UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANA CLARA DA PONTE CERVO

PRINCÍPIOS DA MINERAÇÃO CIRCULAR

BRASÍLIA - DF
NOVEMBRO DE 2025

ANA CLARA DA PONTE CERVO

PRINCÍPIOS DA MINERAÇÃO CIRCULAR

Monografia de Projeto Final do curso de graduação em Engenharia Ambiental na Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. rer. nat. Germán Vinueza
Co-orientador: Prof. Dr. Éder de Souza Martins

ANA CLARA DA PONTE CERVO

BRASÍLIA - DF
DEZEMBRO, 2025

PRINCÍPIOS DA MINERAÇÃO CIRCULAR

Monografia de Projeto Final do curso de graduação em Engenharia Ambiental na Universidade de Brasília, apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO POR:

_____
GERMÁN VINUEZA, Dr. rer. nat (ENC/FT/UNB)
(ORIENTADOR)

_____
JUAN FÉLIX RODRIGUEZ REBOLLEDO, Dr. (ENC/FT/UNB)
(EXAMINADOR INTERNO)

_____
CLAUDIA FRANCO DE SALLES DIAS, MSc. (IBRAM/DF)
(EXAMINADORA EXTERNA)

BRASÍLIA - DF
12 DE DEZEMBRO DE 2025.

FICHA CATALOGRÁFICA

C419p da Ponte Cervo, Ana Clara

Princípios da Mineração Circular / Ana Clara da Ponte Cervo. – Universidade de Brasília, 2025.

74f.

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) – Universidade de Brasília, 2025.

Orientador(a): Dr. Germán Vinueza
Coorientador(a): Dr. Éder Martins

1. Economia Circular. 2. Remineralizadores. 3. Sustentabilidade. 4. Passivo Ambiental. 5. Rejeitos. I. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CERVO, A. C. P. (2025). Princípios da Mineração Circular. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, [74] p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: ANA CLARA DA PONTE CERVO
TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Princípios da Mineração Circular
GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2021

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

_____

Ana Clara da Ponte Cervo
anacpcervo@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, a Deus, por me dar sabedoria, serenidade e força nos momentos em que o caminho pareceu mais difícil. Foi a presença e a fé que me sustentaram e iluminaram cada etapa desta jornada.

Ao meu pai, meu exemplo de dedicação e coragem, agradeço por sempre acreditar em mim e por me ensinar o valor do esforço e da honestidade.

À minha mãe, minha base e inspiração, por seu amor incondicional, paciência infinita e por ser o refúgio seguro em todos os momentos. Sem o seu apoio diário, nada disso seria possível.

À minha irmã, pela leveza, companheirismo e pelas palavras de incentivo nas horas em que eu mais precisava.

À minha tia Rose, por estar sempre presente, com carinho e cuidado, me lembrando da importância de seguir com esperança e gratidão.

Ao meu namorado, por compreender as ausências, os dias longos e as noites de estudo. Obrigada por me incentivar a continuar, mesmo quando eu duvidava da minha própria capacidade, e por compartilhar comigo cada pequena vitória.

Ao meu orientador, Prof. Germán, e ao meu co-orientador, Prof. Éder, expresso minha profunda gratidão pela paciência, pelo apoio e pela confiança em mim. A orientação de vocês foi essencial para eu poder realizar este trabalho e para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

A todos os familiares e amigos que, de alguma forma, fizeram parte deste percurso (com palavras, gestos, incentivos ou silêncios) deixo aqui meu agradecimento. Este trabalho também carrega um pouco de cada um de vocês.

RESUMO

A mineração circular vem ganhando destaque como um modelo capaz de transformar e melhorar a relação entre o setor mineral e o meio ambiente. Entre essas soluções, os remineralizadores são uma alternativa estratégica para melhorar a fertilidade do solo, aumentar a produtividade agrícola e reduzir a dependência de fertilizantes importados. A pesquisa analisa como esses insumos se inserem na lógica da economia circular e como podem fortalecer um sistema mineral mais eficiente, menos impactante e melhor ambientalmente.

A revisão teórica que sustenta o estudo abrange conceitos de sustentabilidade, mineração regenerativa e políticas públicas que moldam o setor, como a PNRS, PNMA, PLANEC, PNF e PNM 2050. Também são discutidos os fundamentos químicos, mineralógicos e agronômicos que explicam o funcionamento dos remineralizadores e sua relevância para solos tropicais. Documentos e bases de dados de órgãos como ANM, MAPA, EMBRAPA, IBRAM e ICMM ofereceram suporte para compreender o cenário atual e possíveis caminhos futuros.

Os resultados mostram que o reaproveitamento de resíduos minerais para fins agrícolas já ocorre em diferentes estados do país e está em expansão. Dados analisados indicam crescimento no número de produtos registrados, maior diversificação das rochas utilizadas e aumento das parcerias entre mineradoras, instituições de pesquisa e agricultores. Tabelas e gráficos apresentados no estudo evidenciam o avanço da produção, a concentração territorial da atividade, o impacto dos remineralizadores na produtividade agrícola e a incorporação crescente de indicadores na gestão mineral. A análise também identifica que o Brasil possui condições favoráveis para ampliar o uso de remineralizadores, como variedade geológica, grande volume de materiais passíveis de reaproveitamento e grande capacidade científica.

De modo geral, o estudo confirma que os remineralizadores articulam inovação tecnológica, recuperação ambiental e eficiência econômica. Eles demonstram que é possível alinhar produção mineral e sustentabilidade, contribuindo para a construção de um modelo de desenvolvimento mais integrado e orientado à regeneração dos sistemas naturais.

Palavras-chave: Economia Circular; Remineralizadores; Sustentabilidade; Passivo Ambiental; Rejeitos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estimativas de investimentos no setor mineral 16
Figura 2 - Distribuição das estimativas de investimentos no setor mineral por segmento 17
Figura 3 - Fases da implantação de uma mina a céu aberto 21
Figura 4 - Principais riscos e oportunidades para a mineração em 2025 29
Figura 5 - Instalações da *LKAB* para recuperação de fósforo e elementos terras-raras 38
Figura 6 - Depósitos de rejeitos no Canadá utilizados para extração de minerais críticos 39
Figura 7 - Remineralizadores registrados Brasil 42
Figura 8 - Custo operacional efetivo da cultura de soja 44
Figura 9 - Margem líquida da cultura de soja 44
Figura 10 - Fluxograma da metodologia 52
Figura 11 - Evolução do número de remineralizadores registrados no Brasil 54
Figura 12 - Distribuição das áreas com maior potencial de remineralizadores 56
Figura 13 - Evolução de projetos, parceiras e empresas relacionadas à mineração circular 57
Figura 14 - Produtividade média de culturas agrícolas com e sem uso de remineralizadores 58
Figura 15 - Papel dos remineralizadores na integração dos pilares ESG 64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicadores de sustentabilidade da mineração na dimensão ambiental 26
Tabela 2 - Economia circular na mineração 33
Tabela 3 - Marco legal e normativo dos remineralizadores 48
Tabela 4 - Potenciais de reaproveitamento de resíduos minerais 53
Tabela 5 - Nível de consolidação das práticas de reaproveitamento mineral no Brasil (2025) 54
Tabela 6 - Benefícios e impactos da integração mineração–agricultura 57
Tabela 7 - Indicadores ESG aplicados à circularidade mineral no Brasil 62

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIAÇÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABREFEN – Associação Brasileira dos Remineralizadores e Fertilizantes Naturais

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

AIA – Avaliação de Impactos Ambientais

ANA – Agência Nacional de Águas

ANM – Agência Nacional de Mineração

CaO – Óxido de Cálcio

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral

CO_2 – Dióxido de Carbono

CONFERT – Associação Nacional para Difusão de Fertilizantes

CNI – Confederação Nacional da Indústria

CNPM – Comissão Nacional do Plano de Mineração

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ENEC – Estratégia Nacional de Economia Circular

ESG – *Environmental, Social and Governance* (Ambiental, Social e Governança)

ha – hectare

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

ICMM – *International Council on Mining and Metals*

ISA – Autoridade Internacional dos Fundos Marinhos (International Seabed Authority)

ISO – *International Organization for Standardization*

K_2O – Óxido de Potássio

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MgO – Óxido de Magnésio

MME – Ministério de Minas e Energia

N_2O – Óxido Nitroso

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OIT – Organização Internacional do Trabalho

ONU - Organização das Nações Unidas

PFM – Plano de Fechamento de Mina

PIB – Produto Interno Bruto

PLANEC – Plano Nacional de Economia Circular

PNF – Plano Nacional de Fertilizantes

PNM – Política Nacional de Mineração

PNMA – Política Nacional do Meio Ambiente

PNOT – Plano Nacional de Ordenamento Territorial

PNPSA – Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

PRAD – Plano de Recuperação de Áreas Degradadas

SAE – Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República

SGB - Serviço Geológico do Brasil

UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....12
2. OBJETIVOS.....14
2.1. OBJETIVO GERAL.....14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....15
3.1. A INDÚSTRIA MINERAL NO CONTEXTO ATUAL.....15
3.1.1. Panorama histórico e relevância econômica da mineração.....15
3.1.2. Impactos socioambientais ao longo do ciclo de vida da atividade mineral.....18
3.1.3. Desafios contemporâneos frente às exigências ambientais e regulatórias.....22
3.1.4. Panorama Atual da Mineração no Brasil.....24
3.2. SUSTENTABILIDADE NO SETOR MINERAL.....25
3.2.1. Conceito de sustentabilidade aplicada à mineração.....25
3.2.2. Práticas sustentáveis consolidadas.....26
3.2.3. Limites do modelo convencional e necessidade de transformação sistêmica.....29
3.3. ECONOMIA CIRCULAR: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....30
3.3.1. Princípios e evolução da economia circular.....31
3.3.2. Plano Nacional de Economia Circular.....34
3.4. PRÁTICAS EM CIRCULARIDADE NO SETOR MINERAL.....35
3.4.1. Definição e origem da mineração circular.....35
3.4.2. A mineração circular no contexto internacional.....37
3.5. REMINERALIZADORES NO CONTEXTO DA MINERAÇÃO CIRCULAR.....40
3.5.1. Definição de remineralizador de solo.....40
3.5.2. Relevância do uso de remineralizadores no agronegócio.....42
3.5.3. Aplicações agrícolas e ambientais.....45
3.5.4. Desafios regulatórios e técnicos.....47
3.5.5. Exemplos práticos.....50
4. METODOLOGIA.....50
4.1. NATUREZA E ABORDAGEM DA PESQUISA.....50
4.2. TIPOLOGIA E FONTE DE DADOS.....50
4.3. ETAPAS METODOLÓGICAS.....51
4.4. JUSTIFICATIVA METODOLÓGICA.....52
5. RESULTADOS.....52
5.1. RESSIGNIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS MINERAIS NA LÓGICA CIRCULAR.....52
5.2. A CIRCULARIDADE EM PRÁTICA.....55
5.3. ESTUDO DE CASO.....59
5.4. POTENCIAIS DE EXPANSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS.....60
5.5. INDICADORES DE DESEMPENHO DA CIRCULARIDADE.....62
6. CONCLUSÕES.....64
6.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....65
6.2. CONTRIBUIÇÕES DOS ESTUDOS.....65
6.3. LIMITAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES.....66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....67

1. INTRODUÇÃO

A mineração circular consiste em uma abordagem inovadora que busca alinhar a atividade mineral aos princípios da economia circular, promovendo a eficiência no uso dos recursos minerais, a valorização dos resíduos ao longo de toda a cadeia produtiva e a mitigação dos impactos ambientais. Diferente do modelo linear tradicional, a mineração circular propõe um ciclo contínuo, em que rejeitos e subprodutos podem ser reaproveitados e transformados em insumos para processos produtivos, reduzindo a pressão sobre novas jazidas e contribuindo para a sustentabilidade. Segundo o relatório do Serviço Geológico do Brasil (SGB, 2023), em seu *Balanço Social 2023*, a instituição já aponta o "fomento à mineração circular para fornecimento de insumos para segurança alimentar" como parte de suas iniciativas estratégicas, demonstrando que rejeitos e subprodutos deixam de ser considerados apenas passivos ambientais para serem transformados em oportunidades.

Em escala global, estudos como o de Adewuyi (2024) destacam que a recuperação sólida–líquida de rejeitos de mineração pode reduzir ou eliminar a necessidade de grandes obras geotécnicas para disposição de rejeitos, como barragens, além de viabilizar a reutilização de materiais em processos produtivos. De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2022), a transição para modelos circulares envolve não apenas tecnologia, mas também integração entre pesquisa, indústria e políticas públicas, incentivando a reutilização de materiais e valorizando cadeias locais de fornecimento, aspectos fundamentais para que a mineração circular venha a ser implementada de modo eficaz.

O conceito de sustentabilidade é amplamente reconhecido como a capacidade de atender às necessidades presentes sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas próprias demandas, conforme estabelecido pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento no Relatório Brundtland (ONU, 1987). Essa noção integra três dimensões: a ambiental, voltada para a preservação dos ecossistemas; a social, relacionada ao bem-estar, à equidade e à justiça social; e a econômica, que busca assegurar crescimento e inovação de forma responsável. De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD, 2020), a sustentabilidade deve ser entendida como um equilíbrio entre o desenvolvimento humano e a conservação dos recursos naturais, garantindo resiliência frente às mudanças climáticas, à escassez de recursos e às desigualdades sociais.

Uma das principais pautas discutidas atualmente é justamente a minimização dos impactos ambientais decorrentes das ações humanas, com destaque para a redução de resíduos e o incentivo à reutilização e à reciclagem como estratégias centrais de sustentabilidade. Nesse

contexto, setores primários, como a mineração, vêm sendo desafiados a se enquadrar nessa nova realidade, adotando práticas que priorizem a gestão eficiente e circular de seus resíduos. Essa transição envolve a incorporação de princípios como a eficiência no uso de matérias-primas, o desenvolvimento tecnológico voltado ao aproveitamento de rejeitos e a implementação de medidas de mitigação e/ou compensação em áreas afetadas. Segundo o IBRAM (2022), a transição para modelos circulares no setor mineral envolve a reestruturação das cadeias produtivas para que o rejeito e o estéril deixem de ser vistos como passivos ambientais e passem a ser reintroduzidos nos processos produtivos ou utilizados em novos ciclos econômicos, como na produção de remineralizadores de solo e materiais para a construção civil. Também, de acordo com o SGB (2023), essa abordagem busca reduzir a pressão sobre novas jazidas, diminuir custos operacionais e ampliar a sustentabilidade do setor, promovendo o reaproveitamento de minerais descartados e a inovação tecnológica em processos de beneficiamento.

Conforme a Agência Nacional de Mineração, em conformidade com o Código de Mineração (ANM, 2022), “mineração é o conjunto de atividades coordenadas para o aproveitamento industrial de um bem mineral, desde a pesquisa até o beneficiamento do minério.” Trata-se, portanto, de uma atividade essencial para o fornecimento de matérias-primas a diversos setores industriais, mas também reconhecida por seus expressivos impactos socioambientais, que podem ocorrer desde o planejamento até a desativação do empreendimento. Entre os principais efeitos adversos destacam-se a degradação da paisagem, o desmatamento, a poluição e compactação do solo, a geração de resíduos e a disposição inadequada de rejeitos, além da redução da biodiversidade.

Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de transformar o atual modelo de mineração, historicamente intensivo no consumo de recursos naturais, como água, energia e combustíveis fósseis. Ademais, grandes volumes de insumos químicos são requeridos tanto para a extração quanto para o beneficiamento mineral. Esse padrão produtivo, baseado em um modelo linear de “extrair–utilizar–descartar”, tem gerado significativos impactos ambientais, como degradação de ecossistemas, emissão de gases de efeito estufa e geração de resíduos. A crescente pressão da sociedade, de organismos internacionais e de órgãos reguladores têm impulsionado a busca por práticas mais responsáveis, capazes de integrar a extração mineral à conservação ambiental. Nesse contexto, a mineração circular se apresenta como uma alternativa promissora e estratégica, representando uma mudança de paradigma que visa agregar valor econômico e social por meio da gestão sustentável dos recursos minerais.

Assim, é de extrema relevância investigar como os princípios da mineração circular

podem ser aplicados de forma prática e no setor mineral brasileiro, analisando seus fundamentos, desafios e oportunidades. Esse tipo de estudo contribui para consolidar um novo entendimento sobre a atividade mineradora, superando a visão restrita de um processo meramente exploratório e consolidando-a como agente de sustentabilidade territorial.

2. **OBJETIVOS**

Os objetivos definem a direção e a finalidade deste estudo, indicando o que se busca compreender e alcançar com a análise da mineração circular. Eles servem como guia para a investigação e para a construção das discussões ao longo do trabalho.

2.1. OBJETIVO GERAL

Analisar a mineração circular como proposta inovadora para o setor mineral, com base na identificação de seus princípios fundamentais e na investigação de seus potenciais para mitigar impactos ambientais e fomentar estratégias socioambientais sustentáveis.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Associar os princípios orientadores da economia circular aos desafios atuais da indústria mineral e às práticas sustentáveis;
- Analisar os potenciais de mitigação e compensação ambiental da mineração circular, considerando a redução da degradação ao longo do ciclo de vida da atividade;
- Apresentar o uso de rejeitos como remineralizadores para a agricultura como estratégia socioambiental associada à mineração circular.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente seção visa reunir as principais teorias, conceitos e debates acadêmicos que fundamentam o estudo sobre mineração circular, sua implantação no setor mineral e suas contribuições para a mitigação de impactos socioambientais.

3.1. A INDÚSTRIA MINERAL NO CONTEXTO ATUAL

Para a compreensão do papel da mineração circular, é necessário explorar o contexto atual da indústria mineral, seus desafios, impactos e caminhos em direção à sustentabilidade, como abordado a seguir.

3.1.1. **Panorama histórico e relevância econômica da mineração**

A mineração é uma das atividades mais antigas da humanidade que, ao longo do tempo, moldou as paisagens culturais e influenciou a evolução das civilizações em todas as partes do mundo. Há registros, desde a pré-história, da exploração mineral para a fabricação de armas e ferramentas, com o uso de pedras e metais rudimentares. Com o avanço de técnicas e conhecimento, a humanidade passou por períodos marcantes, como a Idade do Cobre, Idade do Bronze e Idade do Ferro, nas quais o domínio de metais foi a razão para avanços tecnológicos, sociais e econômicos de diversas sociedades antigas (MILANEZ, 2017). A mineração mudou de dimensão com a chegada da Revolução Industrial. O desenvolvimento de tecnologias de extração e beneficiamento mineral, foi impulsionado pelo aumento da demanda por matéria prima, ao mesmo tempo em que expandiu a escala de atividade mineral e sua degradação socioambiental. A mineração tornou-se uma atividade estratégica em nível mundial, desde que minerais como ferro, cobre e carvão tornaram-se imprescindíveis para o avanço industrial (LIMA; OLIVEIRA, 2015).

No Brasil, a atividade mineral foi de extrema importância para a colonização, a partir do ciclo do ouro e dos diamantes (Século XVIII), que promoveu a ocupação do interior e influenciou a formação e crescimento econômico e territorial do Brasil. Desde então, o país tem o seu setor mineral em expansão, devido a sua importância como produtor e exportador mundial de minérios, destacando-se atualmente ferro, alumínio, ouro, manganês e nióbio. Esse protagonismo, no entanto, trouxe dilemas relacionados com a distribuição desigual dos benefícios econômicos, além de promover a concentração de impactos em comunidades locais (IBRAM, 2021).

