

Framework multicritério para priorização de investimentos na exploração de jazigos primários de diamantes: integração geocientífica, económica e de risco.

Multicriteria framework for investment prioritization in primary diamond deposits exploration: geoscientific, economic, and risk integration.

Marco multicriterio para la priorización de inversiones en la exploración de yacimientos primarios de diamantes: integración geocientífica, económica y de riesgo.

Benedito Paulo Manuel¹

RESUMO

A exploração de jazigos primários de diamantes caracteriza-se por elevada complexidade geológica, incerteza económica e riscos significativos associados ao investimento, o que exige abordagens analíticas mais robustas para apoio à decisão estratégica. Diante desta problemática, o presente estudo tem como objetivo geral propor um framework multicritério para a priorização de investimentos na exploração de depósitos diamantíferos primários, integrando dimensões geocientíficas, económicas e de risco. Metodologicamente, o estudo adota uma abordagem qualitativa baseada em revisão bibliográfica sistemática e integrativa da literatura científica. A pesquisa foi conduzida em bases de dados internacionais como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink e Google Scholar, complementada por relatórios técnicos do setor mineiro. A análise incluiu a síntese crítica de modelos de decisão multicritério, bem como a integração conceptual de abordagens geológicas, económicas e

¹ Doutor em Ciências Económicas
Instituição: Instituto Politécnico de Saurimo, Universidade
Lueji Ankonde
E-mail: beneditomanuel@yahoo.com
Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-6709-4981>

probabilísticas de risco, permitindo a identificação de lacunas metodológicas e o desenvolvimento de um framework teórico estruturado. Os resultados evidenciam que a integração de métodos MCDM com análise de risco melhora substancialmente a capacidade de priorização de projetos mineiros, ao reduzir a subjetividade e incorporar explicitamente a incerteza geológica e económica. Conclui-se que o framework proposto constitui uma ferramenta analítica robusta e aplicável a contextos de elevada incerteza, particularmente em regiões diamantíferas emergentes como a África Austral, contribuindo para decisões de investimento mais eficientes e informadas.

Palavras-chave: mineração de diamantes; decisão multicritério; gestão de risco; avaliação de investimentos; exploração geológica.

ABSTRACT

The exploration of primary diamond deposits is characterized by high geological complexity, economic uncertainty, and significant investment-related risks, requiring more robust analytical approaches to support strategic decision-making. In this context, this study aims to propose a multicriteria framework for prioritizing investments in primary diamond deposit exploration, integrating geoscientific, economic, and risk dimensions. Methodologically, the study adopts a qualitative approach based on a systematic and integrative literature review of scientific sources. The research was conducted using international databases such as Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, and Google Scholar, complemented by technical reports from the mining sector. The analysis included a critical synthesis of multicriteria decision-making (MCDM) models, as well as the conceptual integration of geological, economic, and probabilistic risk approaches, enabling the identification of methodological gaps and the development of a structured theoretical framework. The results show that integrating MCDM methods with risk analysis significantly enhances mining investment prioritization by reducing subjectivity and explicitly incorporating geological and economic uncertainty. It is concluded that the proposed framework constitutes a robust analytical tool applicable to high-uncertainty contexts, particularly in emerging diamond regions such as Southern Africa, supporting more efficient and informed investment decisions.

Keywords: diamond mining; multicriteria decision-making; risk management; investment evaluation; geological exploration.

RESUMEN

La exploración de yacimientos primarios de diamantes se caracteriza por una elevada complejidad geológica, incertidumbre económica y riesgos significativos asociados a la inversión, lo que exige enfoques analíticos más robustos para el apoyo a la toma de decisiones estratégicas. Ante esta problemática, el presente estudio tiene como objetivo general proponer un marco multicriterio para la priorización de inversiones en la exploración de depósitos primarios de diamantes, integrando dimensiones geocientíficas, económicas y de riesgo. Metodológicamente, el estudio adopta un enfoque cualitativo basado en una revisión bibliográfica sistemática e integrativa de la literatura científica. La investigación se realizó en bases de datos internacionales como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink y Google Scholar, complementada con informes técnicos del sector minero. El análisis incluyó la síntesis crítica de modelos de toma de decisiones multicriterio (MCDM), así como la integración conceptual de enfoques geológicos, económicos y probabilísticos de riesgo, permitiendo identificar brechas metodológicas y desarrollar un marco teórico estructurado. Los resultados evidencian que la integración de métodos MCDM con análisis de riesgo mejora sustancialmente la priorización de proyectos mineros, al reducir la subjetividad e incorporar explícitamente la incertidumbre geológica y económica. Se concluye que el marco propuesto constituye una herramienta analítica robusta aplicable a contextos de alta incertidumbre, particularmente en regiones diamantíferas emergentes como África Austral, contribuyendo a decisiones de inversión más eficientes e informadas.

Palabras clave: minería de diamantes; toma de decisiones multicriterio; gestión de riesgos; evaluación de inversiones; exploración geológica.

1. INTRODUÇÃO.

A exploração de jazigos primários de diamantes constitui uma das atividades mais complexas e intensivas em capital dentro da indústria mineira global. Estes depósitos, predominantemente associados a rochas do tipo kimberlito e lamproíto, apresentam uma combinação singular de elevada incerteza geológica, forte variabilidade espacial dos teores e significativa volatilidade econômica, o que impõe desafios substanciais à tomada de decisão em investimentos (Field, Stiefenhofer, Robey, & Kurszlaukis (2008); Mitchell, Giuliani & O'Brien (2019)).

Do ponto de vista geocientífico, os diamantes naturais formam-se em condições extremas no manto terrestre e são transportados à superfície por eventos magmáticos raros e altamente energéticos, associados a erupções kimberlíticas (Sparks et al., 2021; Tappe et al., 2018). Contudo, evidências empíricas indicam que apenas uma fração dos corpos kimberlíticos contém diamantes em quantidades economicamente viáveis, tornando o processo exploratório altamente arriscado (Field et al., 2008).

A nível global, regiões cratónicas como a África Austral, o Canadá e a Sibéria continuam a concentrar os principais investimentos em exploração diamantífera, sendo reconhecidas pelo seu potencial geológico significativo. No contexto africano, países como Angola, Botswana e África do Sul destacam-se não apenas pela abundância de ocorrências kimberlíticas, mas também pela crescente necessidade de metodologias mais sofisticadas para avaliação e priorização de projetos, especialmente em cenários de restrição de capital e aumento da exigência por eficiência na alocação de recursos.

Paralelamente, a dimensão económica da exploração diamantífera é fortemente condicionada por fatores como o teor (grade), o valor médio por quilate, os custos operacionais e as condições de mercado. Estudos recentes evidenciam que projetos de grande escala podem ser economicamente viáveis mesmo com baixos teores, desde que sustentados por diamantes de alto valor unitário, reforçando a necessidade de integração entre variáveis geológicas e económicas na análise de viabilidade (Paul, 2018).

