxiliar de 5,5 cm de diâmetro interno, esteve em funcionamento durante todo o período de colecta.



Figura 17: amostrador automático da *RSF*

- **Obtenção dos dados analíticos das amostras**

Os dados laboratoriais utilizados neste estudo foram obtidos a partir de análises realizadas pela equipa técnica do laboratório, não tendo sido efectuadas directamente pela autora. As amostras colectadas foram submetidas a processo de separação gravítica, o qual consiste na utilização de *LST*, líquido de separação densa para

concentrar os minerais pesados. Os resultados dessas análises foram posteriormente registados e armazenados no sistema *Opsdata*, de onde foram extraídos e organizados para fins desta investigação.

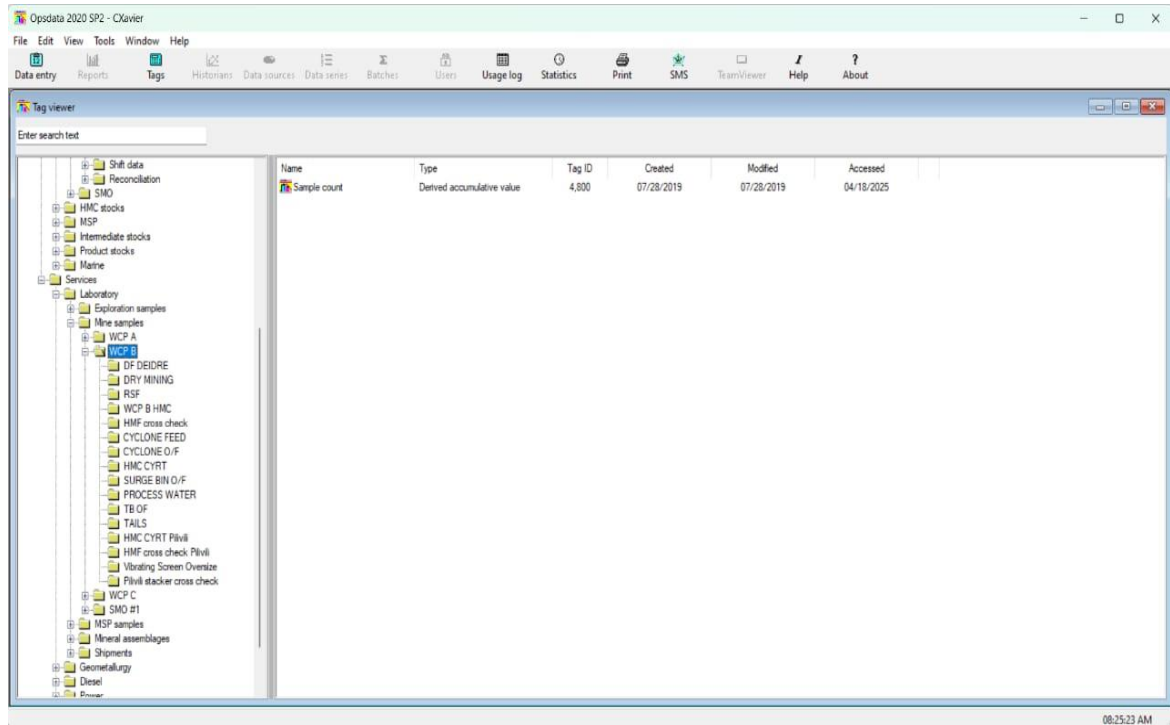


Figura 18: Visualização dos resultados laboratoriais integrados ao sistema *opsdata*, referentes aos teores da planta de beneficiamento

3.3. Método de comparação e avaliação do modelo de bloco

Para comparar os teores totais de minerais pesados do modelo de bloco, utilizaram-se os dados de teores totais de minerais pesados provenientes das amostras da planta de beneficiamento, analisados através dos indicadores estatísticos.

Os indicadores estatísticos possibilitaram avaliar a consistência e a correlação entre os teores previstos pelo modelo de bloco e os teores efectivamente obtidos nas amostras colectadas.

- **Coefficiente de correlação de Pearson** - resume a relação entre modelo bloco geológico e os valores das amostras. Ele pode ser calculado a partir de (Ferreira, 2012):

$$r = \frac{\sum_{k=1}^n (Y_k - \bar{Y}_k) \times \sum_{k=1}^n (U_k - \bar{U}_k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (Y_k - \bar{Y}_k)^2 \times \sum_{k=1}^n (U_k - \bar{U}_k)^2}}, \text{ varia de } (0;1) \quad (11)$$

Tabela 1: Interpretação dos valores do Coeficiente de correlação de Pearson (r)

Valor de r (+ ou -)	Interpretação
0.00 - 0.19	Uma correlação muito fraca
0.2 - 0.39	Uma correlação fraca
0.4 - 0.69	Uma correlação moderada
0.7 - 0.89	Uma correlação forte
0.9 -1	Uma correlação muito forte

Fonte: Fernández (2022).

- **Coeficiente de Determinação** - mede o quão o modelo de bloco consegue explicar os valores das amostras. Ele pode ser calculado a partir de (Ferreira, 2012):

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{k=1}^n (Y_k - \bar{Y}_k) \times \sum_{k=1}^n (U_k - \bar{U}_k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (Y_k - \bar{Y}_k)^2 \times \sum_{k=1}^n (U_k - \bar{U}_k)^2}} \right]^2, \text{ varia de } (0;1) \quad (12)$$

Esse valor multiplicado por 100%, obtém-se a percentagem de explicação do modelo de bloco.

- **Índice de concordância**- uma medida estatística que avalia o quanto os valores observados estão em acordo com os valores previstos, estimados ou medidos por outra fonte. Ele pode ser calculado a partir de (Wilmott, 1981):

$$d = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (Y_k - U_k)^2}{\sum_{k=1}^n (|Y_k - \bar{Y}_k| + |U_k - \bar{U}_k|)^2}, \text{ varia de } (0;1) \quad (13)$$

Esse valor multiplicado por 100%, obtém-se a percentagem de concordância.

Para a avaliação da fiabilidade do modelo de bloco como estimativa do teor minerado, foi utilizado o cálculo da recuperação da planta e teor médio, com base nos teores obtidos no modelo de bloco e na amostra da draga. Adicionalmente, aplicaram-se ferramentas estatísticas como o erro relativo, o desvio padrão e variância, para avaliar a magnitude da diferença entre os valores médios de teor e recuperação obtidos no modelo de bloco e nas amostras da draga, tendo como ponto de referência a alimentação da espiral

primária (*RSF*), considerando a sua localização estratégica e a estabilidade das condições de amostragem. Esta abordagem permitiu verificar até que ponto as variações entre os dados do modelo de bloco e da draga podem influenciar a consistência do balanço de massa e a representatividade das amostras na avaliação global do desempenho da planta.

- **Erro relativo**

$$Er(\%) = \frac{X-Y}{Y} \times 100\% \quad (14)$$

Onde:

X- teor médio ou recuperação média do modelo de bloco ou da amostra da draga

Y- teor médio ou recuperação média da *RSF*

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Comparação do Modelo de Bloco e da Draga

Os resultados apresentados na Figura 19, comparam os teores totais de minerais pesados obtidos no modelo de bloco e nas amostras colectadas no ponto da draga, durante um período de 40 dias de amostragem. Observam-se discrepâncias relevantes entre os teores, atribuídas à colecta manual das amostras, cuja representatividade foi afectada pela dependência directa da actuação do operador, comprometendo a consistência dos dados.

Um factor técnico adicional, associado à heterogeneidade do material minerado, identificado foi a utilização de válvulas com diâmetro inferior ao do material minerado, promovendo uma selectividade positiva e resultando em uma elevação artificial dos teores totais de minerais pesados nas amostras da draga.

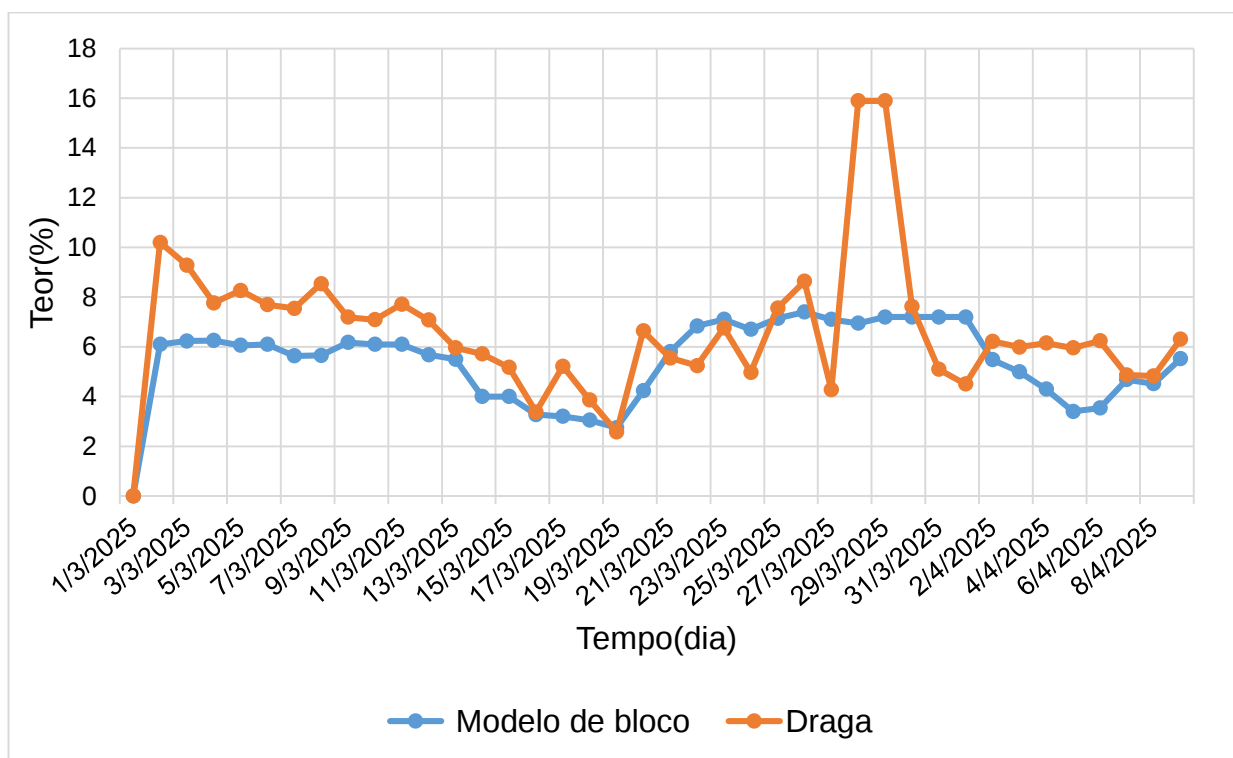


Figura 19: Distribuição de teores totais de minerais pesados no modelo de blocos e nas amostras da draga

