

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDERSON ALEXANDRE ANHUSSI

O SETOR MINERAL BRASILEIRO: UMA ANÁLISE DA SUA CONTRIBUIÇÃO NA
ECONOMIA DO BRASIL NO CONTEXTO DE CHOQUES EXTERNOS E DA
INDÚSTRIA 4.0

CURITIBA

2025

ANDERSON ALEXANDRE ANHUSSI

O SETOR MINERAL BRASILEIRO: UMA ANÁLISE DA SUA CONTRIBUIÇÃO NA
ECONOMIA DO BRASIL NO CONTEXTO DE CHOQUES EXTERNOS E DA
INDÚSTRIA 4.0

Dissertação apresentada ao Programa Profissional de Pós-Graduação em Economia, no Setor de Ciências Sociais Aplicadas, na Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Economia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Virginia Laura Fernández

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS

Anhussi, Anderson Alexandre

O setor mineral brasileiro : uma análise da sua contribuição na economia do Brasil no contexto de choques externos e da Indústria 4.0 / Anderson Alexandre Anhussi .- 2025.

1 recurso on-line: PDF.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Programa de Pós-Graduação em Economia. Orientadora: Profa. Dra. Virginia Laura Fernández.

1.Economia. 2. Indústria mineral - Brasil. 3. Industry 4.0. 4. Minérios de ferro. 5. Nitratos. I. Fernández, Virginia Laura. II. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Sociais Aplicadas. Programa de Pós-Graduação em Economia. III. Título.

Bibliotecária: Kathya Fecher Dias – CRB-9/2198



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS SOCIAIS E APLICADAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ECONOMIA -
40001016051P7

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ECONOMIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ANDERSON ALEXANDRE ANHUSSI**, intitulada: **O SETOR MINERAL BRASILEIRO: UMA ANÁLISE DA SUA CONTRIBUIÇÃO NA ECONOMIA DO BRASIL NO CONTEXTO DE CHOQUES EXTERNOS E DA INDÚSTRIA 4.0**, sob orientação da Profa. Dra. VIRGINIA LAURA FERNANDEZ, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 30 de Junho de 2025.

Assinatura Eletrônica

03/07/2025 09:18:10.0

VIRGINIA LAURA FERNANDEZ

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

03/07/2025 13:45:58.0

WELLINGTON DA SILVA PEREIRA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

02/07/2025 17:20:26.0

RICARDO LOBATO TORRES

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedicado às mais de 7 milhões de vítimas fatais da COVID-19 em todo o mundo e aos cerca de 1 milhão de mortos e feridos resultantes da invasão da Rússia à Ucrânia (até dezembro de 2024).

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda energia divina, pois a minha fé foi essencial em todo esse processo.

Agradeço aos meus pais, **José e Maria**, pelo amor incondicional, apoio constante e por serem minha maior fonte de inspiração e força em cada passo desta jornada.

Agradeço às minhas irmãs, **Amanda e Mariele**, pelo carinho, parceria, cumplicidade, apoio e por serem sempre meu porto seguro nos momentos mais difíceis.

Agradeço à minha família, por acreditarem em mim, mesmo nos momentos de incerteza, e por estarem sempre ao meu lado, oferecendo palavras de encorajamento e conforto.

Agradeço à minha querida e admirada orientadora, **Prof^a. Dr^a. Virginia Laura Fernández**, por ter compreendido o momento em que escrevi este trabalho, acolhido as minhas dificuldades e por ter sido fundamental para minha formação como pesquisador. Agradeço por todo o conhecimento transmitido, pela paciência, gentileza e carinho durante a orientação, que foram essenciais para que eu pudesse concluir esta etapa.

Agradeço aos meus amigos, que, com paciência, compreensão e incentivo, me apoiaram nos momentos mais desafiadores, tornando o caminho mais leve e possível.

Agradeço a todos os **professores do Programa Profissional de Pós-Graduação em Economia (PPGEcon)**, que foram fundamentais em nossa trajetória por mais conhecimento.

Agradeço à ilustre **Universidade Federal do Paraná**, por oferecer o ambiente acadêmico necessário para o desenvolvimento deste estudo. Meus agradecimentos também se estendem a todos os funcionários, desde os técnico-administrativos, aos colaboradores responsáveis pela limpeza e manutenção, bem como aos diretores e ao reitor da universidade, cujo trabalho foi essencial para viabilizar este projeto.

Por fim, gostaria de agradecer às pessoas que, de alguma maneira, contribuíram para que mais este objetivo fosse alcançado.

"Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá."

- SENNA, 1994

RESUMO

Este estudo investiga os efeitos econômicos de dois choques externos sobre o setor mineral brasileiro: a pandemia de COVID-19, com ênfase na extração e exportação de minério de ferro, e a invasão da Rússia à Ucrânia, com foco na variação dos preços do nitrato de amônio. A análise também examina como a Indústria 4.0 e os minerais estratégicos associados a esta nova revolução industrial têm contribuído para a resiliência e a adaptação do setor, principalmente diante desses eventos disruptivos, além de apontar caminhos para seu reposicionamento futuro. Adicionalmente, a pesquisa analisa as externalidades negativas da atividade mineral, destacando os impactos econômicos e socioambientais que fragilizam sua sustentabilidade. A pesquisa adota uma abordagem empírico-analítica e constrói um conjunto original de indicadores com base em dados primários e secundários, extraídos de fontes oficiais, relatórios corporativos e painéis públicos. Entre os principais achados, destacam-se a elevação da receita cambial e da arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) em 2021, além da manutenção e, até mesmo, geração de empregos durante a pandemia de COVID-19, impulsionada sobretudo pelo aumento nos preços do minério de ferro. Além disso, foi observada uma forte alta no preço do nitrato de amônio, insumo essencial para a mineração, no contexto da invasão, evidenciando a vulnerabilidade do setor diante da dependência de insumos importados. O estudo conclui que, embora o setor tenha se mostrado economicamente estratégico em tempos de choques externos, sua inserção internacional ainda apresenta fragilidades. A adoção de tecnologias da Indústria 4.0 e o fortalecimento de cadeias produtivas locais associadas a minerais estratégicos podem representar caminhos promissores para ampliar a eficiência, reduzir riscos e promover maior autonomia tecnológica.

Palavras-chave: Setor Mineral Brasileiro. Choques Externos. Indústria 4.0. Minério de Ferro. Nitrato de Amônio.

ABSTRACT

This study investigates the economic effects of two external shocks on the Brazilian mineral sector: the COVID-19 pandemic, with an emphasis on iron ore extraction and exports, and the Russian invasion of Ukraine, focusing on fluctuations in ammonium nitrate prices. The analysis also examines how Industry 4.0 and the strategic minerals associated with this new industrial revolution have contributed to the sector's resilience and adaptability, especially in the face of such disruptive events, while also pointing to possible paths for its future repositioning. Additionally, the research explores the negative externalities of mining activities, highlighting the economic and socio-environmental impacts that undermine the sector's sustainability. The study adopts an empirical-analytical approach and builds an original set of indicators based on primary and secondary data extracted from official sources, corporate reports and public dashboards. Among the main findings are the increase in foreign exchange revenues and in the collection of the Financial Compensation for the Exploitation of Mineral Resources (CFEM) in 2021, as well as the maintenance and even creation of jobs during the COVID-19 pandemic, driven primarily by rising iron ore prices. Furthermore, a sharp increase in the price of ammonium nitrate, an essential input for mining, was observed in the context of the invasion, revealing the sector's vulnerability due to its dependence on imported inputs. The study concludes that although the sector has proven to be economically strategic in times of external shocks, its international integration still presents structural weaknesses. The adoption of Industry 4.0 technologies and the strengthening of local value chains associated with strategic minerals may represent promising avenues to enhance efficiency, reduce risks and promote greater technological autonomy.

Keywords: Brazilian Mineral Sector. External Shocks. Industry 4.0. Iron Ore. Ammonium Nitrate.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	LINHA DO TEMPO 1 - PRIMEIRA FASE: 1560-1917.....	29
FIGURA 2 -	LINHA DO TEMPO 2 - SEGUNDA FASE: 1920-1996	30
FIGURA 3 -	LINHA DO TEMPO 3 - TERCEIRA FASE: 2000-2024.....	32
FIGURA 4 -	MODELO DE DETONADOR NÃO ELÉTRICO UTILIZADO EM MINERAÇÃO	43
FIGURA 5 -	MODELO DE DETONADOR ELETRÔNICO UTILIZADO EM MINERAÇÃO	44
FIGURA 6 -	MODELO DE <i>BOOSTER</i> UTILIZADO EM MINERAÇÃO	44
FIGURA 7 -	MODELOS DE CORDÉIS UTILIZADOS EM MINERAÇÃO	45
FIGURA 8 -	MODELO DE EMULSÃO ENCARTUCHADA UTILIZADA EM MINERAÇÃO	45
FIGURA 9 -	MODELO DE EMULSÃO MATRIZ UTILIZADO EM MINERAÇÃO ..	46
FIGURA 10 -	MODELO DE CAMINHÃO UTILIZADO PARA TRANSPORTAR A EMULSÃO MATRIZ EM OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO.....	47
FIGURA 11 -	BANCADA DE DESMONTE EM OPERAÇÃO DE MINERAÇÃO	49
FIGURA 12 -	CORTE LATERAL DOS TIPOS DE ESCORVA: CORDEL COM ENCARTUCHADO E CORDEL COM <i>BOOSTER</i>	50
FIGURA 13 -	CORTE LATERAL DA ESCORVA COM <i>BOOSTER</i> E EMULSÃO MATRIZ.....	51
FIGURA 14 -	CORTE LATERAL DA ESCORVA COM ENCARTUCHADO E EMULSÃO MATRIZ	51
FIGURA 15 -	FLUXOGRAMA DE UMA USINA DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO	52
FIGURA 16 -	TIPOS DE MINÉRIO DE FERRO	54
FIGURA 17 -	ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO	55
FIGURA 18 -	EXEMPLO DE UMA MINA A CÉU ABERTO	58
FIGURA 19 -	ESQUEMA DE UMA MINA MISTA	59
FIGURA 20 -	ESQUEMA DE UMA MINA SUBTERRÂNEA	60
FIGURA 21 -	EXEMPLO DE UMA MINA A SUBTERRÂNEA.....	60
FIGURA 22 -	PARTICIPAÇÃO DAS PRINCIPAIS SUBSTÂNCIAS METÁLICAS NO VALOR DA PRODUÇÃO MINERAL COMERCIALIZADA NO ANO DE 2021	62

FIGURA 23 -	ESTATÍSTICAS SOBRE AS PRINCIPAIS SUBSTÂNCIAS METÁLICAS - ALUMÍNIO, COBRE, CROMO, ESTANHO, FERRO, MANGANÊS, NIÓBIO, NÍQUEL, OURO, VANÁDIO E ZINCO - NO ANO DE 2021	63
FIGURA 24 -	LOCALIZAÇÃO DAS PRINCIPAIS RESERVAS MINERAIS BRASILEIRAS DE ALUMÍNIO, COBRE, CROMO, ESTANHO, FERRO, MANGANÊS, NIÓBIO, NÍQUEL, OURO, VANÁDIO E ZINCO NO ANO DE 2021	64
FIGURA 25 -	MINAS COM PRODUÇÃO ROM > 1.000.000 t/ANO NO ANO DE 2021	66
FIGURA 26 -	AMOSTRAS DE ELEMENTOS TERRAS RARAS	80
FIGURA 27 -	DEGRADAÇÃO AMBIENTAL GERADA PELA MINERAÇÃO NA REGIÃO DE GUARAREMA/SP NO ANO DE 2010	96
FIGURA 28 -	EXPORTAÇÕES DO BRASIL EM 2021	102
FIGURA 29 -	CLASSIFICAÇÃO DAS INDÚSTRIAS EXTRATIVAS SEGUNDO CNAE 2.0	108
FIGURA 30 -	EXPORTAÇÕES DO BRASIL EM 2020	125

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - EVOLUÇÃO DO PIB BRASILEIRO E PARTICIPAÇÃO DA IEM NO PIB DO BRASIL (2000–2024).....	35
GRÁFICO 2 - EVOLUÇÃO DO PIB DA IEM E DO PIB DO FERRO, E SUAS PARTICIPAÇÕES NO PIB BRASILEIRO (2000–2024)	35
GRÁFICO 3 - PARTICIPAÇÃO DO PIB DO FERRO NO PIB DA IEM (2000–2024)	35
GRÁFICO 4 - EVOLUÇÃO DOS INVESTIMENTOS NO SETOR MINERAL NO BRASIL (2003–2023).....	36
GRÁFICO 5 - EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO TOTAL MINERAL E DA PRODUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO NO BRASIL (2000–2023).....	37
GRÁFICO 6 - AS 10 MAIORES EMPRESAS DO BRASIL NA BOLSA DE VALORES B3 (02/09/2024)	73
GRÁFICO 7 - CRESCIMENTO REAL DO PIB (VARIAÇÃO PERCENTUAL ANUAL) - BRASIL E MUNDO (1980–2028).....	84
GRÁFICO 8 - EVOLUÇÃO DO PREÇO DO MINÉRIO DE FERRO EM USD POR TON (2016-2025).....	87
GRÁFICO 9 - ÍNDICE DE PREÇOS AO PRODUTOR DE PRODUTOS QUÍMICOS: AMÔNIA SINTÉTICA, ÁCIDO NÍTRICO E COMPOSTOS DE AMÔNIO (2014-2024).....	88
GRÁFICO 10 - CRESCIMENTO REAL DO PIB (VARIAÇÃO PERCENTUAL ANUAL) - RÚSSIA, UCRÂNIA E BRASIL (2002–2022)	89
GRÁFICO 11 - EVOLUÇÃO DA TAXA DE CâMBIO COMERCIAL (USD/BRL) (1999-2023).....	103
GRÁFICO 12 - EVOLUÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO NAS EXPORTAÇÕES TOTAIS DO BRASIL EM VALOR FOB (% DO TOTAL) (1997–2023).....	126
GRÁFICO 13 - EVOLUÇÃO DA EXPORTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DO BRASIL EM VALOR FOB (1997–2023), EM MILHÕES DE USD ..	131
GRÁFICO 14 - EVOLUÇÃO DA EXPORTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DO BRASIL EM QUANTIDADE FOB (1997–2023), EM BILHÕES DE KG	132