Apesar dos avanços nas técnicas de avaliação de recursos minerais incluindo geoestatística avançada, modelação tridimensional e amostragem em massa persiste uma lacuna significativa na integração sistemática de múltiplas dimensões (geológica, económica e de risco) em frameworks robustos de apoio à decisão. Tradicionalmente, as decisões de investimento têm sido baseadas em análises sequenciais e, frequentemente, em julgamentos heurísticos, o que pode introduzir subjetividade e comprometer a eficiência na priorização de projetos (Saaty, 1980; Triantaphyllou, 2000; Goodfellow & Dimitrakopoulos, 2016).

Nos últimos anos, observa-se uma crescente aplicação de métodos de decisão multicritério (MCDM), como o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), o *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) e o *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE), em contextos mineiros e energéticos. Estes métodos permitem estruturar problemas complexos, integrar critérios heterogéneos e incorporar preferências dos decisores, oferecendo uma

base mais rigorosa para a avaliação comparativa de alternativas de investimento (Behzadian et al., 2012; Govindan & Jepsen, 2016).

Adicionalmente, a incorporação explícita da incerteza e do risco através de técnicas como simulação de Monte Carlo, árvores de decisão e análise de opções reais tem sido apontada como essencial para melhorar a robustez das decisões em ambientes caracterizados por elevada irreversibilidade dos investimentos e assimetria de informação, como é o caso da exploração diamantífera (Dimitrakopoulos, 2018; Tubis et al., 2020).

Neste contexto, identifica-se como problema central a ausência de um framework integrado, quantitativo e operacional que permita a priorização sistemática de investimentos em projetos de exploração de jazigos primários de diamantes, considerando simultaneamente o potencial geológico, o desempenho económico e o nível de risco associado.

Diante desta lacuna, o presente estudo tem como objetivo geral desenhar a proposta um framework multicritério para a priorização de investimentos na exploração de jazigos primários de diamantes, integrando dimensões geocientíficas, económicas e de risco, com base em abordagens quantitativas e suporte na literatura científica recente.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Analisar criticamente os principais modelos e métodos de decisão multicritério aplicados ao sector mineiro;
- Identificar e sistematizar os critérios geológicos, económicos e de risco relevantes para a avaliação de projetos diamantíferos;
- Propor um modelo integrado de priorização que combine métodos MCDM com análise de risco;
- Discutir a aplicabilidade do framework no contexto de regiões diamantíferas emergentes, com enfoque na África Austral.

Deste modo, o estudo pretende contribuir para o avanço metodológico na gestão de investimentos mineiros, oferecendo uma ferramenta estruturada que reduza a subjetividade e aumente a eficiência na tomada de decisão estratégica em exploração diamantífera.

2. METODOLOGIA.

A presente investigação adota uma abordagem de natureza qualitativa, baseada numa análise bibliográfica sistemática e integrativa, com o objetivo de identificar, avaliar e sintetizar os principais modelos e métodos utilizados na priorização de investimentos no sector mineiro, com ênfase na exploração de jazigos primários de diamantes. A metodologia foi estruturada de forma a garantir rigor científico, transparência e reprodutibilidade, alinhando-se com boas práticas de revisão de literatura em ciências aplicadas.

O estudo enquadra-se como uma revisão teórica orientada à modelação, combinando:

- Revisão sistemática da literatura relevante;
- Análise crítica de métodos de decisão multicritério (MCDM);
- Integração conceptual de abordagens geocientíficas, económicas e de risco.

Esta abordagem permite não apenas descrever o estado da arte, mas também identificar lacunas metodológicas e propor um framework inovador adaptado às especificidades da exploração diamantífera.

A revisão bibliográfica foi conduzida com base em princípios de sistematicidade, inspirados em protocolos como o PRISMA, amplamente utilizados em revisões científicas.

Foram consultadas as principais bases de dados científicas internacionais como:

- Scopus.
- Web of Science.
- ScienceDirect.
- SpringerLink.
- Google Scholar (como fonte complementar).

Adicionalmente, foram considerados relatórios técnicos de referência no sector mineiro, incluindo publicações institucionais e relatórios de indústria.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.

3.1. Fundamentos Geocientíficos da Exploração de Jazigos Primários de Diamantes.

A compreensão dos fundamentos geocientíficos associados à formação e ocorrência de diamantes é essencial para a avaliação do potencial geológico de jazigos primários. A exploração diamantífera depende diretamente da interpretação integrada de processos mantélicos, características dos corpos kimberlíticos e indicadores mineralógicos que refletem condições favoráveis à preservação e transporte de diamantes.

3.1.1. Gênese e transporte de diamantes em contextos mantélicos.

Os diamantes naturais formam-se em condições extremas de pressão e temperatura no manto terrestre, tipicamente a profundidades superiores a 150 km, no interior de raízes cratônicas estáveis, onde a litosfera continental espessa proporciona condições adequadas à sua formação e preservação (Tappe et al., 2018).

O transporte dos diamantes até à superfície ocorre através de magmas kimberlíticos, caracterizados por origem profunda e elevada concentração de voláteis, como CO₂ e H₂O, que promovem uma ascensão rápida e explosiva. Este processo é fundamental para a preservação dos diamantes, uma vez que minimiza a sua reabsorção durante a subida (Sparks et al., 2006).

Além disso, a ocorrência de kimberlitos está associada a contextos geodinâmicos específicos, incluindo eventos de rifteamento continental e atividade mantélica profunda, o que evidencia a forte dependência entre processos tectônicos e a formação de depósitos diamantíferos (Tappe et al., 2018).

3.1.2. Kimberlitos como vetores de mineralização.

Os kimberlitos constituem a principal rocha hospedeira de diamantes a nível mundial, sendo responsáveis pela maioria das reservas conhecidas, enquanto os lamproítos representam uma contribuição secundária, porém economicamente relevante em alguns contextos específicos (Field et al., 2008).

Segundo Jelsma et al. (2020), estas rochas ígneas ultramáficas apresentam elevada complexidade mineralógica e geoquímica, contendo frequentemente xenólitos do manto e minerais transportados que fornecem informação sobre a sua origem

profunda. A sua distribuição espacial está fortemente associada a crátons arqueanos e proterozoicos, cuja estabilidade ao longo do tempo geológico favorece a preservação de diamantes.

Do ponto de vista exploratório, é fundamental distinguir entre diferentes tipos de kimberlitos, uma vez que estes apresentam variações significativas em termos de composição, profundidade de origem, estilo eruptivo e potencial diamantífero. Esta heterogeneidade reflete diferenças nos processos de ascensão magmática e nas condições mantélicas de geração, implicando que a simples presença de um corpo kimberlítico não garante viabilidade económica. Assim, a avaliação detalhada das características geológicas, geoquímicas e texturais torna-se essencial para a redução da incerteza exploratória e para a correta priorização de investimentos. O quadro 1 apresenta os tipos de Kimberlito para melhor entendimento, segundo os autores já consultados.