A produção mineral se tornou uma parcela significativa do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, devido ao fortalecimento do mercado global e a inserção do Brasil em cadeias internacionais de fornecimento de *commodities* minerais. O setor mineral brasileiro registrou, em 2023, um faturamento de aproximadamente R$250 bilhões, resultado da comercialização de minérios no mercado interno e externo, com destaque para o minério de ferro, seguido por cobre, níquel, ouro e alumínio, o que evidencia sua relevância econômica e a geração de milhares de empregos diretos e indiretos (IBRAM, 2023). Em 2024, o setor mineral brasileiro registrou um faturamento de aproximadamente R$270,8 bilhões, representando um crescimento de 9,1% em relação a 2023. Desse total, o minério de ferro respondeu por cerca de 59,4% do faturamento, equivalente a R$160,7 bilhões, seguido por cobre, ouro, níquel e bauxita. (IBRAM, 2025).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2025), os investimentos previstos para o setor mineral no período de 2025-2029 somam US$ 68,4 bilhões, representando um aumento de 6,6% em relação ao período anterior (2024-2028), conforme mostra a Figura 1.

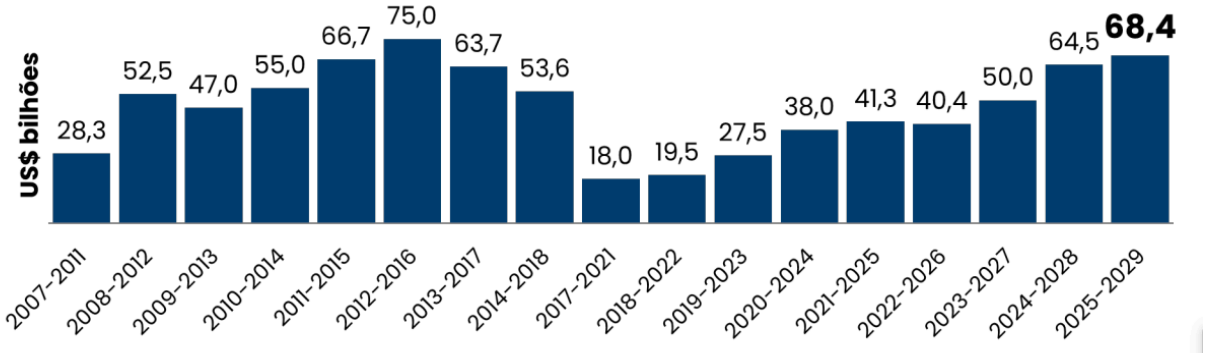


Figura 1 -*Estimativas de investimentos no setor mineral (2007-2029)*
Fonte: IBRAM (2025).

Além disso, a distribuição dos investimentos por segmento evidencia a predominância do minério de ferro (28,7%), seguido por projetos socioambientais (16,6%), logística (15,9%), cobre (10,7%) e fertilizantes (8,2%), entre outros, conforme apresentado na Figura 2.

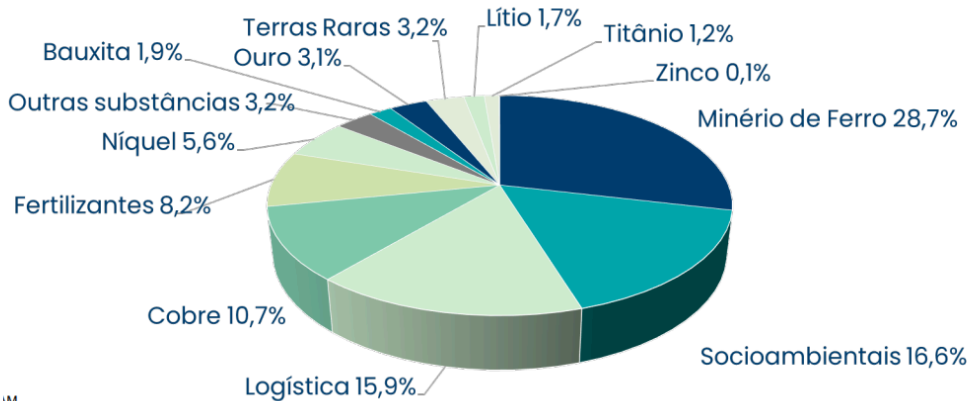


Figura 2 - *Distribuição das estimativas de investimentos no setor mineral por segmento (2025-2029)*
Fonte: IBRAM (2025).

A capacidade de atrair investimentos estrangeiros e promover o crescimento de infraestrutura em regiões marginalizadas também são fatores observados na relevância econômica da mineração. Em locais como Minas Gerais, esta atividade opera como principal meio econômico, interferindo diretamente na construção de estradas e redes logísticas (AQUINO, 2019). Porém, a vulnerabilidade à oscilação dos preços internacionais dos minérios, bem como a escassez de políticas públicas voltadas à diversificação econômica são fatores que comprometem o desenvolvimento dos territórios onde a atividade está inserida.

Por esses motivos, é importante observar que, mesmo que a mineração seja um setor estrategicamente relevante para o desenvolvimento nacional, o modelo linear baseado na extração intensiva se mostra incompatível com as demandas e cobranças atuais, voltadas diretamente para o bem-estar social, econômico e ambiental. Nesse contexto, a história da atividade mineral permite compreender sua evolução técnica e tecnológica, além da crescente exigência por modelos mais sustentáveis, como a mineração circular.

Também, iniciativas recentes do IBRAM (2024), como o IPS Mineração (índice que avalia o progresso social e ambiental) de 223 municípios mineradores a partir de indicadores de educação, saúde, saneamento, moradia, segurança e qualidade ambiental evidenciam que a relevância econômica do setor não pode ser analisada isoladamente. O IPS mostra que a mineração só contribui efetivamente para o desenvolvimento quando os benefícios sociais e ambientais acompanham o crescimento econômico. Assim, a própria mensuração do bem-estar nas regiões mineradoras reforça a necessidade de superar o modelo linear tradicional e avançar para abordagens mais sustentáveis, como a mineração circular.

3.1.2. **Impactos socioambientais ao longo do ciclo de vida da atividade mineral**

A exploração mineral é uma atividade essencial para a humanidade desde a pré-história e os bens minerais compõem um dos principais pilares que sustentam a prosperidade da sociedade atual. Porém, ao mesmo tempo que proporciona o crescimento econômico e benefícios sociais, ela ocasiona impactos socioambientais e, dificilmente, possibilita desenvolvimento equânime para todas as partes envolvidas. Na prática, ao passo que os principais bônus da atividade alcançam escala global, seus maiores ônus persistem localmente.

Para compreender os impactos decorrentes da mineração, é inevitável, primeiramente, analisar as diferentes etapas que integram seu ciclo produtivo, reconhecendo os agentes presentes em cada fase, assim como os efeitos causados pela integração entre esses elementos. A fase de pesquisa e prospecção busca detectar áreas de potencial mineral, seguida da realização de avaliação conjunta de exploração a fim de determinar a viabilidade e quantidade de minério. Nessa etapa, os impactos ambientais são em menor escala, atividades como perfuração exploratória e coleta de amostras podem gerar compactação do solo do local, perturbação da fauna, decréscimo da vegetação nativa e contaminação de aquíferos. Mesmo que essa fase não envolva grandes alterações ou volumes estruturais do solo, já podem ocorrer interferências em comunidades locais, especialmente em áreas sensíveis ambientalmente ou alocadas em territórios tradicionais (PORTELLA, 2015). Porém, é importante lembrar que, no contexto da mineração legal, toda e qualquer atividade deve obrigatoriamente passar por licenciamento ambiental, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA nº 237/1997, que define procedimentos, estudos e medidas de controle ambiental aplicáveis às diversas fases das atividades minerais, além da Política Nacional do Meio Ambiente, instituída pela Lei nº 6.938/1981, determina que atividades potencialmente poluidoras devem adotar medidas de prevenção, mitigação, monitoramento e compensação ambiental. Dessa forma, ainda nas etapas preliminares, os potenciais impactos sobre comunidades locais, recursos hídricos e áreas ambientalmente sensíveis devem ser avaliados e controlados, garantindo que a atividade ocorra de acordo com os princípios da prevenção e da responsabilidade ambiental previstos na legislação brasileira.

A mineração pode ser realizada sob diferentes modalidades: a céu aberto, subterrânea, subaquática e, mais recentemente, a mineração espacial. A mineração a céu aberto, foco deste trabalho, permanece como a modalidade mais empregada globalmente em função de sua viabilidade técnica e econômica. Contudo, é também aquela associada aos maiores impactos

ambientais, devido à necessidade de supressão vegetal, decapeamento de extensas áreas, movimentação de grandes volumes de solo e rochas, e geração de quantidades expressivas de estéril e rejeitos. Em contraste, a mineração subterrânea tende a provocar menor alteração paisagística, ainda que esteja associada a maiores riscos operacionais e geotécnicos, conforme amplamente reconhecido na literatura especializada.

A mineração subaquática tem se tornado tema recorrente em debates internacionais conduzidos pela Autoridade Internacional dos Fundos Marinhos (ISA) e em discussões nacionais promovidas pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB). Isso ocorre devido à ausência de regulamentações consolidadas e da crescente preocupação com potenciais impactos sobre ecossistemas bentônicos, a turbidez da coluna d'água e a integridade de áreas sensíveis no ambiente marinho. Esses debates refletem o avanço de tecnologias capazes de alcançar depósitos minerais em ambientes profundos, ao mesmo tempo em que evidenciam a necessidade de marcos regulatórios robustos para prevenir danos irreversíveis.

No caso da mineração espacial, embora ainda predominantemente teórica, o tema tem ganhado relevância no cenário internacional e acadêmico. Discussões recentes mostram que a exploração mineral em corpos celestes é uma possível alternativa futura para suprir a demanda crescente por minerais estratégicos, especialmente aqueles essenciais para a transição energética (*The Regulatory Review*, 2024). No entanto, essa perspectiva envolve problemáticas jurídicas sobre a compatibilidade de iniciativas privadas de exploração com o direito espacial internacional, especialmente o Tratado do Espaço Exterior de 1967, que estabelece o uso do espaço como patrimônio comum da humanidade.

Autores também têm destacado desafios relacionados à governança global, à desigualdade no acesso aos recursos extraterrestres e à necessidade de modelos normativos que garantam um benefício comum e equitativo entre países. Ademais, análises recentes realizadas no contexto brasileiro apontam que, embora a mineração espacial seja vista como uma alternativa promissora, seu desenvolvimento ainda é limitado pelo alto custo, pela complexidade tecnológica e por incertezas regulatórias (IGC-USP, 2025). A literatura nacional tem crescido nesse campo, incluindo obras que apresentam panoramas jurídicos sobre a mineração em outros corpos celestes e suas implicações para o arcabouço legal vigente (*Brazilian Space,* 2024).

A implantação de uma mina consiste na transformação de um depósito mineral em uma instalação produtiva, ou seja, quando a infraestrutura necessária para iniciar a extração é efetivamente no local, como por exemplo barragens de rejeito, estradas, alojamentos, entre outros. Nessa fase, os impactos se tornam mais significativos, segundo Gonçalves e

Mendonça (2015), a fragmentação de habitats, transformação da paisagem e contaminação de corpos d'água podem ser causadas pelas intervenções do meio físico. Em questões sociais, há a redistribuição de recursos, realocação da população, poluição sonora, e outros impactos que afetam diretamente a vida de moradores próximos à mina.

A operação é a mais longa e intensa, nesta fase a extração de minério é realmente realizada, envolvendo atividades como perfuração, desmonte, carregamento e transporte de minérios. Também são realizados a lavra e o beneficiamento do minério, os quais são atividades que lidam em larga escala com recursos naturais não renováveis, possuindo um alto consumo de água, substâncias químicas e energia. Os impactos ambientais gerados nesta operação podem abranger a poluição atmosférica, contaminação e assoreamento de corpos d'água, emissão de ruídos, geração de rejeitos (em grandes volumes) e alteração da qualidade do solo, como indicado por Lovón-Canchumani, Lima e Oliveira (2015).

Em vista social, essa etapa pode ocasionar impactos na saúde da população, aumento do custo de vida, marginalização de populações vulneráveis e restrição ao acesso de recursos naturais, por exemplo. Embora possua benefícios econômicos, como geração de empregos e arrecadações tributárias, por exemplo, não há uma distribuição equitativa, o que pode acarretar a desigualdade socioeconômica e disputa de territórios (AQUINO, 2019). É importante destacar que a mineração possui potencial transformador sobre o tecido socioeconômico local, desde que seja estruturada por um arranjo institucional claro, capaz de promover governança eficiente, planejamento participativo e mecanismos de redistribuição dos benefícios econômicos, de modo a fortalecer comunidades e reduzir vulnerabilidades sociais.

Por fim, a etapa de fechamento de mina é o processo de encerramento das atividades de exploração e extração de minério. Envolve a desativação do empreendimento, reabilitação de áreas degradadas, monitoramento ambiental e gestão de passivos. É a fase que apresenta maiores dificuldades para a sustentabilidade na mineração, quando não seguidas as normativas, como a Resolução ANM nº 68/2021, que estabelece critérios para o Plano de Fechamento de Mina, e a Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Também se aplicam as diretrizes da Resolução CONAMA nº 420/2009, sobre áreas contaminadas, e as normas do IBAMA e da própria ANM relacionadas à reabilitação ambiental e gestão de passivos. De acordo com o IBRAM (2024), o planejamento do fechamento de mina deve ir além da recuperação ambiental e da gestão de passivos, incluindo a preservação do tecido socioeconômico local. O guia recomenda que as empresas mineradoras, em conjunto com governos e comunidades, promovam a reintegração de

trabalhadores, a capacitação profissional e a diversificação econômica local, de modo que o encerramento das atividades possa gerar oportunidades de emprego e ocupação sustentável pós-mina. O instituto enfatiza que o fechamento não deve ser visto como abandono, mas como uma etapa estratégica que integra aspectos ambientais, sociais e econômicos do ciclo de vida do empreendimento.

O encerramento de uma mina sem o devido planejamento pode ocasionar o passivo ambiental. Segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 1990), passivo ambiental decorrente da atividade minerária pode ser definido como "Aquele que é gerado quando, no encerramento das atividades minerárias, não foi executada nenhuma ação ou projeto no sentido de recuperação do meio ambiente, possibilitando o seu retorno às condições originais ou restabelecimento das condições de equilíbrio", dentre eles, pode-se citar as áreas contaminadas, locais abandonados, perda de biodiversidade local, erosão do solo, entre outros. Além disso, também há a necessidade de destacar impactos sociais, uma vez que o fechamento repentino de atividades no local pode gerar desemprego em massa, abandono de infraestrutura pública e colapso na economia local. Ademais, esta fase requer um planejamento prévio, desde o início do projeto minerário, com a implantação de um Plano de Fechamento de Mina (PFM), o qual compete medidas de reestruturação ambiental e estratégias de monitoramento e controle ao longo prazo (IBRAM 2020).

Dessa forma, nota-se que a mineração, apesar de essencial para o avanço econômico e tecnológico, está associada com uma intrincada rede de impactos socioambientais, que possuem maneiras distintas de se manifestar ao longo do ciclo de vida da atividade. A Figura 3 apresenta, de forma esquemática, as quatro principais fases do ciclo de vida da mineração a céu aberto (prospecção, implantação, operação e fechamento)



Figura 3 - Fases da implantação de uma mina a céu aberto.
Fonte: Tetra Tech (2024)

3.1.3. **Desafios contemporâneos frente às exigências ambientais e regulatórias**

A maior rigidez atual nas exigências ambientais e regulatórias é reflexo da constante conscientização global sobre os impactos socioambientais da mineração, segurança e justiça ambiental e a necessidade de um modelo mais sustentável. O conjunto de leis que regem a mineração é amplo e complexo, nele, podemos citar o Código de Mineração (Decreto-Lei nº 227/1967), atualizado pela Lei nº 13.575/2017 que criou a ANM em substituição ao antigo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Além disso, o Decreto nº 9.406/2018 regulamenta o Código de Mineração e consolida as diretrizes sobre outorga, pesquisa, lavra e fechamento de mina, complementando o marco legal do setor. No campo ambiental, destacam-se a Política Nacional do Meio Ambiente (*Lei nº 6.938/1981*) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (*Lei nº 12.305/2010*), que dispõem sobre as obrigações relacionadas aos impactos socioambientais, à recuperação de áreas degradadas e à gestão de passivos ambientais.

Segundo relatório da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), o Brasil ainda possui muitos impasses em seu marco regulatório mineral, como a falta de coordenação entre agentes reguladores e demora nos processos de licenciamento ambiental. Essas falhas causam deficiência na governança do setor, comprometendo a adoção de novas práticas, como a mineração circular (OECD, 2022).

O Ministério de Minas e Energia (MME) reconhece os atuais obstáculos e defende a implementação de políticas públicas que promovam a segurança ambiental e jurídica, sem contrapor-se ao desenvolvimento econômico. A proposta visa colocar em igualdade os princípios de sustentabilidade e interesses econômicos, promovendo avanços tecnológicos.

Nesse cenário, a introdução à mineração circular é promissora, visto que sugere diversos métodos que visam o desenvolvimento sustentável, como a valorização de rejeitos remanescentes do tratamento inicial e a redução do uso de materiais não renováveis (Serviços e Informações do Brasil, 2023).

Outro aspecto promissor nos desafios regulatórios atuais é a implementação dos Direitos da Natureza, abordagem iniciante no ordenamento jurídico, mas que já causa impactos nas leis do Equador e Bolívia. Ela prevê que a natureza seja reconhecida como sujeito de direitos, promovendo novas formas de penalidades e responsabilidades em caso de impacto ambiental negativo (ACOSTA, 2016). Normas e guias técnicos não vigentes como da ABNT (NBR 13025:2017 e NBR 13029:2017), que, mesmo não tendo força legal, é exigida, principalmente após o rompimento das barragens em Mariana (2015) e Brumadinho (2019),

por órgãos licenciadores e seguradoras (ABNT, 2017; OCDE, 2022).

Países como Suécia e Austrália destacam-se por utilizarem técnicas regulatórias e mais eficazes no setor mineral, o que serve de incentivo ao Brasil. Essas nações aplicam políticas integradas as quais priorizam o desenvolvimento de tecnologias limpas. Para o Brasil, essa comparação internacional fortalece o marco regulatório brasileiro, aliado com práticas de mineração circular, que são essenciais para o alinhamento do país às exigências ambientais globais e competitividade no setor mineral (IBRAM, 2023).

Apesar da ampliação normativa, a efetividade de políticas ambientais na mineração continua apresentando entraves significativos na prática. A ausência de fiscalizações contínuas e integradas (especialmente em regiões remotas) continua sendo um dos principais desafios normativos. Segundo Milanez (2017), a fragilidade institucional e a escassez de recursos financeiros e humanos destinados aos órgãos de controle ambiental, à Agência Nacional de Mineração (ANM), ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e aos órgãos ambientais estaduais prejudicam a implementação das normas, beneficiando omissões, conflitos e degradação de ecossistemas. Essa limitação reforça a importância de se promover uma reforma na governança ambiental brasileira, com ênfase na transparência e na responsabilização das empresas, a recente Política Nacional de Ordenamento Territorial (PNOT), atualmente em fase de consulta pública e elaborada pelo Ministério do Desenvolvimento Regional, surge como um instrumento estratégico de planejamento e gestão do território nacional, ao propor diretrizes para o uso sustentável dos recursos naturais e a prevenção de conflitos socioambientais.