GRÁFICO 15 - EVOLUÇÃO DA EXPORTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DO BRASIL PARA A CHINA EM VALOR FOB (1997–2023), EM MILHÕES DE USD	136
GRÁFICO 16 - EVOLUÇÃO DA EXPORTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DO BRASIL PARA OS EUA EM VALOR FOB (1997–2023), EM MILHÕES DE USD	137
GRÁFICO 17 - ARRECADAÇÃO ANUAL DA CFEM (2009-2023)	139
GRÁFICO 18 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA ARRECADAÇÃO DA CFEM POR SUBSTÂNCIA MINERAL EM 2019	140
GRÁFICO 19 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA ARRECADAÇÃO DA CFEM POR SUBSTÂNCIA MINERAL EM 2020	141
GRÁFICO 20 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA ARRECADAÇÃO DA CFEM POR SUBSTÂNCIA MINERAL EM 2021	141
GRÁFICO 21 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA ARRECADAÇÃO DA CFEM POR SUBSTÂNCIA MINERAL EM 2022	142
GRÁFICO 22 - ARRECADAÇÃO DA CFEM POR ESTADO (2020-2022)	143
GRÁFICO 23 - GERAÇÃO DE EMPREGO PELA IEM (1996-2021)	145
GRÁFICO 24 - GERAÇÃO DE RENDA PELA IEM (2008-2021).....	146
GRÁFICO 25 - GERAÇÃO DE RENDA RECEITA LÍQUIDA DE VENDAS IEM (2008-2021).....	147
GRÁFICO 26 - PREÇOS MÉDIOS TRIMESTRAIS DE NITRATO DE AMÔNIO COM BASE NO INDICADOR FOB MAR NEGRO (2019-2022)	149
GRÁFICO 27 - PREÇOS MÉDIOS TRIMESTRAIS DE FERTILIZANTES COM BASE NO INDICADOR FOB MAR BÁLTICO (2019-2024)	150
GRÁFICO 28 - VARIAÇÃO DO PPI PARA FERTILIZANTES SEGUNDO DADOS DO BLS (2019-2024).....	151

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 -	PRINCIPAIS OPERAÇÕES DE MINERADORAS AFETADAS NA AMÉRICALATINA.....	91
QUADRO 2 -	INDICADORES, BREVES DESCRIÇÕES, FONTES E RECORTES TEMPORAIS.....	118

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	PORTE E MODALIDADE DE LAVRA DAS MINAS NO ANO DE 2021	65
TABELA 2 -	QUANTIDADE E PORTE DAS USINAS NO ANO DE 2021	66
TABELA 3 -	VALOR DAS EXPORTAÇÕES BRASILEIRAS DE SUBSTÂNCIAS METÁLICAS SELECIONADAS EM 2021, POR GRAU DE PROCESSAMENTO (US\$ MILHÕES FOB)	127
TABELA 4 -	VALOR DAS EXPORTAÇÕES DAS 11 PRINCIPAIS SUBSTÂNCIAS METÁLICAS NO ANO DE 2021 (POR PAÍS DESTINO).....	129
TABELA 5 -	BALANÇO DO COMÉRCIO EXTERIOR DAS 11 PRINCIPAIS SUBSTÂNCIAS METÁLICAS NO ANO DE 2021	130
TABELA 6 -	PAÍSES DE DESTINO DAS EXPORTAÇÕES DE MINÉRIO DE FERRO DO BRASIL EM VALOR FOB (1997–2023), EM MILHÕES DE USD	134
TABELA 7 -	PAÍSES DE DESTINO DAS EXPORTAÇÕES DE MINÉRIO DE FERRO DO BRASIL EM VALOR FOB (1997–2022), EM MILHÕES DE USD	135

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANM	- Agência Nacional de Mineração
AN	- <i>Ammonium Nitrate</i>
B3	- Brasil, Bolsa, Balcão
BHP	- <i>Broken Hill Proprietary</i>
BHS	- <i>Brazilian Hematite Syndicate</i>
BLS	- <i>Bureau of Labor Statistics</i>
CFEM	- Compensação Financeira pela Exploração de Recursos
Minerais	
CNAE	- Classificação Nacional de Atividades Econômicas
CPI	- Comissões Parlamentares de Inquérito
CSN	- Companhia Siderúrgica Nacional
CVRD	- Companhia Vale do Rio Doce
DIPEM	- Departamento de Informações e Estudos Minerários
FAO	- Organização das Nações Unidas para Alimentação e
Agricultura	
FMB	- <i>Fertiliser Market Bulletin</i>
FMG	- <i>Fortescue Metals Group</i>
FMI	- Fundo Monetário Internacional
FOB	- <i>Free-on-Board</i>
FRED	- <i>Federal Reserve Economic Data</i>
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEM	- Indústria Extrativa Mineral
IMF	- <i>International Monetary Fund</i>
ISIC	- <i>International Standard Industrial Classification of All Economic</i>
MDIC	- Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços
MME	- Ministério de Minas e Energia
OMC	- Organização Mundial do Comércio
OMS	- Organização Mundial da Saúde
SITEC	- Subsecretaria de Inteligência e Estatística de Comércio Exterior
STF	- Supremo Tribunal Federal

PIA	- Pesquisa Industrial Anual
PIB	- Produto Interno Bruto
PPI	- <i>Producer Price Index</i>
QF	- Quadrilátero Ferrífero
ROM	- <i>Run-Of-Mine</i>
UE	- União Europeia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	EVOLUÇÃO HISTÓRICA E CARACTERIZAÇÃO DO SETOR MINERAL BRASILEIRO COM ÊNFASE NA EXTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO ..	23
2.1	EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO SETOR MINERAL BRASILEIRO COM ÊNFASE NA EXTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO	23
2.2	RELEVÂNCIA DO SETOR MINERAL BRASILEIRO COM ÊNFASE NO MINÉRIO DE FERRO	34
2.3	FUNDAMENTOS DA MINERAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E ESPECIFICIDADES DO SETOR MINERAL BRASILEIRO	38
2.3.1	O ferro brasileiro	39
2.3.2	Da fabricação dos principais explosivos utilizados no Brasil até a rocha desmontada	42
2.3.3	Da chegada do minério de ferro em forma de rocha desmontada nas usinas de beneficiamento até o transporte dos produtos finais	52
2.3.4	Fundamentos da mineração	56
2.4	PANORAMA DA INDÚSTRIA EXTRATIVA MINERAL BRASILEIRA	61
3	INDÚSTRIA 4.0: INOVAÇÕES E MINERAIS ESTRATÉGICOS ASSOCIADOS A NOVA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL	68
3.1	CONCEITO E PRINCIPAIS ASPECTOS DA INDÚSTRIA 4.0	69
3.2	APLICAÇÕES DA INDÚSTRIA 4.0 NO SETOR MINERAL BRASILEIRO	70
3.3	TRANSFORMAÇÕES DA INDÚSTRIA 4.0 NO SETOR DE MINERAÇÃO DE FERRO	72
3.3.1	Estudo de caso: transformações da indústria 4.0 na mineradora Vale	72
3.3.2	Transformações da indústria 4.0 em outras mineradoras de extração do minério de ferro	75
3.4	MINERAIS ESTRATÉGICOS PARA A INDÚSTRIA 4.0: NIÓBIO, LÍTIO E TERRAS RARAS	77
3.4.1	A importância do nióbio para a indústria 4.0 e a transição para uma economia de baixo carbono no Brasil	78
3.4.2	O papel do lítio na transição energética	78
3.4.3	Terras raras: um potencial a ser desenvolvido	79
4	CHOQUES EXTERNOS: PANDEMIA DE COVID-19 E A INVASÃO DA RÚSSIA À UCRÂNIA	83

4.1	VISÃO GERAL DOS CHOQUES EXTERNOS E SEUS IMPACTOS NA ECONOMIA GLOBAL	83
4.2	PANDEMIA DE COVID-19	85
4.3	INVASÃO DA RÚSSIA À UCRÂNIA	87
4.3.1	Sanções econômicas aplicadas à Rússia e seus impactos na cadeia de suprimentos	90
5	EXTERNALIDADES NEGATIVAS DA ATIVIDADE MINERADORA NO BRASIL: ANÁLISE DOS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS E ECONÔMICOS.....	94
5.1	IMPACTO SOCIOAMBIENTAL DA ATIVIDADE DE MINERAÇÃO NO BRASIL	94
5.1.1	Alterações ambientais e geração de áreas degradadas	95
5.1.2	Transtornos à população que habita no entorno das minas	96
5.1.3	Barragens de rejeitos de minérios: um passivo da mineração	97
5.1.3.1	Acordos de reparação no caso Mariana: perspectivas nacionais e internacionais.....	100
5.2	IMPACTO ECONÔMICO DA ATIVIDADE DE MINERAÇÃO NO BRASIL	101
6	METODOLOGIA.....	106
6.1	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	106
6.1.1	Levantamento e revisão bibliográfica	106
6.1.2	Coleta de dados.....	109
6.1.2.1	Fontes primárias	109
6.1.2.2	Fontes secundárias	112
6.1.2	Tratamento e análise dos dados	113
6.2	BASE DE DADOS	117
6.3	JUSTIFICATIVA DO USO DE DADOS DE COMÉRCIO EXTERIOR COMO INDICADOR EMPÍRICO	121
6.4	CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DAS EMPRESAS E DELIMITAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	122
7	IMPACTOS ECONÔMICOS DOS CHOQUES EXTERNOS E CONTRIBUIÇÃO DO SETOR MINERAL PARA A ECONOMIA BRASILEIRA.....	124
7.1	EXPORTAÇÕES DOS MINÉRIOS DO BRASIL	124

7.2	A CFEM COMO POLÍTICA DE ARRECADAÇÃO E DESENVOLVIMENTO NO SETOR MINERAL	138
7.3	GERAÇÃO DE EMPREGO, RENDA E RECEITAS LÍQUIDAS	144
7.4	EFEITOS DO CHOQUE EXTERNO DA INVASÃO DA RÚSSIA À UCRÂNIA NO PREÇO DO NITRATO DE AMÔNIO	148
7.4.1	Adaptações no mercado nacional e perspectivas globais para fornecedores de fertilizantes.....	152
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	157
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	160
	APÊNDICE A - INDICADORES DE ANÁLISE DE FORMAÇÃO DO PREÇO DO NITRATO DE AMÔNIO O MERCADO GLOBAL: JUSTIFICATIVAS E SELEÇÃO FINAL.....	177
	APÊNDICE B - APLICAÇÃO DA <i>CUTOFF RULE</i> NA ANÁLISE DA ARRECADAÇÃO DA CFEM	180

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma das atividades produtivas mais antigas da humanidade, tendo desempenhado, ao longo da história, um papel estratégico na formação econômica de países e na geração de riqueza (Radetzki, 1982; Davis, 1995). Seus produtos são essenciais para diversas cadeias produtivas, desde indústrias de base até setores como a agroindústria e a construção civil (Nassif, 2008; Koppe, 2007).

No contexto brasileiro, o minério de ferro ocupa posição de destaque. Sua extração e exportação consolidaram-se como um pilar relevante da economia nacional, contribuindo para a balança comercial, a geração de empregos e a dinamização econômica regional (Amaral, 2024; Instituto Brasileiro de Mineração, 2024). Entretanto, essa dependência do setor mineral, especialmente das *commodities*, torna a economia brasileira suscetível às flutuações do mercado internacional e a choques externos (Corden; Neary, 1982; van Wijnbergen, 1984). Além dos desafios econômicos, a mineração impõe impactos socioambientais amplamente documentados, como degradação ambiental, contaminação de recursos hídricos e riscos associados à gestão de barragens (Enríquez; Fernandes; Alamino, 2011; Rezende, 2016).

Esse quadro de desafios tornou-se ainda mais patente diante de dois choques externos: a pandemia de COVID-19 e a invasão da Rússia à Ucrânia, que impactaram o comércio internacional, as cadeias de suprimentos e os mercados de *commodities*, incluindo o nitrato de amônio, insumo estratégico para a cadeia produtiva da mineração (Mou, 2020; Ozili, 2024; Schnitkey *et al.*, 2022).

Por outro lado, esses eventos também intensificaram as discussões sobre inovação, modernização tecnológica e resiliência industrial. Nesse contexto, a Indústria 4.0 surge como uma oportunidade estratégica, ao viabilizar a adoção de tecnologias como automação, inteligência artificial, internet das coisas (mais conhecida pela sigla em inglês, IoT – *Internet of Things*) e análise de *big data*, além de estimular o desenvolvimento de minerais considerados críticos para a transição energética, como lítio, nióbio e terras raras (Amaral, 2024).

Diante desse cenário, este trabalho busca responder às seguintes perguntas centrais: de que forma o setor mineral brasileiro, especialmente na extração e exportação de minério de ferro, contribuiu para a economia nacional no contexto do choque externo provocado pela pandemia de COVID-19; quais foram os impactos da

invasão da Rússia à Ucrânia sobre o preço do nitrato de amônio, uma *commodity* essencial para a cadeia produtiva da mineração; e como os avanços associados à Indústria 4.0, e à disponibilidade de minerais estratégicos, podem contribuir para a automação, a eficiência e a resiliência do setor mineral brasileiro frente aos desafios estruturais e conjunturais da economia global, especialmente, em contextos de choques externos.

Para responder a essas questões, o objetivo geral desta pesquisa é investigar de que forma o setor mineral brasileiro, especialmente na extração e exportação de minério de ferro, contribuiu para a economia nacional diante do choque externo provocado pela pandemia de COVID-19. Busca-se, adicionalmente, analisar os efeitos da invasão da Rússia à Ucrânia sobre a variação do preço do nitrato de amônio, uma *commodity* essencial para a cadeia produtiva da mineração. Por fim, pretende-se compreender como a Indústria 4.0 e a disponibilidade de minerais estratégicos no Brasil podem fortalecer a resiliência do setor mineral, sobretudo frente a tais choques.

A pesquisa desenvolve-se, ainda, buscando atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar o setor mineral brasileiro no ano de 2021, com foco na extração e exportação de minério de ferro;
- b) Analisar os impactos da extração e exportação de minério de ferro para a economia nacional durante o choque externo da pandemia de COVID-19;
- c) Analisar os impactos da invasão da Rússia à Ucrânia sobre a variação do preço do nitrato de amônio, uma *commodity* essencial para a cadeia produtiva da mineração;
- d) Investigar as externalidades negativas associadas à atividade mineral brasileira, com foco nos impactos socioambientais e econômicos decorrentes da atividade de mineração no Brasil;
- e) Avaliar de que forma a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 e o acesso a minerais estratégicos encontrados no Brasil podem contribuir para a resiliência, a eficiência e a sustentabilidade do setor mineral, em especial, diante do cenário de choques externos;
- f) Mensurar a contribuição econômica do setor mineral brasileiro para a economia nacional, com ênfase na extração e exportação de minério de ferro, especialmente no contexto do choque externo da pandemia de COVID-19.