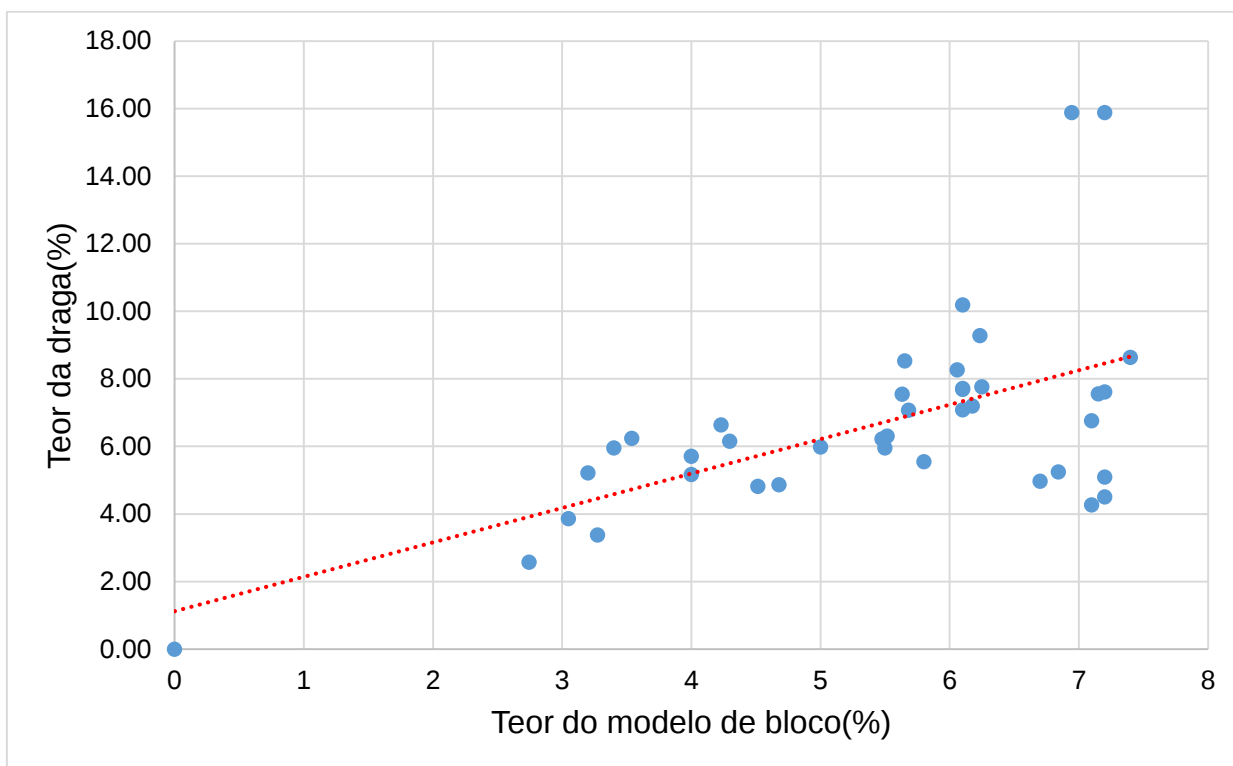


Figura 20: Dispersão dos teores totais de minerais pesados do modelo de bloco com as amostras colectadas da draga

Para avaliação da correlação entre o modelo de bloco e a draga foram obtidos os seguintes indicadores estatísticos:

Tabela 2: Correlação e concordância entre o modelo de bloco e a draga

Comparação	d	r	R ²
Modelo de bloco vs Draga	0.608	0.580	0,337

Os indicadores estatísticos da correlação entre os teores previstos pelo modelo de bloco e os teores obtidos na amostragem da draga revelam uma correspondência moderada a baixa. O índice de concordância ($d = 0.609$) indica que há 60.9% de concordância ou seja há uma aderência parcial entre os teores do modelo de bloco e os teores observados, com variações consideráveis ao longo da série de dados.

O coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0.580$) reforça essa interpretação, demonstrando uma relação linear moderada entre os conjuntos de dados. Este valor sugere que, embora exista alguma tendência de alinhamento entre os teores do modelo de blocos e da draga, essa relação não é suficientemente forte para garantir a

representatividade do modelo de bloco como substituto directo da amostragem da draga. Além disso, o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,337$) evidencia que apenas 33,7% da variabilidade nos teores minerados pode ser explicada pelo modelo de bloco.

4.2. Comparação do Modelo de Bloco e da DCyF

Os resultados apresentados na Figura 21, comparam os teores totais de minerais pesados obtidos no modelo de bloco e nas amostras colectadas no ponto da DCyF, ao longo de 40 dias de amostragem. Observa-se uma variabilidade significativa nos teores da DCyF, com teores que oscilam entre 0% a 20%, essa grande variação se deve ao facto da amostragem da DCyF ter sido realizada manualmente, o que compromete a representatividade das amostras, pois depende directamente da actuação do operador, isso afecta negativamente o balanço de massa da planta, bem como a reconciliação com o modelo de bloco.

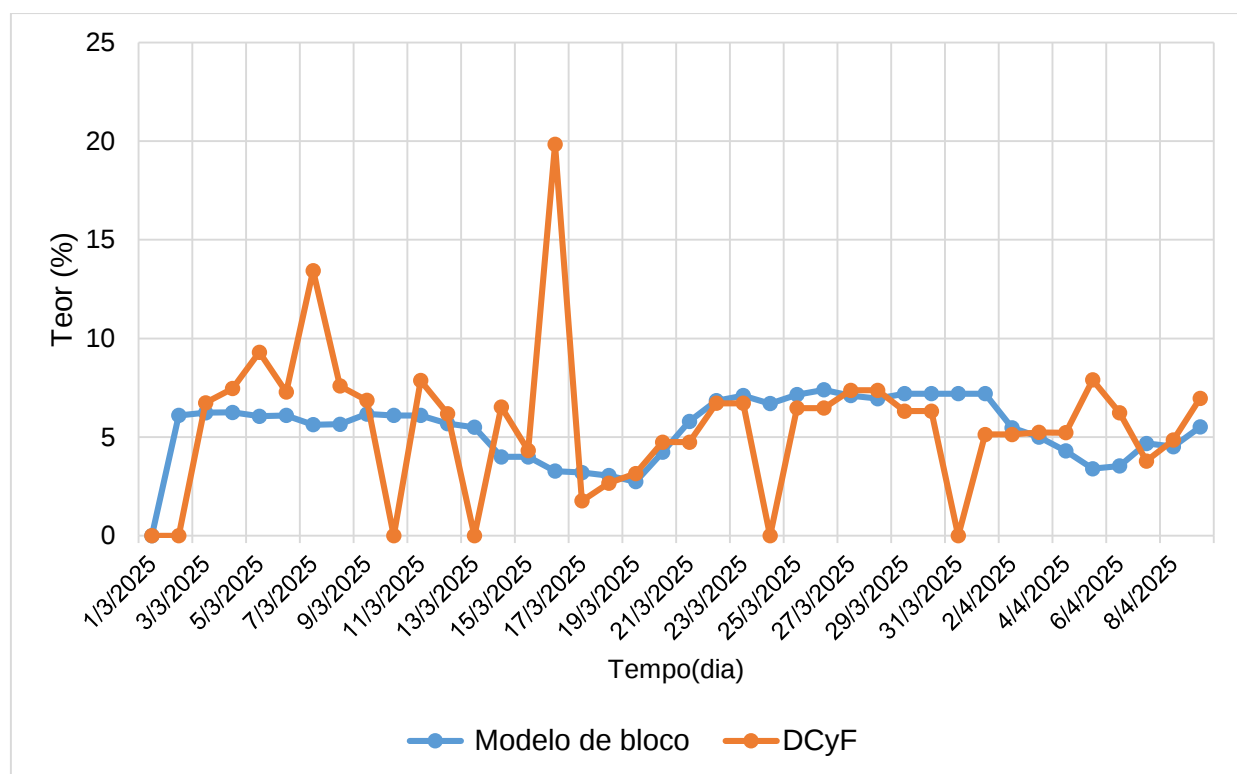


Figura 21: Distribuição de teores totais de minerais pesados no modelo de bloco e nas amostras da DCyF

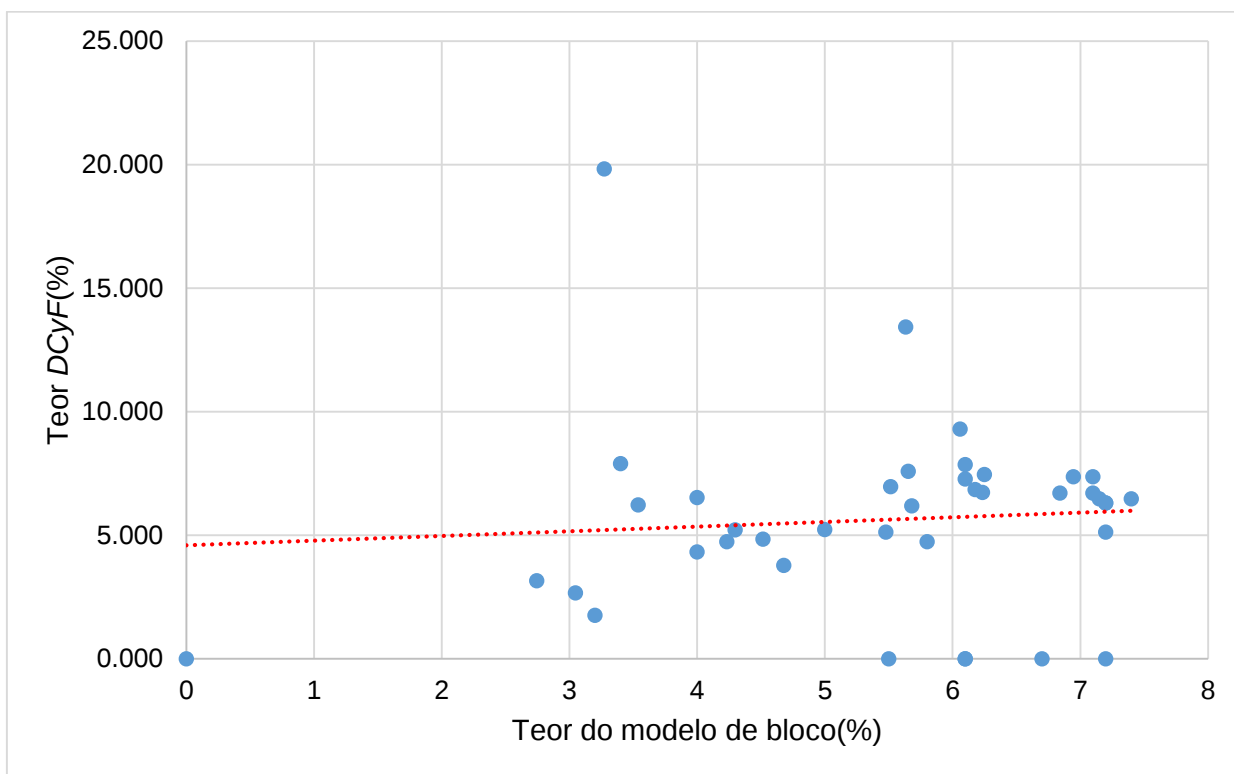


Figura 22: Dispersão dos teores totais de minerais pesados do modelo de bloco com as amostras colectadas na *DCyF*

Para avaliação da correlação entre o modelo de bloco e a *DCyF* foram obtidos os seguintes indicadores estatísticos:

Tabela 3: Correlação e concordância entre o modelo de bloco e a *DCyF*

Comparação	d	r	R ²
Modelo de bloco vs <i>DCyF</i>	0.354	0.082	0.007

Os indicadores estatísticos referentes à correlação entre os teores previstos pelo modelo de bloco e os teores da alimentação do hidrociclone de deslamagem (*DCyF*) demonstram uma baixa aderência entre os dois conjuntos de dados. O índice de concordância ($d = 0.354$) obtido evidencia uma concordância de 35,4% ou seja fraca, indicando que os teores do modelo de bloco divergem significativamente dos teores obtidos na *DCyF*.

O coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0.082$) reforça esse resultado, representando uma correlação muito fraca entre os conjuntos de dados. Este valor sugere que praticamente não há uma relação linear significativa entre o modelo de bloco e os teores

da alimentação do hidrociclone de deslamagem, revelando um possível desalinhamento operacional entre o plano da mina e o material efectivamente processado nesta etapa de *DCyF*.

Adicionalmente, o coeficiente de determinação ($R^2 = 0.007$) indica que menos de 1% da variabilidade observada nos teores da *DCyF* pode ser explicada pelo modelo de bloco. Este resultado destaca uma inconsistência expressiva entre os teores do modelo de bloco e os observados, podendo ser atribuída, entre outros factores, à influência de erro associado principalmente à amostragem manual.

4.3. Comparação do Modelo de Bloco e da *RSF*

Os resultados apresentados na Figura 23, comparam os teores totais de minerais pesados obtidos no modelo de bloco e nas amostras colectadas no ponto da *RSF*, ao longo de 40 dias de amostragem. Espera-se que os teores no *RSF* estejam consistentemente acima dos teores previstos pelo modelo de bloco, uma vez que essa etapa corresponde à concentração dos minerais após a classificação granulométrica e deslamagem.

Entretanto, observa-se que, embora em vários momentos as amostras da *RSF* apresentem uma consistência em teores maiores que o modelo de bloco, em alguns dias os teores caem abaixo dos teores do modelo de bloco, nesse caso pode ter ocorrido diluição na extracção e perdas nas correntes de classificação granulométrica (teores totais de minerais pesados retidos no vibrador) apresentadas no Apêndice A4.

Também se observa o caso em os teores da *RSF* estão muito acima do modelo de bloco, o que pode se justificar com existência do *spillage*, que é a adição de material derramado durante o transporte a frente de lavra, bem como o material contaminado ou misturado que pode ser encontrado durante o processo.

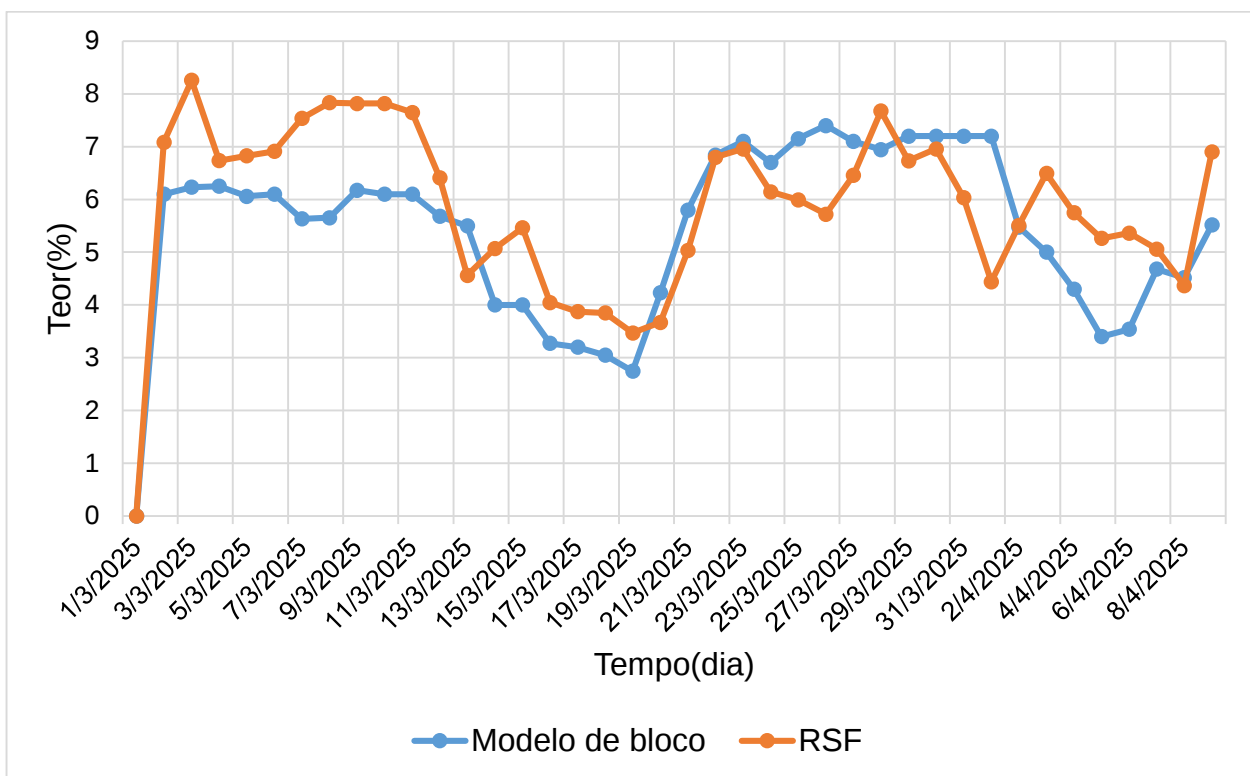


Figura 23: Distribuição de teores totais de minerais pesados no modelo de bloco e nas amostras da RSF

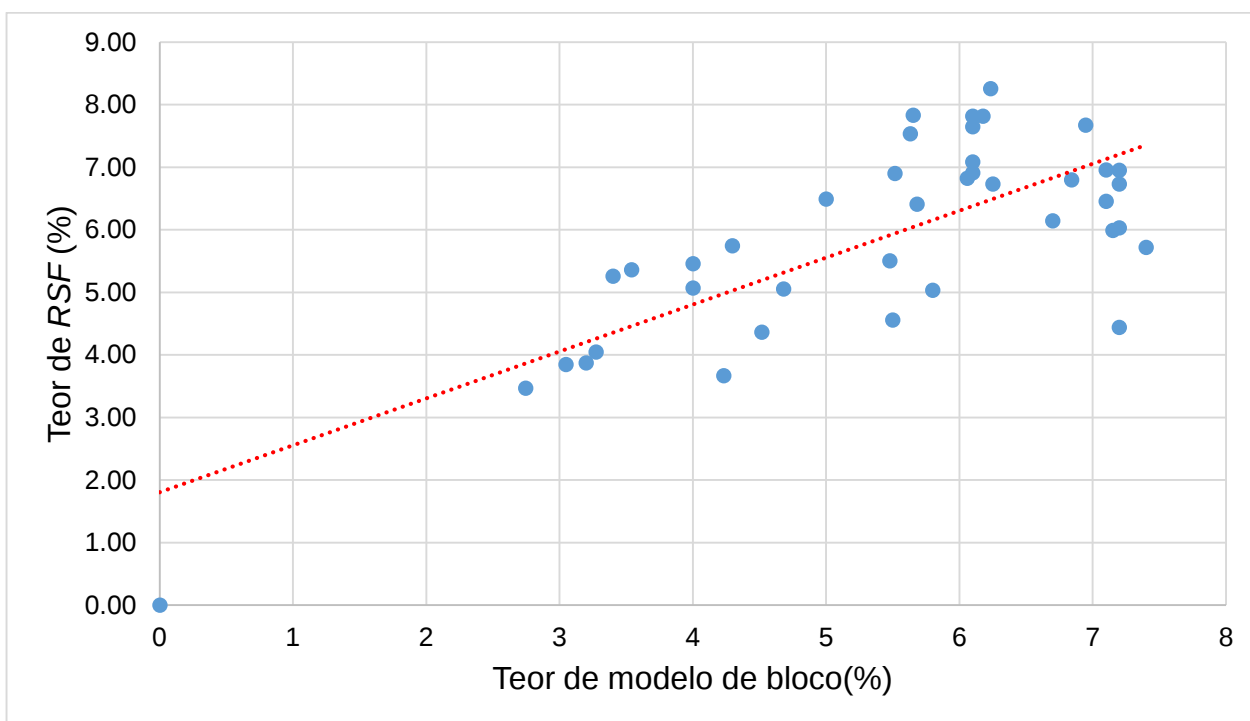


Figura 24: Dispersão dos teores totais de minerais pesados comparando do modelo de bloco com as amostras colectadas na RSF

Para avaliação da correlação entre o modelo de bloco e a *RSF* foram obtidos os seguintes indicadores estatísticos:

Tabela 4: Correlação e concordância entre o modelo de bloco e a *RSF*

Comparação	d	r	R ²
Modelo de bloco vs <i>RSF</i>	0.843	0.754	0.569

Os indicadores estatísticos referentes à correlação entre os teores previstos pelo modelo de bloco e os teores da alimentação da espiral primária (*RSF*) apresentam uma correspondência forte a moderada.

O índice de concordância ($d=0.843$), o que indica uma boa concordância entre os teores previstos pelo modelo de bloco e os teores observados nesta etapa do processo. Este elevado valor sugere que aproximadamente 84.3% da variabilidade nos teores da *RSF* está em conformidade com os teores do modelo de bloco, reflectindo uma representatividade adequada da previsão do modelo de bloco.

O coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0.754$), entre as duas variáveis, é considerado forte, sugerindo que há uma tendência de aumento dos teores na *RSF* em função do aumento dos teores previstos pelo modelo de bloco. Embora existam variações, esta relação positiva reforça a validade do modelo de bloco especialmente nesta etapa da planta de beneficiamento.

O coeficiente de determinação ($R^2 = 0.569$) confirma que 56.9% da variabilidade nos teores da *RSF* pode ser explicada pelos teores do modelo de bloco. Este desempenho mais consistente pode estar associado à maior estabilidade operacional da planta nesta etapa, bem como ao uso de sistema automático de amostragem, que contribuem para uma maior precisão e reprodutibilidade na colecta das amostras da *RSF*.