Finalmente, pode-se observar uma crescente demanda por políticas que associam justiça ambiental e participação social efetiva no planejamento e monitoramento de atividades mineradoras. A Convenção 169 da Organização Internacional do Trabalho (OIT), ratificada pelo Brasil, determina o direito das populações tradicionais à consulta livre, prévia e informada sobre empreendimentos que afetem seus territórios. Portanto, garantir a inclusão de diferentes atores sociais nas etapas de licenciamento e gestão dos recursos minerais é um passo essencial para consolidar uma mineração mais democrática, ética e alinhada aos princípios da sustentabilidade.

3.1.4. **Panorama Atual da Mineração no Brasil**

O setor mineral brasileiro apresentou, em 2024, um cenário de elevada relevância para a economia nacional, consolidando-se como um dos pilares do desenvolvimento socioeconômico do país. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (2024), a mineração registrou um faturamento de aproximadamente 250 bilhões de reais, resultado que reflete tanto a comercialização de minérios no mercado interno quanto às exportações, com destaque para o minério de ferro, cobre, ouro, bauxita, níquel e manganês.

Regionalmente, estados como Minas Gerais, Pará e Bahia continuam liderando a produção mineral, seguidos por Mato Grosso e Amapá. Minas Gerais mantém protagonismo no minério de ferro, enquanto Pará ganha destaque pela diversificação mineral, incluindo bauxita, cobre e manganês. Esse dinamismo reforça a relevância da mineração na interiorização do desenvolvimento econômico e na criação de cadeias produtivas locais.

Do ponto de vista socioambiental, o setor enfrenta o desafio de alinhar crescimento econômico e responsabilidade socioambiental. O relatório do IBRAM (2024) destaca a necessidade de consolidação de práticas de ESG, a ampliação do uso de energias renováveis e a implementação de soluções de economia circular. Nesse contexto, práticas como o reaproveitamento de rejeitos e estéreis e a adoção de remineralizadores, por exemplo, tornam-se fundamentais para assegurar maior sustentabilidade à atividade mineral no longo prazo. Eles correspondem a insumos obtidos a partir de rochas moídas, ricos em nutrientes, que podem ser aplicados ao solo para melhorar sua fertilidade e promover a recuperação de áreas degradadas, reduzindo a dependência de fertilizantes químicos convencionais.

Além disso, o debate em torno da mineração brasileira da atualidade evidencia a crescente pressão da sociedade civil e de organismos internacionais para que o setor adote modelos de governança mais transparentes e inclusivos, capazes de minimizar os impactos sociais e ambientais. Questões como a gestão hídrica, a redução das emissões de gases efeito estufa e a proteção da biodiversidade permanecem como prioridades estratégicas, alinhadas tanto às metas nacionais de sustentabilidade quanto aos compromissos assumidos pelo Brasil em acordos multilaterais.

Portanto, o panorama da mineração no Brasil em 2024 reflete um setor robusto, ao mesmo tempo em que enfrenta o desafio de harmonizar competitividade internacional com inovação tecnológica e práticas socioambientais responsáveis. Essa conjuntura reforça a importância de novos paradigmas e de instrumentos regulatórios que incentivam maior eficiência no uso de recursos naturais, a valorização de resíduos e a regeneração dos ecossistemas afetados.

3.2. SUSTENTABILIDADE NO SETOR MINERAL

Uma vez falando de mineração circular, torna-se indispensável o entendimento de sustentabilidade em seu setor, uma vez que, este conceito se fortalece nas discussões sociais, industriais e econômicas globais. A seguir, serão abordadas diferentes dimensões da sustentabilidade aplicada à mineração, citando fundamentos teóricos, desafios práticos e estratégias emergentes.

3.2.1. **Conceito de sustentabilidade aplicada à mineração**

Sustentabilidade é a capacidade de atender as necessidades atuais sem comprometer as gerações futuras de suprirem as próprias, assegurando a preservação de recursos naturais, justiça social e viabilidade econômica. Este conceito aplicado à mineração é algo complexo, pois a natureza de sua atividade é finita, ou seja, gera modificações ambientais significativas. Porém, com o planejamento adequado e tecnologias sustentáveis, é possível unir a atividade mineral com o desenvolvimento sustentável.

De acordo com Sanches e Morse (2014), um empreendimento mineral é considerado sustentável caso cumpra critérios ambientais, sociais e econômicos em seu planejamento, operação e fechamento da mina, incluindo o uso eficiente de recursos, prevenção de riscos ambientais e respeito às comunidades locais. O Conselho Internacional de Mineração e Metais (ICMM, 2015) reitera que, a mineração sustentável necessita se basear em princípios como a responsabilidade socioambiental, respeito aos direitos humanos e transparência.

Para a medição do nível de sustentabilidade em projetos de mineração, são adotados os indicadores ambientais, ferramentas que medem e acompanham o desempenho de atividades humanas em relação aos princípios do desenvolvimento sustentável. Eles podem incluir diversos fatores como taxa de recuperação de áreas degradadas, intensidade de uso de água, emissões de gases, porcentagem de resíduos reaproveitados, por exemplo. Na visão social, podem ser avaliados aspectos como oportunidade de empregos locais, melhora na qualidade de vida e investimentos na saúde. Já os econômicos medem análise de rentabilidade, diversificação econômica e continuidade de renda após o fechamento da mina (Silva e França, 2020). Estudos como os de Assis Dantas et al. (2013) mostram incentivos metodológicos de indicadores ambientais em municípios mineradores, o que expõe a possibilidade de monitorar continuamente os impactos e benefícios da mineração.

Além dos indicadores, documentos como o relatório do Ministério do Meio Ambiente

(MMA, 2011) ditam práticas para aumentar a sustentabilidade na atividade mineral, como a análise do ciclo de vida de rejeitos, responsabilidade ambiental das empresas responsáveis pela mina e sistemas de gestão socioambiental. Essas alternativas podem mitigar impactos e suprir a valoração de boas práticas como o uso de fontes renováveis, por exemplo.

Por fim, esses processos guiados por políticas públicas bem estruturadas podem migrar a mineração tradicional para a circular, tornando-a uma atividade mais ética e alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Tabela 1 - Indicadores de sustentabilidade da mineração na dimensão ambiental.
Fonte: IBRAM (2023-2025)

Indicador ESG	Descrição
Participação de mulheres no setor mineral	Aproximadamente 21% em 2023, com meta setorial de 34% até 2030.
Uso de água nova (m³ por tonelada de ROM)	Indicador reforçado pelo IBRAM: tendência recente de redução; meta 2030: 0,237 m³/ton.
Proporção de energia renovável na matriz energética	Subiu para cerca de 43% (2022); meta 2025: 44%.
Percentual de resíduos não-minerários reciclados	Em crescimento: 62% (2022); meta 2030: 90%.
Relação entre áreas protegidas e áreas impactadas	Índice estável entre 10–11 nos últimos anos; meta 2030: 11,8.
Investimentos em P&D e inovação	2022: 0,34% da receita; meta 2030: 0,40%.

3.2.2. **Práticas sustentáveis consolidadas**

Como citado anteriormente, a sustentabilidade na mineração é inevitável para o futuro da atividade, além de ser um tópico frequentemente discutido em fóruns internacionais, como demonstram os relatórios da *International Seabed Authority*, que destacam a necessidade de equilibrar a exploração mineral com a preservação ambiental (ISA, 2021), e as publicações do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, que reforçam a urgência de promover uma governança mineral alinhada ao desenvolvimento sustentável (UNEP, 2019).

De acordo com o Boletim Institucional, publicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2022), práticas como gestão hídrica integrada e implantação de Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) já estão em prática. Essas ações foram

intensificadas pela exigência de licenciamento ambiental rigoroso e fiscalização de minimização de danos ao meio ambiente. Entre as práticas em consolidação destacam-se o reaproveitamento de rejeitos, que podem ser utilizados tanto na construção civil quanto na agricultura, com a produção de remineralizadores agrícolas, alternativa que vem ganhando destaque por unir redução de passivos ambientais e geração de valor

Adicionalmente, o IBRAM apresenta uma análise de 20 anos de ações sustentáveis na atividade mineral, com casos de sucesso na reabilitação ambiental, usos de fontes de energia sustentável e monitoramento da qualidade da água. O estudo mostra que 75% das empresas associadas do IBRAM adotam políticas de ESG, destacando ideias que vão desde a valorização do ecossistema até inclusão de comunidades locais, como recuperação de áreas degradadas com espécies nativas e promoção da qualificação de nativos. Por fim, este percentual representa empresas que se posicionam a favor dos princípios da ICMM e ODS da ONU. (IBRAM, 2021).

As ações sustentáveis não se limitam apenas às questões físicas da mina, o planejamento do uso e cobertura do solo e sensoriamento territorial também se enquadram como responsabilidade da mineradora, principalmente quando se trata de locais com alta densidade populacional (nativas ou não). O MME comprova que projetos atuais apresentam estudos de impactos sociais, avaliações de riscos e segurança na infraestrutura, principalmente na fase de licenciamento da obra (MME, 2022). A adoção de novas tecnologias digitais, também são de extrema importância para a previsão de possíveis desastres, como rompimento de barragens, controle de emissões de gases tóxicos e melhor transparência nas obras e funcionamento das minas, por exemplo. O uso de dados online voltados para a sustentabilidade promove avanços reais para a diminuição de danos e assim, elevar a rastreabilidade em tempo real dos processos de projeto, implantação e operação da mina (ICMM, 2021).

Segundo o MME (2022), a obrigatoriedade da prática de recuperação e restauração de áreas degradadas, por exemplo, trouxe a adoção comum da reconversão de áreas para uso agroecológico e restauração de ecossistemas. Atividades como essas trazem diversos benefícios ambientais, como compensação de danos, e promovem serviços ecossistêmicos e o fortalecimento de economias locais. Além disso, programas de capacitação e inclusão social ajudam no fortalecimento do capital humano, ademais, se mostram essenciais na sustentabilidade mineral. A adoção de equidade nas contratações, movidos pela educação técnica em regiões onde a mineração é forte em parcerias com as universidades para aumentar

o conhecimento em pesquisas aplicadas à mineração sustentável, são projetos adotados atualmente pela maioria das empresas mineradoras.

Estas mudanças estruturais da indústria são fruto das pressões regulatórias investidas, da sociedade civil e da adoção de práticas ESG pelos empreendimentos. O entendimento de mineração moderna é definido pela junção entre responsabilidade ambiental, justiça social e empreendedorismo, como reforçado pelo MME (2022), práticas consolidadas são demandadas para a continuidade do setor.

A Figura 4 apresenta o ranking dos 10 principais riscos e oportunidades para o setor de mineração em 2025, conforme o estudo global da *Ernst & Young* (EY). Cada faixa representa um risco e sua posição no ranking, enquanto os símbolos indicam sua variação em relação a 2024, setas verdes mostram temas que subiram, setas laranjas indicam queda, faixas roxas apontam estabilidade e a estrela azul identifica riscos que surgiram como novos em 2025.

Os resultados mostram que Capital ocupa a primeira posição, refletindo a crescente disputa por investimentos em um cenário global mais restritivo. Em seguida, destacam-se *Environmental Stewardship* (gestão ambiental) e Geopolítica, evidenciando que medidas de governança ambiental, proteção de recursos naturais e estabilidade geopolítica tornaram-se fatores estratégicos centrais para a competitividade do setor mineral. Temas como esgotamento de recursos e reservas, licença para operar, custos operacionais e produtividade e mudanças climáticas permanecem entre os riscos estruturantes, reforçando a necessidade de maior eficiência no uso de recursos naturais e de fortalecimento da governança socioambiental. A figura também evidencia o crescimento de *Environmental Stewardship*, que sobe no ranking e consolida a prioridade dada à gestão de impactos, proteção ambiental e atendimento às expectativas sociais. Além disso, a entrada de novos projetos e o reposicionamento de áreas como inovação e modelos de negócio em transição demonstram que o setor tem buscado se adaptar às pressões por sustentabilidade, resiliência climática e redução de riscos operacionais.

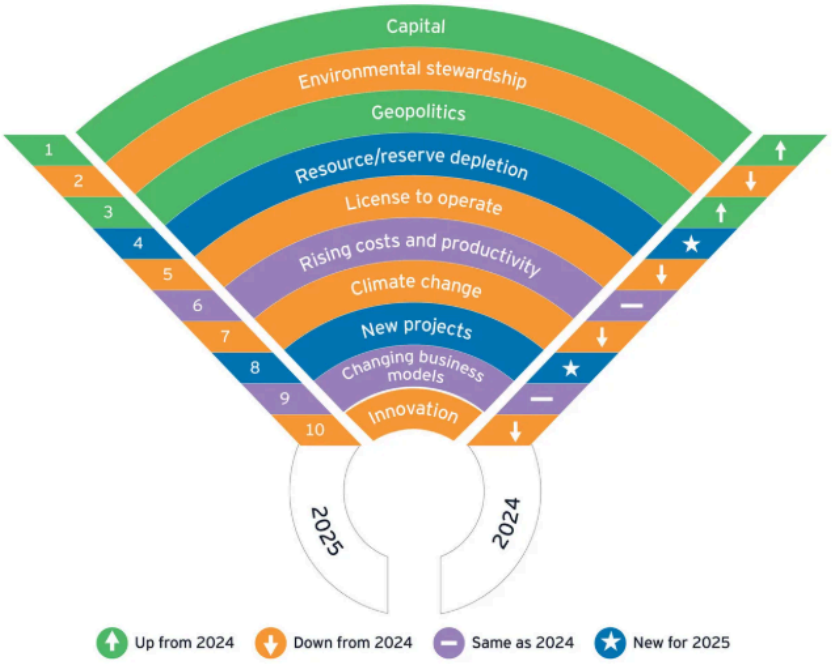


Figura 4 - Principais riscos e oportunidades para a mineração em 2025.

Fonte: *Ernst & Young* (2025)

3.2.3. **Limites do modelo convencional e necessidade de transformação sistêmica**

O modelo convencional de mineração é incompatível com os atuais desafios institucionais, baseando-se na lógica linear, a qual segue a linearidade de extração, processamento, utilização e descarte. Sua principal característica é a abordagem extrativista intensiva, com alta demanda de recursos naturais e, consequentemente, significativa geração de resíduos. Nessa lógica, o modelo convencional comparado com as exigências contemporâneas se torna limitado.

Das fragilidades desse esquema, pode-se ilustrar, por exemplo, o esgotamento gradual de jazidas, dificuldades na disposição de rejeitos e o acúmulo de passivos ambientais não remediados. Diante das complexidades dos impactos gerados pelo ciclo de vida da mina, é nítido que o modelo tradicional de mineração não acompanha e não oferece respostas adequadas para a evolução sustentável global, principalmente nas fases de operação e encerramento, elas que concentram os maiores riscos de degradação ambiental. Além disso, como citado anteriormente, falhas significativas na gestão de barragens de rejeitos, como as ocorridas em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), evidenciam os riscos associados a uma cultura conservadora de baixa prevenção (Silva e França, 2020). O modelo linear, ao descartar grandes volumes de rejeitos, desperdiça oportunidades de reinserção produtiva, como no caso dos remineralizadores, que poderiam transformar materiais de baixo valor em insumos

agrícolas estratégicos para a recuperação de solos e redução da dependência de fertilizantes químicos.

Também, o modelo tradicional apresenta limitações nos campos social e econômico. As comunidades locais são as mais prejudicadas com impactos diretos advindos da mineração, como perda de qualidade de vida, geração de poluição atmosférica e fragilidade na saúde pública, além de impactos indiretos, como conflitos territoriais e perdas culturais. Ademais, este modelo demonstra fragilidade no setor econômico, com oscilações no mercado mundial, como crises externas e volatilidade dos preços. Com isso, o foco em ganhos imediatos limita a contribuição para o desenvolvimento sustentável.

A ineficiência no uso de recursos é outro aspecto crítico, os baixos índices de aproveitamento de matéria-prima e elevado consumo de água são frutos da operação de processos de extração mineral. Segundo Silva e França (2020), diversas operações excluem o potencial dos materiais de serem reaproveitados, desperdiçando recursos que poderiam ser inseridos na cadeia produtiva, com sua aplicação em outros setores como a agricultura ou construção civil. Esses feitos ampliam os impactos ambientais e, também, aumentam a chance de perda de valor econômico.

No Caderno 5 do Plano Nacional de Mineração 2050, o MME (2022) reconhece que o comprometimento da integridade dos ecossistemas e a ameaça da legitimidade social da atividade minerária são resultados da persistência desse modelo linear. O documento projeta mudanças do padrão, guiadas por uma transição sistêmica que engloba os princípios da ODS à logística produtiva. Neste contexto, a mudança para modelos circulares implica na redefinição completa da cadeia mineral, sem exclusão de nenhuma das fases da atividade. É necessário abandonar a lógica da extração predatória e inserir na mineração regenerativa, observando os recursos minerais como finitos e adotar práticas a favor do meio ambiente.

3.3. ECONOMIA CIRCULAR: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A economia circular é essencial para a reestruturação de setores produtivos marcados pela linearidade, além de ser a base que sustenta o novo modelo de mineração, cuja ideia central é a reintegração de resíduos na cadeia produtiva. A seguir, serão aprofundados os principais conceitos que moldaram esse paradigma.

3.3.1. **Princípios e evolução da economia circular**

Segundo a Confederação Nacional da Indústria (2019), em modelos de negócios lineares tradicionais, os recursos minerais são extraídos, beneficiados e utilizados na fabricação de produtos que, ao final de sua vida útil, são descartados. No entanto, essa lógica já não atende às exigências das cadeias de suprimentos contemporâneas, marcadas por uma crescente demanda, metas de sustentabilidade e regulamentos ambientais cada vez mais rigorosos, como explicado anteriormente. Diante disso, a economia circular emerge como uma abordagem transformadora, redefinindo a forma como consumimos e gerimos os recursos naturais.

Aplicada à mineração, essa lógica representa uma mudança de paradigma, na qual o setor deixa de ser apenas extrator de recursos e passa a incorporar práticas que buscam reduzir o desperdício, prolongar a vida útil dos materiais e regenerar os sistemas naturais. A circularidade nesse contexto tem como base o desenho inteligente de processos e produtos, o compartilhamento, a manutenção, a reutilização, a remanufatura e a reciclagem de materiais.

O reaproveitamento de rejeitos e estéreis, por exemplo, que historicamente foram tratados como passivos ambientais e econômicos, passa a ser visto como uma oportunidade para inovação e geração de valor. Ela desenvolve um sistema econômico restaurativo e regenerativo, buscando manter componentes e materiais em seus mais altos níveis de utilidade e valor ao longo do tempo (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015). Segundo a CNI (2019), os ideais centrais que estruturam o novo modelo econômico baseiam-se em 4 (quatro) propostas que dialogam com o conceito de *Cradle to Cradle* (BERGSTEINER; AVERY, 2011), o qual advoga a reestruturação de processos industriais visando a reutilização de materiais sem perda de qualidade, propondo:

I. Eliminação da geração de resíduos desde a concepção;
II. Prolongação do ciclo de vida dos produtos e materiais;
III. Uso eficiente e contínuo de recursos;
IV. Regeneração dos sistemas naturais.

A evolução da nova economia como modelo econômico é resultado da combinação de diversos campos de conhecimento, como a economia do desempenho, *design* sistêmico e ecologia da indústria. Geistdoerfer et al. (2017) dizem que a economia circular se firmou, ao longo da última década, como uma das estratégias fundamentais para o desenvolvimento

sustentável. Sua aplicação deixou de ser exclusiva de nichos industriais e passou a ser introduzida em políticas públicas e estratégias empresariais, principalmente em países da OCDE e China. Também, mais do que reciclar, a economia circular propõe uma mudança sistêmica capaz de gerar benefícios ambientais, sociais e econômicos, aumentando a resiliência das cadeias produtivas e promovendo uma atividade produtiva mais eficiente e criando uma atmosfera focada em minimizar o desperdício e o valor do sistema produtivo seja elevado ao máximo.