A escolha deste tema justifica-se por quatro pilares centrais. O primeiro refere-se à importância econômica da mineração no Brasil, particularmente do minério de ferro, que figura há décadas como um dos principais produtos da pauta exportadora do país, sendo relevante para a balança comercial, a geração de empregos, renda e a arrecadação pública. O segundo decorre dos impactos gerados pelos choques externos da pandemia de COVID-19 e da invasão da Rússia à Ucrânia, que provocaram disrupções nas cadeias produtivas globais, afetando diretamente o setor mineral brasileiro, especialmente a cadeia do minério de ferro e seus insumos estratégicos, como o nitrato de amônio. O terceiro pilar está relacionado às transformações tecnológicas em curso, com a ascensão da Indústria 4.0 e a crescente demanda por minerais estratégicos, fundamentais para a transição energética e digital, o que impõe mudanças relevantes e pressões ao setor mineral brasileiro. Soma-se a esses aspectos a necessidade de compreender os efeitos econômicos estruturais da dependência de *commodities*, especialmente no que se refere à vulnerabilidade externa da economia brasileira. Acrescenta-se, ainda, a vivência profissional do autor, que atua como gestor da cadeia de suprimentos na América Latina em uma multinacional do setor de explosivos para mineração. A experiência prática diante dos desafios enfrentados durante a pandemia, como as restrições logísticas e o descompasso entre oferta e demanda, e, posteriormente, os impactos da invasão da Rússia à Ucrânia, que inviabilizou a importação de nitrato de amônio russo, fortaleceu o interesse acadêmico em compreender como choques externos afetam o setor mineral e suas cadeias de suprimentos, bem como as possibilidades de mitigação desses riscos no contexto da Indústria 4.0.

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, além da introdução e das considerações finais. O capítulo dois apresenta uma caracterização do setor mineral brasileiro, com foco na mineração de ferro. O capítulo três discute a Indústria 4.0 e os minerais estratégicos associados à nova revolução industrial. O capítulo quatro analisa os choques externos da pandemia de COVID-19 e da invasão da Rússia à Ucrânia. O capítulo cinco examina as externalidades negativas da atividade mineradora. O capítulo seis apresenta os procedimentos metodológicos da pesquisa. O capítulo sete reúne e analisa os dados empíricos, com foco nos impactos econômicos dos choques externos e na contribuição do setor mineral. O capítulo oito traz as considerações finais, destacando os principais achados, limitações e sugestões para pesquisas futuras.

2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA E CARACTERIZAÇÃO DO SETOR MINERAL BRASILEIRO COM ÊNFASE NA EXTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

A mineração é uma das mais antigas atividades produtivas exercidas pela humanidade. Radetzki (1982) e Davis (1995) compreendem a atividade de mineração como capaz de gerar renda e financiar o desenvolvimento e a diversificação da economia. Os minerais extraídos são, por muitas vezes, insumos diretos das indústrias de base e também matérias-primas essenciais para diversas outras áreas, como o agronegócio, o que faz com que a extração de minerais metálicos e não metálicos componha um setor estratégico para múltiplas indústrias (Nassif, 2008). Diversos objetos metálicos, desde a mais simples panela até o mais complexo instrumento científico, são fabricados a partir de uma variedade de insumos minerais, e a falta desses materiais provoca um encadeamento de rupturas no fornecimento para as indústrias que dependem deles como matérias-primas (Koppe, 2007).

Este capítulo propõe aprofundar a contextualização histórica e técnica da extração de minério de ferro no Brasil, oferecendo uma análise de sua evolução, relevância e características que moldaram o setor mineral brasileiro. Para dar início, no próximo subcapítulo será apresentada a evolução histórica da mineração de ferro. Na sequência, será discutida a relevância econômica do setor mineral, destacando as contribuições da exploração do minério de ferro, acompanhadas pela caracterização técnica do setor, incluindo fundamentos da mineração, especificidades do minério de ferro, processos de beneficiamento, aplicação de explosivos, conceitos de jazidas e reservas, classificação das reservas e tipos de minas.

2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO SETOR MINERAL BRASILEIRO COM ÊNFASE NA EXTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

A análise histórica busca contextualizar a evolução do setor mineral brasileiro e o papel do minério de ferro na formação do complexo minerador brasileiro, que pode ser entendido como o conjunto de atividades econômicas, industriais e logísticas interligadas que sustentam a exploração, beneficiamento, transporte e utilização dos recursos minerais estratégicos. Esse complexo desempenhou um papel fundamental na integração econômica do país, principalmente o minério de ferro, alavancando o desenvolvimento regional, especialmente em estados como Minas Gerais, Pará e

Espírito Santo (Quaresma, 1987; Fischer, 2014). Além disso, consolidou-se como um dos pilares para o crescimento econômico nacional, contribuindo significativamente para a balança comercial brasileira e para a geração de empregos diretos e indiretos (Amaral, 2024). Este subcapítulo abordará a trajetória histórica do setor mineral brasileiro, com ênfase na extração de minério de ferro, que inclui a evolução histórica apresentada em três fases distintas, representadas por figuras que ilustram linhas do tempo específicas. Essas figuras proporcionam uma abordagem visual que facilita a compreensão do desenvolvimento do setor, desde o período colonial até os dias atuais.

Durante o período colonial, a mineração consolidou-se como uma atividade econômica de grande importância desde o século XVII, desempenhando papel central no desenvolvimento econômico do país nas últimas décadas, especialmente pelos impactos positivos na balança comercial (Koppe, 2007), com o minério de ferro tornando-se um dos principais produtos de exportação do Brasil (Amaral, 2024). Embora a mineração de ferro tenha começado a ser explorada no final do século XVII, sua relevância econômica era restrita devido a fatores como a baixa qualidade do minério em algumas regiões e à falta de infraestrutura e tecnologia para produção em larga escala (Quaresma, 1987). Antes disso, tentativas iniciais foram feitas: Bartolomeu Fernandes, atuando próximo a Santo Amaro (SP), tentou fabricar ferro, mas fracassou pela baixa qualidade do minério; pouco depois, em 1590, Afonso Sardinha construiu uma forja no Morro de Araçoiaba, em Sorocaba, considerada o marco inicial da extração e produção de ferro no Brasil, ao oferecer o ferro ao governador D. Francisco de Souza. Esse primeiro empreendimento foi interrompido em 1629, retomado em 1760 e encerrado em seguida, dando lugar a uma usina de açúcar (Eschwege, 2011). Esses episódios demonstram como as primeiras iniciativas mineradoras foram marcadas por limitações técnicas e conjunturais, moldando o início da trajetória histórica do setor.

A partir do século XVII, a extração de ferro começou a se tornar significativa para a economia colonial brasileira, especialmente após a descoberta do Quadrilátero Ferrífero (QF) na antiga província de Minas Gerais, no atual estado de Minas Gerais, abrangendo as cidades de Belo Horizonte, Itabira, Ouro Preto e Congonhas. Este período marcou o início da exploração do minério de ferro na região. Os primeiros registros da descoberta desse metal nobre no QF datam aproximadamente de 1693, desencadeando um verdadeiro entusiasmo pela mineração de ferro na província de

Minas Gerais (Maxwell, 1977; Matos; Mello, 2012). Segundo Eschwege (2011), na província de Minas Gerais, as técnicas de mineração e fabricação de ferro tornaram-se conhecidas através dos escravos africanos. A elite mineira da época, que possuía a capacidade administrativa adquirida pelos anos de gestão de suas terras e contava com a mão de obra escrava africana, a qual detinha o conhecimento sobre as técnicas de extração do minério de ferro, desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento da atividade mineradora de extração de ferro (Dorr, 1969). Esse grupo liderou tanto a criação quanto a conservação das reservas minerais de ferro, impulsionando avanços que contribuíram para o fortalecimento do Estado por meio da exploração desses recursos (Matos; Mello, 2012). Fatores como a implementação de processos produtivos em menor escala, uma gestão mais centralizada e eficiente dos recursos disponíveis, além de incentivos à exploração mineral, foram determinantes para esses progressos (Maxwell, 1977). Todavia, por muitas décadas, o Brasil não contou com fábricas de ferro de médio ou grande porte, o que revelou uma fragilidade estrutural no setor. Essa limitação retardou e dificultou o desenvolvimento da mineração e o processo de industrialização do país. Os elevados custos dos insumos, que precisavam ser necessariamente importados, além do risco substancial de escassez de suprimentos, representavam os principais obstáculos enfrentados pela indústria (Callaghan, 1981).

Diante desses desafios, e com a chegada da Família Real ao Brasil em 1808, teve início um novo ciclo para a extração e produção de ferro no país, no qual a crescente demanda impulsionou a criação da primeira grande fábrica de ferro nacional. Coube ao mineralogista Eschwege, a convite do Príncipe Regente Dom João, a primeira tentativa de produção de ferro de forma industrializada no Brasil. Essa iniciativa foi conduzida pelo Intendente Câmara, que, entre 1808 e 1809, apresentou o projeto para a construção de uma grande usina siderúrgica de ferro em Serro Frio, nas proximidades do Arraial do Morro do Pilar. Esse empreendimento, conhecido como Real Fábrica de Ferro do Morro do Pilar, foi localizado no morro do Gaspar Soares, no município de Morro do Pilar, em Minas Gerais (Carvalho, 2002; Eschwege, 2011; Matos; Mello, 2012). Embora seu funcionamento tenha sido prejudicado pela abolição da escravidão, a fábrica proporcionou avanços político-econômicos significativos durante o período em que operou plenamente (Baeta, 1971).

Após a criação da primeira grande fábrica de ferro, outro marco relevante ocorreu em 1876, com a fundação da Escola de Minas de Ouro Preto, hoje parte da

Universidade Federal de Ouro Preto, sob a liderança do geólogo e mineralogista francês, Claude Henri Gorceix, amplamente reconhecido por sua contribuição para o desenvolvimento da educação e das ciências geológicas no Brasil. Esse acontecimento marcou o início de uma organização institucional destinada ao aprimoramento dos estudos e processos relacionados ao minério de ferro (Carvalho, 2002), como exemplificado pelas pesquisas científicas que abordavam as necessidades da indústria siderúrgica nacional e das técnicas para a melhor exploração do Quadrilátero Ferrífero (Ruchkys, 2007; Fischer, 2014).

Em 1910, um grupo conhecido como “geólogos de *Wisconsin*” formou uma aliança com advogados e investidores brasileiros e ingleses, visando liderar a corrida internacional pelos minérios brasileiros. Essa cooperação rapidamente se consolidou no Brasil sob o nome de “*Brazilian Iron and Steel Company*” (Fischer, 2014). Paralelamente, a região conhecida como Vale do Rio Doce, situada no município de Itabira, no estado de Minas Gerais, começou a ganhar destaque. Durante essa corrida mineral, a região foi adquirida pelo grupo empresarial inglês *Brazilian Hematite Syndicate* (BHS), de maneira semelhante ao que ocorreu dois anos antes, em 1908, com a compra do controle acionário da Companhia Estrada de Ferro Vitória a Minas, única via de escoamento do minério do Vale do Rio Doce para o litoral.

A aquisição do Vale do Rio Doce promoveu uma rápida expansão produtiva e desenvolvimento estrutural, dado o novo sistema integrado por minas, ferrovias, siderúrgicas e porto. Esta compra também resultou em um plano siderúrgico avançado, liderado pela própria BHS e pelo então presidente Epitácio Pessoa (Matos; Mello, 2012), dando início a um processo gradual de integração entre instituições, o setor privado e o Estado, além da crescente influência de técnicos, cientistas e redes empresariais (Fischer, 2014). Como parte dessa integração, em 1942, foram fundadas a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), no contexto da Segunda Guerra Mundial. Diante dos desafios enfrentados naquele período, o Brasil desempenhou o papel de fornecedor de recursos para os países aliados (Estados Unidos da América, Reino Unido, França e União Soviética), recebendo em troca apoio financeiro para a construção de terminais marítimos, modernização de ferrovias e instalação de uma indústria siderúrgica em Minas Gerais. Esse apoio foi crucial para consolidar as duas companhias, tornando-as referências no setor de mineração no cenário nacional (Silva, 1995).

Os impactos dessa aquisição, ocorrida no início da década de 1940, são evidentes até os dias de hoje. O legado deixado, tanto em termos de infraestrutura quanto de logística, consolidou a região e as empresas como protagonistas no setor minerário. Atualmente, a Vale S/A¹ é a maior mineradora do Brasil e uma das mais importantes do mundo, com uma produção anual superior a 180 milhões de toneladas de minério bruto extraído das principais minas do Quadrilátero Ferrífero (Amaral, 2024). Segundo o relatório disponibilizado pela Vale aos investidores, somente no ano de 2023, a empresa lucrou R\$ 36,3 bilhões (Vale, 2024). A CSN, por sua vez, estabeleceu o Brasil como um importante produtor de aço no mercado global. Segundo o Relatório Integrado 2023 da empresa, disponibilizado em seu website para consulta pelos investidores, no ano de 2021, o lucro da CSN foi de R\$ 13,596 bilhões; em 2022, o lucro foi de R\$ 2,168 bilhões; e em 2023, o lucro foi de R\$ 403 milhões (Companhia Siderúrgica Nacional, 2024).

Atualmente, o Brasil destaca-se como um dos maiores detentores de depósitos de ferro no mundo, o que torna a extração desse mineral a atividade mais relevante no setor de mineração nacional. Cerca de 75% da produção de ferro do país é destinada à exportação, ainda que o consumo interno tenha crescido consideravelmente devido às elevadas demandas dos setores industriais (Amaral, 2024). As principais empresas do setor são a Vale, CSN e a Usiminas (Instituto Brasileiro de Mineração, 2024), com a Vale sendo a principal mineradora brasileira e uma das maiores do mundo, desempenhando um papel central no desenvolvimento econômico do Brasil desde sua criação em 1942.

A seguir, apresenta-se a evolução da mineração de ferro no Brasil, organizada em três fases distintas. Essa divisão reflete os principais marcos econômicos, institucionais e produtivos que moldaram o setor ao longo do tempo, permitindo compreender como a atividade mineradora evoluiu desde o período colonial, passando pela industrialização, até sua consolidação no mercado global de *commodities*. A primeira fase abrange do século XVI até 1917, período marcado pela exploração rudimentar, pela ausência de uma indústria siderúrgica consolidada e por uma economia colonial extrativista. A segunda fase, de 1920 até 1996, tem como marco inicial os esforços de industrialização, passando pela criação e posterior

¹Para fins de simplificação, a empresa Vale S/A será referida apenas como Vale a partir deste ponto no texto.

privatização da CVRD, evento que simboliza uma inflexão na governança do setor e na lógica de desenvolvimento nacional. A terceira fase, que se estende de 2000 a 2024, reflete o aprofundamento da integração do Brasil ao mercado global, impulsionado pela demanda chinesa, pela financeirização do setor, pela adoção gradual das tecnologias associadas à Indústria 4.0, pelo impacto de choques externos da pandemia de COVID-19 e a invasão da Rússia à Ucrânia, e pelo aumento da pressão socioambiental. O ano de 2024 corresponde ao recorte final deste trabalho, que contempla as transformações observadas até sua conclusão, oferecendo uma análise coerente com a dinâmica recente do setor. Assim, a evolução do setor é organizada resumidamente em três fases distintas:

- **Primeira Fase (1560-1917):** tem início por volta dos anos 1560, após a chegada dos portugueses ao Brasil, e se estende até 1917, ano da fundação da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira, que precedeu a criação da CSN.
- **Segunda Fase (1920-1996):** compreende o período a partir do governo de Epitácio Pessoa, durante o qual, em 1920, foi planejada a instalação de uma usina siderúrgica com capacidade para 150 mil toneladas de aço. Estende-se até 1996, ano que marca a privatização da CVRD.
- **Terceira Fase (2000-2024):** marcada pela expansão da produção, pela adoção gradual de tecnologias associadas à Indústria 4.0, pelo impacto de choques externos da pandemia de COVID-19 e da invasão da Rússia à Ucrânia, pelo aumento da pressão socioambiental, impulsionada pela forte demanda internacional, especialmente da China.