Quadro 1. *Tipos de kimberlitos.*

Tipo de Kimberlito	Profundidade de origem (aprox.)	Potencial diamantífero
Kimberlito de raiz (hypabyssal / root zone)	>200–300 km	Alto (principal zona fonte de diamantes)
Kimberlito diatrema (crater facies)	~150–250 km	Moderado a baixo (depende de retrabalho e preservação)
Kimberlito alterado / brechado (transicional)	~100–200 km	Variável (alta incerteza geológica)
Lamproíto diamantífero (<i>comparativo</i>)	~150–250 km	Alto, mas espacialmente restrito

Nota: elaborado pelo autor com base em, Field et al. (2008); Tappe et al. (2018); Sparks et al. (2006).

Contudo, a simples presença de um corpo kimberlítico não garante potencial económico. Estudos empíricos como Field et al. (2008), demonstram que apenas uma fração destes corpos contém diamantes em quantidades economicamente viáveis, o que reforça a necessidade de critérios geológicos robustos na fase de prospeção.

3.1.3. Indicadores geológicos de potencial diamantífero.

A identificação de minerais indicadores constitui uma das ferramentas mais importantes na prospeção de depósitos diamantíferos primários, sendo amplamente utilizada para inferir condições do manto associadas à formação de diamantes (Field et al., 2008). Estes minerais refletem características físico-químicas do manto litosférico subcontinental, permitindo avaliar o potencial diamantífero de corpos kimberlíticos.

O mesmo autor explica que entre os principais minerais indicadores destacam-se **granadas do tipo G10**, **cromitas** ricas em crómio e **diopsídios cromíferos**, os quais estão associados a condições de alta pressão e a regimes mantélicos favoráveis à estabilidade do diamante.

Adicionalmente, minerais como a **olivina** podem fornecer informação sobre a evolução geoquímica do manto e os processos de geração dos magmas kimberlíticos, contribuindo de forma indireta para a interpretação do contexto petrogenético dos sistemas diamantíferos (Tappe et al., 2018). A análise geoquímica destes minerais constitui, assim, um elemento complementar na prospeção moderna.

De acordo com as abordagens de Jelsma et al. (2020), outro fator crítico na avaliação do potencial diamantífero é o contexto tectónico, particularmente a presença de crátons espessos e estáveis, os quais favorecem tanto a formação como a preservação de diamantes ao longo do tempo geológico.

3.1.4. Variabilidade geológica e implicações na exploração.

Os jazigos primários de diamantes caracterizam-se por elevada variabilidade geológica, refletida na distribuição heterogénea dos diamantes dentro dos corpos kimberlíticos e nas diferenças significativas entre depósitos. Esta variabilidade resulta de múltiplos fatores, incluindo a heterogeneidade do manto fonte, os processos de ascensão magmática e as alterações pós-emplacimento (Field et al., 2008).

Como consequência, a exploração diamantífera apresenta uma elevada taxa de insucesso, sendo comum a identificação de corpos kimberlíticos sem viabilidade económica. Esta incerteza geológica constitui um dos principais desafios na indústria, exigindo a integração de múltiplas fontes de informação e o uso de métodos quantitativos para reduzir o risco associado à tomada de decisão (Tappe et al., 2018).

Neste contexto, a variabilidade geológica não deve ser encarada apenas como uma limitação, mas como um elemento central a ser incorporado em modelos de avaliação, justificando a necessidade de frameworks que integrem explicitamente esta incerteza.

Os fundamentos geocientíficos já citados evidenciam que, a exploração de jazigos primários de diamantes é controlada por processos complexos e altamente variáveis, desde a formação mantélica até à emplaceção de kimberlitos. A presença de indicadores geológicos favoráveis, aliada ao contexto tectónico adequado, constitui condição necessária, mas não suficiente, para a viabilidade económica dos depósitos.

Deste modo, a incorporação sistemática de critérios geocientíficos na avaliação de projetos é essencial para reduzir a incerteza e melhorar a qualidade das decisões de investimento.

3.2. Avaliação Económica de Projetos Mineiros Diamantíferos.

A avaliação económica de projetos mineiros diamantíferos apresenta especificidades relevantes quando comparada com outros sectores da mineração, devido à natureza singular do produto, à elevada variabilidade geológica e à forte influência de fatores de mercado. A viabilidade destes projetos depende de uma interação complexa entre teor, valor do diamante, escala de produção e custos operacionais, exigindo abordagens analíticas robustas e integradas (De Bruin, 2022).

3.2.1. Particularidades económicas da indústria diamantífera.

Ao contrário de commodities metálicas, cujo valor é relativamente homogéneo e determinado por mercados globais transparentes, os diamantes apresentam uma elevada heterogeneidade em termos de qualidade, dimensão, cor e pureza. Esta variabilidade traduz-se numa grande dispersão de preços por quilate, tornando o valor económico de um depósito altamente dependente da distribuição granulométrica e qualitativa das pedras (Field et al., 2008).

Assim, dois depósitos com teor semelhante podem apresentar desempenhos económicos radicalmente distintos, dependendo do valor médio por quilate. Esta característica diferencia a mineração de diamantes de outras operações mineiras, onde o teor é frequentemente o principal determinante económico.

Adicionalmente, o mercado diamantífero é caracterizado por **assimetria de informação e baixa transparência**, sendo fortemente influenciado por canais de comercialização específicos e por estruturas oligopolistas históricas. Esta condição introduz incerteza adicional na previsão de receitas e reforça a complexidade da avaliação económica (De Beers Group, 2023).

3.2.2. Indicadores clássicos de viabilidade.

A avaliação económica de projetos mineiros baseia-se tradicionalmente em indicadores financeiros derivados de modelos de fluxo de caixa descontado (DCF), entre os quais se destacam:

- Valor Atual Líquido (Net Present Value – NPV).
- Taxa Interna de Retorno (Internal Rate of Return – IRR).
- Período de Recuperação do Investimento (Payback Period).

O quadro 2, apresenta uma síntese dos principais indicadores financeiros utilizados na avaliação económica de projetos mineiros, destacando as suas características, critérios de decisão, vantagens e limitações. Estes indicadores constituem a base dos modelos tradicionais de análise de investimento, sendo amplamente aplicados no sector mineiro.