4.4. Análise Crítica entre o Modelo de Bloco e Teor Reportado

A Tabela 5, evidencia discrepâncias entre o modelo de bloco e os teores reais reportados no processo de mineração, usando o ponto de amostragem da draga.

Tabela 5: Comparação entre o teor médio do modelo de bloco e o teor médio reportado

Amostra	Teor (%)	Teor <i>RSF</i> (%)	Er (%)	S	S²
Draga	6.64	5.86	-13.17	0.546	0.298
Modelo de bloco	5.55	5.86	5.39	0.223	0.050

Para a análise das discrepâncias, conforme mostrado usando o ponto de referência a alimentação da espiral primária (*RSF*), tendo em conta sua localização estratégica, o teor da *RSF* não deve estar abaixo dos teores da draga e do modelo de bloco.

Essas discrepâncias entre a *RSF* e a draga é evidência de forma clara que a condição de amostragem desempenha um papel fundamental. A condição da válvula de amostragem da draga favorece a selectividade positiva, contribuindo para o aumento dos teores obtidos na draga e sugerindo a existência de perdas ao longo do processo, antes da *RSF*, as quais explicam esse aumento aparente.

Tabela 6: Análise comparativa da recuperação da planta usando o modelo de bloco e o teor reportado

Amostra	R_P (%)	R_s (%)	Er (%)	S²	S
Draga	75.38	93.55	19.42	0.128	0.016
Modelo de bloco	87.81	93.55	6.13	0.041	0.002

A análise em termos de recuperação revela discrepâncias significativas entre os teores obtidos na draga e teores previstos pelo modelo de bloco, com implicações directas na interpretação do desempenho da planta. O erro relativo de 19.42% entre a draga e a *RSF*, compromete a fiabilidade da amostragem da draga como referência para o controlo da produção.

Além disso, a maior variabilidade nos teores da draga, expressa pelo desvio padrão de 0.128 e variância de 0.016, indica baixa estabilidade e elevada dispersão dos dados, o que pode estar associado à heterogeneidade do material minerado, à ineficiência da amostragem, ou ainda as condições operacionais instáveis nesse ponto do processo, nomeadamente na draga.

A recuperação global da planta *WCP-B* baseada nos teores da draga é de 75.38%, valor consideravelmente inferior à recuperação estimada com os teores do modelo de bloco,

que é de 87.82%. Esta diferença sugere que o uso exclusivo dos teores da draga pode subestimar a eficiência real da planta, comprometendo não apenas o balanço de massa, mas também a reconciliação com o plano de mina.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

Com base neste estudo, pode-se concluir que, para termos uma análise consistente sobre a representatividade dos teores totais de minerais pesados do modelo de bloco, é necessário considerar as condições no momento da mineração e a forma como as amostras são colectadas, pois esses factores influenciam directamente a representatividade do modelo de bloco. Esse facto é evidenciado na análise comparativa entre os teores do modelo de bloco e os teores obtidos nas diferentes etapas do processo, como draga, alimentação do hidrociclone de deslamagem (*DCyF*) e alimentação da espiral primária (*RSF*) que revelou discrepâncias, que comprometem o balanço de massa da planta de concentração húmida B (*WCP-B*), onde as maiores discrepâncias foram verificadas nas amostras colectadas manualmente, na draga e na *DCyF*. Na *DCyF*, teve uma correlação fraca, demonstrando que os dados colectados nessa etapa são altamente inconsistentes, devido dependência da actuação do operador, o que introduz variações operacionais que comprometem os resultados. Na draga, teve uma correlação moderada a fraca, indicando que as condições de amostragem na draga, devido à dependência da actuação do operador e válvula de amostragem inadequada que eleva artificialmente os teores de totais de minerais pesados, comprometem a representatividade das amostras e controlo operacional. Em contrapartida, a etapa *RSF* apresentou o melhor alinhamento, com correlação forte a moderada, mostrando que pode se considerar o mais confiável do processo, sobretudo por contar com sistema de amostragem automática. Isso indica que, apesar das flutuações, há uma tendência dos teores da *RSF* seguirem o comportamento esperado pelos teores do modelo de bloco. Ainda assim, em determinados dias, observou-se que os teores da *RSF* ficaram abaixo dos teores do modelo de bloco, o que pode estar relacionado ao efeito de diluição na extracção e perdas nas correntes de classificação granulométrica.

Os resultados estatísticos mostraram que os desvios amostrais na draga que representa o teor reportado afectam significativamente a recuperação da planta, e maior variabilidade nos teores, o que compromete a reconciliação metalúrgica e o plano da mina. Diante disso, embora o modelo de bloco tenha limitações na sua capacidade de representar com

precisão o teor minerado, especialmente devido à variabilidade e inconsistências nas amostras colectadas, ele apresenta potencial para ser utilizado como referência para o teor minerado, principalmente quando associado a etapa do processo com maior estabilidade e representatividade, como a *RSF*.

5.2. Recomendações

Com base nos resultados obtidos, são propostas recomendações técnicas com o propósito de otimizar a qualidade dos dados amostrais e a eficiência operacional dos processos analisados. Estas medidas visam mitigar as discrepâncias identificadas entre os teores previstos pelo modelo de bloco e os teores efectivamente reportados ao longo do processo, promovendo maior representatividade da amostra e acurácia nas estimativas, além de subsidiar futuras aplicações práticas e estudos de reconciliação mineral:

1. Implementar técnicas automatizadas de amostragem, com o objectivo de minimizar interferências humanas e garantir maior representatividade e fiabilidade dos dados obtidos;
2. Estabelecer um plano rigoroso de manutenção preventiva dos equipamentos de amostragem automática, evitando longos períodos de inactividade e assegurando a continuidade e consistência da recolha de amostras;
3. Adoptar controlos estatísticos semanais para monitorar as variações nos teores ao longo do processo. Estes controlos permitirão ajustes contínuos nas previsões do modelo de bloco, contribuindo para a redução das discrepâncias observadas;
4. Implementar um sistema de rastreio semelhante ao utilizado na draga para a operação na mina seca C (*Dry Mine C*). Esta medida visa aprimorar a rastreabilidade das amostras, melhorar a avaliação da acurácia do modelo de bloco e reforçar a fiabilidade das estimativas utilizadas no plano de produção;
5. Quantificar e monitorar os teores totais de minerais pesados do *spillage* (derrame/perda de material fora das correntes principais do processo) que são adicionados a frente de lavra nos blocos para serem minerados.

CAPÍTULO 6

6. BIBLIOGRAFIA

Bhardwaj, P. (2019). Statistic: Types of sampling in research. *Journal of the Practice of Cardiovascular Sciences*.

Bonito, J., Anjo, A. B., & Peixoto, E. (2025). Geological resources in Mozambique and its presence in. *Revista de Estudios e Investigación en Psicología y Educación*, 1.

Canile, F. (2023). Módulo I – Minerais pesados. *Petrologia e Petrografia de Rochas Sedimentares-CIT009*, pp. 3–6. Acesso em 28 de Maio de 2025, disponível em <https://pt.scribd.com/document/663620673/CIT0092-AULA-2-Parte-1>

Coastal & Environmental Services Mozambique Limitada. (2012). *Projecto de Areias Pesadas de Moma da Kenmare: Relatório do estudo de pré-viabilidade ambiental e definição do âmbito do projecto de Pilivili e Mualadi*. Maputo: CES.

Correia. (2025). *Dragagem: Tudo o que você precisa saber*. Acesso em 25 de Maio de 2025, disponível em Correia transportes: <https://share.google/R5eBsMexU6iqmip8G>

Curi, A. (2014). *Minas a céu aberto: Planejamento de lavra*. São Paulo: Oficina de Textos.

Da Luz, A. B. , Sampaio, J. A., & França, S. C. A. (2010). *TRATAMENTO DE MINÉRIOS* (5ª ed.). Rio de Janeiro: CETEM/MCT.

Devore, J. L. (2006). *Probabilidade e estatística para engenharia e ciências* (6ª ed.). São Paulo: Thomson.

Emery, X., & Séguet, S. A. (2019). applications to porphyry copper deposits. Em *Geostatistics for the Mining Industry* (p. XVII). Paris: Presses des Mines.

Fernández, M. F., Díaz, E. L., Tejeda, N. R., & Cumpa, M. S. (2022). ** Estrés y desempeño laboral docente del Colegio Emblemático Cruz De Chalpón, Motupe – Lambayeque* (1ª ed.). Quito, Equador: Religación Press.

Ferreira, P. M. (2012). *Estatística e Probabilidade*. Fortaleza: UAB/IFCE.

Haldar, S. K. (2018). *Mineral exploration - Principles and applications*. Elsevier.

Holland Batt, A. B. (1995). Mineral Technologies Division . Em *Some design considerations for spiral separators* (p. 2). Gold Coast Mail Centre, QLD: Clyde Industries Limited .

Kelly, E. G., & Spottiswood, D. J. (1982). *Introduction to mineral processing*. New York: John Wiley & Sons.

Kenmare Resources PLC. (2025). Acesso em 28 de Maio de 2025, disponível em A Mina de Moma: <https://www.kenmareresources.com/pt/a-nossa-atividade/a-mina-de>

Lope, M. (2013). Equipamentos para concentração de minerais pesados . Acesso em 19 de Junho de 2025, disponível em [https://www.academia.edu/33073257/Equipamentos_para_concentra%C3%A7%](https://www.academia.edu/33073257/Equipamentos_para_concentra%C3%A7%C3%A3o_de_minerais_pesados)

Martins, M. E. (2014). Coeficiente de correlação amostral. *Revista de Ciência Elementar*, 2.

Miedema, S. A. (2013). Dredging processes - Soil Mechanics. p. 14 .

Mining Technology. (2021). *Moma titanium minerals mine, Mozambique* . Acesso em 27 de Maio de 2025, disponível em <https://www.mining-technology.com/projects/moma-titanium-minerals>

Sampaio, J. A., França, S. A., & Braga, P. A. (2007). *Tratamentos de minérios: Práticas laboratoriais*. CETEM-MCT.

Souza, R. A. (2013). *Análise e controle dos índices de aderência e cumprimento para planos de lavra*. Universidade Federal de Goiânia – Campus Catalão.

Tanno, L. C., & Sintonia, A. (2003). *Mineração e município: Bases para planejamento e gestão dos recursos*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

Universidade Federal de Minas Gerais. (2008). *Introdução ao planejamento e operação de lavra (a céu aberto e subterrânea)*. Engenharia de Minas , Belo Horizonte.

Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – Campus de Marabá. (2015). *Os teores e a avaliação econômica de mineração*. Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Marabá.

Van Gosen, B. S., Fey, D. L., Shah, A. K., & Verplanck, P. L. (2014). Mineral Deposit Models for Resource Assessment (Chapter L). Em *Deposit model for heavy mineral sands in coastal environments* (pp. 3-4). Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.

Willmott, C. I. (1981). *On the validation of models*. University of Delaware – Center for Climatic Research , Newark, Delaware.