No Brasil, estas ideias encontram respaldo legal em instrumentos como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010). Também são relevantes a este direcionamento a Lei nº 6.938/1981, que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente, o Código de Mineração (Decreto-Lei nº 227/1967, atualizado pela Lei nº 13.575/2017), a Resolução ANM nº 85/2021, que regulamenta o reaproveitamento de rejeitos e estéreis, e a Política Nacional de Mineração 2050 (PNM 2050), a qual estabelece diretrizes estratégicas para a mineração sustentável no país. Soma-se a esse arcabouço o Projeto de Lei nº 3899/2012, recentemente aprovado, que institui a Política Nacional de Economia Circular (PLANEC), criando um marco regulatório específico para a transição circular no Brasil. Em nível internacional, destaca-se ainda a ISO 59004:2024 – Economia Circular: Estrutura e Princípios, que orienta governos e setores produtivos na adoção de modelos circulares e sustentáveis.

Complementando essa visão, a Fundação Ellen MacArthur (2015) propõe mudanças exigentes nos modelos de negócios, nas cadeias de suprimento e, até mesmo, no comportamento dos consumidores para que haja uma transição efetiva para a circularidade. A economia circular deve ser encarada como uma nova situação estratégica para o desenvolvimento promissor da competitividade e sustentabilidade na indústria brasileira, principalmente pelo olhar global, como exemplificado a seguir:

I. **Modelo de negócios:** adoção de estratégias “produto como serviço” e extensão da vida útil dos produtos;
II. **Cadeias de suprimentos:** reorganização dos fluxos de materiais;
III. **Comportamento do consumidor:** estímulo a práticas de consumo consciente e menor dependência de posse.

Ainda que não possuam força legal, normas como ABNT NBR 10004:2004 (que classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos) e as diretrizes voluntárias de ESG

(amplamente exigidas por instituições financeiras e investidores) têm ampliado o alcance da economia circular em setores de alto impacto.

Tabela 2 - Economia circular na mineração.

Categoria	Instrumento	Conteúdo / Aplicação
Política Ambiental	Lei nº 6.938/1981 – Política Nacional do Meio Ambiente	Estabelece princípios de preservação ambiental, controle da poluição e uso racional dos recursos naturais.
Gestão de Resíduos	Lei nº 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos	Institui a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e incentiva a reutilização, reciclagem e logística reversa.
Regulação da Mineração	Decreto-Lei nº 227/1967 (atualizado pela Lei nº 13.575/2017)	Dispõe sobre a atividade mineral, exigindo planos de aproveitamento econômico e recuperação ambiental das áreas impactadas.
Fechamento de Mina	Resolução ANM nº 85/2021	Estabelece diretrizes para apresentação, análise e aprovação do Plano de Fechamento de Mina, visando mitigar impactos ambientais e sociais.
Normas Técnicas	ABNT NBR 10004:2004 – Resíduos Sólidos	Define critérios para classificação de resíduos sólidos quanto à sua origem, periculosidade e destinação adequada.
Princípios Circulares	Ellen MacArthur Foundation (2013; 2015)	Defende a preservação do valor dos materiais, eliminação de resíduos desde a concepção dos produtos e regeneração dos sistemas naturais.
Sustentabilidade e Design	Cradle to Cradle (Bergsteiner; Avery, 2011)	Propõe processos industriais baseados em ciclos fechados, com reaproveitamento contínuo dos materiais, sem perda de qualidade.
Diretrizes Industriais	CNI (2019) – Economia Circular no Brasil	Apresenta a economia circular como estratégia para aumentar a competitividade e promover a sustentabilidade.
Diretrizes Internacionais	ISO 59004:2024 – Economia Circular	Define a estrutura e os princípios para implementação da economia circular em processos, produtos e modelos de negócio, aplicável globalmente.

Política Setorial	PNM 2050 – Política Nacional de Mineração	Estabelece diretrizes estratégicas de longo prazo para a mineração no Brasil, incluindo sustentabilidade, inovação tecnológica e economia.
Marco Nacional de Circularidade	PLANEC – Política Nacional de Economia Circular	Consolida princípios e ações para transição circular no país, integrando setores produtivos
Política de Economia Circular	PL 3899/2012- Institui a PLANEC	Cria o marco legal da economia circular no Brasil, estabelecendo diretrizes, objetivos e instrumentos para promover produção sustentável

3.3.2. **Plano Nacional de Economia Circular**

A consolidação da economia circular como modelo principal econômico no Brasil ganhou importância com a formação do Plano Nacional de Economia Circular (PLANEC), publicado em 2025 pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), no âmbito da Estratégia Nacional da Economia Circular (ENEC), instituída pelo Decreto nº 12.082/2024. Ele apresenta um novo ciclo na gestão dos recursos naturais, ao promover o desenvolvimento econômico voltado à regeneração ecológica, inclusão produtiva e inovação, auxiliando a transição brasileira do modelo linear para o sistema circular.

Os três princípios em que o PLANEC está ancorado são os mesmos fundamentados pela Fundação Ellen MacArthur (2015) e o conceito de *Cradle to Cradle* (BERGSTEINER; AVERY, 2011), todos centrados na lógica de reaproveitamento e reconfiguração sistêmica do modo de produção e consumo. A operacionalização deles está distribuída em cinco principais eixos estratégicos: Ambiente Normativo; Inovação e Cultura; Uso eficiente de recursos; Instrumentos Econômicos e Governança Territorial. Cada um desses eixos abrange indicadores e ações específicas a serem implementadas no período de 2025-2034, sendo 18 macro objetivos e 71 ações estratégicas. Entre os compromissos, pode-se citar o incentivo ao design circular, estímulo ao "produto como serviço" e a valorização de resíduos.

Em termos legais, o plano fortalece alguns dos principais instrumentos normativos brasileiros, como a Lei 12.305/2010 (PNRS), Lei nº 12.187/2009 (Política Nacional sobre Mudanças Climáticas), Lei nº 14.260/2021 (reciclagem) e o Código de Mineração

(Decreto-Lei nº 227/1967). A versatilidade do PLANEC também tem alinhamento com os ODS, Acordo de Paris e Convenção da Diversidade Biológica.

O plano se destaca pela inclusão socioeconômica, propondo ações para a valorização do trabalho de catadores de materiais recicláveis, cooperativas e comunidades tradicionais, o qual incentiva a equidade de negócios circulares. No setor industrial, prevê incentivos à reconfiguração de cadeias produtivas utilizando o conceito de "valor residual" como modelo inovador.

Em relação à mineração, o setor intensivo com grande geração de rejeitos é visto pelo PLANEC como uma nova forma de integração de indicadores de circularidade no processo de licenciamento ambiental, de incentivo à valorização de resíduos minerais e à recuperação de áreas degradadas. Tem-se um novo paradigma que impõe a atividade mineral como agente ativo na regeneração ambiental e econômica. Assim, o plano consegue materializar os fundamentos teóricos da circularidade em políticas públicas concretas, conduzindo tanto a inovação tecnológica e ambiental, como no comprometimento político. É um marco grandioso para destacar o Brasil como um polo na construção de uma economia inovadora.

3.4. PRÁTICAS EM CIRCULARIDADE NO SETOR MINERAL

A mineração circular é uma abordagem inovadora fundamental para o avanço sustentável e crescimento econômico do país. Com isso, é necessário o melhor entendimento de seus processos e inovações, como serão abordados abaixo.

3.4.1. **Definição e origem da mineração circular**

A mineração circular é um conceito que se introduz na transição global atual para modelos de negócios sustentáveis, tendo como princípio as bases da economia circular aplicada ao setor mineral. Enquanto a mineração tradicional segue a lógica linear, a proposta do novo modelo prevê total reestruturação desse fluxo, focado na otimização de recursos, revalorização de resíduos e mitigação dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida da atividade (SILVA; FRANÇA, 2020).

Sua origem conceitual está relacionada ao movimento internacional da economia circular, sendo aplicada mais recentemente aos setores intensivos em reuso, como mineração e metalurgia. Seu conceito é moldado a partir da integração de princípios de circularidade que propõem a transformação de resíduos da mineração em insumos econômicos, dentro da

própria cadeia mineral e em outros setores, como a indústria de cerâmica, construção civil e agricultura (ICMM, 2019).

Na perspectiva brasileira, esse modelo vem sendo altamente discutido e incorporado em iniciativas institucionais. O estudo de Silva e França (2020), publicado pelo CETEM/MCTI, demonstra o conceito como uma nova forma de agregar valor aos rejeitos e estéreis, promovendo o redirecionamento dos fluxos de matéria-prima para novos usos e aumentando a eficiência do pós-uso dos recursos. Esta nova conduta reforça as exigências da utilização de um planejamento integrado em todas as fases de atuação de uma atividade mineral, com a incorporação de indicadores de sustentabilidade e circularidade nos projetos como licenciamento e monitoramento.

No contexto do PLANEC (2025-2024), a mineração circular é admitida como uma das frentes de ações de destaque para garantir a regeneração dos sistemas naturais e a promoção da justiça socioambiental. Segundo o plano, a circularidade na atividade mineral deve seguir ações como a reutilização de água, uso de subprodutos minerais (como remineralizadores agrícolas) e recuperação de áreas degradadas. Essas medidas melhoram as oportunidades econômicas, sociais e benefícios ambientais em regiões dependentes da mineração.

Já, a base normativa brasileira para o avanço da circularidade na mineração encontra amparo em legislações e estratégias complementares, que reforçam a transição prática para a sustentabilidade. A Lei nº 14.119/2021, que institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA), incentiva a compensação por ações de conservação, incluindo iniciativas de recuperação de áreas de atividade mineral. Em relação ao campo internacional, acordos como a Agenda 2030, Pacto Global da ONU e a Convenção da Basiléia sobre o Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos também marcam a formulação de parâmetros sobre responsabilidade compartilhada, inclusive na mineração. Nas normas técnicas como a ABNT NBR 13028:2017, que trata da disposição de rejeitos e desativação dessa estrutura, e a ISO 14044:2006, voltada à avaliação do ciclo de vida (ACV), oferecem contribuições metodológicas para incluir a circularidade no setor. Além disso, discussões atuais sobre tributação verde, logística reversa multissetorial e planos estaduais de resíduos sólidos fomentam caminhos para a regulamentação futura que contribui para uma estrutura jurídica mais integrada com os desafios atuais.

Nesse cenário, destaca-se também a mineração urbana, considerada uma vertente complementar e estratégica dentro da economia circular. A mineração urbana consiste na recuperação de materiais presentes em resíduos eletrônicos, veículos descartados, sucatas

metálicas, baterias e resíduos da construção civil, importantes fontes de metais críticos para tecnologia e transição energética (GUTOWSKI et al., 2017). Sua integração ao conceito de mineração circular reduz a pressão sobre novas frentes de lavra, fortalece a segurança mineral e aumenta a recuperação de recursos de alto valor contidos nos resíduos urbanos.

Finalmente, este novo caminho serve para alinhar às exigências contemporâneas de sustentabilidade, inovação e responsabilidade social. Trata-se de uma mudança de paradigma, que exige políticas públicas integradas, incentivo à pesquisa e desenvolvimento e reformulação normativa. Ao propor um uso inteligente dos recursos, essa tática demonstra um leque de oportunidades concretas para que a mineração seja um vetor de justiça socioeconômica e socioambiental no mundo.

A mineração circular propõe justamente esse redirecionamento de fluxos, em que rejeitos antes considerados passivos são reaproveitados em novos usos, como na produção de remineralizadores, fortalecendo a conexão entre o setor mineral e a agricultura.

3.4.2. **A mineração circular no contexto internacional**

A mineração circular tem ganhado destaque internacional como um modelo para reduzir a dependência de recursos primários, mitigar impactos ambientais e inserir a indústria extrativa nas metas globais de descarbonização e economia circular. Nos últimos anos, países como Suécia, Alemanha e Canadá passaram a integrar políticas industriais, inovação tecnológica e gestão avançada de rejeitos para estruturar cadeias produtivas mais eficientes e capazes de recuperar valor de resíduos minerais. Estudos internacionais indicam que a circularidade na mineração envolve a recuperação de minerais críticos em rejeitos, a reutilização de subprodutos, o aumento da reciclagem e a melhoria de processos metalúrgicos para reduzir perdas e emissões (GARCIA; THOMAS; WANG, 2023).

Na Suécia, a mineração circular se consolidou como eixo central da política mineral e da estratégia nacional de segurança de matérias-primas. A estatal *Luossavaara–Kiirunavaara AB* (LKAB) desenvolve projetos de extração de fósforo, terras-raras e compostos industriais a partir de rejeitos de minério de ferro, utilizando rotas físico-químicas avançadas para transformar passivos em insumos de alto valor agregado (Figura 5). Segundo o relatório técnico da empresa, tais iniciativas têm potencial para suprir parte significativa da demanda europeia por elementos terras-raras a partir de depósitos já existentes, reduzindo a necessidade de novas frentes de lavra (LKAB, 2024).

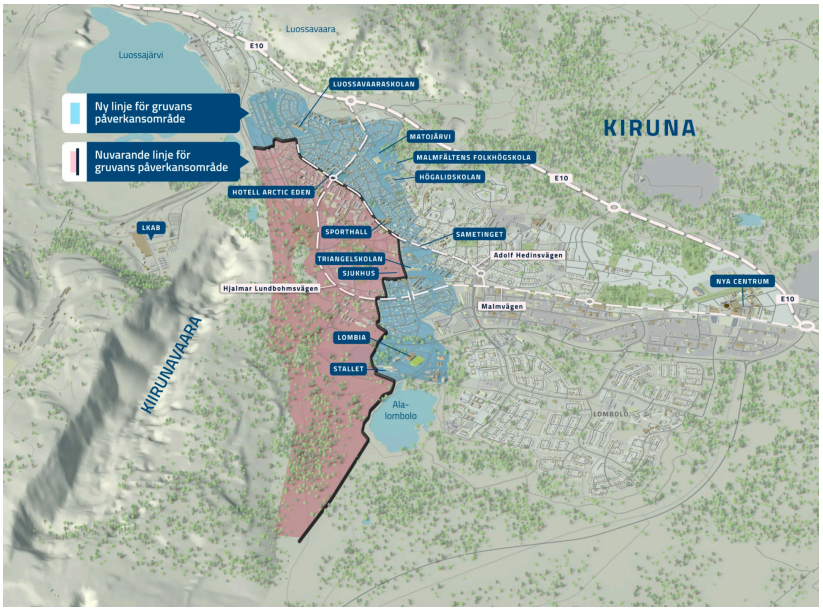


Figura 5. Instalações da *LKAB* para recuperação de fósforo e elementos terras-raras
Fonte**:** *LKAB* (2024). *Recovery of Phosphorus and Rare Earth Elements from Mining Residues.*

A imagem mostra parte do complexo industrial da *LKAB* em Kiruna, onde estão localizadas as instalações utilizadas para o Projeto *ReeMAP*, no centro da imagem observam-se as unidades de processamento e separação físico-química, responsáveis por concentrar os minerais residuais presentes nos rejeitos finos. Esses equipamentos fazem parte da rota tecnológica da *LKAB*, que envolve etapas como a reclassificação dos rejeitos, para liberar fosfatos e minerais portadores de terras-raras; a separação magnética e gravítica, utilizada para retirar partículas de ferro remanescentes e o refinamento químico, onde são extraídos produtos de alto valor agregado.

Já a Alemanha apresenta um dos quadros regulatórios mais desenvolvidos para a transição circular. A Estratégia Nacional de Economia Circular estabelece metas para a redução do uso de recursos primários, ampliação da reciclagem e estímulo à inovação em mineração e processamento mineral. No setor extrativo, projetos como o "*Blue Mining*" e iniciativas do *German Mineral Resources Agency* (*DERA*) investigam rotas para a recuperação de metais críticos em depósitos de rejeito por meio de tecnologias de dessedentação, separação fina e beneficiamento avançado (*DERA*, 2022). A abordagem alemã mostra que a mineração circular depende de políticas públicas que promovam incentivos econômicos, diretrizes técnicas e instrumentos regulatórios adequados.

Por fim, no Canadá, órgãos governamentais e consórcios científico-industriais têm tratado os depósitos de rejeitos como potenciais "reservas secundárias". O governo canadense destaca que a re-mineração de *tailings* (rejeitos de mineração resultantes do beneficiamento do

minério) pode fornecer minerais essenciais para baterias, energias renováveis e tecnologias de baixo carbono, embora ainda existam barreiras regulatórias, financeiras e tecnológicas que limitam a plena implementação (*GOVERNMENT OF CANADA*, 2024). Estudos recentes identificam desafios como a heterogeneidade mineralógica dos rejeitos, a falta de marcos regulatórios específicos e a necessidade de integrar custos de remediação ambiental às análises de viabilidade econômica dos projetos (*ACTION CANADA*, 2023). Ainda assim, o país tem ampliado o mapeamento nacional de depósitos de rejeitos e desenvolvido pilotos que combinam recuperação de metais e reabilitação ambiental, reforçando a visão de que a mineração circular pode simultaneamente reduzir passivos e gerar novas fontes de receita. (Figura 6).



Figura 6. Depósitos de rejeitos no Canadá utilizados para extração de minerais críticos
Fonte**:** Action Canada, *Critical Minerals and the Future of Tailings Re-Mining*, 2023..

Ao comparar esses três casos, observa-se um conjunto de práticas convergentes:

I. Investimentos em caracterização mineral detalhada para identificar elementos de interesse presentes em rejeitos;

II. Desenvolvimento de tecnologias de beneficiamento capazes de recuperar frações finas com segurança;

III. Criação de mercados para subprodutos minerários, como fertilizantes, agregados e insumos industriais;

IV. Fortalecimento de marcos regulatórios que incentivem o reaproveitamento de resíduos e a redução da extração primária.

Essas práticas internacionais dialogam diretamente com os princípios apresentados no contexto brasileiro, principalmente no que se refere à necessidade de transformar passivos ambientais em recursos circulares e de integrar universidades, governo e setor produtivo na formulação de políticas e tecnologias.

Assim, o panorama internacional demonstra que a mineração circular já é uma realidade estratégica em países líderes do setor mineral e que sua implementação depende de ações estruturantes em ciência, tecnologia, economia e governança. A Suécia avança em rotas tecnológicas sofisticadas, a Alemanha consolida instrumentos regulatórios e políticas industriais, e o Canadá expande seu enfoque em re-mineração e mapeamento de rejeitos. Esses exemplos fortalecem a ideia de que a circularidade mineral representa uma oportunidade de reduzir impactos, aumentar a eficiência e garantir a segurança de suprimento de matérias-primas críticas em escala global.

3.5. REMINERALIZADORES NO CONTEXTO DA MINERAÇÃO CIRCULAR

Os remineralizadores formam uma alternativa sustentável dentro da mineração circular, possibilitando o aproveitamento de estéreis e rejeitos como insumos agrícolas e ambientais. Essa prática transforma passivos em recursos úteis, reduzindo impactos ambientais e fortalecendo a integração entre mineração e sustentabilidade, como serão abordados abaixo.