Quadro 2. *Indicadores clássicos de viabilidade económica em projetos mineiros.*

Indicador	Descrição	Critério de decisão	Vantagens principais	Limitações principais
Valor Atual Líquido (NPV)	Diferença entre o valor presente dos fluxos de caixa futuros e o investimento inicial.	Aceitar se $NPV > 0$.	Considera o valor temporal do dinheiro; mede criação de valor; amplamente utilizado.	Sensível à taxa de desconto; assume cenários determinísticos; não incorpora flexibilidade gerencial.
Taxa Interna de Retorno (IRR)	Taxa de desconto que	Aceitar se $IRR > \text{custo de capital}$.	Fácil interpretação; permite	Pode gerar múltiplas soluções; não

	torna o NPV igual a zero.		comparação entre projetos; mede rentabilidade relativa.	considera escala do investimento; pode ser enganoso em fluxos não convencionais.
Período de Recuperação (Payback)	Tempo necessário para recuperar o investimento inicial.	Aceitar se inferior ao limite definido.	Simple e intuitivo; útil para avaliar liquidez e risco de curto prazo.	Ignora fluxos após o payback; não considera valor temporal do dinheiro (na versão simples); não mede rentabilidade.

Nota. Elaborado pelo autor com base em Brealey et al. (2020), De Bruin (2022) e Dimitrakopoulos (2018).

O NPV é geralmente considerado o principal critério de decisão, uma vez que mede a criação de valor económico ao longo do tempo, incorporando o valor temporal do dinheiro. Por sua vez, o IRR permite avaliar a rentabilidade relativa do projeto, enquanto o payback fornece uma medida da liquidez e do risco temporal associado ao investimento (Brealey et al., 2020).

Contudo, a aplicação destes indicadores em projetos mineiros, particularmente na exploração diamantífera, apresenta limitações relevantes devido à natureza determinística dos modelos subjacentes e à elevada incerteza associada às variáveis críticas (De Bruin, 2022).

3.2.3. Relação entre escala, teor e valor económico.

Na exploração diamantífera, a relação entre teor, escala e valor económico apresenta particularidades relevantes. Ao contrário de muitos depósitos metálicos, onde o aumento do teor tende a correlacionar-se diretamente com maior viabilidade, nos depósitos diamantíferos o fator determinante é frequentemente o valor médio por quilate.

Depósitos de baixo teor podem ser economicamente viáveis quando explorados em larga escala e quando produzem diamantes de alto valor unitário. Por outro lado, depósitos com teor relativamente elevado podem não ser rentáveis caso os diamantes sejam de baixa qualidade (Field et al., 2008).

Esta relação não linear implica que a avaliação económica deve considerar simultaneamente:

- distribuição de tamanhos (size frequency distribution);
- valor por quilate;
- capacidade de processamento;
- custos unitários.

Assim, a escala de operação pode atuar como mecanismo de compensação para baixos teores, desde que sustentada por um valor de mercado suficientemente elevado.

3.2.4. Limitações dos modelos determinísticos.

Apesar da sua ampla utilização, os modelos tradicionais baseados em fluxo de caixa descontado apresentam limitações significativas, sobretudo em contextos caracterizados por elevada incerteza, como é o caso da exploração diamantífera.

Uma das principais limitações reside no facto de estes modelos serem, na sua forma clássica, determinísticos, assumindo valores fixos para variáveis críticas como preços, teores, custos e volumes de produção. No entanto, na realidade, estas variáveis são altamente incertas e sujeitas a variações significativas ao longo do tempo (Dimitrakopoulos, 2018).

Adicionalmente, o NPV não captura adequadamente:

- a flexibilidade gerencial (por exemplo, adiar, expandir ou abandonar projetos);
- a variabilidade geológica;
- a volatilidade de preços;
- a assimetria de informação típica do mercado diamantífero.

Como resultado, decisões baseadas exclusivamente no NPV podem conduzir a avaliações enviesadas do risco e a uma subvalorização de oportunidades estratégicas. Neste contexto, a literatura recente destaca a necessidade de integrar abordagens

probabilísticas e métodos avançados de análise de risco para melhorar a robustez da avaliação económica (De Bruin, 2022; Dimitrakopoulos, 2018).

3.3. Incerteza e Análise de Risco na Exploração Mineira.

De acordo com Dimitrakopoulos (2018) e De Bruin (2022), a exploração mineira, e em particular a exploração de jazigos primários de diamantes, caracteriza-se por níveis elevados de incerteza e risco, resultantes da complexidade geológica, da volatilidade dos mercados e da natureza intensiva em capital dos projetos. Estas condições tornam a análise de risco um elemento central no processo de tomada de decisão, exigindo abordagens que permitam capturar a variabilidade dos principais parâmetros e reduzir a probabilidade de decisões subótimas.

3.3.1. Natureza da incerteza em projetos mineiros.

A incerteza em projetos mineiros é multidimensional e pode ser classificada em três categorias principais: geológica, económica e operacional.

A incerteza geológica: é, geralmente, a mais significativa, estando associada à limitada informação disponível sobre a distribuição espacial dos teores, à variabilidade dos depósitos e à dificuldade de amostragem representativa. Mesmo com técnicas avançadas de modelação geoestatística, permanece um grau elevado de incerteza quanto às características reais do depósito (Dimitrakopoulos, 2018).

A incerteza económica: decorre da volatilidade dos preços das commodities, das flutuações cambiais e das variações nos custos de capital e operacionais. No caso específico dos diamantes, esta incerteza é amplificada pela heterogeneidade do produto e pela falta de transparência do mercado (De Bruin, 2022).

Por sua vez, a **incerteza operacional:** está relacionada com fatores técnicos e logísticos, incluindo desempenho dos equipamentos, condições geotécnicas, eficiência do processamento e riscos associados à implementação do projeto. Estes fatores podem afetar significativamente os custos e a produtividade ao longo do ciclo de vida da mina.

A interação entre estas três dimensões resulta num ambiente decisório altamente complexo, onde a avaliação determinística tradicional se revela insuficiente.

3.3.2. Métodos de análise de risco: abordagens qualitativas e quantitativas.

Os métodos de análise de risco podem ser classificados em qualitativos e quantitativos, dependendo do nível de formalização e da capacidade de mensuração da

incerteza. As abordagens qualitativas, de acordo com Hillson (2003), baseiam-se na identificação e classificação dos riscos através de julgamento especializado, utilizando ferramentas como matrizes de risco, análise SWOT e entrevistas a especialistas. Estas metodologias são úteis em fases iniciais do projeto, mas apresentam limitações significativas em termos de objetividade e comparabilidade

Por outro lado, as abordagens quantitativas permitem modelar explicitamente a incerteza através de distribuições de probabilidade e técnicas matemáticas, possibilitando a quantificação do impacto dos riscos nos resultados económicos do projeto. Estas abordagens incluem simulações, modelos estocásticos e análise probabilística, sendo consideradas mais robustas e adequadas para projetos mineiros de elevada complexidade (Dimitrakopoulos, 2018).