Essas três fases, detalhadas neste subcapítulo, não apenas ilustram os marcos históricos da mineração de ferro no Brasil, mas também evidenciam a transformação estrutural do setor ao longo do tempo. As FIGURAS 1, 2 e 3, apresentadas na sequência, sintetizam visualmente cada uma dessas fases:

FIGURA 1 - LINHA DO TEMPO 1 - PRIMEIRA FASE: 1560-1917

(continua)

1560-1760: A primeira tentativa de extrair o minério de ferro e produzir ferro foi a de Afonso Sardinha que construiu forja no morro de Araçoiaba em 1590 (Sorocaba, SP)². Anteriormente, tem-se relato de fabricação de ferro pelo ferreiro Bartolomeu Fernandes, perto de Santo Amaro, SP, cuja pobreza do minério não permitiu o sucesso do empreendimento³. Assim, é geralmente aceita como início da produção de ferro a data de 1590, com o empreendimento de Sardinha que o presenteou ao governador de São Paulo, D. Francisco de Souza⁴. Esta primeira tentativa teve encerrada suas atividades em 1629, depois reiniciada em 1760, quando foi definitivamente abandonada, e em seu lugar, construída uma usina de açúcar⁵. Em 1693, foi descoberto o Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais⁶. O achado do metal nobre fez com que naquele tempo houvesse uma migração enorme em direção às montanhas ao redor desse lugar⁷.

1808-1810: A conjunção de fatores como a legislação, a geopolítica e o distanciamento tecnológico em relação ao cenário internacional e às demandas nacionais culminou na criação da primeira fábrica de ferro no Brasil, denominada "Fundição Real – Fábrica de Ferro São João do Ipanema"⁸.

1876: Idealizada por Dom Pedro II e sob a liderança do cientista Claude Henri Gorceix, foi fundada a Escola de Minas de Ouro Preto (EMOP), hoje parte da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)⁹. Este centro de ensino se consolidou como o núcleo responsável pelo desenvolvimento científico e institucional no campo dos minérios brasileiros, respondendo de maneira eficaz às necessidades da nascente indústria siderúrgica nacional, especialmente no contexto do Quadrilátero Ferrífero (MG)¹⁰.

1886: Foi estabelecida a Comissão Geográfica e Geológica de São Paulo, destacando-se a publicação da obra "As minas do Brasil e sua legislação", de autoria do geólogo João Pandiá Calógeras¹¹. Este documento, juntamente com o trabalho da comissão, serviu como base para significativas reformas legislativas e jurídicas no setor mineral¹².

1907: O Serviço Geológico e Mineralógico Brasileiro (SGMB) foi instituído, representado por nomes de destaque, como Peter Claussen e Virgil von Helmreichen¹³. Sob a liderança dessa instituição, o setor de mineração no Brasil foi amplamente profissionalizado, resultando na institucionalização da geologia em todo o território nacional¹⁴. Essas iniciativas permitiram que o Brasil superasse seu atraso competitivo frente às demais nações¹⁵. Ademais, a exploração das reservas minerais foi impulsionada, com muitos desses recursos sendo vendidos para potências internacionais na produção de aço, como a Inglaterra¹⁶.

²(Paes, 2024).

³(Callaghan, 1981).

⁴(Paes, 2024).

⁵(Callaghan, 1981).

⁶(Ruchkys, 2007).

⁷(Ruchkys, 2007).

⁸(Ferreira, 2001).

⁹(Paes, 2024).

¹⁰(Carvalho, 2002).

¹¹(Brasil, 1988).

¹²(Callaghan, 1981).

¹³(Quaresma, 1987).

¹⁴(Callaghan, 1981).

¹⁵(Quaresma, 1987).

¹⁶(Fischer, 2014).

FIGURA 1 - LINHA DO TEMPO 1 - PRIMEIRA FASE: 1560-1917

(conclusão)

1908-1910: Durante este período, a região do Vale do Rio Doce-Itabira foi adquirida por um grupo de empresários ingleses, o *Brazilian Hematite Syndicate (BHS)*, em um movimento similar ao que já havia ocorrido com o controle acionário da Companhia Estrada de Ferro Vitória a Minas, principal via de escoamento do minério dessa região para o litoral¹⁷.

1910: A 11ª edição do Congresso Geológico Internacional foi realizada em Estocolmo, evento que marcou o início do mapeamento sistemático dos recursos minerais em escala global¹⁸. Foi também concluído o primeiro inventário de um tipo específico de minério, o que adquiriu relevância econômica mundial no contexto da corrida por recursos minerais, impulsionada pelas indústrias tecnológicas e bélicas¹⁹. Um grupo de geólogos norte-americanos, os chamados “geólogos de Wisconsin”, formou uma aliança com advogados e investidores brasileiros e ingleses para participar da corrida internacional por minérios no Brasil²⁰. Essa cooperação deu origem à “*Brazilian Iron and Steel Company*”, consolidando uma importante frente de investimentos no país²¹.

1917: Fundação da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira, resultado da associação da empresa belga ARBED (Aciéries Réunies de Burbach-Eich-Dudelange) com a Companhia Siderúrgica Mineira²². Esse empreendimento representou um marco no desenvolvimento da indústria siderúrgica brasileira, em especial em Minas Gerais²³.

FONTE: O autor (2024).

FIGURA 2 - LINHA DO TEMPO 2 - SEGUNDA FASE: 1920-1996

(continua)

1920: Em 1920, durante o governo de Epitácio Pessoa, foi planejada a instalação de uma usina siderúrgica com capacidade de 150 mil toneladas de aço, financiada pela *Itabira Iron Ore Company*, uma empresa inglesa²⁴. O contrato concedia à empresa diversos privilégios, como a posse de ferrovias e isenção de impostos de importação²⁵. Pessoa defendia o apoio governamental ao capital estrangeiro, já que a empresa investiria 60 milhões de dólares no Brasil²⁶. No entanto, o contrato gerou forte oposição, especialmente do governo de Minas Gerais, que defendia a criação de pequenas usinas sem capital estrangeiro²⁷. Esse período marcou o início de maior integração entre o Estado, o setor privado e redes de especialistas²⁸.

1921: Foi sancionada a Lei nº 4.265/1921, que tinha por objetivo sistematizar o processo de descoberta, pesquisa e exploração das riquezas naturais do país²⁹.

¹⁷(Callaghan, 1981).¹⁸(Fischer, 2014).¹⁹(Callaghan, 1981).²⁰(Fischer, 2014).²¹(Quaresma, 1987).²²(Gonçalves; Silva; Perobelli, 2015)²³(Paes, 2024).²⁴(Callaghan, 1981).²⁵(Quaresma, 1987).²⁶(Callaghan, 1981).²⁷(Quaresma, 1987).²⁸(Callaghan, 1981).²⁹(Lamoso, 2001).

FIGURA 2 - LINHA DO TEMPO 2 - SEGUNDA FASE: 1920-1996

(conclusão)

1928-1929: Durante o governo de Washington Luiz, foi celebrado um novo termo com a *Itabira Iron Ore Company*, alterando os termos do contrato de 1920³⁰. Entretanto, a crise econômica de 1929 suspendeu os investimentos que seriam realizados pela companhia naquele momento³¹.

1934: Neste ano, foi criado o Departamento Nacional de Produção Mineral, com a responsabilidade de coordenar estudos e oferecer ensino técnico voltado à produção mineral nacional³². Também foi promulgado o novo Código de Minas, assim como o Código de Águas, ambos de grande importância jurídica e econômica para o país³³.

1942: No contexto da Segunda Guerra Mundial, foram fundadas a CSN e a CVRD, com o objetivo de abastecer os países aliados e, em contrapartida, obter apoio financeiro para a construção de terminais marítimos, modernização das ferrovias e a instalação de uma indústria siderúrgica em Minas Gerais³⁴. A fundação dessas empresas visava, ainda, estimular a exploração dos recursos minerais nacionais³⁵.

1945: O término da Segunda Guerra Mundial provocou uma drástica redução na demanda mundial por produtos siderúrgicos, o que prejudicou os contratos de exclusividade que a CVRD mantinha com países como Inglaterra e Estados Unidos³⁶. Além disso, houve um aumento significativo dos custos, especialmente em relação ao transporte marítimo, e dificuldades logísticas³⁷. Como resposta, a empresa recorreu a intermediários, o que elevou os gastos e reduziu a lucratividade³⁸.

1948: A CVRD registrou pela primeira vez um saldo positivo na balança comercial, resultado do aumento nos preços da *commodity* minério de ferro³⁹.

1950: O número de produtores de minério de ferro aumentou e os preços das commodities diminuíram, forçando a CVRD a explorar novos mercados consumidores, como o Japão e o Canadá⁴⁰.

Década de 1960: A CVRD alcançou um novo patamar no cenário internacional, impulsionada por novos investimentos, reestruturação das divisões de trabalho e grandes projetos de expansão. Em 1967 iniciou-se a exploração das minas de ferro da Serra dos Carajás, uma das maiores do Brasil⁴¹.

1996: Durante o governo de Fernando Henrique Cardoso, a CVRD foi privatizada e passou a se chamar Vale S/A⁴². Esse processo de privatização ocorreu em um momento de grande valorização internacional das commodities de ferro, o que consolidou a empresa como uma das líderes mundiais no setor⁴³.

FONTE: O autor (2024).

³⁰(Callaghan, 1981).³¹(Quaresma, 1987).³²(Callaghan, 1981).³³(Quaresma, 1987).³⁴(Paes, 2024).³⁵(Callaghan, 1981).³⁶(Paes, 2024).³⁷(Quaresma, 1987).³⁸(Callaghan, 1981).³⁹(Paes, 2024).⁴⁰(Ferreira, 2001).⁴¹(Lamoso, 2001).⁴²(Ferreira, 2001).⁴³(Lamoso, 2001).

FIGURA 3 - LINHA DO TEMPO 3 - TERCEIRA FASE: 2000-2024

(continua)

2000-2008: A Vale, impulsionada por novos investimentos e pela crescente demanda global por minério de ferro, especialmente da China, expandiu suas operações no Brasil⁴⁴. Houve um aumento significativo na produção de minério de ferro, com novos projetos de mineração como o complexo Carajás⁴⁵, no Pará⁴⁶. O início dos anos 2000 também foi marcado por uma explosão na demanda de minério de ferro, impulsionada principalmente pelo rápido crescimento econômico da China⁴⁷. Isso resultou em um aumento nos preços do minério de ferro, beneficiando as mineradoras brasileiras⁴⁸.

2008-2012: A crise financeira de 2008 teve impacto no setor, com a demanda global por minério de ferro diminuindo temporariamente⁴⁹. No entanto, a recuperação foi rápida, especialmente com a retomada das construções e infraestrutura na China⁵⁰. Durante esse período, a Vale e outras mineradoras brasileiras continuaram a expandir sua capacidade produtiva, investindo em novas minas e tecnologias, incluindo o projeto S11D⁵¹, no Pará, considerado o maior projeto de mineração de ferro do mundo⁵².

2015: Em novembro de 2015, ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, operada pela Samarco (joint venture entre Vale e BHP Billiton), em Mariana, Minas Gerais⁵³. Este foi um dos maiores desastres ambientais do Brasil, com impactos significativos para o setor de mineração, resultando em investigações, multas e mudanças regulatórias⁵⁴.

2019: Em janeiro de 2019, o rompimento de outra barragem da Vale, em Brumadinho, Minas Gerais, causou mais de 270 mortes e graves danos ambientais⁵⁵. Esse acidente intensificou a pressão sobre o setor de mineração para melhorar suas práticas de segurança, e a Vale enfrentou sanções e novas regulamentações ambientais rigorosas⁵⁶.

⁴⁴(Ferreira, 2001).

⁴⁵O Complexo Carajás é considerado uma das maiores reservas de minério de ferro do mundo já descobertas, destacando-se pela alta pureza do minério, com elevados teores de ferro e baixo nível de contaminantes. Esse complexo desempenha um papel crucial no abastecimento global de minério de ferro, consolidando-se como um dos pilares da indústria siderúrgica internacional (Vale, 2025).

⁴⁶(Lamoso, 2001).

⁴⁷(Amaral, 2024).

⁴⁸(Amaral, 2024).

⁴⁹(Amaral, 2024).

⁵⁰(Amaral, 2024).

⁵¹ O Projeto S11D, também conhecido como Projeto Serra Sul, é um dos maiores empreendimentos de mineração de ferro a céu aberto do mundo e integra o Complexo Carajás. Destaca-se pelo uso de tecnologias inovadoras que minimizam os impactos ambientais, como o transporte de minério por correias em vez de caminhões, reduzindo emissões de carbono e consumo de combustível. Com capacidade de produção anual superior a 90 milhões de toneladas de minério de ferro de alta qualidade, o S11D é um marco na mineração sustentável e um pilar estratégico no abastecimento global de minério de ferro (Vale, 2025).

⁵²(Amaral, 2024).

⁵³(Freitas *et al.*, 2019).

⁵⁴(Freitas *et al.*, 2019).

⁵⁵(Freitas *et al.*, 2019).

⁵⁶(Freitas *et al.*, 2019).

FIGURA 3 - LINHA DO TEMPO 3 - TERCEIRA FASE: 2000-2024

(conclusão)

- **2020-2021:** A pandemia de COVID-19 afetou globalmente a indústria de mineração, mas a recuperação foi rápida devido à alta demanda por minério de ferro, principalmente da China, que necessitava de materiais para sustentar seus programas de infraestrutura⁵⁷. Em 2021, os preços do minério de ferro atingiram recordes históricos devido à forte demanda e interrupções no fornecimento causadas por questões climáticas e logísticas⁵⁸.
- **2022:** Início da invasão da Rússia à Ucrânia⁵⁹.
- **2023:** Com a crescente preocupação global sobre mudanças climáticas, as mineradoras brasileiras, incluindo a Vale, passaram a investir mais em práticas sustentáveis, como a redução de emissões de carbono e o uso de tecnologias mais limpas em suas operações⁶⁰. É o início da Indústria 4.0 na mineração, revolucionando o setor com maior eficiência e competitividade, ao mesmo tempo em que contribui para a sustentabilidade das operações⁶¹.
- **2024:** A Vale e outras empresas continuam a investir em projetos de mineração "verde", focando em reduzir as emissões de carbono, o uso de energia limpa e a recuperação de áreas impactadas pela mineração⁶². Novas regulações ambientais e a pressão por práticas sustentáveis direcionam o futuro do setor no Brasil⁶³.

FONTE: O autor (2024).