3.5.1. **Definição de remineralizador de solo**

De acordo com a Lei 12.890 de 10 de dezembro de 2013, em seu artigo 3º, por remineralizador entende-se todo material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos e que altere os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova a melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo. Ele também é conhecido como agromineral, termo que abrange todas as fontes de origem mineral, que após processos de transformação e beneficiamento, se transformam em produtos para o manejo da fertilidade do solo, como fertilizantes, corretivos, substratos, condicionadores e os remineralizadores de solo (Van Straaten, 2007).

Para que um material mineral seja enquadrado como remineralizador, deve atender aos parâmetros definidos pela Instrução Normativa nº5/2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que estabelece critérios mínimos de composição química e limites máximos para elementos potencialmente tóxicos. Por exemplo, o pó de rocha precisa

apresentar teor de óxido de potássio (K_2O) igual ou superior a 1%, além de uma soma mínima de 9% em peso de K_2O, óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO). Esses óxidos representam a forma como os nutrientes são medidos nas análises químicas e estão diretamente relacionados à fertilidade do solo, pois são elementos essenciais para o desenvolvimento das plantas.

Além disso, a legislação define limites rigorosos para elementos traços potencialmente tóxicos, como arsênio (máximo de 15 ppm), cádmio (10 ppm), chumbo (200 ppm) e mercúrio (ppm) que podem ser prejudiciais tanto ao meio ambiente quanto à saúde humana. Outro critério importante é o teor de sílica livre, que deve ser inferior a 25%, já que concentrações elevadas de quartzo reduzem a reatividade do material no solo, além de trazer riscos à saúde dos trabalhadores durante o processo de moagem (procedimento onde um produto é submetido a uma trituração com o objetivo de diminuir o tamanho de suas partículas).

Do ponto de vista científico, o uso de remineralizadores baseia-se em aspectos geoquímicos, mineralógicos e biológicos interdependentes: dissolução mineral, liberação gradual de nutrientes e a mobilização biológica. Martins et al. (2023) mostram como a composição geoquímica, mineralógica e granulométrica dos remineralizadores, influenciam na taxa de liberação de nutrientes no solo, bem como a importância de microrganismos e processos biogênicos na solubilização de elementos essenciais. Rochas mais reativas, como silicatos de estrutura menos cristalina ou mais alteráveis, tendem a liberar íons de nutrientes com maior facilidade, enquanto minerais cristalinos mais estáveis exigem tratamento ou moagem mais fina para promover sua mobilização.

De forma prática, os remineralizadores destinam-se a complementar, e não substituir integralmente, fertilizantes convencionais, principalmente quando o solo apresenta deficiências minerais específicas ou quando há interesse em reduzir insumos importados. A aplicação pode promover a correção gradual de fertilizantes, melhorar a estrutura do solo, aumentar a eficiência de nutrientes já presentes e reduzir impactos associados à produção e uso intensivo de fertilizantes convencionais.

Também é possível visualizar a distribuição geográfica desses produtos registrados no Brasil. A identificação da origem deles registrados no Ministério da Agricultura e Pecuária, por município, é disponibilizada pela plataforma Sipeagro. No total foram mapeados 84 produtos registrados em mais de 50 municípios brasileiros, com as rochas mais utilizadas sendo os basaltos, fonolitos e sienitos, predominantes nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, este levantamento integra a base de dados de estudos científicos sobre a eficiência agronômica de agrominerais silicáticos, disponibilizada pela plataforma Sistema de Inteligência Territorial

Estratégica da Macrologística Agropecuária Brasileira. Além disso, a estimativa é de que mais de 1,4 milhão de hectares no país já utilizam esses insumos, o que representa cerca de 1,8% da área agrícola nacional. (2024) [CNPM] (Figura 5).

Finalmente, destaca-se que essa adoção exige diagnóstico rigoroso do solo, caracterização detalhada do material mineral e acompanhar seu desempenho ao longo do tempo, sobretudo nos aspectos de solubilidade, toxicidade e interação com a microbiota edáfica. Só assim é possível garantir que o uso de remineralizadores respeite os critérios agronômicos, ambientais e legais, tornando-os uma estratégia viável para a transição à mineração circular.

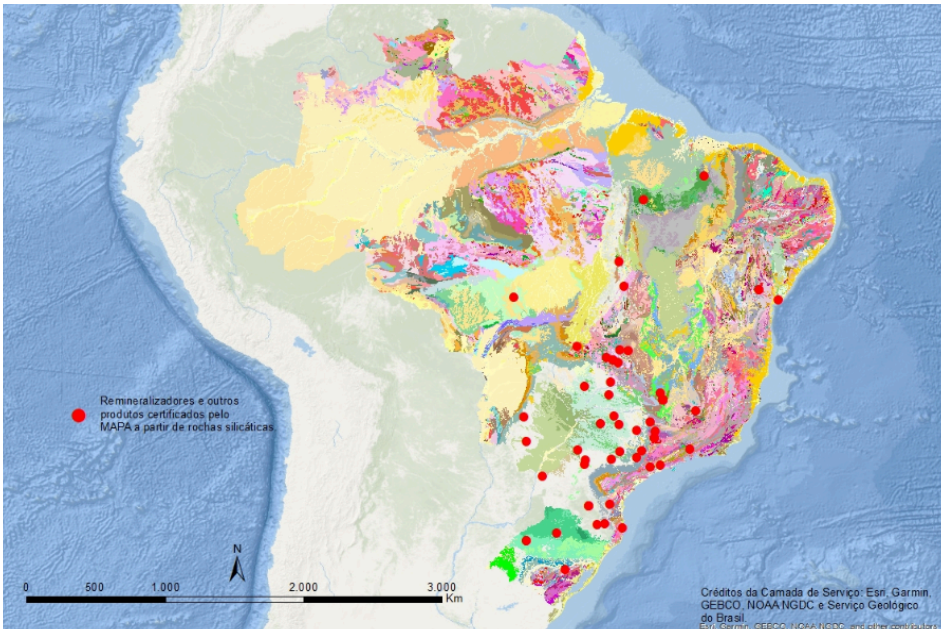


Figura 7 - Remineralizadores registrados Brasil
Fonte: MAPA, 2024

3.5.2. **Relevância do uso de remineralizadores no agronegócio**

O agronegócio é o setor que futuramente pode mais se beneficiar do uso de remineralizadores de solo, principalmente diante do alto consumo de fertilizantes no Brasil, e da significativa dependência de importações. Atualmente, o país importa cerca de 80% dos fertilizantes utilizados em sua produção, o que representa um gasto aproximado de US$25 Bilhões por ano. Essa dependência torna esse setor vulnerável a flutuações cambiais e crises geopolíticas, como as que afetaram o mercado global de fertilizantes durante o conflito entre Rússia e Ucrânia, principais fornecedores desses insumos. (AGROADVANCE, 2023).

Além disso, o documento da Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (SAE, 2022) mostra que a alta dependência externa de fertilizantes compromete a soberania produtiva nacional e impõe riscos econômicos diretos, pois os custos de importação impactam o preço final dos alimentos e reduzem a competitividade do agronegócio brasileiro. Nesse contexto, os remineralizadores surgem como uma alternativa economicamente vantajosa (além de ambientalmente sustentável), promovendo a liberação gradual de nutrientes, reduzindo a necessidade de adubação frequente e o gasto com importações. Essa substituição parcial de fertilizantes químicos por remineralizadores pode representar reduções de até 30% nos custos de produção em algumas culturas, além de benefícios ambientais como o aumento da atividade biológica do solo. Ainda, a SAE aponta que o Brasil possui jazidas de rochas com potencial para a formulação de agrominerais, especialmente nas regiões Centro-Oeste e Sudeste, o que reforça a viabilidade técnica e econômica de sua adoção. Também, O Plano Nacional de Fertilizantes 2050, associado ao estudo da SAE, propõe como diretriz estratégica a modernização, reativação e expansão das plantas de produção nacional de fertilizantes e o fortalecimento da cadeia tecnológica de insumos minerais no país. Nesse sentido, o incentivo ao uso de remineralizadores pode estimular a pesquisa mineral regional e ampliar os investimentos em beneficiamento de rochas agrícolas no Brasil.

O estudo “Aspectos econômicos da produção de soja com o uso de remineralizadores e bioinsumos no Cerrado”, conduzido pela EMBRAPA (2024), apresenta dados sobre o impacto econômico do uso desses insumos. Segundo o documento, o uso de agrominerais em sistemas integrados de produção permitiu redução de até 22% no custo total de fertilização e aumento de até 10% na margem líquida dos produtores de soja. Também, a substituição de parte dos fertilizantes solúveis por rochas moídas reduziu o custo por hectare e aumentou a estabilidade da produtividade ao longo dos ciclos agrícolas. O mesmo estudo destaca que os remineralizadores contribuem para a estabilidade da produtividade ao longo dos anos, diminuindo a dependência de insumos químicos importados e reduzindo o impacto ambiental causado pelo uso intensivo de fertilizantes solúveis. O documento ressalta ainda que, em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, a combinação de bioinsumos e remineralizadores potencializa os resultados agronômicos e econômicos, promovendo uma fertilização mais equilibrada e sustentável.

Como demonstrado no Gráfico da Figura 8, o custo operacional efetivo da cultura de soja tende a ser menor nos sistemas que utilizam remineralizadores e bioinsumos, quando comparados aos modelos convencionais, mostrando maior estabilidade mesmo em períodos de oscilação de preços. Já o Gráfico da Figura 9 apresenta a evolução da margem líquida da

cultura de soja, evidenciando que os sistemas com remineralizadores mantêm desempenho econômico mais consistente ao longo dos ciclos agrícolas.

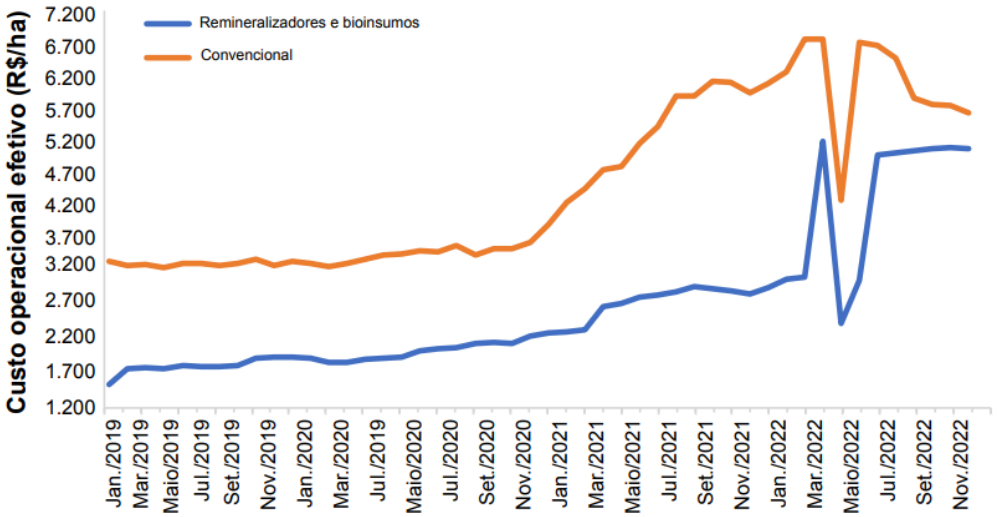


Figura 8 - Custo operacional efetivo da cultura de soja
Fonte: EMBRAPA, 2024, p. 27

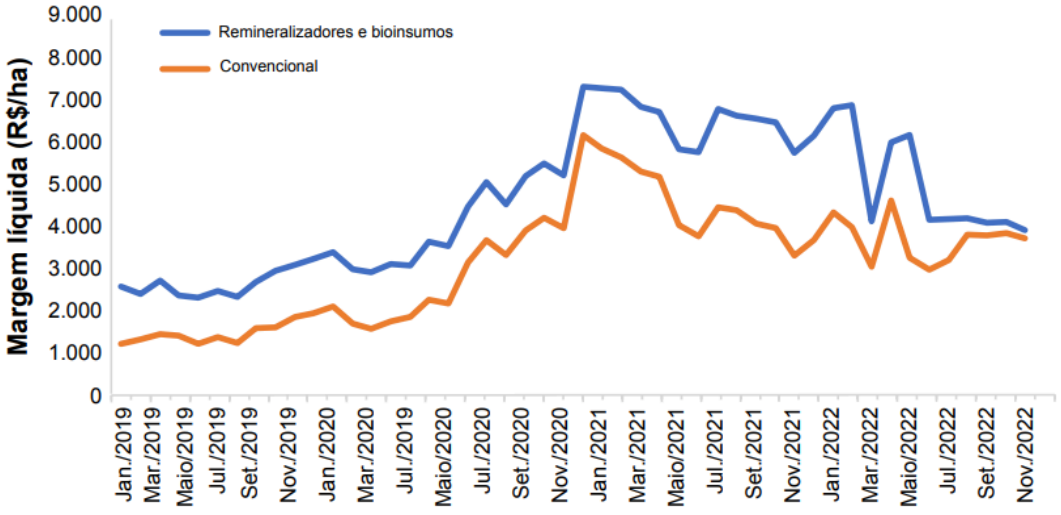


Figura 9 - Margem líquida da cultura de soja
Fonte: EMBRAPA, 2024, p 27

A adoção de remineralizadores pode contribuir para o equilíbrio da balança comercial de fertilizantes, incentivando a produção local e estimulando cadeias de valor internas voltadas à mineração e beneficiamento de rochas. Isso reforça a importância de políticas públicas que incentivem o uso desses produtos e apoiem o desenvolvimento tecnológico e logístico necessário para sua ampla implantação no campo. Em síntese, o uso de remineralizadores representa uma solução estratégica para o agronegócio brasileiro, combinando ganhos econômicos e sustentáveis. Ao reduzir custos, aumentar a produtividade

e diminuir a dependência externa, essa prática contribui para fortalecer a autonomia do país e garantir maior resiliência ao sistema agrícola frente às instabilidades do mercado global de insumos.

3.5.3. **Aplicações agrícolas e ambientais**

Os remineralizadores têm ganhado força entre os produtores agrícolas brasileiros, pela sua eficiência agronômica associada ao baixo custo. O uso crescente desses insumos, impulsionado por uma mudança de paradigma no manejo de solos, é refletido pelo aumento da produção nacional. Agricultores relatam melhor estrutura, maior retenção de umidade e produtividade mais estável ao longo das safras. Esse resultado é obtido pela liberação gradual de macro e micronutrientes (como potássio e magnésio) que favorecem o equilíbrio químico e aumentam a disponibilidade de nutrientes de forma sustentável (MARTINS et al., 2024).

A adoção de agrominerais, segundo o SGB (2023), representa também uma estratégia ambiental de longo prazo, visto que o uso de rochas moídas promove processos semelhantes à meteorização natural (processo de decomposição e desintegração de rochas e solos por agentes externos), reconstruindo minerais no solo e estimulando a atividade microbiana. Essa prática, quando ligadas à adubação orgânica e sistemas agroecológicos, contribui para a redução da acidificação do solo, o aumento da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e a diminuição da lixiviação de nutrientes, aspectos de extrema importância para a regeneração de solos tropicais degradados.

Estudos recentes reforçam o papel dos remineralizadores como instrumentos de recuperação de áreas degradadas. Nakamura (2024), em trabalho desenvolvido na Universidade Estadual Paulista (UNESP), analisou a aplicação de resíduos de mineração moídos como fonte de remineralizadores para a recuperação de solos degradados por erosão laminar e perda de matéria orgânica. O estudo foi desenvolvido comparando tratamentos com diferentes tipos de rochas silicáticas (como basalto e fonolito) e doses crescentes de aplicação. As análises laboratoriais mostraram uma grande melhoria na estrutura física do solo, com aumento de porosidade e da estabilidade de agregados, fatores diretamente relacionados à redução da erosão e ao aumento da infiltração de água. Quimicamente, observou-se elevação gradual nos teores de cálcio, magnésio, ferro e silício, além de um aumento na capacidade de troca catiônica (CTC), o que favorece a retenção de nutrientes no perfil do solo. Segundo o autor, a remineralização apresentou custos até 40% inferiores em comparação com o uso de corretivos e fertilizantes convencionais, reforçando seu potencial econômico e ambiental.

No mesmo ponto de vista, Viana, Caitano e Pontes (2021) analisaram a remineralização de solos tropicais degradados, conduzidos em áreas de pastagem degradada no Cerrado brasileiro. O trabalho avaliou o impacto do pó de basalto na restauração da fertilidade e na dinâmica biológica do solo, associando sua aplicação à introdução de leguminosas fixadoras de nitrogênio. Os resultados mostraram incremento expressivo da biomassa microbiana e da diversidade de fungos e bactérias benéficas, refletindo um solo mais equilibrado e resiliente. Além disso, houve aumento dos teores de fósforo disponível e potássio trocável, indicando uma liberação gradual e sustentável de nutrientes.

Sob uma perspectiva ecossistêmica, Siqueira (2024) apresentou um estudo destacando o papel dos remineralizadores na melhoria das funções ecossistêmicas e dos serviços ambientais do solo. A publicação firmou evidências de mais de 50 experimentos de campo e laboratório, concluindo que o uso contínuo desses insumos aumenta a fixação biológica de carbono, a formação de húmus estável e a redução das emissões de gases de efeito estufa, especialmente de óxidos de nitrogênio (N_2O) provenientes de fertilizantes nitrogenados sintéticos. Assim, a remineralização atua como uma dupla estratégia, restaura a fertilidade e contribui para a mitigação das mudanças climáticas.

No campo da mineralogia aplicada, Silva (2024) analisou o comportamento geoquímico e a cinética e liberação de nutrientes de diferentes tipos de rochas utilizadas como remineralizadores. O estudo demonstrou que rochas básicas, como basalto e o diabásio, apresentam liberação lenta e equilibrada de macro e micronutrientes, favorecendo o efeito residual ao longo dos anos. Já rochas mais alcalinas, como o fonolito, apresentaram maior solubilidade inicial, sendo indicadas para solos com acidez elevada e baixos teores de silício. Esses resultados mostram que a escolha do tipo de rocha deve ser feita considerando as condições edafoclimáticas (conjunto de fatores do solo e do clima que influenciam o desenvolvimento de plantas, ecossistemas e atividades agrícolas) locais, o tipo de cultura e os objetivos de manejo, permitindo planejar a remineralização de forma tecnicamente direcionada.

A Epagri (2023), em parceria com instituições de pesquisa agroecológica, avaliou o uso combinado de remineralizadores com compostos orgânicos, bioinsumos e práticas conservacionistas em propriedades rurais de Santa Catarina e Minas Gerais. Essa integração se mostrou eficaz para solos arenosos e ácidos, onde a aplicação promoveu o aumento da capacidade de retenção de água, melhoria na densidade aparente do solo e recuperação da microbiota. As análises microbiológicas indicaram um aumento de até 67% na atividade

enzimática do solo, principalmente em enzimas associadas à ciclagem de nutrientes. Essas descobertas reforçam que os agrominerais estimulam a reconstrução da estrutura e da funcionalidade ecológica do solo.

Dessa forma, a literatura recente evidencia que a remineralização dos solos vai muito além de um manejo agronômico, trata-se de uma prática sustentável que busca recuperar solos degradados, restabelecer sua fertilidade, biodiversidade e equilíbrio ambiental, ao mesmo tempo em que aumenta a produtividade de forma duradoura.