A integração de métodos qualitativos e quantitativos é frequentemente recomendada como boa prática, permitindo combinar o conhecimento especializado com rigor analítico.

3.3.3. Abordagens probabilísticas na avaliação de risco.

A crescente complexidade dos projetos mineiros tem impulsionado a adoção de abordagens probabilísticas, que permitem incorporar explicitamente a incerteza nos modelos de avaliação económica.

A simulação de Monte Carlo é uma das técnicas mais utilizadas, consistindo na geração de múltiplos cenários possíveis através da amostragem aleatória de variáveis-chave, como preços, teores e custos. Esta abordagem segundo Dimitrakopoulos (2018), permite obter distribuições de probabilidade de indicadores económicos, como o NPV, proporcionando uma visão mais realista do risco associado ao projeto

A análise de cenários constitui outra ferramenta relevante, permitindo avaliar o desempenho do projeto sob diferentes condições (por exemplo, cenários otimista, base e pessimista). Embora menos sofisticada do que a simulação de Monte Carlo, esta abordagem é útil para explorar a sensibilidade do projeto a mudanças em variáveis críticas (De Bruin, 2022).

Estas metodologias permitem ultrapassar as limitações dos modelos determinísticos, fornecendo informação essencial para a tomada de decisão em ambientes incertos.

3.3.4. Implicações da irreversibilidade dos investimentos.

Os investimentos em projetos mineiros são caracterizados por elevados custos iniciais e forte irreversibilidade, uma vez que grande parte do capital investido não pode ser recuperado em caso de abandono do projeto. Esta característica, combinada com a incerteza, tem implicações significativas na tomada de decisão.

De acordo com a teoria das opções reais, a flexibilidade gerencial como a possibilidade de adiar, expandir ou abandonar um projeto possui valor económico e deve ser considerada na avaliação de investimentos (Dixit & Pindyck, 1994). No contexto mineiro, esta abordagem permite capturar o valor estratégico da adaptação a condições futuras incertas.

A não consideração desta flexibilidade pode conduzir à subavaliação de projetos ou à tomada de decisões prematuras, especialmente em ambientes caracterizados por elevada volatilidade e incerteza, como a exploração diamantífera (Dimitrakopoulos, 2018).

Assim, a incorporação explícita da irreversibilidade e da flexibilidade estratégica constitui um elemento fundamental para uma avaliação mais realista do risco.

A análise de risco em projetos mineiros exige uma abordagem integrada que considere a natureza multidimensional da incerteza e utilize ferramentas quantitativas capazes de capturar a variabilidade dos principais parâmetros. A evidência científica demonstra que modelos determinísticos são insuficientes para suportar decisões robustas, sendo necessária a adoção de métodos probabilísticos e a consideração da irreversibilidade dos investimentos.

3.1.5. Contexto geológico e potencial diamantífero da África Austral.

A África Austral constitui uma das regiões mais importantes a nível mundial no que respeita à ocorrência de jazigos primários de diamantes, concentrando um número significativo de intrusões kimberlíticas economicamente relevantes. Esta predominância está diretamente associada à presença de extensos crátons arqueanos e proterozoicos, nomeadamente o Cráton do Congo e o Cráton do Kaapvaal, que apresentam condições geotérmicas e estruturais favoráveis à formação e preservação de diamantes ao longo do tempo geológico (Jelsma et al., 2020).

Do ponto de vista geodinâmico, estas estruturas cratônicas caracterizam-se por uma litosfera espessa e estável, capaz de suportar condições de alta pressão e baixa temperatura necessárias à estabilidade do diamante. Adicionalmente, a recorrência de eventos magmáticos kimberlíticos nestas regiões está associada a processos profundos do manto, frequentemente relacionados com plumas mantélicas e reativações tectônicas, o que favorece o transporte de diamantes até à superfície (Tappe et al., 2018).

No contexto exploratório, países como Angola, Botswana e África do Sul destacam-se pela elevada densidade de ocorrências kimberlíticas e pela relevância económica dos seus depósitos. Em particular, Angola apresenta um potencial significativo ainda em fase de desenvolvimento, com numerosas intrusões identificadas em diferentes estágios de prospeção e avaliação.

No entanto, apesar do elevado potencial geológico, a exploração nestas regiões é caracterizada por uma elevada incerteza, resultante da heterogeneidade dos corpos kimberlíticos e da variabilidade do conteúdo diamantífero. Estudos indicam que apenas uma fração dos corpos identificados apresenta viabilidade económica, o que reforça a necessidade de metodologias robustas de avaliação e priorização de investimentos (Field et al., 2008).

Assim, a África Austral representa simultaneamente uma região de elevado potencial e elevado risco, constituindo um contexto ideal para a aplicação de frameworks integrados que combinem critérios geocientíficos, económicos e de risco.

3.4. Métodos de Decisão Multicritério Aplicados à Mineração.

A crescente complexidade dos projetos mineiros, caracterizados por múltiplos critérios frequentemente conflitantes como fatores geológicos, económicos, ambientais e de risco tem impulsionado a adoção de métodos de decisão multicritério (Multi-Criteria Decision Making (MCDM)). Estes métodos permitem estruturar problemas complexos, integrar diferentes tipos de informação e apoiar a tomada de decisão de forma sistemática e transparente (Triantaphyllou, 2000; Govindan & Jepsen, 2016).

No contexto da exploração diamantífera, onde a incerteza é elevada e os critérios de avaliação são heterogéneos, os métodos MCDM constituem ferramentas particularmente adequadas para a priorização de investimentos.

3.4.1. Fundamentos da decisão multicritério (MCDM).

A decisão multicritério baseia-se no princípio de que problemas complexos não podem ser adequadamente avaliados com base num único critério, exigindo a consideração simultânea de múltiplas dimensões. Estes métodos permitem:

- estruturar o problema de decisão;
- identificar e hierarquizar critérios;
- atribuir pesos relativos;
- avaliar e ordenar alternativas.

De acordo com Triantaphyllou (2000), os métodos MCDM podem ser classificados em abordagens de agregação completa (baseadas em funções de utilidade) e métodos de sobreclassificação (ou outranking), que comparam alternativas de forma relativa sem necessidade de uma função de valor global única.

Uma das principais vantagens destes métodos é a capacidade de integrar dados quantitativos e qualitativos, bem como preferências dos decisores, o que é particularmente relevante em contextos mineiros, onde nem todos os critérios são diretamente mensuráveis.

3.4.2. Principais métodos.

AHP (Analytic Hierarchy Process).

O método AHP, desenvolvido por Saaty (1980), é um dos mais utilizados em problemas de decisão multicritério. Baseia-se na decomposição hierárquica do problema em níveis (objetivo, critérios, subcritérios e alternativas) e na realização de comparações par-a-par entre os elementos.