Yamamoto, J. K. (2001). Avaliação e classificação de reservas minerais. Em G. d. Tomi (Ed.), *Modelagem geológica informatizada em Datamine* (pp. 176 -177). São Paulo: EDUSP/FAPESP.

APÊNDICES

APÊNDICE A-Dados do Estudo

A1. Teores totais de minerais pesados do modelo de bloco

Os teores totais de minerais pesados do modelo de bloco foram calculados com base na equação (4) do balanço de massa para determinação de teor, considerando os minerais pesados em cada bloco, levando em conta a localização geoespacial específica e o período de tempo minerado.

Tabela A1: Determinação dos teores totais de minerais pesados do modelo de bloco

Data (dia/mês/ano)	Tempo inicial (hora) 24H/dia	Tempo final (hora) 24H/dia	Canal	Bloco	Teor (%)	Fluxo mássico (t/h)	Teor do modelo de bloco (%)
01/03/2025	6:00	12:00	3	523	0.0	0.0	0.000000
	12:00	6:00	5	521	0.0	0.0	
02/03/2025	6:00	6:00	5	521	6.1	25506.5	6.100000
03/03/2025	6:00	13:30	5	521	6.1	17333.2	6.233530
	13:30	6:00	6	522	6.3	34820.4	
04/03/2025	6:00	17:00	6	522	6.3	19350.6	6.249895
	17:00	6:00	6	523	6.2	19431.9	
05/03/2025	6:00	17:00	6	523	6.2	18928.6	6.059683
	17:00	20:00	5	522	5.6	7987.8	
	20:00	6:00	5	523	6.1	25196.7	
06/03/2025	6:00	6:00	5	523	6.1	31879.1	6.100000
07/0/2025	6:00	20:00	5	523	6.1	20538.8	5.632101

Data (dia/mês/ano)	Tempo inicial (hora) 24H/dia	Tempo final (hora) 24H/dia	Canal	Bloco	Teor (%)	Fluxo mássico (t/h)	Teor do modelo de bloco (%)
	20:00	6:00	4	523	5.0	15203.4	
08/03/2025	6:00	18:00	4	523	5.0	22965.1	5.652735
	18:00	6:00	6	523	6.2	27391.0	
09/03/2025	6:00	16:00	6	523	6.2	17535.6	6.175584
	16:00	6:00	5	524	6.1	5664.7	
10/03/2025	6:00	6:00	5	524	6.1	3550.3	6.100000
11/03/2025	6:00	6:00	5	524	6.1	20811.2	6.100000
12/03/2025	6:00	16:00	5	524	6.1	16847.0	5.681439
	16:00	6:00	4	524	5.5	38864.4	
13/03/2025	6:00	6:00	4	524	5.5	28927.8	5.500000
14/03/2025	6:00	8:20	4	524	5.5	0.0	4. 000000
	8:20	6:00	3	524	4.0	30875.6	
15/03/2025	6:00	6:00	3	524	4.0	53302.0	4. 000000
16/03/2025	6:00	9:40	3	524	4.0	5511.6	3.273554
	10:10	6:00	2	523	3.2	54434.4	
17/03/2025	6:00	6:00	2	524	3.2	61814.4	3.200000
18/03/2025	6:00	8:00	2	524	3.2	4789.5	3.047921
	8:00	13:00	4	524	3.7	14918.6	
	13:00	6:00	1	526	2.8	42176.6	
19/03/2025	6:00	17:00	1	524	2.8	20931.1	2.744511
	17:00	6:00	1	524	2.7	26093.2	
20/03/2025	6:00	10:30	1	525	2.7	7987.8	4.231351

Data (dia/mês/ano)	Tempo inicial (hora) 24H/dia	Tempo final (hora) 24H/dia	Canal	Bloco	Teor (%)	Fluxo mássico (t/h)	Teor do modelo de bloco (%)
	10:30	22:20	2	525	3.2	24896.1	
	22:20	6:00	5	526	5.8	24166.5	
21/03/2025	6:00	6:00	5	525	5.8	56706.7	5.800000
22/03/2025	6:00	10:00	5	525	5.8	7955.7	6.841336
	10:00	6:00	6	525	7.1	32028.2	
23/03/2025	6:00	6:00	6	525	7.1	57086.9	7.100000
24/03/2025	6:00	6:00	6	525	6.7	52860.8	6.700000
25/03/2025	6:00	15:00	6	524	6.7	22985.0	7.150163
	15:00	6:00	7	524	7.4	41415.1	
26/03/2025	6:00	6:00	7	525	7.4	53871.9	7.400000
27/03/2025	6:00	6:00	6	525	7.1	44461.7	7.100000
28/03/2025	6:00	16:30	6	525	6.5	20115.3	6.946134
	16:30	6:00	7	526	7.2	35349.9	
29/03/2025	6:00	6:00	7	526	7.2	30773.5	7.200000
30/03/2025	6:00	6:00	7	526	7.2	33468.9	7.200000
31/03/2025	6:00	6:00	7	526	7.2	37776.3	7.200000
01/04/2025	6:00	6:00	7	526	7.2	35349.6	7.200000
02/04/2025	6:00	11:00	7	526	7.2	12307.6	5.477564
	11:00	6:00	5	526	5.0	44390.0	
03/04/2025	6:00	6:00	5	526	5.0	63902.1	5.000000
04/04/2025	6:00	20:00	5	526	5.0	27786.3	4.297298
	20:00	6:00	4	526	3.4	21760.3	

Data (dia/mês/ano)	Tempo inicial (hora) 24H/dia	Tempo final (hora) 24H/dia	Canal	Bloco	Teor (%)	Fluxo mássico (t/h)	Teor do modelo de bloco (%)
05/04/2025	6:00	6:00	4	526	3.4	57552.2	3.400000
06/04/2025	6:00	12:00	4	526	3.4	17549.1	3.539067
	12:00	15:10	3	525	3.5	1064.8	
	15:10	6:00	3	526	3.6	40734.9	
07/04/2025	6:00	12:00	3	526	3.6	14106.7	4.679464
	12:00	6:00	3	527	5.1	36210.1	
08/04/2025	6:00	12:20	3	527	5.1	15809.7	4.516409
	12:20	6:00	2	527	4.3	42634.1	
09/04/2025	6:00	9:30	2	527	4.3	4586.5	5.516118
	9:30	6:00	4	527	5.8	19648.0	

A2. Teores totais de minerais pesados da Draga, da *RSF* e da *DCyF*

Tabela A2: Dados de teores totais de minerais pesados das amostras da planta de beneficiamento

Data (dia/mês/ano)	Teor da draga (%)	Teor da <i>RSF</i> (%)	<i>DCyF</i> (%)
01/03/2025	0.00	0.00	0.00
02/03/2025	10.19	7.08	0.00
03/03/2025	9.29	8.26	6.74
04/03/2025	7.76	6.74	7.46
05/03/2025	8.27	6.83	9.30
06/03/2025	7.70	6.91	7.28
07/03/2025	7.55	7.54	13.44
08/03/2025	8.53	7.83	7.59
09/03/2025	7.20	7.82	6.86
10/03/2025	7.09	7.82	0.00
11/03/2025	7.72	7.65	7.86
12/03/2025	7.08	6.41	6.19
13/03/2025	5.96	4.56	0.00
14/03/2025	5.71	5.07	6.53
15/03/2025	5.17	5.46	4.33
16/03/2025	3.38	4.05	19.84
17/03/2025	5.22	3.87	1.77
18/03/2025	3.86	3.85	2.67
19/03/2025	2.58	3.47	3.16
20/03/2025	6.64	3.67	4.74
21/03/2025	5.55	5.03	4.74

Data (dia/mês/ano)	Teor da draga (%)	Teor da RSF (%)	DCyF (%)
22/03/2025	5.24	6.80	6.72
23/03/2025	6.76	6.96	6.72
24/03/2025	4.97	6.14	0.00
25/03/2025	7.56	5.99	6.47
26/03/2025	8.63	5.72	6.47
27/03/2025	4.27	6.46	7.37
28/03/2025	15.89	7.68	7.37
29/03/2025	15.89	6.73	6.32
30/03/2025	7.62	6.96	6.32
31/03/2025	5.10	6.03	0.00
01/04/2025	4.50	4.44	5.14
02/04/2025	6.22	5.51	5.14
03/04/2025	5.99	6.49	5.24
04/04/2025	6.15	5.75	5.22
05/04/2025	5.96	5.26	7.90
06/04/2025	6.24	5.36	6.24
07/04/2025	4.87	5.06	3.79
08/04/2025	4.82	4.37	4.85
09/04/2025	6.30	6.90	6.96

A3. Dados de teores totais de minerais pesados e fluxo mássico

Tabela A3: Dados de teores totais de minerais pesados e fluxo mássico

Data (dia/mês/ano)	Fluxo mássico da draga (t/h)	Teor da draga (%)	Fluxo mássico da RSF (t/h)	Teor da RSF (%)	Fluxo mássico da HMC (t/h)	Teor da HMC (%)	Teor do modelo de bloco (%)
01/03/2025	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	0.000000
02/03/2025	25 506.50	10.19	22177.88	7.08	1398.2430	95.16	6.100000
03/03/2025	52153.54	9.29	46324.12	8.26	3144.5560	92.14	6.23353
04/03/2025	38782.52	7.76	34084.47	6.74	2449.6940	92.22	6.249895
05/03/2025	52 113.10	8.27	46 611.50	6.83	3 061.4000	95.65	6.059683
06/03/2025	31897.07	7.70	27 744.70	6.91	1 757.0000	90.13	6.100000
07/03/2025	35742.24	7.55	30896.84	7.54	2 144.6000	89.01	5.632101
08/03/2025	50356.08	8.53	44524.43	7.83	2831.4960	95.77	5.652735
09/03/2025	23200.25	7.20	20275.70	7.82	1 502.8000	91.84	6.175584
10/03/2025	3550.258	7.09	2920.091	7.82	216.2955	91.84	6.100000
11/03/2025	20811.15	7.72	17520.94	7.65	1175.1770	96.22	6.100000
12/03/2025	38864.39	7.08	33422.53	6.41	2522.1210	95.17	5.681439
13/03/2025	28927.76	5.96	24736.33	4.56	1667.0890	93.67	5.500000