Analisando-se as FIGURAS 1, 2 e 3, que ilustram a evolução histórica do setor mineral brasileiro, observa-se que essa trajetória reflete não apenas o aprimoramento das técnicas de exploração e beneficiamento, mas também o papel estratégico do minério de ferro na consolidação de uma economia nacional cada vez mais integrada às cadeias globais. O minério de ferro foi, e continua sendo, um dos pilares na formação do complexo minerador brasileiro, caracterizado pela interação entre mineração, siderurgia e infraestrutura logística. Essa interconexão garantiu não apenas a expansão da exploração mineral, mas também a integração de regiões como Minas Gerais, Pará e Espírito Santo às dinâmicas econômicas nacionais e internacionais (Quaresma, 1987; Fischer, 2014). Como destacado por Amaral (2024), o setor desempenha um papel crucial na balança comercial brasileira, sendo responsável por uma parcela significativa das exportações nacionais e pela geração de empregos diretos e indiretos. Além disso, a literatura especializada reforça a importância histórica do setor para a industrialização e modernização do Brasil, com autores como Callaghan (1981) e Ferreira (2001) apontando os desafios enfrentados,

⁵⁷(Amaral, 2024).⁵⁸(Schnitkey *et al.*, 2022)⁵⁹(Amaral, 2024).⁶⁰(Vale, 2023).⁶¹(Vale, 2023).⁶²(Agência Nacional de Mineração, 2024).⁶³(Ministério do Meio Ambiente, 2024).

como a superação de barreiras tecnológicas e a dependência de investimentos externos. Fischer (2014) complementa essa análise ao discutir a relevância das redes de especialistas e a difusão de conhecimentos técnicos, fundamentais para a consolidação do setor no cenário global.

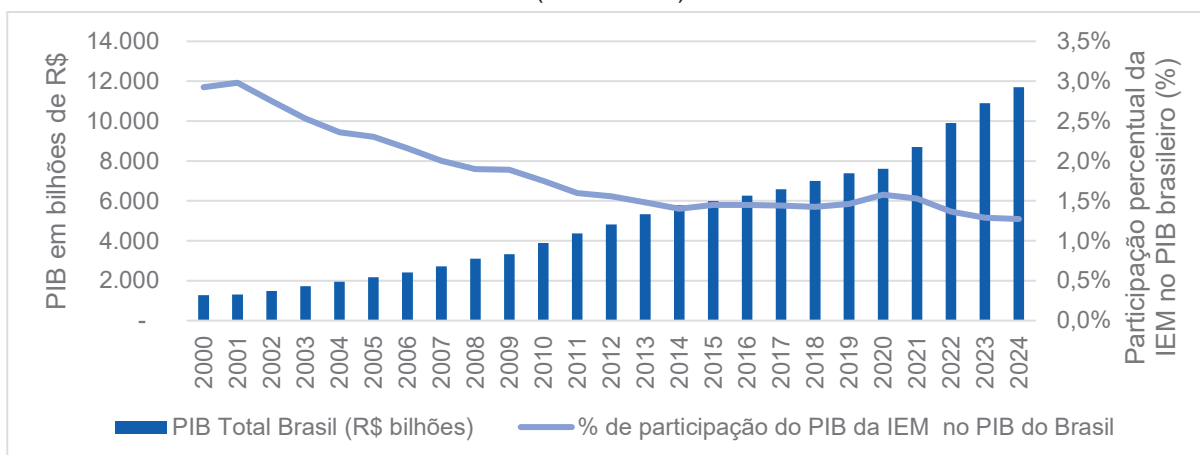
Tendo sido analisado o panorama histórico, passa-se à análise da relevância econômica do setor mineral brasileiro na atualidade, com ênfase no papel estratégico do minério de ferro para a economia nacional. A seguir, são apresentados dados e reflexões que permitem compreender a relevância do setor mineral e do ferro no contexto econômico brasileiro.

2.2 RELEVÂNCIA DO SETOR MINERAL BRASILEIRO COM ÊNFASE NO MINÉRIO DE FERRO

A compreensão da relevância econômica do setor mineral brasileiro é essencial para avaliar como a exploração de recursos naturais sustenta o desenvolvimento e influencia a dinâmica produtiva do país (Nassif, 2008). O ferro, enquanto recurso mineral metálico, é essencial para a expansão e a estruturação das economias modernas, utilizado amplamente em setores como a indústria, o comércio, a infraestrutura e outros ramos fundamentais (Dorr, 1969; Koppe, 2007), com relevância global desde a Revolução Industrial (Dorr, 1969). Neste sentido, este subcapítulo aborda a importância do setor mineral e, em especial, da exploração de minério de ferro, como elemento central para compreender a evolução da Indústria Extrativa Mineral (IEM) brasileira. Ao longo do texto, serão analisados dados históricos e econômicos que permitem entender a evolução do setor, destacando a trajetória do minério de ferro.

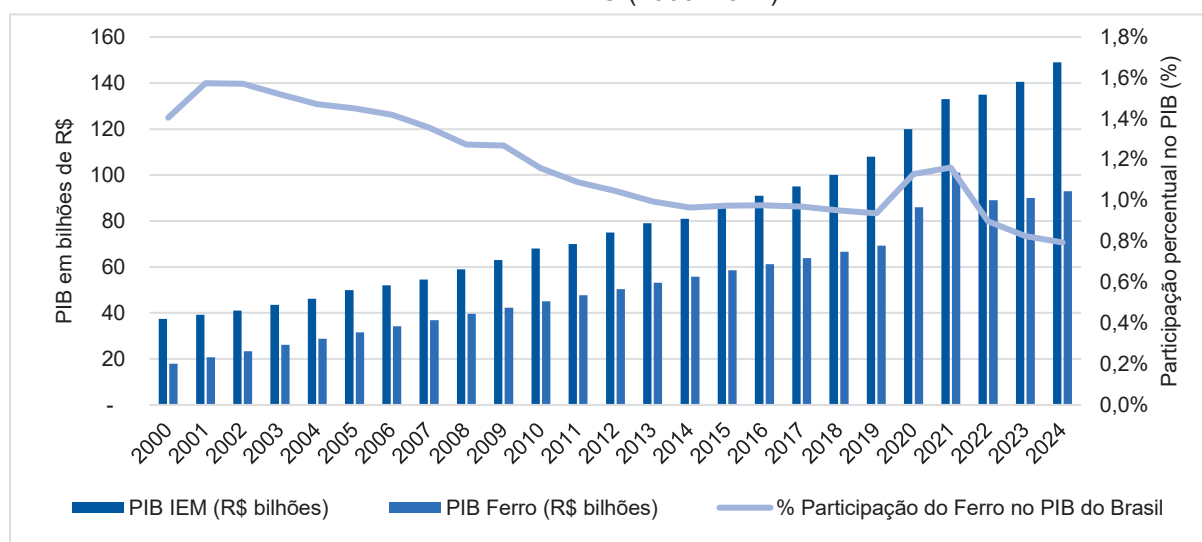
Na sequência, apresentam-se três elementos gráficos elaborados a partir de dados extraídos do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que evidenciam a evolução do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, do PIB da IEM e do PIB do ferro entre 2000 e 2024. Os detalhes sobre a construção dos GRÁFICOS 1, 2 e 3, bem como as suas limitações metodológicas, e a definição e delimitação do que é a IEM, estão detalhados na metodologia desta dissertação:

GRÁFICO 1 - EVOLUÇÃO DO PIB BRASILEIRO E PARTICIPAÇÃO DA IEM NO PIB DO BRASIL (2000–2024)



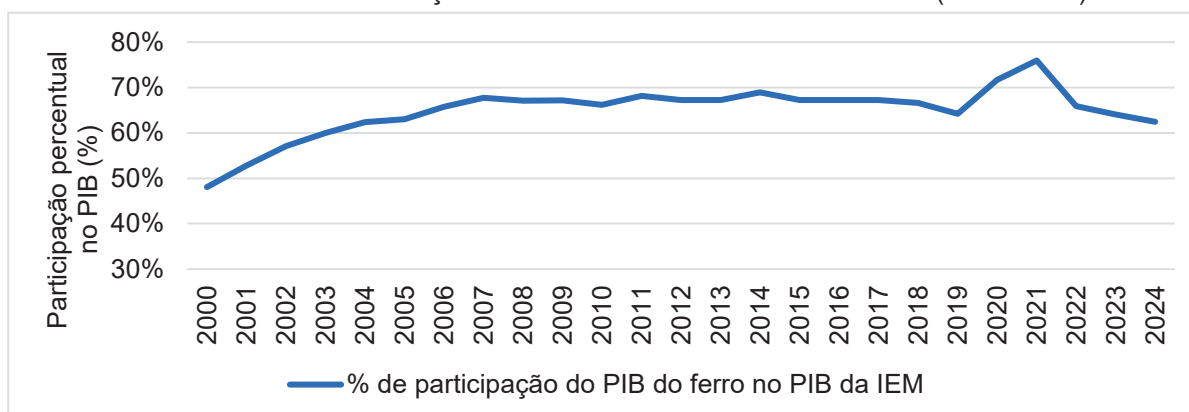
FONTE: Elaborado pelo autor com dados extraídos do SIDRA/IBGE (2025).

GRÁFICO 2 - EVOLUÇÃO DO PIB DA IEM E DO PIB DO FERRO, E SUAS PARTICIPAÇÕES NO PIB BRASILEIRO (2000–2024)



FONTE: Elaborado pelo autor com dados extraídos do SIDRA/IBGE (2025).

GRÁFICO 3 - PARTICIPAÇÃO DO PIB DO FERRO NO PIB DA IEM (2000–2024)



FONTE: Elaborado pelo autor com dados extraídos do SIDRA/IBGE (2025).

A análise do GRÁFICO 1, que apresenta o crescimento do PIB total do Brasil e a evolução da participação percentual da IEM no PIB nacional, revela que, apesar das oscilações, a média de participação da IEM ao longo do período foi de aproximadamente 1,9%, com tendência de redução gradual em comparação com os valores iniciais próximos de 3% em 2000, reforçando a relevância histórica do setor mesmo em um contexto de queda relativa.

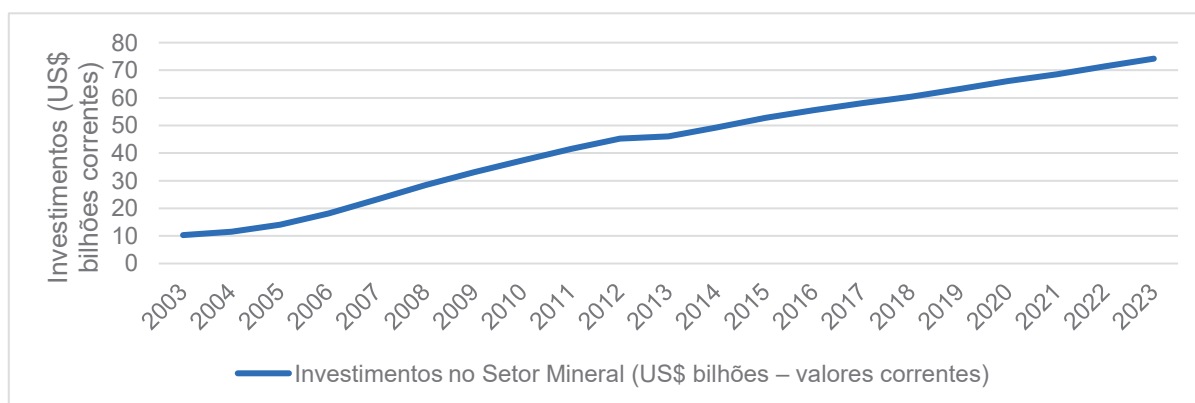
O GRÁFICO 2 amplia essa análise ao evidenciar a evolução da participação percentual do PIB do minério de ferro em relação ao PIB do Brasil, destacando que, no início da série, essa participação era de cerca de 1,6%, atingindo um valor de 1,3% em 2021, com média ao longo do período de cerca de 0,8%, o que ressalta a relevância média histórica do minério de ferro como componente estratégico da economia nacional.

O GRÁFICO 3 detalha a participação percentual do PIB do ferro no PIB total da IEM, revelando que, ao longo de quase todo o período analisado, essa participação se manteve acima de 60% em praticamente toda a série histórica, com alguns picos superiores a 70% em determinados anos.

A análise integrada dos GRÁFICOS 1, 2 e 3 evidencia como, mesmo em um cenário de variações conjunturais, o minério de ferro sustentou posição de destaque, ressaltando sua importância para a IEM e a manutenção de sua contribuição econômica ao longo das últimas décadas.

Complementando essa análise, o GRÁFICO 4 permite observar o comportamento dos investimentos realizados no setor mineral brasileiro no período de 2003 a 2023, apresentando sua evolução em bilhões de dólares correntes:

GRÁFICO 4 - EVOLUÇÃO DOS INVESTIMENTOS NO SETOR MINERAL NO BRASIL (2003–2023)

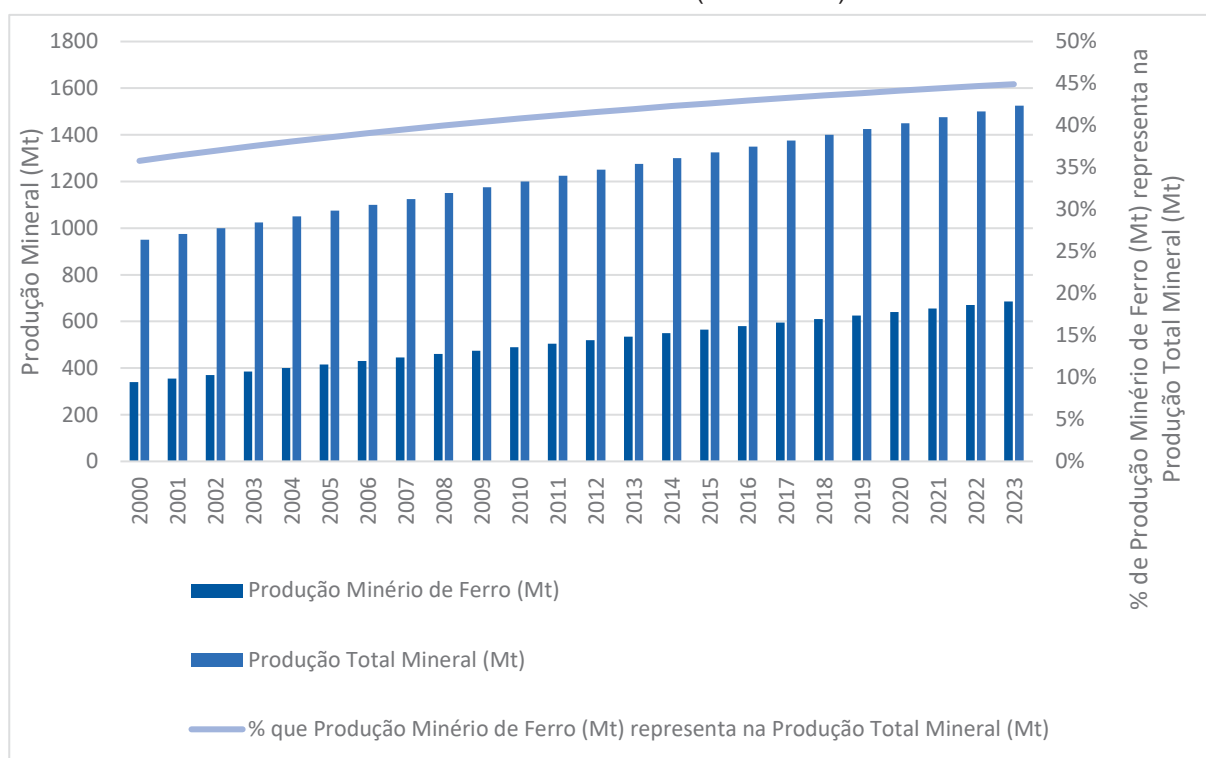


FONTE: Elaborado pelo autor com dados da Departamento de Informações e Estudos Minerários (DIPEM), vinculada a Agência Nacional de Mineração (ANM) (2025).