A principal contribuição do AHP reside na sua capacidade de transformar julgamentos qualitativos em valores quantitativos, através de uma escala de preferência. Adicionalmente, o método permite verificar a consistência dos julgamentos, aumentando a fiabilidade do processo decisório.

No contexto mineiro, o AHP é frequentemente utilizado para:

- definição de pesos de critérios;
- avaliação de alternativas em fases preliminares de decisão;

- integração de conhecimento especializado.

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution).

O método TOPSIS baseia-se no conceito de que a melhor alternativa deve ser aquela que se encontra mais próxima da solução ideal positiva e mais distante da solução ideal negativa (Hwang & Yoon, 1981; Behzadian et al., 2012).

Este método envolve:

- normalização dos dados;
- ponderação dos critérios;
- cálculo das distâncias às soluções ideais;
- ordenação das alternativas.

A principal vantagem do TOPSIS é a sua simplicidade computacional e capacidade de lidar com múltiplos critérios de forma eficiente. É particularmente útil em problemas onde existe um conjunto bem definido de alternativas e critérios quantitativos.

No sector mineiro, o TOPSIS tem sido aplicado na seleção de projetos, avaliação de tecnologias e priorização de investimentos, devido à sua capacidade de produzir rankings claros e interpretáveis.

PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation).

O método PROMETHEE pertence à família dos métodos de sobreclassificação (outranking) e baseia-se na comparação par-a-par das alternativas, considerando funções de preferência associadas a cada critério (Brans & Vincke, 1985; Govindan & Jepsen, 2016).

Diferentemente do TOPSIS, o PROMETHEE não requer a construção de uma solução ideal, permitindo maior flexibilidade na modelação de preferências e na incorporação de critérios qualitativos.

Entre as suas principais características destacam-se:

- capacidade de lidar com critérios conflitantes;
- transparência na estrutura de decisão;

- possibilidade de análise de sensibilidade.

Este método é particularmente adequado para problemas complexos, onde as relações de preferência não são lineares ou facilmente agregáveis.

3.4.3. Aplicações no sector mineiro.

Os métodos MCDM têm sido amplamente aplicados no sector mineiro, abrangendo diversas áreas, tais como:

- seleção de locais para exploração;
- avaliação de projetos mineiros;
- escolha de métodos de lavra;
- análise de sustentabilidade e impacto ambiental.

Estudos recentes demonstram que a integração de métodos multicritério permite melhorar significativamente a qualidade das decisões, ao incorporar simultaneamente fatores técnicos, económicos e ambientais (Bitarafan et al., 2012; Govindan & Jepsen, 2016).

No contexto específico da exploração diamantífera, a utilização de métodos MCDM é particularmente relevante devido à necessidade de integrar:

- incerteza geológica;
- variabilidade económica;
- riscos operacionais.

3.4.4. Limitações e desafios dos métodos MCDM.

Apesar das suas vantagens, os métodos MCDM apresentam algumas limitações que devem ser consideradas. Uma das principais limitações é a subjetividade na atribuição de pesos, especialmente em métodos como o AHP, onde os resultados dependem significativamente dos julgamentos dos decisores. Esta subjetividade pode introduzir viés no processo de decisão.

Adicionalmente, alguns métodos apresentam sensibilidade aos dados de entrada, podendo gerar resultados diferentes em função de pequenas variações nos parâmetros (Triantaphyllou, 2000). Outro desafio relevante é a dificuldade de integrar de forma consistente a incerteza probabilística, uma vez que muitos métodos MCDM são

essencialmente determinísticos. Esta limitação é particularmente crítica em projetos mineiros, onde a incerteza desempenha um papel central (Dimitrakopoulos, 2018).

Por fim, a escolha do método mais adequado depende do contexto do problema, não existindo uma abordagem universalmente superior, o que reforça a necessidade de uma seleção criteriosa das técnicas utilizadas.

Os métodos de decisão multicritério constituem ferramentas essenciais para a análise de problemas complexos no sector mineiro, permitindo integrar múltiplos critérios e apoiar a tomada de decisão de forma estruturada. Entre os principais métodos, destacam-se o AHP, TOPSIS e PROMETHEE, cada um com características específicas que os tornam adequados para diferentes contextos.

No entanto, as suas limitações, particularmente no que respeita à incorporação da incerteza, justificam a necessidade de integração com métodos probabilísticos, sustentando a abordagem proposta neste estudo.

4. PROPOSTA DO FRAMEWORK MULTICRITÉRIO.

A priorização de investimentos na exploração de jazigos primários de diamantes exige uma abordagem integrada que considere simultaneamente o potencial geológico, a viabilidade económica e o nível de risco associado. Com base na fundamentação teórica apresentada, propõe-se um framework multicritério híbrido, que combina métodos de decisão multicritério com abordagens probabilísticas, permitindo uma avaliação mais robusta e realista das alternativas de investimento (Saaty, 1980; Behzadian et al., 2012; Dimitrakopoulos, 2018).

4.1. Estrutura conceptual do framework.

O framework proposto baseia-se em três dimensões principais:

- G — Potencial Geológico
- E — Desempenho Económico
- R — Risco Global

Estas dimensões refletem os principais fatores que condicionam a viabilidade de projetos diamantíferos, sendo operacionalizadas através de um conjunto de critérios e subcritérios.

A função de priorização de investimentos é definida como:

$$PI = w_g G + w_e E - w_r R$$

onde:

- PI representa o índice de priorização do projeto;
- G , E e R correspondem às pontuações normalizadas de cada dimensão;
- w_g , w_e e w_r são os pesos atribuídos, com $w_g + w_e + w_r = 1$.

A inclusão do termo de risco com sinal negativo reflete o impacto adverso desta dimensão na decisão de investimento.

4.2. Definição dos critérios e subcritérios.

4.2.1. Dimensão geológica (G).

A dimensão geológica avalia o potencial diamantífero do depósito, incorporando:

- presença de minerais indicadores (granadas G10, cromitas, diopsídios);
- características do kimberlito (tipo, profundidade de origem);
- contexto tectónico (proximidade a crátons estáveis);
- resultados de amostragem (teor e distribuição).

Estes critérios baseiam-se em evidência geocientífica consolidada sobre a formação e preservação de diamantes (Field et al., 2008; Jelsma et al., 2020).

4.2.2. Dimensão económica (E).

A dimensão económica integra indicadores de desempenho financeiro, incluindo:

- NPV;
- IRR;
- valor médio por quilate;
- custos operacionais (OPEX) e de capital (CAPEX).

Adicionalmente, considera-se a relação entre escala de produção e valor do diamante, reconhecendo a natureza não linear da viabilidade económica em depósitos diamantíferos (De Bruin, 2022).

4.2.3. Dimensão de risco (R).

A dimensão de risco incorpora a incerteza associada ao projeto, considerando:

- variabilidade geológica;
- volatilidade de preços;
- riscos operacionais;
- incerteza nos parâmetros económicos.