3.5.4. **Desafios regulatórios e técnicos**

A regulamentação dos remineralizadores no Brasil é fruto de um processo recente e em constante evolução, refletindo a crescente importância desses insumos na produção agrícola sustentável e regenerativa, sendo sintetizada na Tabela 3. A base legal que estrutura o uso e a comercialização dos remineralizadores está associada principalmente na Lei nº 6.894/1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos e inoculantes. Essa lei foi complementada por dispositivos posteriores que introduziram o conceito de remineralizadores como uma nova categoria de insumo agrícola, diferente dos fertilizantes tradicionais.

Um marco regulatório fundamental foi a Lei nº 12.890/2013, que alterou a Lei antiga para incluir formalmente os remineralizadores e substratos para as plantas no escopo de regulação do MAPA. Posteriormente, a Instrução Normativa MAPA nº 5/2016 detalhou os critérios técnicos e analíticos para o registro, controle e comercialização desses produtos, estabelecendo parâmetros físico-químicos e exigências de rotulagem. Completando esse marco, a Instrução Normativa nº53/2013 do MDCI regulamentou a padronização de insumos minerais utilizados na agricultura, integrando a agenda de remineralizadores ao Conselho de Fertilizantes (CONFERT), que busca harmonizar políticas industriais e ambientais.

Além de normas ministeriais, há dispositivos setoriais que reforçam o papel dos remineralizadores no contexto da economia verde. O Plano Nacional de Fertilizantes (PNF), instituído pelo MAPA em 2022, reconhece remineralizadores como instrumentos estratégicos para reduzir a dependência externa de fertilizantes químicos, promover o uso sustentável de recursos minerais nacionais e incentivar a inovação tecnológica na agricultura. A atuação de instituições como a Embrapa e o SGB tem contribuído para o desenvolvimento técnico-científico do tema, por meio de pesquisas sobre o potencial de rochas silicáticas e basálticas como fontes alternativas de nutrientes e condicionadores de solo. Também, a

Associação Brasileira de Produtores de Remineralizadores e Fertilizantes Naturais (ABREFEN) tem desempenhado papel importante na articulação entre setor produtivo e governo, buscando a ampliação da base normativa e o fortalecimento da fiscalização e do controle de qualidade.

Neste contexto regulatório, ainda há a necessidade de controle radiológico, uma vez que materiais de origem mineral podem conter radionuclídeos naturais. A Norma CNEN NN 3.01/2014 estabelece diretrizes básicas de proteção radiológica, definindo limites, procedimentos de monitoramento e critérios de segurança aplicáveis aos remineralizadores, garantindo que sua produção, manuseio e aplicação não ofereçam riscos ao solo, aos trabalhadores ou aos consumidores. Esse componente normativo complementa a regulamentação agrícola e industrial, assegurando que a expansão do uso de pó de rocha ocorra em conformidade com padrões de segurança radiológica.

Tabela 3 - Marco legal e normativo dos remineralizadores

Categoria	Instrumento Legal / Norma	Conteúdo / Aplicação
Regulação de Fertilizantes e Insumos Agrícolas	Lei nº 6.894/1980 – Fiscalização da Produção e Comércio de Fertilizantes	Define normas para inspeção e controle de fertilizantes, corretivos e inoculantes, abrangendo os remineralizadores após a atualização de 2013.
Inclusão dos Remineralizadores na Legislação Nacional	Lei nº 12.890/2013	Introduz o conceito de remineralizador e substrato para plantas no escopo regulatório do MAPA.
Critérios Técnicos e de Registro	Instrução Normativa MAPA nº 5/2016	Estabelece parâmetros técnicos, exigências de qualidade, métodos de análise e requisitos de rotulagem dos remineralizadores.

Padronização Industrial e Comercial	Instrução Normativa MDIC nº 53/2013	Regulamenta padrões de qualidade e rotulagem para insumos minerais e fertilizantes alternativos.
Planejamento Estratégico Nacional	Plano Nacional de Fertilizantes (MAPA, 2022)	Define diretrizes para ampliação do uso de remineralizadores e redução da dependência externa de insumos químicos.
Controle de Radionuclídeos Naturais em Materiais Minerais	Norma CNEN NN 3.01/2014 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica	Estabelece limites de exposição, requisitos de monitoramento e critérios de segurança para materiais com radionuclídeos naturais,

Apesar dos avanços, os desafios regulatórios e técnicos ainda causam impacto. No campo regulatório, a principal limitação é a fragmentação das normas e a ausência de padronização nacional de métodos laboratoriais para caracterização dos produtos. Isso gera diferenças regionais no processo de registro e fiscalização, dificultando a introdução de pequenos produtores e cooperativas no mercado formal (MAPA, 2022).

Outro problema é a falta de infraestrutura laboratorial e capacitação técnica em órgãos estaduais para análise e controle de qualidade, o que impacta a confiabilidade dos produtos comercializados (EMBRAPA, 2024). Além disso, há dificuldades na obtenção de licenças ambientais e na integração entre os setores mineral e agrícola, já que a extração das rochas utilizadas como remineralizadores ainda é regida por normas do setor de mineração que não contemplam sua função agrícola (SGB, 2023).

No aspecto técnico, ainda existem desafios relacionados à heterogeneidade mineralógica dos materiais utilizados, à definição de doses e métodos de aplicação e à falta de estudos de longo prazo sobre os efeitos cumulativos dos remineralizadores no solo e na produtividade agrícola (EMBRAPA, 2024). A necessidade de certificação e rastreabilidade também é alta, especialmente diante das exigências de mercados internacionais que valorizam

práticas agrícolas de baixo impacto ambiental. No futuro, espera-se que a regulamentação tome um caminho em direção a uma padronização técnica mais completa, com integração entre políticas minerais e agrícolas, incentivo à pesquisa aplicada, capacitação de produtores e fortalecimento de um mercado nacional competitivo e sustentável de remineralizadores. A consolidação de um marco regulatório claro e abrangente é essencial para garantir segurança e promover a inovação tecnológica.

3.5.5. **Exemplos práticos**

4. **METODOLOGIA**

Este capítulo visa apresentar os procedimentos metodológicos que conduziram a realização do projeto de conclusão de curso. O estudo é de caráter teórico e qualitativo, a metodologia teve como base a análise crítica da literatura científica e técnica sobre o tema da mineração circular e sustentabilidade mineral, optou-se por realizar uma pesquisa bibliográfica direcionada por palavras-chave, devido ao foco exploratório e interpretativo deste trabalho. O planejamento metodológico tem como objetivo garantir o embasamento necessário para garantir os objetivos propostos neste projeto.

4.1. NATUREZA E ABORDAGEM DA PESQUISA

O presente projeto de conclusão de curso foi definido como de natureza teórica, com foco qualitativo. Este tipo de pesquisa prioriza a compreensão de fenômenos partindo de análises de relações e processos, sem ocorrer a quantificação de dados. Por este motivo, foi adotado um estudo teórico-conceitual, voltado à interpretação crítica de conceitos e sistematização de medidas em ascensão associadas à mineração circular.

Ademais, a escrita adotou um caráter exploratório e explicativo, buscando o aprofundamento do conhecimento sobre a temática em fase de expansão no setor mineral e a compreensão dos fundamentos da economia circular agregados à extração mineral.

4.2. TIPOLOGIA E FONTE DE DADOS

A pesquisa bibliográfica caracteriza-se por ser um procedimento que se baseia na análise de livros, artigos científicos, teses, legislações e documentos institucionais já

publicados. Neste estudo, os materiais foram examinados de forma crítica e interpretativa, com o objetivo de compreender as normativas, princípios, objetivos e desafios relacionados à implantação da mineração circular.

As buscas foram realizadas em bases científicas e fontes institucionais, abrangendo tanto publicações acadêmicas quanto relatórios técnicos e documentos governamentais. Entre as principais fontes consultadas têm-se o Portal de Periódicos da CAPES, a *ScienceDirect*, a EMBRAPA, o IBRAM, a ANM, o SGB, o MME, o IBAMA, além de repositórios institucionais de universidades federais.

As combinações de palavras-chave utilizadas incluem termos como "mineração circular", "economia circular na mineração", "sustentabilidade mineral", "remineralizadores de solo" e "gestão ambiental na mineração". Foram priorizadas publicações compreendidas entre os anos de 2010 e 2025, destacando materiais recentes que tenham foco sobre discussões atuais. Os critérios de inclusão envolveram a relevância do tema, atualidade, confiabilidade das fontes e aderência ao objeto de estudo, enquanto materiais com abordagem superficial, desatualizada ou sem respaldo técnico foram excluídos. Essa estratégia metodológica possibilitou a identificação e análise das principais tendências conceituais e práticas emergentes, garantindo a coerência teórica e a consistência científica do trabalho.

4.3. ETAPAS METODOLÓGICAS

A execução da análise será dividida nas seguintes etapas:

I. **Identificação e sistematização de estratégias práticas:** foi realizada a coleta de dados sobre estratégias mitigadoras e compensatórias aplicadas à mineração circular, sendo eles retirados de publicações sobre, bem como de documentos, normas e relatórios técnicos.

II. **Análise técnica e categorização temática:** a organização dos dados é composta pelo estudo, análise e aprofundamento do uso agrícola e ambiental de remineralizadores;

III. **Discussão crítica:** os dados analisados foram discutidos à luz dos princípios da economia circular e da sustentabilidade voltados para a mineração.



Figura 10 – Fluxograma da metodologia
Fonte: elaborado pela autora

4.4. JUSTIFICATIVA METODOLÓGICA

A escolha dessa metodologia é justificada pela escassez de estudos aplicados a este tema no Brasil, necessitando de maior conhecimento e esforço para a categorização e análise crítica na produção existente. Ela visa fundamentar as práticas reais de circularidade que vêm sendo desenvolvidas ou testadas no setor mineral. Com isso, a pesquisa visa identificar estratégias replicáveis e evidenciar seus resultados sustentáveis e promissores para garantir a sua aplicação de forma efetiva, consistente e alinhada aos desafios da mineração circular.

5. **RESULTADOS**

A análise dos resultados obtidos neste estudo indica a necessidade de melhorar o entendimento sobre a aplicação da prática da mineração circular em contextos produtivos. Dentre as estratégias, os remineralizadores se destacam como uma das soluções mais promissoras para a valorização de rejeitos e integração entre mineração e agricultura sustentável.

5.1. RESSIGNIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS MINERAIS NA LÓGICA CIRCULAR

A análise dos dados e documentos levantados ao longo desta pesquisa mostra que a transformação dos resíduos minerais em insumos produtivos constitui o eixo central da mineração circular no Brasil. Historicamente tratados como passivos ambientais de alto custo para sua gestão, os rejeitos e estéreis passam a ser reavaliados como fração de material gerado que pode ser reinserida em novos ciclos econômicos.

Essa mudança conceitual, observada em relatórios do IBRAM (2024) e em estudos

técnicos do CETEM (2023), demonstra uma ressignificação do valor do resíduo mineral, de produto de descarte à ativo regenerativo. O aproveitamento do pó de rocha para a formação de remineralizadores agrícolas é o exemplo mais concreto dessa transição, representando um resultado prático para a adoção da circularidade no setor mineral.

A Tabela 4 apresenta uma síntese dos principais tipos de resíduos e rejeitos minerais identificados como passíveis de reaproveitamento, suas aplicações e benefícios ambientais.

Tabela 4 - Potenciais de reaproveitamento de resíduos minerais.

Tipo de rejeito	Possível reaproveitamento	Setor	Origem do material
Pó de rocha e estéreis finos	Produção de remineralizadores agrícolas	Agricultura	Lavra e beneficiamento de rochas silicáticas e máficas
Rejeitos de beneficiamento de minérios metálicos	Materiais para construção civil e pavimentação	Construção civil	Processos de flotação e concentração mineral
Escórias metalúrgicas	Produção de insumos industriais e cimento	Indústria e infraestrutura	Processos de fundição de Fe, Mn e Ni
Resíduos de lavra	Reflorestamento e recuperação de áreas degradadas	Meio ambiente	Extração de bauxita, níquel e ferro
Rejeitos contendo Nióbio e Elementos Terras Raras (ETR)	Produção de componentes para tecnologias da transição energética	Transição Energética	Reprocessamento de rejeitos de minérios contendo Nb e ETR

A partir da análise dos documentos técnicos e institucionais, foi possível classificar o estágio de desenvolvimento das práticas de reaproveitamento mineral do Brasil. Observou-se que o uso de remineralizadores agrícolas apresenta maior grau de consolidação, com base normativa e mercado ativo. Porém, outras iniciativas, como o aproveitamento de escórias, ainda estão em fase experimental ou em processo de regulamentação institucional.

A Tabela 5 ilustra essa análise de maturidade, construída com base em relatórios e artigos técnicos publicados entre 2022 e 2025.

Tabela 5 - Nível de consolidação das práticas de reaproveitamento mineral no Brasil (2025).

Prática de reaproveitamento	Estágio de consolidação
Remineralizadores agrícolas	Consolidado
Uso de rejeitos na construção civil	Consolidado
Reuso de escórias industriais	Consolidado
Reflorestamento com resíduos de lavra	Avançado

A partir da análise dos documentos técnicos e institucionais, foi possível classificar o estágio de desenvolvimento das principais práticas de reaproveitamento mineral no Brasil. Observou-se que os remineralizadores agrícolas, o uso de rejeitos na construção civil e o reuso de escórias industriais já se encontram em estágio consolidado, sustentados por base normativa, escalabilidade técnica e adoção crescente pelo setor produtivo. Por outro lado, práticas como o reflorestamento com resíduos de lavra apresentam um estágio avançado, com resultados promissores e adoção crescente, porém ainda dependentes de ampliação de pesquisas, padronização técnica e maior integração às políticas setoriais.

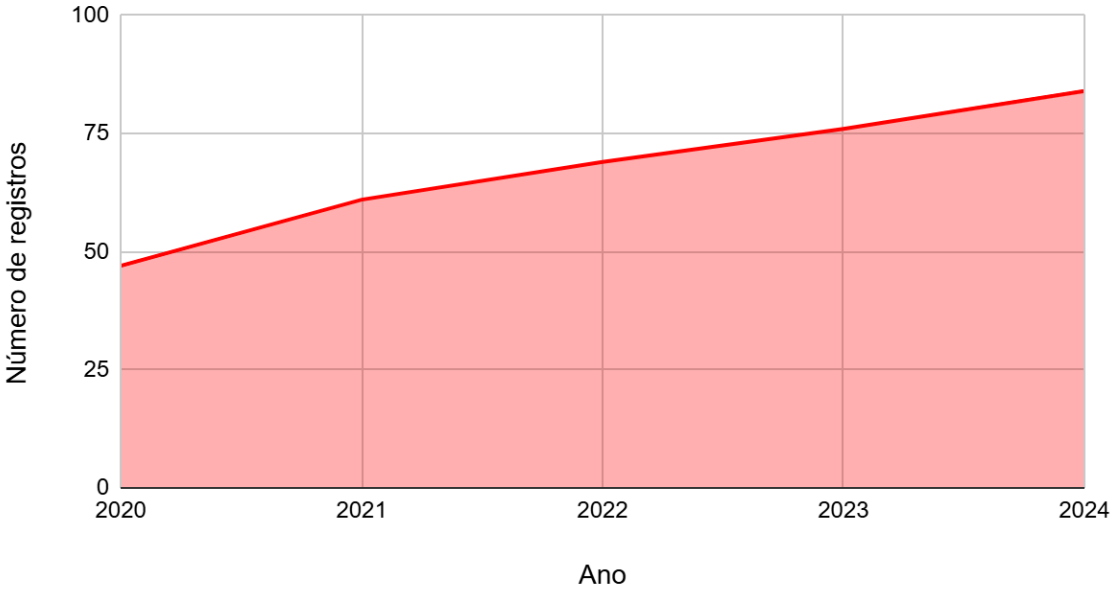


Figura 11 - Evolução do número de remineralizadores registrados no Brasil
Fonte: elaborado pela autora (2025) com base em dados do MAPA (2024).

Esses resultados mostram que o uso de remineralizadores se tornou uma das principais vias de transição da mineração linear para a mineração circular no Brasil. A adoção dos princípios circulares também implica mudanças culturais e institucionais, como a valorização de políticas públicas que estimulam a rastreabilidade dos resíduos, a certificação de origem e o incentivo fiscal a tecnologias limpas. Assim, o resultado mais relevante desta seção é a constatação de que a ressignificação dos resíduos minerais se forma em uma nova lógica produtiva, em termos de expansão de mercado, de inovação tecnológica e de benefícios ambientais associados.

5.2. A CIRCULARIDADE EM PRÁTICA

A análise dos dados coletados em relatórios técnicos, registros do MAPA e publicações institucionais vistos ao longo desta pesquisa demonstra que a integração entre mineração e agricultura ocorre por meio do uso de pós de rocha e rejeitos minerais como remineralizadores agrícolas, capazes de devolver nutrientes ao solo e reduzir a dependência de fertilizantes químicos importados.

Também foi observado que a circularidade mineral encontra aplicação mais consolidada nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul, onde há maior densidade de lavras de rochas silicáticas e cadeias agrícolas, favorecendo a integração entre oferta de materiais e demanda por insumos. Além disso, esses territórios concentram infraestrutura logística mais desenvolvida, com melhor acesso a rodovias, pólos industriais e centros de distribuição, o que reduz custos de transporte e facilita o escoamento de produtos como remineralizadores e insumos derivados de resíduos minerais.

Outro fator determinante é o maior nível de desenvolvimento tecnológico presente nessas regiões, marcado pela atuação de centros de pesquisa, universidades, empresas mineradoras tecnicamente estruturadas e políticas setoriais mais maduras. Isso contribui para a adoção mais rápida de práticas de reaproveitamento, aumento da eficiência operacional e consolidação de cadeias produtivas circulares.

Em contraste, as regiões Norte e Nordeste ainda apresentam maior desigualdade infraestrutural, com limitações logísticas, baixa capilaridade industrial e menor disponibilidade de tecnologias aplicadas à circularidade mineral. Esse cenário explica o ritmo mais lento de incorporação dessas práticas, que, embora já existam, avançam de forma menos uniforme devido à necessidade de investimentos estruturais, desenvolvimento regulatório e

fortalecimento das capacidades locais. Essa espacialização é apresentada no Mapa da Figura 12.

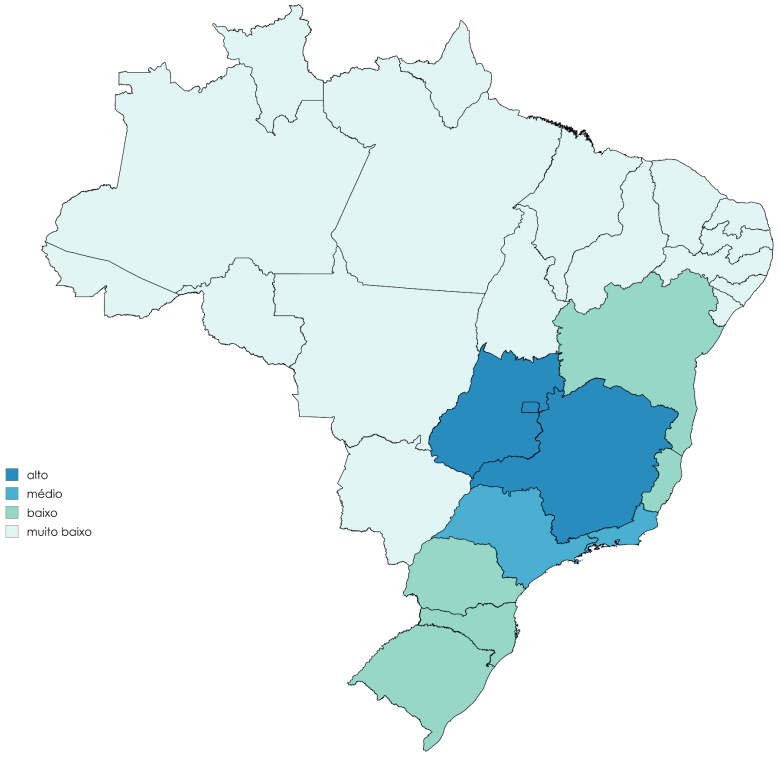


Figura 12 - Distribuição das áreas com maior potencial de remineralizadores
Fonte: elaborado pela autora (2025) com base em dados do IBRAM (2024) e do MAPA (2023).