A análise do GRÁFICO 4 demonstra que os investimentos no setor mineral brasileiro apresentaram uma trajetória de crescimento contínuo entre 2003 e 2023. Nesse período, o volume de investimentos evoluiu de cerca de US\$ 10 bilhões, no início da série, para mais de US\$ 75 bilhões em 2023, em valores correntes. Esse aumento evidencia a manutenção da atratividade do setor mineral nacional para investidores, refletindo sua importância econômica ao longo das duas últimas décadas.

Conforme evidenciado nos GRÁFICOS 2 e 3, que demonstraram a relevante participação do minério de ferro no valor gerado pela IEM, o GRÁFICO 5 apresenta a evolução da produção física, tanto do minério de ferro quanto da mineração como um todo, no período de 2000 a 2023:

GRÁFICO 5 - EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO TOTAL MINERAL E DA PRODUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO NO BRASIL (2000–2023)



FONTE: Elaborado pelo autor com dados extraídos do DIPEM/ANM (2025).

A análise do GRÁFICO 5 demonstra que, no período analisado, a produção total mineral brasileira cresceu de aproximadamente 1.450 milhões de toneladas para mais de 1.850 milhões de toneladas, refletindo o fortalecimento da atividade mineral em resposta ao aumento da demanda. Já a produção de minério de ferro apresentou crescimento ainda mais expressivo, praticamente dobrando ao longo da série, de

cerca de 400 milhões de toneladas para mais de 800 milhões de toneladas. Como consequência, a participação do minério de ferro na produção mineral total elevou-se de aproximadamente 28% no início dos anos 2000 para patamares superiores a 40% na média dos últimos anos. Esses resultados reforçam, mais uma vez, a importância do minério de ferro na dinâmica produtiva do setor mineral brasileiro. A análise do GRÁFICO 5 evidencia que a produção de minério de ferro manteve, ao longo das últimas décadas, uma posição dominante no valor total da produção mineral comercializada. Essa concentração excessiva sustenta o argumento da vulnerabilidade estrutural da economia mineral brasileira, especialmente diante da forte dependência da dinâmica global de preços do ferro. Tal vulnerabilidade conecta-se diretamente aos objetivos desta pesquisa, ao investigar os efeitos econômicos dessa dependência, principalmente, em contextos de crises, como choques externos.

Diante do conjunto de dados apresentados, fica evidenciada a relevância econômica do setor mineral brasileiro e, em especial, do minério de ferro, como componente relevante para a economia nacional. As informações analisadas ao longo deste subcapítulo reforçam a importância de compreender a evolução histórica e o desempenho recente da atividade mineral como base para a análise dos próximos capítulos. Na sequência, será aprofundada a discussão sobre os fundamentos da mineração e as especificidades que caracterizam o setor mineral brasileiro, oferecendo uma compreensão mais detalhada sobre suas operações, processos e singularidades.

2.3 FUNDAMENTOS DA MINERAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E ESPECIFICIDADES DO SETOR MINERAL BRASILEIRO

A análise em maior profundidade dos fundamentos técnicos e das especificidades do setor mineral é necessária para compreender o funcionamento e a complexidade da atividade mineradora no Brasil, especialmente em relação ao minério de ferro. Este subcapítulo busca apresentar, de forma integrada, as principais características do minério de ferro nacional, os processos envolvidos na utilização de explosivos, as etapas que vão da rocha desmontada ao transporte dos produtos finais, além dos conceitos fundamentais sobre jazidas, reservas e tipos de minas. Com isso, pretende-se fornecer ao leitor um panorama completo dos elementos técnicos que

sustentam a cadeia produtiva da IEM brasileira, estabelecendo as bases para a compreensão dos aspectos técnicos abordados nesta dissertação.

Subsequentemente, inicia-se com um subtópico que discute as características estratégicas do minério de ferro nacional. Em seguida, explora-se os principais tipos de explosivos empregados no contexto da mineração brasileira, destacando suas características e exemplos de suas aplicações práticas no desmonte de rochas. Por fim, são apresentadas as etapas de uma usina de beneficiamento e de fabricação do aço, desde a chegada do minério em forma de rocha desmontada até sua transformação em produtos finais, incluindo seu transporte em navios para exportação.

2.3.1 O ferro brasileiro

Este subtópico destina-se a explorar as especificidades do minério de ferro brasileiro, com ênfase nas características que justificam sua relevância estratégica e singularidade para o país. Considerando a complexidade do tema, que envolve múltiplas variáveis, como composição química, níveis de pureza e propriedades físicas e mecânicas, torna-se essencial a apresentação prévia de alguns conceitos que permeiam a análise e que facilitarão a compreensão do leitor. Segundo Vieira (1996), Rosière *et al.* (1997), Pereira e Remacre (2003) e Takehara (2004), os conceitos a seguir elucidam aspectos técnicos fundamentais à abordagem:

- **Hematita:** Mineral de óxido de ferro (Fe_2O_3) amplamente encontrado em depósitos de minério de ferro, reconhecido por seu alto teor de ferro e pela relevância na indústria siderúrgica devido à sua eficiência como fonte de ferro em processos de produção de aço.
- **Minério de ferro do tipo hematítico:** Refere-se a um tipo de minério de ferro composto predominantemente de hematita (conceitualizado anteriormente), caracterizado por alto teor de ferro e uso frequente na produção siderúrgica.
- **Minério de ferro do tipo anidro:** Refere-se a um tipo de minério que se caracteriza pela ausência de água em sua estrutura química, sendo particularmente adequado para aplicações industriais que demandam materiais com baixo teor de umidade.

- **Alumina:** Óxido de alumínio amplamente utilizado na indústria como matéria-prima para a produção de alumínio, sendo um componente comum em minérios como a bauxita.
- **Mineralogia:** Relaciona-se ao estudo e caracterização de minerais, focando em sua composição, estrutura e propriedades para fins de classificação e uso industrial.
- **Morfologia:** Relaciona-se ao estudo e caracterização da forma e estrutura física de minerais ou partículas, essenciais para a análise de suas propriedades e comportamentos em processos industriais.
- **Porosidades:** Caracterizam-se pelos espaços vazios ou poros existentes na estrutura de materiais sólidos, os quais impactam diretamente a densidade, a permeabilidade e a reatividade do material, que é entendida como a capacidade de reagir com outras substâncias em condições específicas.
- **Impurezas:** Componentes indesejados presentes em um minério ou material, que reduzem sua pureza e valor industrial.
- **Purificação:** Processo de remoção seletiva de elementos ou substâncias indesejadas de um material, visando melhorar sua qualidade e eficiência de uso.
- **Agente redutor:** É uma substância que remove o oxigênio dos óxidos de ferro, transformando-os em ferro metálico. O coque, derivado do carvão mineral, é um tipo de agente redutor, utilizado em nos altos-fornos para liberar monóxido de carbono, que realiza essa redução.

Estabelecidos os conceitos iniciais, procede-se à análise das características, particularidades e fatores que atribuem singularidade ao minério de ferro brasileiro.

O que comumente é conhecido como “ferro”, na verdade, refere-se ao produto derivado da extração e processamento do minério de ferro. Esta matéria-prima encontra-se na natureza em formações rochosas compostas por óxidos de ferro, sendo os mais comuns a magnetita e a hematita. Quando submetidos a altas temperaturas e à presença de um agente redutor, como o coque, esses óxidos liberam ferro em sua forma metálica. Aproximadamente 98% do minério de ferro aproveitável extraído globalmente é convertido em aço, mediante processos de produção de ferro-gusa e ferro-esponja em altos-fornos (Jesus, 2009).

Na indústria siderúrgica, é considerado ideal o teor de ferro superior a 58% (United States Geological Survey, 2017). De modo geral, os depósitos brasileiros apresentam altos teores de ferro e baixas concentrações de impurezas, características que favorecem sua competitividade no mercado global (Takehara, 2004). Os minérios de ferro brasileiros são majoritariamente do tipo hematítico, classificados em distintas categorias, e em sua maioria são anidros, apresentando elevado teor de ferro e baixo teor de alumina quando comparados a minérios de outras origens, como os australianos (Rosière *et al.*, 1997). Devido às diversas origens geológicas e condições de intemperismo, observa-se que os minérios no Brasil possuem, em geral, estruturas diferenciadas do ponto de vista mineralógico e morfológico (Vieira, 1996). Esses minérios também podem conter uma variedade de constituintes mineralógicos, como o quartzo, além de distintas porosidades, o que influencia diretamente nas etapas de aglomeração de finos de minério de ferro (Vieira, 1996). Conforme destacado por Pereira e Remacre (2003), a composição mineralógica é o principal fator determinante para o comportamento dos minérios nas etapas de mineração e siderurgia. Nem sempre os minérios apresentam-se prontos para o uso industrial, seja devido à sua granulometria, ou à presença de impurezas; nesses casos, é necessária uma etapa denominada “beneficiamento”, com o objetivo de ajustar a granulometria e remover impurezas indesejadas, preservando a composição química dos materiais (Jesus, 2009).

Dessa forma, compreendidas as características mineralógicas e as particularidades que conferem singularidade ao minério de ferro brasileiro, destaca-se a posição do país no mercado global e os fatores que sustentam sua competitividade. Segundo o United States Geological Survey (2023) e a World Steel Association (2023), a Austrália lidera a produção mundial de minério de ferro, respondendo por mais de 35% do fornecimento global, enquanto o Brasil ocupa a segunda posição, com cerca de 18% da produção e exportações anuais próximas de 370 milhões de toneladas, destinadas principalmente à China. Entre as empresas que dominam o mercado internacional, destacam-se a Vale S.A. (Brasil), *Broken Hill Proprietary* (BHP) e Rio Tinto (ambas australianas), e a *Fortescue Metals Group* (FMG), também da Austrália, responsáveis pela maior parte da produção e comercialização da *commodity*. A Vale, em especial, diferencia-se por ofertar minério de ferro com teor elevado (63% a 66% de Fe) e manter operações integradas de extração, transporte e exportação, com infraestrutura própria que reduz custos logísticos e aumenta a

competitividade do produto brasileiro (Vale, 2024). A qualidade superior do minério de ferro extraído no Brasil, aliada às reservas medidas e indicadas estimadas em mais de 30 bilhões de toneladas (United States Geological Survey, 2023), e à posição geográfica favorável, confere ao país relevância como fornecedor confiável e estratégico de longo prazo. Assim, ao considerar fatores como teor do minério, infraestrutura logística consolidada e tradição exportadora, observa-se que o Brasil permanece entre os principais atores do mercado mundial de minério de ferro, desempenhando papel fundamental no atendimento à demanda global, especialmente de países como China, Alemanha e Japão, que dependem de minério de alta qualidade para suas siderúrgicas (United States Geological Survey, 2023; World Steel Association, 2023).

Compreendida a importância e as especificidades de ferro brasileiro, bem como suas características que o tornam uma matéria-prima estratégica e singular para o país, direciona-se o estudo para a apresentação dos principais tipos de explosivos empregados no contexto da mineração brasileira, destacando suas características e, posteriormente, exemplos de suas aplicações práticas no desmonte de rochas.

2.3.2 Da fabricação dos principais explosivos utilizados no Brasil até a rocha desmontada

A fabricação de explosivos para a mineração civil é um componente de extrema relevância na cadeia produtiva da IEM, pois é considerada como um dos pontos de partida, sendo utilizada na detonação das rochas, uma das primeiras etapas do processo produtivo que leva até o produto final. Devido ao seu caráter estratégico essencial para a eficiência e segurança nas operações de extração, essa atividade envolve uma variedade de materiais explosivos com características técnicas específicas, que desempenham papéis cruciais no planejamento, execução e controle das detonações. Entre os principais explosivos empregados no Brasil, destacam-se os detonadores eletrônicos, não elétricos, *boosters*, cordéis detonantes, e emulsões explosivas à base de nitrato de amônio⁶⁴, que podem ser apresentadas em formato “a granel”, chamadas, então, apenas de emulsão matriz ou em forma de cartuchos,

⁶⁴Para fins de simplificação e clareza textual, o termo completo “emulsão explosiva à base de nitrato de amônio” será mencionado apenas na primeira ocorrência. Nas subsequentes, será utilizado apenas “emulsão”, uma vez que o contexto já esclarece a referência ao explosivo utilizado na mineração.

sendo chamadas, portanto, de emulsões encartuchadas, ou apenas, encartuchados, cada qual com particularidades que influenciam diretamente a precisão e o desempenho dos processos de desmonte (Koppe; Costa, 2012).

Esses materiais são amplamente utilizados nas operações de mineração devido à sua capacidade de fragmentar as rochas de forma controlada, reduzindo riscos e otimizando as etapas subsequentes de produção dos produtos finais, como o beneficiamento (Koppe; Costa, 2012). A análise das propriedades e aplicações desses explosivos permite compreender sua importância no contexto brasileiro, onde fatores como custo, eficiência e segurança orientam sua escolha e uso. Na sequência, as características técnicas desses produtos serão apresentadas com base nas abordagens de Koppe (2007), que detalha suas propriedades e funções, visando facilitar a compreensão do tema:

- **Detonadores Não Elétricos:** É um dispositivo utilizado para iniciar explosões de forma segura e eficiente. O produto é composto por um “tubo de sinal”, contendo material energético, e pelo detonador, responsável por converter a energia transmitida pelo tubo em uma explosão controlada. Funciona por meio de um acionamento mecânico no tubo de sinal que transmite uma onda de choque mecânica ou química para acionar a carga explosiva principal. Sua simplicidade, confiabilidade em condições adversas, como ambientes úmidos ou com interferências eletromagnéticas, e seu baixo custo fazem dele uma solução eficaz no setor mineral. A FIGURA 4 apresenta o modelo de detonador não eletrônico:

FIGURA 4 - MODELO DE DETONADOR NÃO ELÉTRICO UTILIZADO EM MINERAÇÃO



FONTE: Catálogo de produtos e serviços da Orica (2024).