Esta dimensão é avaliada através de métricas probabilísticas derivadas de simulações, como:

- variância do NPV;
- probabilidade de NPV negativo;
- Value-at-Risk (VaR).

4.3. Determinação dos pesos (AHP).

A atribuição de pesos às dimensões e critérios é realizada através do método AHP, que permite incorporar o julgamento de especialistas de forma estruturada (Saaty, 1980).

O processo envolve:

1. Construção da matriz de comparação par-a-par;
2. Cálculo do vetor de prioridades;
3. Verificação da consistência (Consistency Ratio – CR).

Esta abordagem garante transparência e coerência na definição das preferências, sendo particularmente adequada em contextos onde coexistem critérios quantitativos e qualitativos.

4.4. Normalização e agregação dos critérios.

Dado que os critérios apresentam diferentes unidades e escalas, procede-se à sua normalização, utilizando métodos como:

- normalização linear (min–max);
- escalas adimensionais (0–1).

A agregação é realizada através de uma função de valor ponderada, permitindo obter uma pontuação global para cada alternativa.

4.5. Integração com métodos de ranking (TOPSIS).

Para a ordenação das alternativas de investimento, propõe-se a utilização do método TOPSIS, devido à sua capacidade de:

- considerar simultaneamente múltiplos critérios;
- identificar soluções próximas do ideal;
- produzir rankings claros e interpretáveis (Behzadian et al., 2012).

O processo inclui:

- definição da matriz de decisão;
- aplicação dos pesos;
- cálculo das distâncias às soluções ideais;
- determinação do índice de proximidade relativa.

4.6. Integração da análise de risco (Monte Carlo).

A componente de risco é incorporada através de simulação de Monte Carlo, permitindo modelar a incerteza dos principais parâmetros do projeto.

Para cada alternativa:

- são gerados múltiplos cenários;
- obtém-se a distribuição do NPV;
- calculam-se métricas de risco.

Esta abordagem permite substituir valores determinísticos por distribuições probabilísticas, aumentando a robustez da avaliação (Dimitrakopoulos, 2018).

4.7. Procedimento operacional do framework.

O framework proposto segue as seguintes etapas:

1. Definição das alternativas de investimento;
2. Identificação dos critérios (G, E, R);
3. Atribuição de pesos (AHP);
4. Recolha e normalização dos dados;
5. Simulação de Monte Carlo (componente de risco);

6. Aplicação do método TOPSIS;
7. Ordenação final das alternativas (PI).

4.8. Vantagens do framework proposto.

O modelo apresenta várias vantagens:

- integração de múltiplas dimensões críticas;
- incorporação explícita da incerteza;
- redução da subjetividade na decisão;
- aplicabilidade prática em contextos reais;
- flexibilidade para adaptação a diferentes projetos.

Além disso, supera limitações dos modelos tradicionais baseados exclusivamente em NPV, ao integrar risco e múltiplos critérios de decisão.

Em síntese, o framework multicritério proposto constitui uma abordagem integrada para a priorização de investimentos em exploração diamantífera, combinando métodos MCDM e análise probabilística. A sua estrutura permite capturar a complexidade dos projetos mineiros e apoiar decisões mais robustas, alinhadas com as melhores práticas científicas e industriais.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

A aplicação conceptual do framework multicritério proposto evidencia elevada adequação ao contexto de regiões diamantíferas emergentes, particularmente na África Austral, onde coexistem elevado potencial geológico e elevada incerteza exploratória. Este equilíbrio entre oportunidade e risco torna estas regiões um ambiente ideal para a implementação de abordagens integradas de decisão, como a aqui proposta.

A análise dos resultados teóricos do modelo demonstra que a estrutura G–E–R (Geologia–Economia–Risco) permite capturar de forma consistente as principais fontes de variabilidade que caracterizam os projetos diamantíferos nesta região, refletindo adequadamente a complexidade dos sistemas naturais e económicos envolvidos.

5.1. Adequação do framework ao contexto geológico da África Austral.

Do ponto de vista geocientífico, a África Austral apresenta condições altamente favoráveis à formação de depósitos diamantíferos, nomeadamente a presença de crátons arqueanos estáveis e extensa atividade kimberlítica associada a processos mantélicos

profundos. No entanto, esta elevada fertilidade geológica é acompanhada por forte heterogeneidade na distribuição dos diamantes e na qualidade dos corpos kimberlíticos.

Neste contexto, o componente **G (potencial geológico)** do framework demonstra elevada capacidade de discriminação entre diferentes alvos exploratórios, ao integrar variáveis como indicadores mineralógicos, contexto tectónico e características dos kimberlitos. Isto é particularmente relevante em países como Angola e Botswana, onde coexistem depósitos de alta qualidade com numerosos corpos ainda não economicamente viáveis.

Assim, o modelo reforça a ideia de que a simples identificação de kimberlitos não é suficiente para garantir viabilidade económica, sendo necessária uma avaliação integrada e hierarquizada dos critérios geológicos.

5.2. Relevância da dimensão económica em contextos emergentes.

Em regiões diamantíferas emergentes, a dimensão **E (económica)** assume um papel particularmente crítico devido à elevada sensibilidade dos projetos a variações de preço, qualidade do recurso e estrutura de custos.

Os resultados teóricos do framework indicam que a incorporação simultânea de indicadores como NPV, IRR e valor por quilate permite capturar melhor a viabilidade real dos projetos, sobretudo em contextos onde a economia do projeto não depende exclusivamente do teor, mas também da qualidade e distribuição dos diamantes.

Além disso, em economias emergentes, onde o acesso a capital é frequentemente limitado e os custos de oportunidade são elevados, a priorização correta de investimentos torna-se um fator determinante para o sucesso dos projetos mineiros.

5.3. Importância crítica da dimensão de risco.

A análise dos resultados confirma que a dimensão **R (risco)** é o principal fator diferenciador do framework no contexto da África Austral. Esta região caracteriza-se por elevada incerteza geológica e operacional, o que torna inadequadas abordagens determinísticas tradicionais.

A incorporação de risco através de simulação probabilística e métricas de dispersão do NPV permite identificar projetos que, embora atrativos em termos médios, apresentam elevada probabilidade de insucesso económico.

Este aspeto é particularmente relevante em províncias diamantíferas emergentes, onde a falta de informação detalhada sobre os depósitos aumenta significativamente o risco exploratório. Assim, o framework contribui para reduzir decisões baseadas exclusivamente em expectativas médias, promovendo uma visão mais realista do desempenho dos projetos.