Data (dia/mês/ano)	Fluxo mássico da draga (t/h)	Teor da draga (%)	Fluxo mássico da <i>RSF</i> (t/h)	Teor da <i>RSF</i> (%)	Fluxo mássico da <i>HMC</i> (t/h)	Teor da <i>HMC</i> (%)	Teor do modelo de bloco (%)
14/03/2025	30875.61	5.71	24901.95	5.07	1415.406	88.66	4.000000
15/03/2025	53301.98	5.17	43187.28	5.46	2552.094	93.34	4.000000
16/03/2025	59946.02	3.38	49471.31	4.05	1 830.600	89.31	3.273554
17/03/2025	61814.36	5.22	52653.60	3.87	2310.032	91.38	3.200000
18/03/2025	61884.66	3.86	50787.60	3.85	2117.464	90.15	3.047921
19/03/2025	47024.29	2.58	38850.05	3.47	1345.125	93.75	2.744511
20/03/2025	57 050.4	6.64	48261.35	3.67	2070.107	92.59	4.231351
21/03/2025	56706.73	5.55	50027.78	5.03	2757.654	93.23	5.800000
22/03/2025	39983.81	5.24	35166.59	6.80	2 700.800	94.38	6.841336
23/03/2025	57086.90	6.76	49399.45	6.96	3648.036	94.80	7.100000
24/03/2025	52860.80	4.97	46210.29	6.14	2 816.200	95.22	6.700000
25/03/2025	64400.11	7.56	54630.03	5.99	4103.193	93.62	7.150163
26/03/2025	53871.89	8.63	46030.16	5.72	3153.179	93.75	7.400000
27/03/2025	44461.68	4.27	38205.45	6.46	2777.515	92.89	7.100000
28/03/2025	55465.21	15.89	49915.89	7.68	3 796.50	91.51	6.946134
29/03/2025	30773.50	15.89	27839.25	6.73	1924.909	91.76	7.200000

Data (dia/mês/ano)	Fluxo mássico da draga (t/h)	Teor da draga (%)	Fluxo mássico da <i>RSF</i> (t/h)	Teor da <i>RSF</i> (%)	Fluxo mássico da <i>HMC</i> (t/h)	Teor da <i>HMC</i> (%)	Teor do modelo de bloco (%)
30/03/2025	33468.90	7.62	30116.20	6.96	1843.179	93.37	7.200000
31/03/2025	44577.65	5.10	37776.31	6.03	2450.274	93.66	7.200000
01/04/2025	35349.55	4.50	30 889.0	4.44	2126.128	92.78	7.2000000
02/04/2025	56697.57	6.22	49372.78	5.51	2954.737	90.93	5.477564
03/04/2025	63902.06	5.99	53915.01	6.49	3086.530	92.04	5.000000
04/04/2025	49546.58	6.15	42411.85	5.75	2 271.000	94.73	4.297298
05/04/2025	57 552.20	5.96	48293.68	5.26	2699.729	92.65	3.400000
06/04/2025	59348.75	6.24	49753.55	5.36	2726.817	91.95	3.539067
07/04/2025	50316.85	4.87	43305.34	5.06	2061.951	94.26	4.679464
08/04/2025	58443.80	4.82	50514.91	4.37	2016.531	92.25	4.516409
09/04/2025	24 234.40	6.30	20542.31	6.90	1065.072	95.36	5.516118

A4. Teores totais de minerais pesados nas amostras do vibrador

Tabela A4: Dados de teores totais de minerais pesados das amostras retidas do vibrador

Data (dia/mês/ano)	Teores totais de minerais pesados retidos no vibrador (%)
01/03/2025	0.0
02/03/2025	2.0
03/03/2025	1.3
04/03/2025	4.0
05/03/2025	9.5
06/03/2025	1.0
07/03/2025	1.5
08/03/2025	2.3
09/03/2025	3.1
10/03/2025	3.1
11/03/2025	5.1
12/03/2025	5.8
13/03/2025	5.8
14/03/2025	1.2
15/03/2025	2.1
16/03/2025	2.2
17/03/2025	3.0
18/03/2025	3.4
19/03/2025	2.4
20/03/2025	5.7

Data (dia/mês/ano)	Teores totais de minerais pesados retidos no vibrador (%)
21/03/2025	4.7
22/03/2025	7.8
23/03/2025	7.8
24/03/2025	7.8
25/03/2025	7.7
26/03/2025	7.4
27/03/2025	5.1
28/03/2025	4.2
29/03/2025	4.6
30/03/2025	6.7
31/03/2025	6.5
01/04/2025	5.6
02/04/2025	5.6
03/04/2025	5.6
04/04/2025	3.8
05/04/2025	6.0
06/04/2025	2.0
07/04/2025	2.8
08/04/2025	5.1
09/04/2025	5.9

APÊNDICE B -Resultados

B1. Indicadores estatísticos dos teores totais de minerais pesados da Draga e do Modelo de bloco

Tabela B1: Dados de determinação dos indicadores estatísticos dos teores totais de minerais pesados da Draga e do Modelo de bloco

Data (dia/mês/ano)	Teor de Modelo de bloco (%)	Teor da Draga (%)	$(U_k - \bar{U})$	$(Y_k - \bar{Y}_k)$	$(U_k - \bar{U})$ $\cdot (Y_k - \bar{Y}_k)$	$(U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - \bar{Y}_k)^2$	$ (U_k - \bar{U}) $	$ (Y_k - \bar{Y}_k) $	$(Y_k - \bar{Y} $ $+ U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - U_k)^2$
01/03/2025	0.00	0.00	-5.41	-6.64	35.89	29.25	44.03	5.41	6.64	145.06	0.00
02/03/2025	6.10	10.19	0.69	3.56	2.46	0.48	12.67	0.69	3.56	18.07	16.77
03/03/2025	6.23	9.29	0.82	2.65	2.19	0.68	7.02	0.82	2.65	12.08	9.32
04/03/2025	6.25	7.76	0.84	1.13	0.95	0.71	1.27	0.84	1.13	3.88	2.29
05/03/2025	6.06	8.27	0.65	1.63	1.06	0.42	2.66	0.65	1.63	5.20	4.86
06/03/2025	6.10	7.70	0.69	1.06	0.73	0.48	1.12	0.69	1.06	3.07	2.55
07/03/2025	5.63	7.55	0.22	0.91	0.20	0.05	0.83	0.22	0.91	1.29	3.66
08/03/2025	5.65	8.53	0.24	1.90	0.46	0.06	3.60	0.24	1.90	4.59	8.30
09/03/2025	6.18	7.20	0.77	0.56	0.43	0.59	0.31	0.77	0.56	1.76	1.04
10/03/2025	6.10	7.09	0.69	0.45	0.31	0.48	0.20	0.69	0.45	1.30	0.97
11/03/2025	6.10	7.72	0.69	1.08	0.75	0.48	1.17	0.69	1.08	3.14	2.61
12/03/2025	5.68	7.08	0.27	0.44	0.12	0.07	0.19	0.27	0.44	0.51	1.95

Data (dia/mês/ano)	Teor de Modelo de bloco (%)	Teor da Draga (%)	$(U_k - \bar{U})$	$(Y_k - \bar{Y}_k)$	$(U_k - \bar{U})$ $\cdot (Y_k - \bar{Y}_k)$	$(U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - \bar{Y}_k)^2$	$ (U_k - \bar{U}) $	$ (Y_k - \bar{Y}_k) $	$(Y_k - \bar{Y} $ $+ U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - U_k)^2$
13/03/2025	5.50	5.96	0.09	-0.67	-0.06	0.01	0.45	0.09	0.67	0.59	0.21
14/03/2025	4.00	5.71	-1.41	-0.93	1.30	1.98	0.86	1.41	0.93	5.45	2.92
15/03/2025	4.00	5.17	-1.41	-1.47	2.07	1.98	2.15	1.41	1.47	8.27	1.37
16/03/2025	3.27	3.38	-2.14	-3.26	6.96	4.56	10.62	2.14	3.26	29.09	0.01
17/03/2025	3.20	5.22	-2.21	-1.42	3.13	4.88	2.01	2.21	1.42	13.14	4.08
18/03/2025	3.05	3.86	-2.36	-2.78	6.55	5.57	7.70	2.36	2.78	26.38	0.66
19/03/2025	2.74	2.58	-2.66	-4.06	10.81	7.10	16.47	2.66	4.06	45.19	0.03
20/03/2025	4.23	6.64	-1.18	0.00	0.00	1.39	0.00	1.18	0.00	1.39	5.79
21/03/2025	5.80	5.55	0.39	-1.09	-0.43	0.15	1.18	0.39	1.09	2.18	0.06
22/03/2025	6.84	5.24	1.43	-1.39	-1.99	2.05	1.94	1.43	1.39	7.98	2.55
23/03/2025	7.10	6.76	1.69	0.13	0.22	2.86	0.02	1.69	0.13	3.31	0.11
24/03/2025	6.70	4.97	1.29	-1.66	-2.15	1.67	2.77	1.29	1.66	8.73	2.99
25/03/2025	7.15	7.56	1.74	0.93	1.61	3.03	0.86	1.74	0.93	7.12	0.17
26/03/2025	7.40	8.63	1.99	2.00	3.98	3.97	4.00	1.99	2.00	15.93	1.53
27/03/2025	7.10	4.27	1.69	-2.37	-4.00	2.86	5.60	1.69	2.37	16.47	8.01
28/03/2025	6.95	15.89	1.54	9.26	14.23	2.36	85.66	1.54	9.26	116.49	80.01

Data (dia/mês/ano)	Teor de Modelo de bloco (%)	Teor da Draga (%)	$(U_k - \bar{U})$	$(Y_k - \bar{Y}_k)$	$(U_k - \bar{U})$ $\cdot (Y_k - \bar{Y}_k)$	$(U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - \bar{Y}_k)^2$	$ (U_k - \bar{U}) $	$ (Y_k - \bar{Y}_k) $	$(Y_k - \bar{Y} $ $+ U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - U_k)^2$
29/03/2025	7.20	15.89	1.79	9.26	16.58	3.21	85.66	1.79	9.26	122.03	75.53
30/03/2025	7.20	7.62	1.79	0.98	1.76	3.21	0.97	1.79	0.98	7.70	0.18
31/03/2025	7.20	5.10	1.79	-1.54	-2.76	3.21	2.37	1.79	1.54	11.09	4.42
01/04/2025	7.20	4.50	1.79	-2.13	-3.82	3.21	4.55	1.79	2.13	15.39	7.27
02/04/2025	5.48	6.22	0.07	-0.42	-0.03	0.00	0.17	0.07	0.42	0.23	0.55
03/04/2025	5.00	5.99	-0.41	-0.65	0.26	0.17	0.42	0.41	0.65	1.11	0.98
04/04/2025	4.30	6.15	-1.11	-0.48	0.54	1.24	0.23	1.11	0.48	2.54	3.44
05/04/2025	3.40	5.96	-2.01	-0.68	1.36	4.03	0.46	2.01	0.68	7.22	6.54
06/04/2025	3.54	6.24	-1.87	-0.40	0.74	3.50	0.16	1.87	0.40	5.13	7.29
07/04/2025	4.68	4.87	-0.73	-1.76	1.29	0.53	3.11	0.73	1.76	6.22	0.04
08/04/2025	4.52	4.82	-0.89	-1.81	1.62	0.80	3.28	0.89	1.81	7.31	0.09
09/04/2025	5.52	6.30	0.11	-0.33	-0.04	0.01	0.11	0.11	0.33	0.19	0.62
Média	5.41	6.64		Soma	105.30	103.29	318.86		Soma	693.83	271.77