A ligação entre mineração e agricultura pode ser analisada também do ponto de vista econômico e produtivo. O levantamento bibliográfico apontou um alto crescimento no número de parcerias público-privadas voltadas à pesquisa e ao uso de remineralizadores, sobretudo entre 2020 e 2024, conforme mostra o Gráfico da Figura 13.

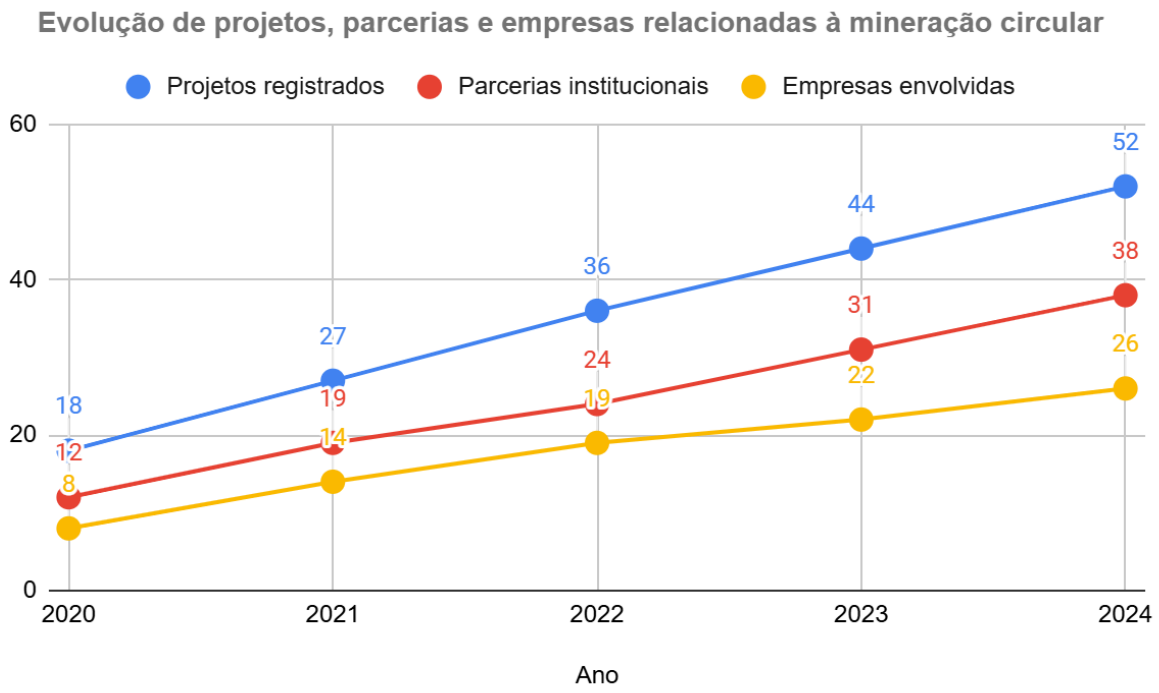


Figura 13 - Evolução de projetos, parcerias e empresas relacionadas à mineração circular
Fonte: elaborado pela autora (2025) com base em IBRAM e EMBRAPA (2024).

A partir desses dados, observa-se um crescimento de 188% no número de projetos em apenas cinco anos, com destaque para os estados de Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso, que concentram simultaneamente rochas aptas à remineralização e cadeias agroindustriais demandantes de nutrientes naturais. Para melhorar essa análise, a Tabela 6 resume os principais benefícios e impactos observados da integração mineração–agricultura a partir de três dimensões da sustentabilidade.

Tabela 6 - Benefícios e impactos da integração mineração–agricultura.
Fonte: SGB (2023)

Dimensão	Benefícios principais	Impactos observados	Indicadores associados
Ambiental	Redução da disposição de rejeitos; menor emissão de CO_2; reabilitação de áreas degradadas	Diminuição de passivos e melhoria da qualidade do solo	Taxa de reaproveitamento de resíduos (%); redução de área impactada (ha)

Econômica	Criação de novos mercados regionais; substituição parcial de insumos importados	Geração de renda local e aumento da competitividade agrícola	Número de registros MAPA; PIB agro-mineral regional
Social	Fortalecimento de comunidades rurais; capacitação técnica	Geração de empregos diretos e inclusão de pequenos produtores	Número de produtores beneficiados; programas de capacitação

A análise dos dados indica que a circularidade mineral já se consolida como uma prática operacional no Brasil, principalmente em regiões onde a cooperação entre mineração, pesquisa científica e agricultura vem sendo regulamentada. Esse avanço representa uma mudança fundamental no modelo produtivo, em que a mineração começa a para nutrir o sistema agrícola, devolvendo à biosfera parte dos elementos originalmente extraídos da litosfera. Dessa forma, se fecha o ciclo geoquímico e econômico, concretizando os princípios da economia circular no contexto mineral.

O Gráfico da Figura 14 apresenta a evolução percentual da produtividade agrícola em áreas que empregam remineralizadores.

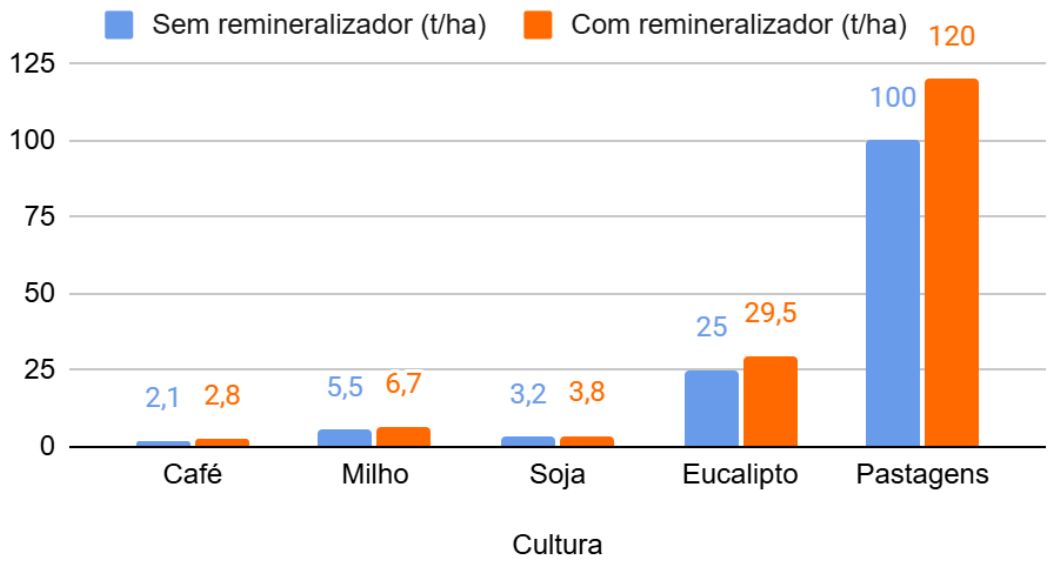


Figura 14 - Produtividade média de culturas agrícolas com e sem uso de remineralizadores (2019–2024)
Fonte: elaborado pela autora (2025) com base na EMBRAPA (2024).

Os resultados mostram ganhos de produtividade e qualidade do solo, reforçando a viabilidade técnica e ecológica da circularidade mineral pelos remineralizadores. Esse modelo integrador reduz a dependência externa de insumos, estimula economias locais e consolida o princípio da regeneração, um dos pilares da mineração circular. Assim, conclui-se que a integração entre mineração e agricultura é uma tendência estimável, sustentada por dados de crescimento, regionalização e resultados agronômicos. A circularidade, nesse contexto, passa a constituir um novo paradigma de desenvolvimento sustentável, no qual o resíduo mineral torna-se base para a segurança alimentar, energética e ecológica do país.

5.3. ESTUDO DE CASO

A utilização de remineralizadores derivados da mineração tem se consolidado como um caminho promissor para integrar sustentabilidade, economia circular e agregação de valor aos resíduos sólidos minerários. No entanto, a viabilidade de um remineralizador depende fundamentalmente de critérios mineralógicos, geoquímicos e agronômicos bem estabelecidos. A Instrução Normativa nº 5/2016 do Ministério da Agricultura (MAPA, 2016) determina que apenas materiais com teores mínimos de bases, solubilidade adequada e mineralogia reativa podem ser registrados. Assim, ao mesmo tempo em que algumas mineradoras conseguem converter rejeitos em insumos agrícolas de alta eficiência, outras enfrentam resultados insatisfatórios por limitações químicas, granulométricas ou toxicológicas. Para demonstrar essa realidade, apresentam-se dois casos reais de mineradoras brasileiras: um exemplo de aplicação bem-sucedida, Lundin Mining (GO) e um de insucesso técnico, Metamat (MT).

O caso de sucesso é representado pela Lundin Mining, operadora da mina de Chapada, localizada entre Alto Horizonte e Nova Iguaçu de Goiás. A empresa buscou alternativas para reduzir a disposição de rejeitos de beneficiamento de cobre e ouro e, ao mesmo tempo, atender às pressões socioambientais para integrar práticas de mineração circular. O rejeito avaliado consistia em micaxisto moído, rico em minerais como biotita, muscovita e feldspatos, contendo quantidades relevantes de potássio, cálcio, magnésio e micronutrientes. Ensaios mineralógicos preliminares indicaram que a fração fina do rejeito possuía mais de 50% de minerais com reatividade significativa sob condições tropicais, favorecendo a liberação gradual de nutrientes.

Ensaios de bancada confirmaram que o material liberava K, Ca e Mg de forma progressiva, aumentando o pH e a soma de bases do solo. Na sequência, experimentos agronômicos em vasos e em campo foram conduzidos com soja e sorgo. Os resultados mostraram aumento expressivo da fertilidade do solo e da produtividade das culturas quando comparado ao controle sem aplicação e a remineralizadores comerciais. As parcelas tratadas com o rejeito da Lundin apresentaram incrementos significativos na capacidade de troca catiônica, melhora no pH e maior vigor vegetativo, demonstrando

desempenho técnico superior ao esperado para um resíduo minerário. Considerando o conjunto de evidências, a Lundin Mining submeteu o material à avaliação oficial, obtendo registro no MAPA como remineralizador, conforme exigências da IN 5/2016. Esse caso tornou-se referência nacional pela capacidade de converter um passivo ambiental em insumo agrícola, consolidando a efetividade do reaproveitamento minerário.

Em contrapartida, o caso de insucesso é observado nos estudos conduzidos pela Metamat – Companhia Mato-grossense de Mineração, que investigou o potencial de diversos resíduos provenientes de mineração de ouro, diamante e garimpos do estado de Mato Grosso. O objetivo era identificar materiais minerários capazes de serem transformados em remineralizadores e, assim, fomentar a agricultura local. No entanto, uma parcela significativa dos materiais avaliados não apresentou propriedades compatíveis com os requisitos agronômicos.

Os rejeitos provenientes de áreas garimpeiras, especialmente aqueles ricos em quartzo e pobres em minerais portadores de bases trocáveis (como feldspatos, anfibólios e piroxênios), apresentaram teores extremamente baixos de K_2O, CaO e MgO, além de solubilidade mínima. Ensaios agronômicos demonstraram que esses materiais não alteraram o pH, a CTC ou a disponibilidade de nutrientes no solo, resultando em desempenho semelhante ou inferior ao solo sem qualquer adubação, conforme relatado nos relatórios técnicos da Metamat (METAMAT, 2023). Em alguns casos, foram detectados níveis de metais traço, como Mn, acima dos valores de referência, o que inviabiliza a utilização agrícola devido ao risco toxicológico.

Ainda segundo o relatório técnico da Metamat (2023), cultivos experimentais com milho e hortaliças não responderam positivamente à aplicação desses rejeitos, demonstrando que a composição mineralógica pouco reativa e a granulometria inadequada impediam qualquer efeito remineralizador. Esses resultados mostraram que, apesar da expectativa de aproveitar resíduos minerários como insumos agrícolas, parte dos materiais estudados não atendia às normas do MAPA e não possuía viabilidade agronômica, constituindo um exemplo claro de insucesso técnico no reaproveitamento de rejeitos.

A análise comparativa entre os dois casos reforça que o sucesso na adoção de remineralizadores depende de fatores intrínsecos ao material: mineralogia, solubilidade, teor de bases, ausência de contaminantes e capacidade real de alterar parâmetros químicos do solo. Enquanto o rejeito da Lundin Mining atendia plenamente aos critérios legais e mostrou desempenho agronômico superior, os materiais analisados pela Metamat evidenciaram limitações que inviabilizaram sua aplicação. Assim, fica evidente que a mineração circular exige não apenas intenção, mas também caracterização mineral rigorosa, testes agronômicos estruturados e aderência normativa, sendo essas as chaves para distinguir um caso de sucesso de um caso de insucesso.

5.4. POTENCIAIS DE EXPANSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

Os resultados obtidos e a revisão bibliográfica permitem inferir que a mineração circular no Brasil se encontra em transição entre a consolidação técnica e a institucionalização política. Ainda que o uso de remineralizadores agrícolas se destaque como prática consolidada em algumas regiões, observa-se um potencial de expansão, tanto em termos territoriais quanto tecnológicos e regulatórios. Esse avanço tende a redefinir a relação entre mineração, agricultura e meio ambiente.

No Brasil, há condições para essa expansão. Sua diversidade geológica, composta por grandes jazidas de rochas silicatadas, básicas e ultramáficas, como basaltos, fonolitos e sienitos, representa uma disponibilidade significativa de recursos minerais, distribuídos de forma estratégica em várias regiões do país. Ao mesmo tempo, a agricultura do Brasil e o aumento da demanda por insumos reforçam a viabilidade de uma economia circular ligada à bioeconomia e à agricultura regenerativa.

Além dos aspectos naturais, a expansão da mineração circular está associada à criação de marcos institucionais e políticas públicas específicas, capazes de englobar os objetivos da mineração sustentável aos planos nacionais de fertilizantes. Relatórios do IBRAM (2024) e do CETEM (2023) indicam que instrumentos como o PNF (2050) e o PNM (2050) já apontam diretrizes relacionadas à circularidade mineral, ao reaproveitamento de rejeitos e à redução da dependência de insumos importados.

Do ponto de vista tecnológico, os avanços recentes em processos de moagem ultrafina, liberação controlada de nutrientes e rastreabilidade digital de produtos minerais têm ampliado a viabilidade técnica do aproveitamento de rejeitos. Esses progressos fortalecem o desenvolvimento regional da economia circular, principalmente em estados como Minas Gerais, Goiás, Bahia e Paraná, onde pequenas mineradoras e cooperativas agrícolas começam a se organizar em arranjos produtivos locais voltados à produção de remineralizadores e outros subprodutos sustentáveis, resultando no surgimento de novos modelos de negócios verdes.

Em relação a parcela ambiental, pesquisas feitas pela EMBRAPA (2024) indicam que o uso contínuo de remineralizadores pode reduzir em até 30% o consumo de fertilizantes solúveis, aumentar o teor de carbono orgânico nos solos e melhorar a sua estrutura física e biológica. Isso demonstra que a mineração circular é capaz de contribuir também para a mitigação de emissões e a recuperação de áreas degradadas, inserindo-se nas metas climáticas assumidas pelo Brasil até 2050.

Assim, o potencial de expansão da mineração circular vai além dos aspectos técnicos. Ele representa uma mudança na concepção de desenvolvimento sustentável, baseada em regeneração, inovação e governança. Nos próximos anos, espera-se que a circularidade se torne parte central das políticas nacionais voltadas à transição ecológica, aproximando ciência, tecnologia e inclusão produtiva.

5.5. INDICADORES DE DESEMPENHO DA CIRCULARIDADE

A consolidação da mineração circular no Brasil depende da capacidade de mensurar seus avanços e resultados concretos, transformando práticas ainda emergentes em políticas estruturadas. A ausência de indicadores específicos tem sido uma falta na gestão mineral e agrícola, dificultando a avaliação de impactos e o monitoramento de benefícios ambientais e econômicos. Portanto, a criação de um conjunto de indicadores de desempenho torna-se essencial para orientar estratégias, medir eficiência e garantir a transparência da transição para um modelo circular. Esses indicadores podem refletir os indicadores ESG e integrar parâmetros que já vêm sendo monitorados por instituições como o IBRAM, o CETEM/MME, o MAPA e a EMBRAPA. A Tabela 7 apresenta um conjunto de métricas para acompanhar o desenvolvimento da circularidade mineral nos parâmetros da Agenda 2030 da ONU, adaptadas ao contexto brasileiro.

Tabela 7 - Indicadores ESG aplicados à circularidade mineral no Brasil.

Dimensão	Indicador	Descrição
Ambiental	Reaproveitamento de resíduos minerais (%)	Percentual de rejeitos e estéreis reinseridos em cadeias produtivas
Ambiental	Redução de emissões de CO_2 (tCO_2e/ano)	Quantidade de emissões evitadas por substituição de fertilizantes químicos
Ambiental	Área reabilitada com remineralizadores (ha)	Superfície de solos agrícolas e áreas mineradas restauradas com pós de rocha
Social	Parcerias locais (nº)	Número de acordos entre mineradoras, cooperativas e agricultores

Social	Capacitação técnica (nº de pessoas)	Trabalhadores e produtores capacitados em boas práticas circulares
Governança	Políticas públicas e programas institucionais (nº)	Número de políticas ou planos que incorporam a circularidade mineral
Produtividade	Taxa de produção por hectare com remineralizador (t/ha)	Variação da produtividade agrícola obtida em áreas que utilizam remineralizadores em comparação a sistemas convencionais

Esses indicadores mostram que a circularidade mineral pode ser colocada em métricas de desempenho ESG, demonstrando que a transição para uma mineração sustentável envolve também responsabilidade social e transparência institucional. O pilar ambiental se relaciona com a eficiência no uso de recursos, a redução de emissões e a recuperação de áreas degradadas. O pilar social mede a capacidade de gerar benefícios compartilhados, como emprego, renda e capacitação técnica. Já o pilar de governança reflete a solidez institucional e a transparência. A circularidade mineral configura um sistema de gestão sustentável, em que desempenho ambiental, inclusão social e governança convergem para regenerar o território e valorizar os recursos minerais.

Entre os instrumentos avaliados, os remineralizadores agrícolas se destacam no eixo ambiental, promovendo a reinserção de materiais minerais na biosfera, substituindo fertilizantes químicos e reduzindo a pegada de carbono da produção agrícola. No eixo social, criando novas cadeias de valor regionalizadas, com participação de pequenas mineradoras e cooperativas agrícolas. Já na dimensão de governança, consolidam-se na estrutura normativa, regulamentada pela Instrução Normativa nº 5/2016 do MAPA, que estabelece critérios de qualidade, rastreabilidade e certificação. A Figura 15 ilustra o papel dos remineralizadores como elemento integrador da circularidade, mostrando como sua aplicação promove equilíbrio entre resultados ambientais, inclusão produtiva e gestão transparente.