- **Detonadores Eletrônicos:** Esses dispositivos são empregados para iniciar a detonação de explosivos com alta precisão e controle. Diferentemente dos detonadores não elétricos, que dependem de um choque mecânico para iniciar a detonação, os eletrônicos podem ser programados para detonar em sequências específicas, permitindo um planejamento mais eficaz das explosões, minimizando riscos e otimizando a eficiência das operações de mineração. Entretanto, podem custar até oito vezes mais que uma unidade equivalente de detonador não elétrico. A FIGURA 5 apresenta o modelo de detonador eletrônico:

FIGURA 5 - MODELO DE DETONADOR ELETRÔNICO UTILIZADO EM MINERAÇÃO



FONTE: Catálogo de produtos e serviços da Orica (2024).

- **Boosters:** São explosivos de maior potência utilizados para amplificar a força de detonação de outros explosivos. Geralmente, são combinados com explosivos menos potentes, como os detonadores não elétricos e eletrônicos, garantindo que a detonação ocorra de forma eficaz. Na prática, os *boosters* são posicionados próximos aos explosivos primários, aumentando a intensidade da explosão e permitindo uma fragmentação mais eficiente da matéria. A FIGURA 6 apresenta o modelo de um *booster*:

FIGURA 6 - MODELO DE BOOSTER UTILIZADO EM MINERAÇÃO



FONTE: Catálogo de produtos e serviços da Orica (2024).

- **Cordel Detonante:** Trata-se de um explosivo em forma de cordão, utilizado para iniciar detonações. Contém uma mistura explosiva em seu revestimento e é ideal para detonações em sequência, fundamentais em operações de escavação em larga escala. Os cordéis detonantes podem ser utilizados para criar atrasos entre as explosões, controlando a detonação e evitando danos a estruturas adjacentes. A FIGURA 7 apresenta o modelo de um cordel:

FIGURA 7 - MODELOS DE CORDÉIS UTILIZADOS EM MINERAÇÃO



FONTE: Catálogo de produtos e serviços da Orica (2024).

- **Emulsão encartuchada:** Trata-se de um tipo de explosivo composto por uma mistura de água, nitrato de amônio (que atua como agente oxidante) e óleo, emulsificada para formar uma mistura homogênea. A emulsão é acondicionada em cartuchos, que a confinam, protegem e facilitam seu manuseio e aplicação. A FIGURA 8 apresenta o modelo de uma emulsão encartuchada:

FIGURA 8 - MODELO DE EMULSÃO ENCARTUCHADA UTILIZADA EM MINERAÇÃO



FONTE: Catálogo de produtos e serviços da Orica (2024).

- **Emulsão Matriz:** Um dos principais explosivos utilizados na mineração civil, combina água, óleo, nitrato de amônio e um agente emulsificante, resultando em uma emulsão estável e resistente à água, tornando-a particularmente útil em ambientes úmidos ou submersos, comuns nas operações de mineração. As emulsões matrizes possuem desempenho explosivo eficaz, com velocidade de detonação ajustável conforme necessário. A FIGURA 9 apresenta o modelo de uma emulsão matriz:

FIGURA 9 - MODELO DE EMULSÃO MATRIZ UTILIZADO EM MINERAÇÃO



FONTE: Catálogo de produtos e serviços da Orica (2024).

A emulsão matriz é um dos explosivos mais utilizados por oferecer vantagens em termos de custo de produção, transporte, além do já mencionado desempenho técnico, particularmente na eficiência do desmonte de rochas. Como se pode observar na FIGURA 9, a emulsão matriz é produzida e vendida no formato a granel. Para facilitar o entendimento do leitor sobre como esta emulsão a granel chega até onde será utilizada, a FIGURA 10 apresenta um modelo de caminhão onde a emulsão matriz é transportada:

FIGURA 10 - MODELO DE CAMINHÃO UTILIZADO PARA TRANSPORTAR A EMULSÃO MATRIZ EM OPERAÇÕES DE MINERAÇÃO



FONTE: Catálogo de produtos e serviços da Orica (2024).

De acordo com o relatório anual aos investidores de 2023 da multinacional de origem australiana Orica, uma das principais empresas no mercado global de fabricação de explosivos para mineração, com atuação na América Latina, inclusive no Brasil, a emulsão matriz representou 45% da receita da companhia. O nitrato de amônio não é somente um componente essencial na produção de emulsão, sendo responsável por fornecer oxigênio durante a combustão, o que potencializa a reação explosiva, mas também amplamente utilizado como fertilizante no setor agrícola. A emulsão matriz, com sua resistência e eficácia, é fundamental para o desmonte de rochas, especialmente quando combinada com o nitrato de amônio em seu formato puro. A produção de nitrato de amônio ocorre por meio da combinação de amônia com ácido nítrico em instalações químicas (Orica Limited, 2023). A Rússia se destaca como o maior produtor global de nitrato de amônio, respondendo por cerca de 45% da produção mundial, com aproximadamente 10 milhões de toneladas produzidas em 2017 (Radio France Internationale, 2020). No subcapítulo 4.3.1 será discutido como a invasão da Rússia à Ucrânia afetou diretamente a cadeia de suprimentos global de nitrato de amônio, principalmente devido às sanções impostas pelos Estados Unidos da América (EUA), Canadá, União Europeia (UE) e Austrália (Forbes Brasil, 2022).

Essas sanções impactaram diversas grandes mineradoras originárias desses países, que têm operações significativas na América Latina, como a BHP (Austrália), Rio Tinto (Austrália), Anglo American (Reino Unido), Lundin Mining (Canadá), Yamana Gold (Canadá), Newmont Corporation (EUA) e a Kinross Gold Corporation (Canadá) (Forbes Brasil, 2022).

Culminada a análise das principais características técnicas dos explosivos utilizados na extração de minérios no Brasil, e ressaltada a importância do nitrato de amônio como matéria-prima para a cadeia de explosivos, passa-se agora à discussão de suas aplicações práticas na mineração civil.

A fragmentação de rochas é o processo controlado de desmonte de maciços rochosos em pedaços menores, geralmente realizado com explosivos, essencial para mineração (Koppe; Costa, 2012). Esse processo busca otimizar a produtividade e minimizar custos, considerando a granulometria desejada e a segurança no local (Koppe, 2007). A eficiência e a segurança nas operações de mineração contemporâneas dependem do uso de diversos explosivos e dispositivos de detonação, projetados para otimizar a fragmentação das rochas e garantir a proteção dos trabalhadores e das instalações. Cada um desses materiais desempenha um papel crucial na detonação, e sua combinação deve ser cuidadosamente planejada para garantir a eficácia das operações de mineração (Koppe; Costa, 2012).

Existem diversas técnicas para o uso de explosivos no desmonte de rochas, cada uma com métodos e aplicações específicos. Para manter o foco e a concisão deste estudo, serão exemplificadas apenas quatro dessas técnicas, com o apoio de figuras que ilustram algumas combinações possíveis, visando facilitar a compreensão do tema. No contexto de uma mina, o termo "bancada" refere-se ao local destinado à aplicação dos explosivos. A FIGURA 11 ilustra uma bancada, proporcionando uma visualização do ambiente onde ocorre o desmonte dos maciços de rocha:

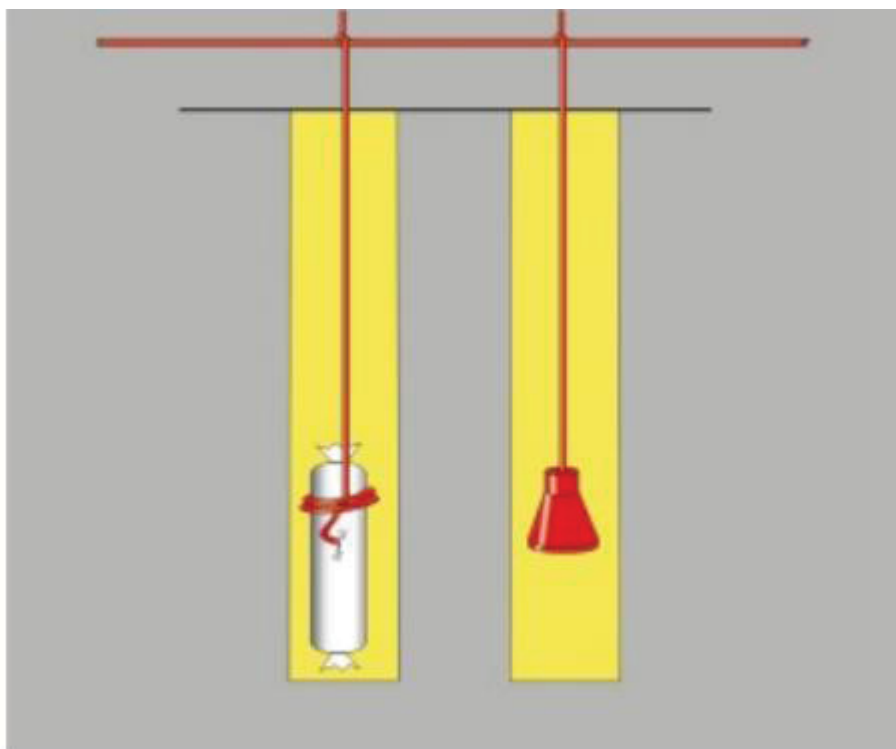
FIGURA 11 - BANCADA DE DESMONTE EM OPERAÇÃO DE MINERAÇÃO



FONTE: Catálogo de serviços da Dinadril (2024).

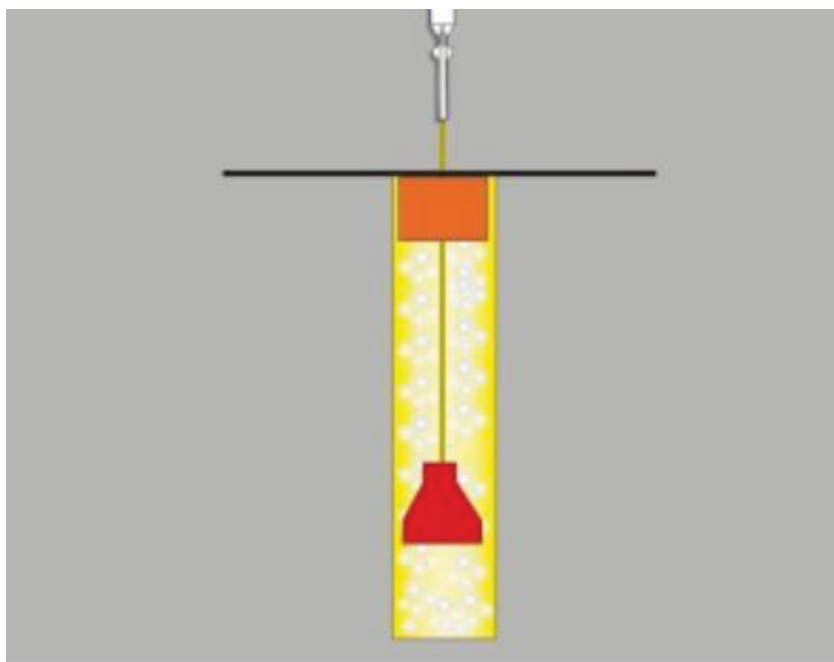
Conforme ilustrado na FIGURA 11, observa-se uma perfuratriz posicionada na bancada. Essa máquina tem como função realizar a perfuração do solo, criando furos específicos para a detonação das rochas. Após a conclusão da perfuração, a empresa responsável pela aplicação dos explosivos realiza a escorva, um procedimento na mineração que consiste no preenchimento dos furos de detonação com material explosivo para confinar a carga, assegurando maior controle e eficiência no desmonte de rochas. A FIGURA 12 apresenta dois tipos de escorvas: na parte esquerda, utiliza-se cordel e encartuchado, enquanto na direita, emprega-se cordel e *booster*. Esse material é inserido nos furos, seguido pela aplicação de emulsão matriz a granel:

FIGURA 12 - CORTE LATERAL DOS TIPOS DE ESCORVA: CORDEL COM ENCARTUCHADO E CORDEL COM *BOOSTER*



FONTE: Catálogo de produtos e serviços da Orica (2024).

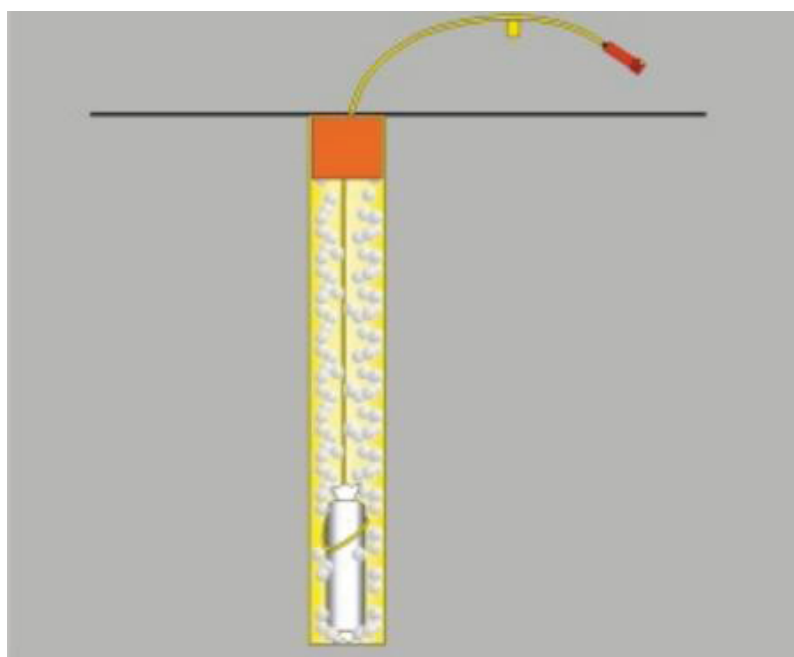
A FIGURA 13 ilustra um exemplo de escorva, empregando um detonador não eletrônico inserido em um *booster*. Esses componentes, quando combinados, são posicionados no fundo do furo, que é então preenchido com emulsão matriz a granel para completar a carga:

FIGURA 13 - CORTE LATERAL DA ESCORVA COM *BOOSTER* E EMULSÃO MATRIZ

FONTE: Catálogo de produtos e serviços da Orica (2024).

A FIGURA 14 ilustra uma modalidade de escorva, na qual um detonador eletrônico é inserido dentro de um cartucho de emulsão encartuchada. Esses materiais, combinados, são posicionados no fundo do furo, que, em seguida, é completado com emulsão matriz a granel para garantir a carga necessária:

FIGURA 14 - CORTE LATERAL DA ESCORVA COM ENCARTUCHADO E EMULSÃO MATRIZ



FONTE: Catálogo de produtos e serviços da Orica (2024).

Segundo Jesus (2009), o processo de beneficiamento pode incluir várias etapas, sendo as principais:

- **Britagem:** O minério é quebrado em pedaços menores para facilitar o processamento;
- **Moagem:** Os fragmentos são moídos para liberar os minerais valiosos;
- **Classificação:** O material moído é classificado por tamanho e densidade para separar os minerais de maior valor das rochas que não são economicamente viáveis;
- **Concentração:** Métodos físicos ou químicos, como flotação, gravitação ou separação magnética, são usados para aumentar a concentração do mineral desejado;
- **Desidratação:** O concentrado mineral é desidratado para remover a água, tornando-o mais adequado para transporte e armazenamento.