B2. Indicadores estatísticos dos teores totais de minerais pesados da DCyF e do Modelo de bloco

Tabela B2: Dados de determinação dos indicadores estatísticos dos teores totais de minerais pesados da DCyF e do Modelo de bloco

Data (dia/mês/ano)	Teor de Modelo de bloco (%)	Teor de DCyF (%)	$(U_k - \bar{U})$	$(Y_k - \bar{Y})$	$(U_k - \bar{U})^*$ $(Y_k - \bar{Y})$	$(U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - \bar{Y})^2$	$ (U_k - \bar{U}) $	$ (Y_k - \bar{Y}_k) $	$(Y_k - \bar{Y} + U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - U_k)^2$
01/03/2025	0.00	0.00	-5.41	-5.62	30.39	29.25	31.56	5.41	5.62	121.59	0.00
02/03/2025	6.10	0.00	0.69	-5.62	-3.88	0.48	31.56	0.69	5.62	39.81	37.21
03/03/2025	6.23	6.74	0.82	1.12	0.92	0.68	1.25	0.82	1.12	3.78	0.25
04/03/2025	6.25	7.46	0.84	1.84	1.55	0.71	3.40	0.84	1.84	7.21	1.47
05/03/2025	6.06	9.30	0.65	3.68	2.40	0.42	13.55	0.65	3.68	18.77	10.49
06/03/2025	6.10	7.28	0.69	1.67	1.15	0.48	2.78	0.69	1.67	5.56	1.40
07/03/2025	5.63	13.44	0.22	7.82	1.75	0.05	61.18	0.22	7.82	64.72	60.96
08/03/2025	5.65	7.59	0.24	1.98	0.48	0.06	3.91	0.24	1.98	4.93	3.77
09/03/2025	6.18	6.86	0.77	1.24	0.95	0.59	1.54	0.77	1.24	4.03	0.47
10/03/2025	6.10	0.00	0.69	-5.62	-3.88	0.48	31.56	0.69	5.62	39.81	37.21
11/03/2025	6.10	7.86	0.69	2.25	1.55	0.48	5.05	0.69	2.25	8.63	3.11
12/03/2025	5.68	6.19	0.27	0.57	0.16	0.07	0.33	0.27	0.57	0.71	0.26
13/03/2025	5.50	0.00	0.09	-5.62	-0.51	0.01	31.56	0.09	5.62	32.60	30.25

Data (dia/mês/ano)	Teor de Modelo de bloco (%)	Teor de DCyF (%)	$(U_k - \bar{U})$	$(Y_k - \bar{Y})$	$(U_k - \bar{U})^*$ $(Y_k - \bar{Y})$	$(U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - \bar{Y})^2$	$ (U_k - \bar{U}) $	$ (Y_k - \bar{Y}) $	$(Y_k - \bar{Y} + U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - U_k)^2$
14/03/2025	4.00	6.53	-1.41	0.91	-1.28	1.98	0.83	1.41	0.91	5.39	6.40
15/03/2025	4.00	4.33	-1.41	-1.29	1.82	1.98	1.67	1.41	1.29	7.29	0.11
16/03/2025	3.27	19.84	-2.14	14.22	-30.36	4.56	202.14	2.14	14.22	267.41	274.30
17/03/2025	3.20	1.77	-2.21	-3.85	8.51	4.88	14.85	2.21	3.85	36.74	2.06
18/03/2025	3.05	2.67	-2.36	-2.95	6.97	5.57	8.72	2.36	2.95	28.23	0.15
19/03/2025	2.74	3.16	-2.66	-2.46	6.55	7.10	6.05	2.66	2.46	26.25	0.17
20/03/2025	4.23	4.74	-1.18	-0.87	1.03	1.39	0.76	1.18	0.87	4.21	0.26
21/03/2025	5.80	4.74	0.39	-0.87	-0.34	0.15	0.76	0.39	0.87	1.60	1.11
22/03/2025	6.84	6.72	1.43	1.10	1.57	2.05	1.21	1.43	1.10	6.41	0.02
23/03/2025	7.10	6.72	1.69	1.10	1.86	2.86	1.21	1.69	1.10	7.78	0.15
24/03/2025	6.70	0.00	1.29	-5.62	-7.25	1.67	31.56	1.29	5.62	47.74	44.89
25/03/2025	7.15	6.47	1.74	0.86	1.49	3.03	0.73	1.74	0.86	6.75	0.46
26/03/2025	7.40	6.47	1.99	0.86	1.71	3.97	0.73	1.99	0.86	8.11	0.86
27/03/2025	7.10	7.37	1.69	1.75	2.96	2.86	3.07	1.69	1.75	11.86	0.07
28/03/2025	6.95	7.37	1.54	1.75	2.69	2.36	3.07	1.54	1.75	10.82	0.18
29/03/2025	7.20	6.32	1.79	0.70	1.25	3.21	0.49	1.79	0.70	6.20	0.78

Data (dia/mês/ano)	Teor de Modelo de bloco (%)	Teor de DCyF (%)	$(U_k - \bar{U})$	$(Y_k - \bar{Y})$	$(U_k - \bar{U})^*$ $(Y_k - \bar{Y})$	$(U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - \bar{Y})^2$	$ (U_k - \bar{U}) $	$ (Y_k - \bar{Y}) $	$(Y_k - \bar{Y} + U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - U_k)^2$
30/03/2025	7.20	6.32	1.79	0.70	1.25	3.21	0.49	1.79	0.70	6.20	0.78
31/03/2025	7.20	0.00	1.79	-5.62	-10.06	3.21	31.56	1.79	5.62	54.90	51.84
01/04/2025	7.20	5.14	1.79	-0.48	-0.86	3.21	0.23	1.79	0.48	5.17	4.26
02/04/2025	5.48	5.14	0.07	-0.48	-0.03	0.00	0.23	0.07	0.48	0.30	0.12
03/04/2025	5.00	5.24	-0.41	-0.38	0.16	0.17	0.14	0.41	0.38	0.62	0.06
04/04/2025	4.30	5.22	-1.11	-0.40	0.44	1.24	0.16	1.11	0.40	2.28	0.85
05/04/2025	3.40	7.90	-2.01	2.28	-4.59	4.03	5.22	2.01	2.28	18.43	20.27
06/04/2025	3.54	6.24	-1.87	0.62	-1.16	3.50	0.38	1.87	0.62	6.19	7.28
07/04/2025	4.68	3.79	-0.73	-1.83	1.33	0.53	3.35	0.73	1.83	6.55	0.79
08/04/2025	4.52	4.85	-0.89	-0.77	0.69	0.80	0.60	0.89	0.77	2.77	0.11
09/04/2025	5.52	6.96	0.11	1.35	0.14	0.01	1.81	0.11	1.35	2.11	2.10
Média	5.41	5.62		Soma	19.51	103.29	541.25		Soma	940.45	607.28

B3. Indicadores estatísticos dos teores totais de minerais pesados da *RSF* e do Modelo de bloco

Tabela B3: Dados de determinação dos indicadores estatísticos dos teores totais de minerais pesados da *RSF* e do Modelo de bloco

Data (dia/mês/ano)	Teor de Modelo de bloco (%)	Teor de <i>RSF</i> (%)	$(U_k - \bar{U})$	$(Y_k - \bar{Y})$	$(U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - \bar{Y})^2$	$(U_k - \bar{U})^* (Y_k - \bar{Y})$	$ (U_k - \bar{U}) $	$ (Y_k - \bar{Y}) $	$(Y_k - \bar{Y} + U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - U_k)^2$
01/03/2025	0.00	0.00	-5.41	-5.86	29.25	34.38	31.71	5.41	5.86	127.06	0.00
02/03/2025	6.10	7.08	0.69	1.22	0.48	1.49	0.84	0.69	1.22	3.66	0.97
03/03/2025	6.23	8.26	0.82	2.40	0.68	5.74	1.98	0.82	2.40	10.37	4.10
04/03/2025	6.25	6.74	0.84	0.87	0.71	0.76	0.73	0.84	0.87	2.94	0.24
05/03/2025	6.06	6.83	0.65	0.96	0.42	0.93	0.63	0.65	0.96	2.61	0.59
06/03/2025	6.10	6.91	0.69	1.05	0.48	1.10	0.72	0.69	1.05	3.02	0.66
07/03/2025	5.63	7.54	0.22	1.67	0.05	2.80	0.37	0.22	1.67	3.60	3.63
08/03/2025	5.65	7.83	0.24	1.97	0.06	3.89	0.48	0.24	1.97	4.91	4.76
09/03/2025	6.18	7.82	0.77	1.96	0.59	3.82	1.50	0.77	1.96	7.41	2.70
10/03/2025	6.10	7.82	0.69	1.96	0.48	3.82	1.35	0.69	1.96	7.01	2.95
11/03/2025	6.10	7.65	0.69	1.78	0.48	3.18	1.23	0.69	1.78	6.13	2.39
12/03/2025	5.68	6.41	0.27	0.55	0.07	0.30	0.15	0.27	0.55	0.67	0.53
13/03/2025	5.50	4.56	0.09	-1.30	0.01	1.70	-0.12	0.09	1.30	1.94	0.88
14/03/2025	4.00	5.07	-1.41	-0.79	1.98	0.63	1.11	1.41	0.79	4.84	1.15

Data (dia/mês/ano)	Teor de Modelo de bloco (%)	Teor de RSF (%)	$(U_k - \bar{U})$	$(Y_k - \bar{Y})$	$(U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - \bar{Y})^2$	$(U_k - \bar{U})^*$ $(Y_k - \bar{Y})$	$ (U_k - \bar{U}) $	$ (Y_k - \bar{Y}) $	$(Y_k - \bar{Y} + U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - U_k)^2$
15/03/2025	4.00	5.46	-1.41	-0.40	1.98	0.16	0.57	1.41	0.40	3.28	2.13
16/03/2025	3.27	4.05	-2.14	-1.82	4.56	3.30	3.88	2.14	1.82	15.62	0.60
17/03/2025	3.20	3.87	-2.21	-1.99	4.88	3.96	4.40	2.21	1.99	17.63	0.45
18/03/2025	3.05	3.85	-2.36	-2.01	5.57	4.06	4.75	2.36	2.01	19.14	0.64
19/03/2025	2.74	3.47	-2.66	-2.39	7.10	5.73	6.38	2.66	2.39	25.58	0.53
20/03/2025	4.23	3.67	-1.18	-2.19	1.39	4.81	2.58	1.18	2.19	11.37	0.32
21/03/2025	5.80	5.03	0.39	-0.83	0.15	0.69	-0.32	0.39	0.83	1.49	0.59
22/03/2025	6.84	6.80	1.43	0.94	2.05	0.88	1.34	1.43	0.94	5.62	0.00
23/03/2025	7.10	6.96	1.69	1.09	2.86	1.20	1.85	1.69	1.09	7.76	0.02
24/03/2025	6.70	6.14	1.29	0.28	1.67	0.08	0.36	1.29	0.28	2.47	0.31
25/03/2025	7.15	5.99	1.74	0.13	3.03	0.02	0.23	1.74	0.13	3.50	1.34
26/03/2025	7.40	5.72	1.99	-0.14	3.97	0.02	-0.29	1.99	0.14	4.56	2.83
27/03/2025	7.10	6.46	1.69	0.59	2.86	0.35	1.00	1.69	0.59	5.21	0.42
28/03/2025	6.95	7.68	1.54	1.81	2.36	3.29	2.79	1.54	1.81	11.23	0.53
29/03/2025	7.20	6.73	1.79	0.87	3.21	0.76	1.56	1.79	0.87	7.09	0.22
30/03/2025	7.20	6.96	1.79	1.09	3.21	1.19	1.96	1.79	1.09	8.32	0.06