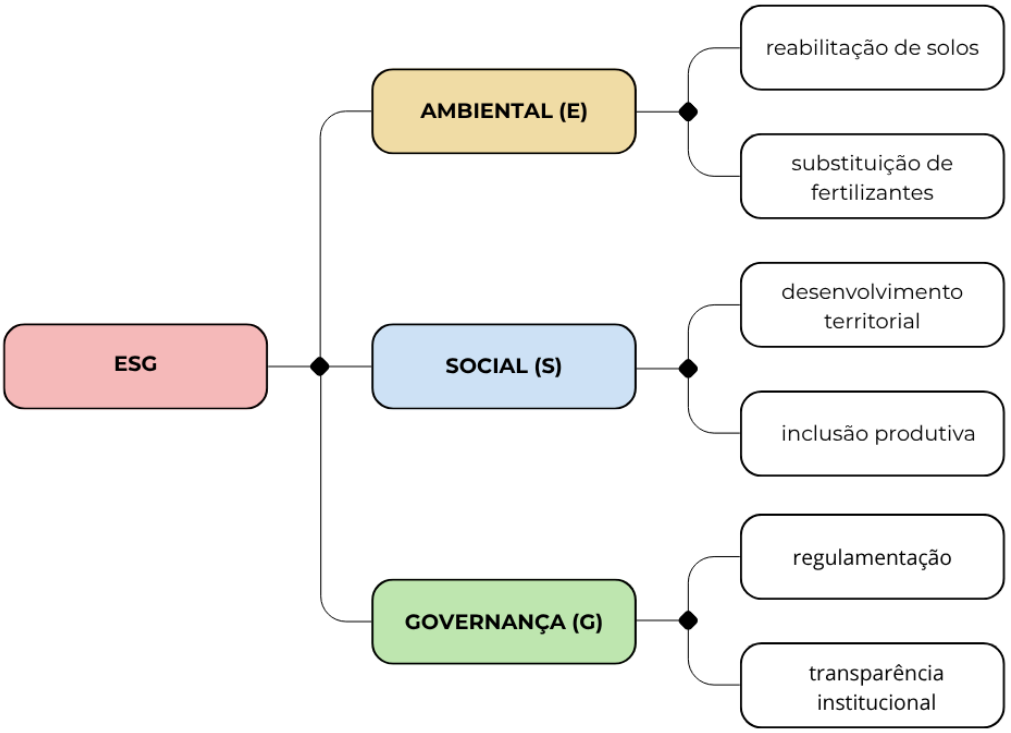


Figura 15 - Papel dos remineralizadores na integração dos pilares ESG
Fonte: elaborado pela autora (2025).

O fluxograma representa a circularidade como cada dimensão ESG reforçando as demais. O reaproveitamento de resíduos minerais se converte em benefícios ambientais, sociais e institucionais, criando um ciclo de valor regenerativo que redefine o papel da mineração no desenvolvimento sustentável.

Os resultados e metas apresentados mostram que a circularidade mineral pode ser medida e aprimorada, transformando-se em um modelo de mineração com foco em resultados reais. Nesse processo, os remineralizadores demonstram que a sustentabilidade mineral vai além da extração responsável, ela inclui a recuperação dos solos, a diminuição das emissões e a geração de benefícios econômicos e sociais duradouros. Dessa maneira, os indicadores propostos não apenas acompanham o avanço da circularidade, mas também apontam o caminho para sua consolidação definitiva. Isso reforça o potencial do Brasil em se tornar referência internacional em mineração regenerativa, integrando ciência, tecnologia e responsabilidade ambiental.

6. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no capítulo anterior demonstraram que os remineralizadores, junto com as práticas de reaproveitamento de resíduos e a adoção de indicadores ESG, constituem a base de um modelo produtivo capaz de reduzir impactos, gerar valor e promover

regeneração ambiental. A partir desses achados, este capítulo apresenta a síntese geral, as principais contribuições do estudo e as perspectivas futuras para a área.

6.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A ressignificação dos resíduos minerais aparece para ampliar o aproveitamento de materiais destinados a depósitos ou barragens. Os remineralizadores, surgem como o uso mais consolidado dessa lógica, fortalecidos por regulamentação específica, resultados agronômicos comprovados e crescente integração entre mineração e agricultura. Outro ponto importante identificado foi a integração operacional entre setores, vista na possibilidade de parcerias institucionais, arranjos produtivos regionais e expansão de projetos voltados à economia circular. Esse movimento reflete um avanço das relações intersetoriais e indica uma mudança gradual no entendimento da mineração como parte de sistemas biofísicos e produtivos mais amplos.

Por fim, a adoção de indicadores ESG mostrou-se essencial para medir o desempenho da circularidade mineral. Os indicadores apresentados demonstraram que é possível quantificar benefícios ambientais, sociais e de governança, reforçando que a mineração circular deve ser acompanhada por métricas verificáveis e alinhadas às diretrizes internacionais de sustentabilidade. Em conjunto, os resultados mostram que o Brasil possui necessários, base científica, institucional e produtiva para ampliar significativamente a aplicação de modelos circulares, especialmente em territórios onde mineração, agricultura e inovação já atuam de forma integrada.

6.2. CONTRIBUIÇÕES DOS ESTUDOS

O presente trabalho oferece contribuições relevantes para o campo da mineração circular, tanto no plano teórico quanto no prático. Em primeiro lugar, contribui ao sistematizar evidências atualizadas sobre a aplicação dos remineralizadores e ao demonstrar seu papel como vetor de circularidade mineral no país. Isso amplia a compreensão sobre como resíduos minerais podem ser reutilizados em cadeias produtivas de forma eficiente e economicamente viável.

Outra contribuição importante está na articulação entre remineralizadores e indicadores ESG. Ao propor indicadores aplicáveis à realidade brasileira, o estudo amplia o debate sobre governança mineral, introduzindo parâmetros capazes de auxiliar políticas públicas e ferramentas de monitoramento empresarial. O trabalho também contribui ao destacar a importância das relações intersetoriais para a consolidação de práticas circulares. Essa abordagem valida que a transição para modelos mais sustentáveis necessita de cooperação, inovação contínua e

reconfiguração das cadeias produtivas em direção ao desenvolvimento regional.

Finalmente, ao reunir dados, análises e interpretações em uma perspectiva crítica, esta pesquisa reforça o papel do Brasil como espaço privilegiado para o avanço da mineração circular, devido à sua diversidade geológica, à capacidade científica e às demandas crescentes por práticas produtivas que conciliam eficiência e regeneração.

6.3. LIMITAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES

Apesar das diversas análises, o estudo apresenta limitações acerca do estágio atual do Brasil. A principal limitação refere-se à falta de dados padronizados e de séries históricas sobre o desempenho da circularidade mineral. Informações sobre emissões evitadas, reaproveitamento real de resíduos em escala nacional e impactos socioeconômicos ainda se encontram dispersas, dificultando comparações e análises mais precisas.

Outra limitação é à heterogeneidade dos territórios minerários brasileiros. As práticas e condições de aplicação dos remineralizadores variam amplamente entre biomas, culturas agrícolas e tipos de solo, o que demanda análises mais específicas. Além disso, a caracterização geoquímica dos pós de rocha ainda é insuficiente em muitas regiões, restringindo estudos mais aprofundados sobre eficiência agronômica e possíveis riscos associados ao uso inadequado desses materiais. De acordo com essas limitações, é recomendado que pesquisas futuras ampliem investigações de longo prazo sobre eficiência agronômica dos remineralizadores, considerando diferentes escalas espaciais e condições climáticas. Sugere-se também o desenvolvimento de metodologias de avaliação de ciclo de vida voltadas especificamente à mineração circular, além de estudos que explorem modelos de governança capazes de coordenar cadeias produtivas circulares entre mineração, agricultura e setor público. Recomenda-se o aprofundamento de análises socioeconômicas para medir os impactos territoriais da circularidade mineral, principalmente na geração de empregos e fortalecimento de redes locais. A expansão de indicadores ESG específicos para o setor, com séries históricas e padrões de transparência, também é um campo promissor para futuras pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREFEN. **ABREFEN protagoniza mais um ano de luta pelo setor e pela agricultura regenerativa baseada nos REM e FN**. 2023. Disponível em: https://abrefen.org.br/. Acesso em: 14 out. 2025.

ACOSTA, A. **O bem viver**: uma oportunidade para imaginar outros mundos. São Paulo: Autonomia Literária, 2016.

ACTION CANADA. **Critical Minerals and the Future of Tailings Re-Mining**. Ottawa, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). O que é mineração. Brasília, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/mineracao/o-que-e-mineracao. Acesso em: 2 jul. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução nº 68, de 30 de novembro de 2021**. Estabelece critérios e procedimentos para elaboração, análise e acompanhamento do Plano de Fechamento de Mina. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução nº 85, de 21 de setembro de 2021**. Dispõe sobre o aproveitamento de rejeitos e estéreis da mineração. Diário Oficial da União, n. 181, p. 107, 24 set. 2021.

AGROADVANCE. **Importação de fertilizantes no Brasil**: panorama e desafios atuais. 2023. Disponível em: https://agroadvance.com.br/blog-importacao-de-fertilizantes-brazil/. Acesso em: 14 out. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6023**: informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13028**: fechamento de mina – Diretrizes. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13029**: gestão de barragens de mineração – Requisitos e diretrizes. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14724**: informação e documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação. Rio de Janeiro, 2023.

ASSIS DANTAS, H. F. S.; FREITAS, L. S. Contribuições da mineração para o município na perspectiva da sustentabilidade. **[S.l.: s.n.]**, [s.d.].

ASSIS DANTAS, H. F. S. et al. A mineração e os indicadores de sustentabilidade local. In: CONGRESSO NACIONAL DE GESTÃO AMBIENTAL – CONGESTAS, 2013, São Paulo. **Anais...** São Paulo: CONGESTAS, 2013. Disponível em: https://eventos.ecogestaobrasil.net/congestas2013/trabalhos/pdf/congestas2013-et-05-027.pdf. Acesso em: 12 maio 2025.

ASSIS DANTAS, H. F. S. et al. Sustentabilidade em municípios mineradores: proposta de um índice. In: CONGRESSO NACIONAL DE GESTÃO AMBIENTAL – CONGESTAS, 2013, São Paulo. **Anais...** São Paulo: CONGESTAS, 2013. Disponível em: https://eventos.ecogestaobrasil.net/congestas2013/trabalhos/pdf/congestas2013-et-05-028.pdf. Acesso em: 12 maio 2025.

AUTORIDADE INTERNACIONAL DOS FUNDOS MARINHOS (ISA). **International Seabed Authority**. 2025. Disponível em: https://isa.org.jm/. Acesso em: 3 nov. 2025.

BERGSTEINER, H.; AVERY, G. C. **Sustainable leadership**: models and guidelines for practice. New York: Routledge, 2011.

BOLIDEN. **Sustainability and Circular Mining Report**. Stockholm, 2023.

BRASIL. Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967. Dá nova redação ao Código de Mineração. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 28 fev. 1967. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del0227.htm. Acesso em: 2 jul. 2025.

BRASIL. Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980. Dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes e corretivos.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2 set. 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 2 jul. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. Altera a Lei nº 6.894/1980 para incluir remineralizadores e substratos para plantas.

BRASIL. Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017. Cria a Agência Nacional de Mineração. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 27 dez. 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Decreto nº 8.384, de 29 de dezembro de 2014. Dispõe sobre remineralizadores e condicionadores de solo.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Política Nacional de Mineração 2050**. Brasília, DF, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/.../PNM2050. Acesso em: 9 set. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Plano Nacional de Economia Circular 2025–2034**. Brasília, 2025.

CADERNOS DE AGROECOLOGIA. Remineralizadores e bioinsumos como alternativa sustentável para fertilidade de solos tropicais. 2024.

CANADIAN BAR ASSOCIATION (CBA). **Equity in the Space Frontier**: The Laws of Commercial Space Mining and Solutions for Common Benefit. 2025.

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM). **Mineração e desenvolvimento sustentável**. [S.l.]: CETEM, [s.d.].

CMS LAW-NOW. **Space Mining**: Breach of International Law in Space? 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Economia circular**: caminho estratégico para a indústria brasileira. Brasília: CNI, 2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 9, de 2 de dezembro de 1990**. Dispõe sobre critérios para o encerramento de atividades mineradoras.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Critérios e valores orientadores para qualidade do solo.

DERA – German Mineral Resources Agency. **Recycling and Secondary Raw Materials in Germany**. Berlin, 2022.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy**. Cowes, 2013.

EMBRAPA. **Aspectos econômicos da produção de soja com o uso de remineralizadores e bioinsumos no Cerrado**. Brasília, DF, 2024.

EMBRAPA. GeoInfo: Identificação da origem dos produtos registrados no MAPA. 2025.

EMBRAPA. Mesa-redonda aborda estratégias para reduzir a dependência de fertilizantes importados. 2023.

EMBRAPA. Pesquisa brasileira avança no uso de remineralizadores. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA (EPAGRI). **Remineralizadores de solo e seus efeitos sobre sistemas agroecológicos**. 2023.

FERREIRA, V. F.; SILVA, R. R.; REIS, R. S. A mineração circular como proposta de sustentabilidade para o setor mineral. **Revista Mineira de Geociências**, v. 6, n. 1, 2021.

GARCIA, M.; THOMAS, L.; WANG, S. Advances in circular mining technologies: a global review. **Resources Policy**, v. 82, 2023.

GAZETA DO POVO. US$ 25 bilhões: o custo para o agro brasileiro ao importar 85% dos fertilizantes. Curitiba, 2023.

GEISSDOERFER, M. et al. The circular economy – a new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, 2017.

GERMANY. Federal Ministry for the Environment. **National Circular Economy Strategy**. Berlin, 2023.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GONÇALVES, R. J. F. A.; MENDONÇA, M. R. Expansão da atividade mineradora e os conflitos socioambientais. **Revista Territorial**, 2015.

GOVERNMENT OF CANADA. **Circular Economy Initiatives in the Mining Sector**. Ottawa, 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Faturamento do setor mineral em 2024 é de R$ 270,8 bilhões. Brasília: IBRAM, 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Gestão para a sustentabilidade na mineração**: 20 anos de história. Brasília, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Guia para elaboração de plano de fechamento de mina**. Brasília, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Mineração e desenvolvimento sustentável**. Brasília, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Práticas em circularidade no setor mineral**. 2. ed. Brasília, 2024.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS (IGC – USP). Mineração espacial aparece como alternativa futura, mas é cara e complexa. 2025.

INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS (ICMM). **Circular economy in the mining and metals sector**. Londres, 2019.

INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS (ICMM). Metals and minerals are at the heart of a circular economy. Londres, 2019.

INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS (ICMM). **Sustainable development framework**. Londres, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 59004**: Circular economy — Framework and principles for implementation. Geneva: ISO, 2024.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

LIMA NETO, J. F. **Impactos socioambientais de uma mineradora sob a ótica de moradores adjacentes**. 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

LKAB. **Recovery of Phosphorus and Rare Earth Elements from Mining Residues**. Kiruna, 2024.

LOVÓN-CANCHUMANI, G. A.; LIMA, F. M. R. S.; OLIVEIRA, P. P. **Avaliação do ciclo de vida na mineração**: estudo da produção de minério de ferro. Rio de Janeiro: CETEM, 2015.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016**. Estabelece as normas para registro, especificações e garantias dos remineralizadores. Brasília, 2016.

MARTINS, E. S. **Princípios geoquímicos, mineralógicos e biológicos do manejo de remineralizadores de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2021.

MENDES, J. C. Mineração sustentável: realidade ou utopia? **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2013.

METAMAT – Companhia Mato-grossense de Mineração. **Relatório Técnico**: Avaliação de rejeitos de mineração e rochas silicáticas para uso como remineralizadores no estado de Mato Grosso. Cuiabá, 2023. Disponível em: https://midiarural.com.br/2024/11/05/projeto-da-metamat-utiliza-rejeitos-de-mineracao-como-insumos-para-fortalecer-a-agricultura-em-mt/. Acesso em: 11 fev. 2025.

MILANEZ, B. **Mineração, ambiente e sociedade**: impactos socioambientais e caminhos para a sustentabilidade. Juiz de Fora: POEMAS/UFJF, 2017.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. Normas sobre registro, controle e comercialização de remineralizadores.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Plano Nacional de Fertilizantes**. Brasília, 2022.

NAKAMURA, K. L. F. **Avaliação da potencialidade do uso de subproduto de mineração para remineralização do solo degradado**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Estadual Paulista, [Local], 2024.

NEW SCIENCE PUBLISH. Potencial de remineralizadores silicáticos para a agricultura. **Arace Journal**, 2024.

NOTÍCIAS AGRÍCOLAS. Uso de remineralizadores ganha força entre agricultores para regenerar solos. 2025.

OLIVEIRA, L. F.; SANTOS, M. R.; SILVA, A. P. Mineração circular: caminhos para a sustentabilidade. **Revista Engenharia e Sustentabilidade**, 2022.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **Global material resources outlook to 2060**. Paris: OECD, 2019.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **OECD review of the mining sector in Brazil**. Paris: OECD, 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Nosso futuro comum**. 2. ed. Rio de Janeiro: FGV, 1991.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO (OIT). **Convenção nº 169 sobre Povos Indígenas e Tribais**. Genebra, 1989.

PAIVA, S. M. C. et al. Indicadores de sustentabilidade para mineração no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL (I CBAIA), 2012.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS (PUC GOIÁS). Aspectos jurídicos da mineração e o meio ambiente. **Revista Jurídica da PUC Goiás**, 2021.

PORTAL DO AGRONEGÓCIO. Remineralizadores ganham espaço no planejamento da próxima safra. 2024.

PORTELLA, M. O. Efeitos colaterais da mineração no meio ambiente. **Revista Brasileira de Políticas Públicas**, 2015.

REVISTA MINÉRIOS & MINERALES. Uso de rejeito do processo de produção de concentrado de cobre e ouro da Mina Chapada como remineralizador de solo. **Revista Minérios & Minerales**, 2023. Disponível em: https://revistaminerios.com.br/uso-de-rejeito-do-processo-de-producao-de-concentrado-de-cobre-e-ouro-da-mina-chapada-como-remineralizador-de-solo-2/. Acesso em: 11 fev. 2025.

SÁNCHEZ, L. E.; MORSE, S. Sustainability assessment of mining projects. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, 2014.

SANTOS, B. S.; DANTAS, M. E. V. **Impactos socioambientais da mineração no Brasil**. Brasília: IPEA, 2017.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). **Estudo sobre potenciais remineralizadores de solo**. Brasília, 2023.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). Perguntas frequentes sobre remineralizadores de solo. Brasília, 2022.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). **Recursos minerais do fundo do mar**. Brasília, 2024.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). Remineralizadores de solo são alternativa para fertilizantes tradicionais. 2023.

SILVA, R. C. da; FRANÇA, S. A. R. **Mineração circular**: conceito, desafios e oportunidades para o Brasil. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2020.

SPRINGER. Use of coal mining wastes in the construction industry to promote circular economy. **Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies**, 2025.

THE REGULATORY REVIEW. The Future of Mining in Outer Space. 2024.

TIME. Why Taiwan is becoming a leader in urban mining. 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA (UFU). Economia circular: a reinvenção do modelo econômico a partir da sustentabilidade. Uberlândia, 2018.

VALE. Mineração circular. 2025.

VIANA, L. S. B.; CAITANO, T. B. S.; PONTES, A. N. Soil remineralization as an initiative for sustainable development. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, 2021.

ZHANG, Y. et al. Circular economy pathways for the mining sector: technologies and governance. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, 2022.