5.4. Contributo do framework para regiões emergentes.

A aplicação conceptual do modelo demonstra que o framework é especialmente adequado para regiões emergentes por três razões principais:

1. **Redução da incerteza decisional**, através da integração de múltiplas fontes de informação;
2. **Priorização estruturada de investimentos**, evitando decisões baseadas apenas em intuição geológica;
3. **Integração entre ciência e economia**, permitindo alinhar potencial geológico com viabilidade financeira e perfil de risco.

No caso específico da África Austral, isto traduz-se numa ferramenta particularmente útil para autoridades mineiras e empresas de exploração, ao permitir uma melhor alocação de recursos exploratórios em ambientes de elevada competição e risco.

5.5. Implicações estratégicas para Angola e regiões similares.

Em países como Angola, onde o sector diamantífero desempenha um papel estratégico na economia nacional, a aplicação de frameworks multicritério pode contribuir significativamente para melhorar a eficiência do processo exploratório.

A existência de numerosos corpos kimberlíticos ainda não totalmente avaliados exige mecanismos de priorização robustos, capazes de distinguir entre alvos de elevado potencial e aqueles com baixa probabilidade de viabilidade económica.

Neste sentido, o framework proposto oferece uma abordagem estruturada que pode apoiar tanto empresas mineiras como entidades reguladoras na definição de estratégias de exploração mais eficientes e sustentáveis.

5.6. Síntese da discussão.

Os resultados teóricos indicam que o framework multicritério proposto apresenta elevada aplicabilidade em regiões diamantíferas emergentes, particularmente na África Austral. A integração das dimensões geológica, económica e de risco permite capturar a

complexidade intrínseca dos projetos mineiros e melhorar significativamente a qualidade do processo decisório.

Deste modo, o modelo não apenas reforça a importância da abordagem integrada na avaliação de investimentos, como também oferece uma ferramenta conceptual robusta para apoiar a exploração responsável e eficiente de recursos diamantíferos em contextos de elevada incerteza.

6. CONCLUSÕES.

A crescente complexidade associada à exploração de jazigos primários de diamantes, marcada por elevada incerteza geológica, riscos económicos significativos e forte exigência de capital, torna cada vez mais necessária a adoção de abordagens integradas de apoio à decisão. Neste contexto, o presente estudo propôs um framework multicritério destinado à priorização de investimentos, articulando de forma estruturada dimensões geocientíficas, económicas e de risco, com o objetivo de superar limitações dos modelos tradicionais baseados em critérios isolados.

Conclui-se que o framework desenvolvido constitui uma contribuição relevante para o avanço das metodologias de avaliação de projetos mineiros, ao incorporar explicitamente a incerteza e permitir uma análise mais robusta e holística das alternativas de investimento. A sua aplicabilidade é particularmente pertinente em regiões diamantíferas emergentes, como a África Austral, onde coexistem elevado potencial geológico e elevado risco exploratório. Apesar do contributo teórico significativo, destaca-se a necessidade de validação empírica futura e de adaptação do modelo a contextos operacionais específicos, de forma a reforçar a sua utilidade prática na tomada de decisão estratégica no sector diamantífero.

Recomendações para investigações futuras:

Investigações futuras segundo o autor deverão concentrar-se em três direções principais:

1. Aplicação empírica do framework em casos reais de exploração diamantífera, particularmente em regiões da África Austral;
2. Integração com técnicas avançadas de análise de dados e machine learning para melhorar a previsão do potencial geológico;
3. Desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão computacionais que operacionalizem o framework em ambientes industriais.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051–13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051–13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- Bitarafan, M., Zolfani, S. H., Arefi, S. L., Zavadskas, E. K., & Mahmoudzadeh, A. (2014). Evaluation of Real-Time Intelligent Sensors for Structural Health Monitoring of Bridges Based on Swara-Waspas; a Case in Iran. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 9(4), 333-340. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2014.40>
- Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). A preference ranking organisation method: The PROMETHEE method for MCDM. *Management Science*, 31(6), 647–656. <https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647>
- Brealey, R. A., Myers, S. C., & Allen, F. (2020). *Principles of Corporate Finance* (13th ed.). MCGRAW-HILL.
- De Beers Group. (2023). The Diamond Insight Report 2023 CHINA: *The outlook and opportunities for diamonds*. https://www.debeersgroup.com/~media/Files/D/debeers-v2/documents/reports/2023/DeBeers_DIR2023.pdf
- Dimitrakopoulos, R. (2018). *Stochastic Mine Planning Methods, Examples and Value in an Uncertain World*. In: Dimitrakopoulos, R. (eds) *Advances in Applied Strategic Mine Planning*. Springer, Cham, 101-115 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69320-0_9
- Dixit, A. K., & Pindyck, R. S. (1994). *Investment under uncertainty*. Princeton University Press.
- Field, M., Stiefenhofer, J., Robey, J. and Kurszlauskis, S. (2008). Kimberlite-hosted diamond deposits of southern Africa: A review. *Ore Geology Reviews*, 34 (1–2), 33-75. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.11.002>
- Goodfellow, R., & Dimitrakopoulos, R. (2016). Global optimization of open pit mining complexes with uncertainty, *Applied Soft Computing*, Vol. 40, 292-304. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.11.038>
- Govindan, K & Jepsen, M. B. (2016). ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications, *European Journal of Operational Research*, Elsevier, vol. 250(1), pages 1-29. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.07.019

- Govindan, K., & Jepsen, M. B. (2016). ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, 250 (1), 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.019>
- Hillson, D. (2003). *Effective opportunity management for projects: Exploiting positive risk*. CRC Press.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer.
- Jelsma, H., Barnett, W., Richards, S., & Lister, G. (2009). Tectonic setting of kimberlites. *Lithos*, 112 (Sup 1), 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.06.030>
- Mitchell, R. H; Giuliani, A; O'Brien, H. (2019). What is a Kimberlite? Petrology and Mineralogy of Hypabyssal Kimberlites. *Elements*, 15 (6): 381–386. <https://doi.org/10.2138/gselements.15.6.381>
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill. New York
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.
- Sparks, R. S. J., Baker, L., Brown, R. J., Field, M., Schumacher, J., Stripp, G., & Walters, A. (2006). Dynamical constraints on kimberlite volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 155(1–2), 18–48. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.02.010>
- Tappe, S., Smart, K.A., Torsvik, T.H., Massuyeau, M., & Wit, M.C. (2018). Geodynamics of kimberlites on a cooling Earth: Clues to plate tectonic evolution and deep volatile cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, 484, 1-14. [DOI:10.1016/J.EPSL.2017.12.013](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.12.013)
- Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-criteria decision making methods: A comparative study*. Springer.
- Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-Criteria Decision Making: A Comparative Study*. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, Dordrecht, Vol.1, 320. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3157-6>
- Tubis, A., Werbińska-Wojciechowska, S., & Wroblewski, A. (2020). Risk Assessment Methods in Mining Industry: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 10(15), 5172. <https://doi.org/10.3390/app10155172>