Data (dia/mês/ano)	Teor de Modelo de bloco (%)	Teor de RSF (%)	$(U_k - \bar{U})$	$(Y_k - \bar{Y})$	$(U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - \bar{Y})^2$	$(U_k - \bar{U})^* (Y_k - \bar{Y})$	$ (U_k - \bar{U}) $	$ (Y_k - \bar{Y}) $	$(Y_k - \bar{Y} + U_k - \bar{U})^2$	$(Y_k - U_k)^2$
31/03/2025	7.20	6.03	1.79	0.17	3.21	0.03	0.31	1.79	0.17	3.85	1.36
01/04/2025	7.20	4.44	1.79	-1.42	3.21	2.02	-2.55	1.79	1.42	10.33	7.62
02/04/2025	5.48	5.51	0.07	-0.36	0.00	0.13	-0.02	0.07	0.36	0.18	0.00
03/04/2025	5.00	6.49	-0.41	0.63	0.17	0.40	-0.26	0.41	0.63	1.08	2.23
04/04/2025	4.30	5.75	-1.11	-0.12	1.24	0.01	0.13	1.11	0.12	1.51	2.10
05/04/2025	3.40	5.26	-2.01	-0.60	4.03	0.36	1.21	2.01	0.60	6.82	3.46
06/04/2025	3.54	5.36	-1.87	-0.50	3.50	0.25	0.93	1.87	0.50	5.61	3.33
07/04/2025	4.68	5.06	-0.73	-0.81	0.53	0.65	0.59	0.73	0.81	2.35	0.14
08/04/2025	4.52	4.37	-0.89	-1.50	0.80	2.24	1.34	0.89	1.50	5.71	0.02
09/04/2025	5.52	6.90	0.11	1.04	0.01	1.08	0.11	0.11	1.04	1.32	1.93
Média	5.55	5.86		Soma	103.29	102.21	77.52		Soma	374.78	58.72

B4. Dados da recuperação da planta e das espirais

Tabela B4: Valores de recuperação da planta e das espirais ao longo do período avaliado

Data (dia/mês/ano)	R_p (%) Modelo de bloco	R_p (%) Draga	R_s (%)
01/03/2025	0	0	0
02/03/2025	86	51	85
03/03/2025	89	60	76
04/03/2025	93	75	98
05/03/2025	93	68	92
06/03/2025	81	65	83
07/03/2025	95	71	82
08/03/2025	95	63	78
09/03/2025	96	83	87
10/03/2025	92	79	87
11/03/2025	89	70	84
12/03/2025	109	87	112
13/03/2025	98	91	138
14/03/2025	102	71	99
15/03/2025	112	86	101
16/03/2025	83	81	82
17/03/2025	107	65	104
18/03/2025	101	80	98
19/03/2025	98	104	94
20/03/2025	79	51	108
21/03/2025	78	82	102

Data (dia/mês/ano)	R_p (%) Modelo de bloco	R_p (%) Draga	R_s (%)
22/03/2025	93	122	107
23/03/2025	85	90	101
24/03/2025	76	102	94
25/03/2025	83	79	117
26/03/2025	74	64	112
27/03/2025	82	136	105
28/03/2025	90	39	91
29/03/2025	80	36	94
30/03/2025	71	67	82
31/03/2025	72	101	101
01/04/2025	78	124	144
02/04/2025	87	76	99
03/04/2025	89	74	81
04/04/2025	101	71	88
05/04/2025	128	73	98
06/04/2025	119	68	94
07/04/2025	83	79	89
08/04/2025	70	66	84
09/04/2025	76	66	72
Média	88	75	94

ANEXOS

Anexo 1- Dados do Estudo do problema

Tabela A1-1-Valores mensais dos teores totais de minerais pesados para RSF, Draga e Modelo de Bloco

Tempo(mês/ano)	Teor da RSF(%)	Teor da Draga(%)	Teor do modelo de bloco(%)
Janeiro /2022	6.406	6.274175	5.027844
Fevereiro /2022	6.923	7.923441	7.831559
Março/2022	6.653	7.044758	8.773015
Abril/2022	4.166	4.093099	6.066477
Maio/2022	5.196	4.650925	5.032623
Junho/2022	7.328	6.540197	6.400000
Julho/2022	7.917	7.347321	6.800000
Agosto/2022	7.904	6.861508	7.936109
Setembro/2022	7.026	6.67982	6.678398
Outubro/2022	6.582	6.708501	6.584349
Novembro/2022	6.626	6.890688	6.460477
Dezembro/2022	6.690	6.696325	6.892624
Janeiro/2023	5.877	5.168355	6.148399
Fevereiro/2023	5.813	5.496620	6.320280
Março/2023	5.890	4.971795	6.903210
Abril/2023	6.704	6.271238	6.225037
Maio/2023	5.920	5.099644	6.213603
Junho/2023	4.094	3.687487	5.288812
Julho/2023	4.645	4.138015	4.215279
Agosto/2023	4.268	4.196525	4.577273
Setembro/2023	5.463	5.096401	4.916269
Outubro/2023	7.181	7.148507	6.569034
Novembro/2023	5.910	5.855972	5.294501
Dezembro/2023	4.895	4.788251	4.206867
Janeiro/2024	5.569	4.987746	4.559335
fevereiro/2024	3.340	3.067614	2.804541
Março/2024	4.887	4.992094	3.708071

Tempo(mês/ano)	Teor da RSF(%)	Teor da Draga(%)	Teor do modelo de bloco(%)
Abril/2024	4.219	4.063011	3.995911
Maio/2024	3.652	3.485251	3.533639
Junho/2024	4.128	3.863454	3.284060
Agosto/2024	4.055	3.855390	3.966979
Setembro/2024	4.712	4.741061	4.198549
Outubro/2024	5.735	5.716209	5.197588
Novembro/2024	5.786	6.143376	5.192895
Dezembro/2024	6.773	6.187501	5.471480
Janeiro/2025	5.760	5.826027	5.338333
Fevereiro/2025	4.419	4.357015	4.279440

Fonte: Xavier (2025).

Anexo 2- Mapa de localização da área em estudo

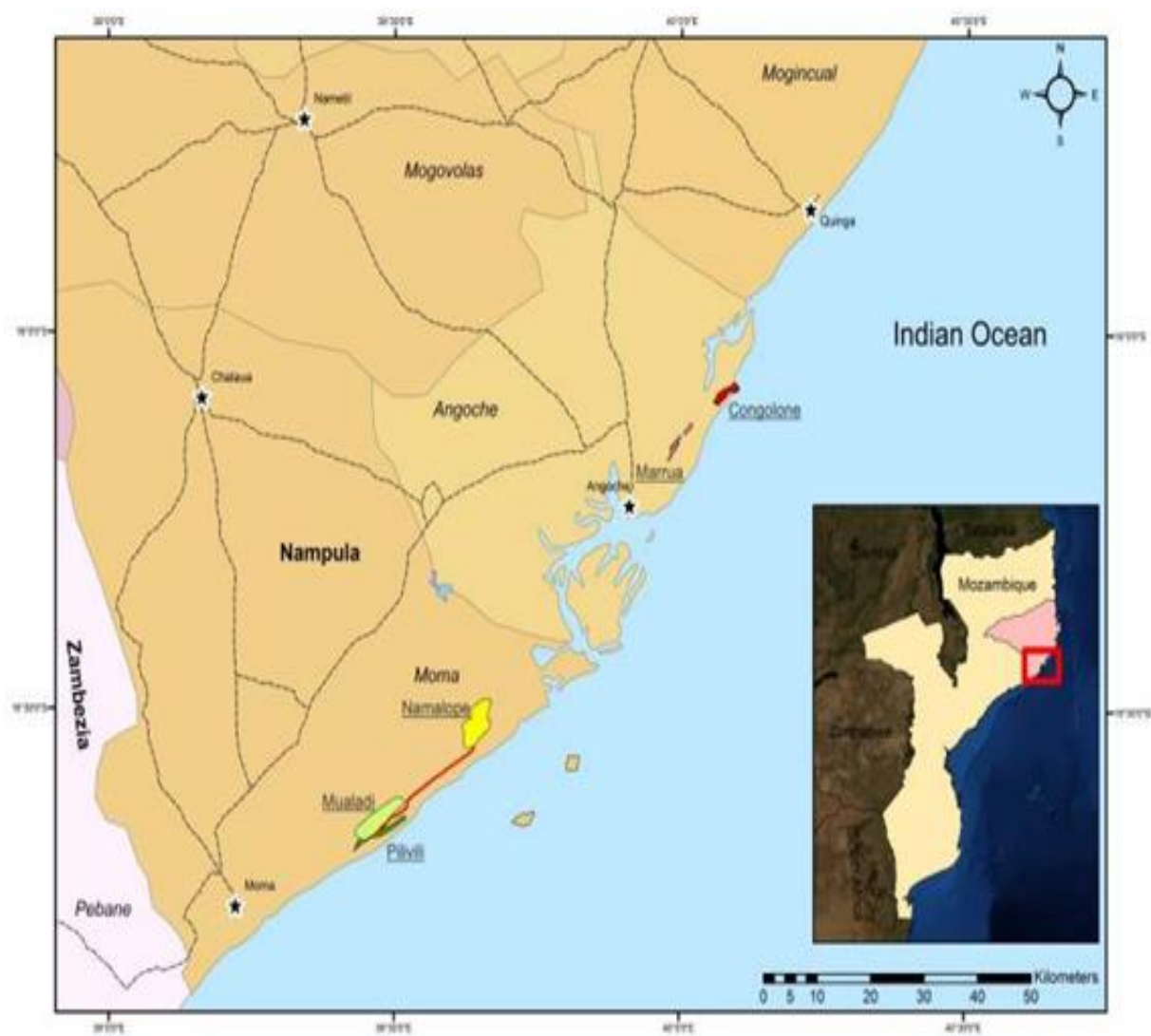


Figura A2.1: Mapa de localização do Projecto de areias pesadas de Moma da KENMARE, em relação ao território de Moçambique

Fonte: Coastal & Environmental Services Mozambique Limitada (2012).