As usinas de beneficiamento desempenham um papel essencial na indústria de mineração, pois transformam o minério extraído em produtos comercializáveis e utilizáveis em diversas aplicações, como na fabricação de aço (no caso do minério de ferro) ou em outros setores industriais. A eficiência e a tecnologia adotadas nessas usinas impactam diretamente a rentabilidade e a sustentabilidade das operações mineradoras. As usinas de beneficiamento são classificadas conforme seu porte, que é determinado pela capacidade anual de produção. Essa categorização, conforme descrita por Koppe (2007), estabelece quatro tipos principais de usinas: grandes, médias, pequenas e micro usinas. A seguir, apresentam-se as especificações dessas categorias:

- **Grande:** Usinas com produção anual de minério beneficiado superior a 1.000.000 toneladas.
- **Média:** Usinas cuja produção anual de minério beneficiado varia entre 100.000 e 1.000.000 toneladas.
- **Pequena:** Usinas com produção anual entre 10.000 e 100.000 toneladas.
- **Micro:** Usinas que beneficiam menos de 10.000 toneladas anualmente.

Após o beneficiamento, os produtos apresentam características específicas, o que implica que cada um deles passará por um número variável de etapas de

processamento, de acordo com sua classificação. De acordo com Takehara (2004), esses produtos são classificados da seguinte forma:

- **Granulado:** partículas com granulometria entre 6,3 mm e 31,7 mm e forma irregular;
- **Sinter Feed:** partículas com tamanho entre 0,15 mm e 6,3 mm;
- **Pellet Feed:** partículas com granulometria inferior a 0,15 mm.

Esses processos possibilitam o aproveitamento de materiais que anteriormente seriam descartados como rejeitos (Takehara, 2004). Os minérios de ferro beneficiados são então transportados para os pátios de estocagem das usinas siderúrgicas ou enviados aos portos para exportação (Jesus, 2009). A FIGURA 16 apresenta os tipos de minério de ferro citados anteriormente:

FIGURA 16 - TIPOS DE MINÉRIO DE FERRO

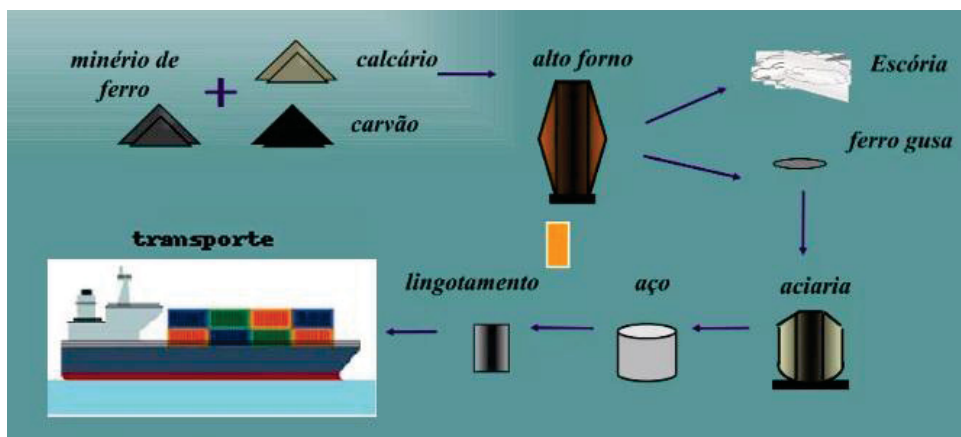


FONTE: Companhia Siderúrgica Nacional (2025).

Outrossim, a elevada qualidade do minério brasileiro, caracterizada pelo alto teor de ferro e baixa concentração de impurezas, posiciona o Brasil como um fornecedor estratégico para a produção de aço, fortalecendo sua competitividade no mercado siderúrgico internacional (Takehara, 2004; Jesus, 2009).

A FIGURA 17 ilustra as etapas do processo de fabricação do aço, que ocorre após o término do beneficiamento, começando com os materiais primários e finalizando com o transporte do produto acabado:

FIGURA 17 - ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO



FONTE: O autor (2024).

Segundo Jesus (2009), o processo é dividido nas seguintes fases:

- **Redução do minério de ferro:** é feita nos altos-fornos carregados com granulados ou aglomerados de minério de ferro, calcário e carvão.
- **Alto-forno:** Dentro do alto-forno, o oxigênio é removido dos óxidos de ferro, e a carga é fundida, resultando no ferro-gusa, uma liga de ferro e carbono que contém silício, manganês, fósforo e enxofre, além da escória, subproduto formado pelas impurezas eliminadas durante a fusão dos minérios. Composta por óxidos e outros elementos não metálicos, a escória é frequentemente reutilizada na construção civil, como em cimento e pavimentação, devido à sua durabilidade.
- **Refino na aciaria:** O ferro gusa é transferido para a aciaria, onde passa pelo processo de refino. Nessa etapa, o ferro gusa é purificado, removendo-se impurezas adicionais e ajustando-se o teor de carbono para transformá-lo em aço.
- **Lingotamento:** Após o refino, o aço líquido é solidificado no processo de lingotamento, formando blocos, chapas, ou outros formatos semiacabados de aço.
- **Transporte:** Finalmente, o aço em sua forma semi-acabada ou acabada é transportado para ser utilizado em aplicações industriais.

Os aspectos iniciais abordados neste subtópico até aqui permitiram compreender as bases técnicas do processo de extração e beneficiamento do minério de ferro. Na sequência, o próximo subtópico apresenta os fundamentos relacionados a jazidas, reservas e tipos de minas, essenciais para aprofundar a compreensão das características geológicas do setor mineral brasileiro.

2.3.4 Fundamentos da mineração

Neste subtópico, serão apresentados de forma consolidada os conceitos sobre jazidas, reservas, classificação das reservas e tipos de minas, oferecendo ao leitor as bases para entender as condições geológicas e econômicas que determinam a viabilidade e o aproveitamento dos recursos minerais no Brasil, direcionando-se agora à análise do conceito de jazida.

Uma jazida refere-se a uma concentração natural de recursos minerais, como minérios, cuja extração é economicamente viável. Essa definição não se limita à presença do mineral, mas também inclui a análise da viabilidade econômica de sua exploração. As jazidas são identificadas por meio de estudos geológicos e apresentam variações quanto ao tamanho, qualidade e profundidade (Koppe, 2007). As jazidas são categorizadas em diferentes tipos, de acordo com o recurso mineral que contêm, como jazidas de minério de ferro, ouro, carvão, entre outros. A qualidade de uma jazida é um fator determinante para a viabilidade econômica de sua exploração, levando em conta aspectos como a pureza do mineral e os custos associados à extração (Koppe, 2007). Adicionalmente, o conceito de jazida possui relevância no setor de mineração, uma vez que está intrinsecamente ligado à capacidade de uma região ou país de explorar e utilizar seus recursos minerais para fortalecer a economia. Jazidas bem localizadas e com recursos abundantes podem impactar positivamente o desenvolvimento econômico, gerando empregos e aumentando a arrecadação tributária (Koppe, 2007).

Definido o conceito de jazida e sua relevância para o setor mineral, passa-se à análise das reservas de minério de ferro, subdividindo-se em conceitos básicos, classificação, tipos de minas e suas implicações no contexto econômico e operacional.

As reservas de minério correspondem à quantidade de mineral disponível em uma jazida que pode ser economicamente extraída. Essas reservas são organizadas em diferentes categorias, com base em critérios como viabilidade econômica, volume e qualidade do minério existente. A análise dessas reservas desempenha um papel crucial na indústria mineral, pois subsidia o planejamento da produção e a definição de investimentos estratégicos (Koppe, 2007).

Nesse contexto, a extração de minério de ferro envolve a lavra direta da jazida, removendo a cobertura e obtendo o minério bruto, conhecido como *Run-of-Mine* (ROM), que ainda não passou pelo beneficiamento. A seguir, são apresentados em

maior detalhe os conceitos de lavra de minério de ferro, ROM e volume de produção, que, embora possam ser novos para o leitor, são fundamentais para a compreensão do conteúdo e para o pleno entendimento desta dissertação:

- **Lavar minério de ferro:** O termo "lavar" refere-se ao processo de extração de minério de ferro de uma jazida. Esse processo envolve a remoção de rochas e solo que cobrem o minério, conhecido como "cobertura", e a retirada do minério em si. A lavra pode ser realizada por diferentes métodos, incluindo mineração a céu aberto ou subterrânea, dependendo da profundidade e localização do minério. O objetivo da lavra é extrair a maior quantidade possível de minério de forma econômica, para que possa ser processado e utilizado na indústria, especialmente na fabricação de aço.
- **Minério extraído (ROM):** Este termo refere-se ao minério extraído diretamente da mina, antes de qualquer beneficiamento ou processamento. O ROM é importante porque indica a quantidade total de minério disponível para lavra, sendo um parâmetro essencial para compreender a produção total possível e avaliar o potencial produtivo e a viabilidade econômica da mina (Koppe, 2007).
- **Volume de produção:** O termo "volume de produção" refere-se à quantidade total de material retirado do solo e submetido a processos de beneficiamento para a obtenção de produtos finais em um período determinado. Na mineração, esse parâmetro, usualmente expresso em toneladas ou metros cúbicos, é amplamente empregado como indicador da escala e da eficiência das operações realizadas em minas ou instalações industriais. Além disso, o volume de produção serve como critério fundamental para avaliar a importância de uma mina no contexto global (Koppe, 2007).

Estabelecidos os conceitos básicos sobre reservas de minério, com destaque para a lavra e o ROM, direciona-se agora à análise da classificação das reservas, abordando critérios e categorias fundamentais para a organização e o entendimento dessas estruturas no contexto mineral.

As reservas de minério são classificadas em grandes, médias e pequenas, com base no volume anual de extração, o que permite avaliar o potencial produtivo e as implicações econômicas de cada mina Koppe (2007). A seguir, serão apresentadas as especificações das reservas de acordo com seu volume:

- **Grandes:** São aquelas que apresentam uma quantidade de minério extraído anual superior a 1.000.000 toneladas. Este valor se refere ao total de minério bruto que pode ser extraído, sem descontar as perdas durante o processo de beneficiamento. Essas reservas são frequentemente associadas a minas de grande escala, que têm capacidade significativa de produção.
- **Médias:** Incluem reservas que variam entre 100.000 toneladas e 1.000.000 toneladas de minério bruto extraído por ano. Essas reservas têm um potencial intermediário e podem atender a demandas específicas de mercado.
- **Pequenas:** Estas são aquelas que possuem uma quantidade de minério bruto anual extraído que varia de 10.000 toneladas a 100.000 toneladas e, normalmente, são exploradas por mineradoras menores ou em operações de nicho.

Definida a classificação das reservas de minério, com ênfase em sua categorização em grandes, médias e pequenas, passa-se agora à análise dos tipos de minas, abordando suas características e particularidades no contexto da mineração.

As minas são classificadas em céu aberto, mistas e subterrâneas, de acordo com a profundidade do depósito mineral. A seguir, serão descritas as características de cada tipo de mina, acompanhadas de imagens, para facilitar a compreensão do leitor sobre os diferentes métodos de extração:

- **Mina a Céu Aberto (CA):** Esse tipo de mina é caracterizado pela extração do minério na superfície, o que geralmente permite uma operação mais econômica. Na mineração a céu aberto, o solo e a rocha acima do minério são removidos para facilitar a extração. A FIGURA 18 ilustra uma mina CA:

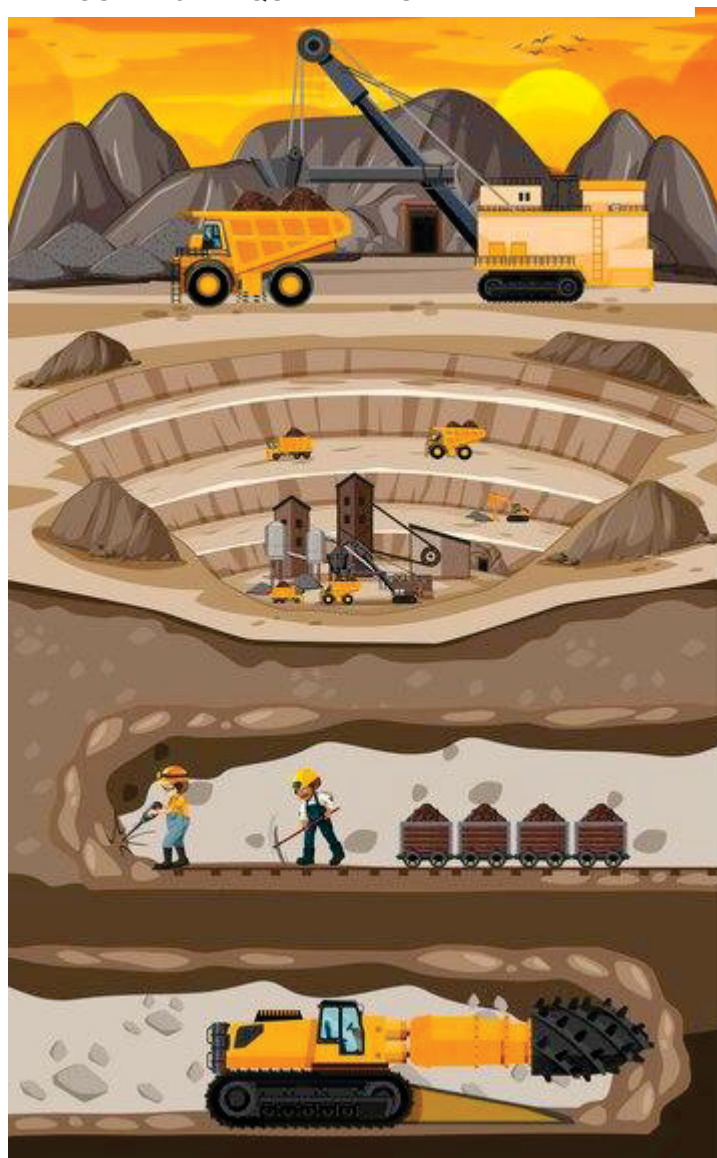
FIGURA 18 - EXEMPLO DE UMA MINA A CÉU ABERTO



FONTE: Cristal JR (2024).

- **Minas Mistas (M):** As minas mistas combinam características de extração a céu aberto e subterrânea. Elas podem começar como minas a céu aberto e, à medida que a profundidade do minério aumenta, podem se transformar em operações subterrâneas. Esse tipo de mina é vantajoso, pois pode aproveitar diferentes métodos de extração, dependendo da localização do minério. A FIGURA 19 ilustra o esquema de uma mina mista:

FIGURA 19 - ESQUEMA DE UMA MINA MISTA

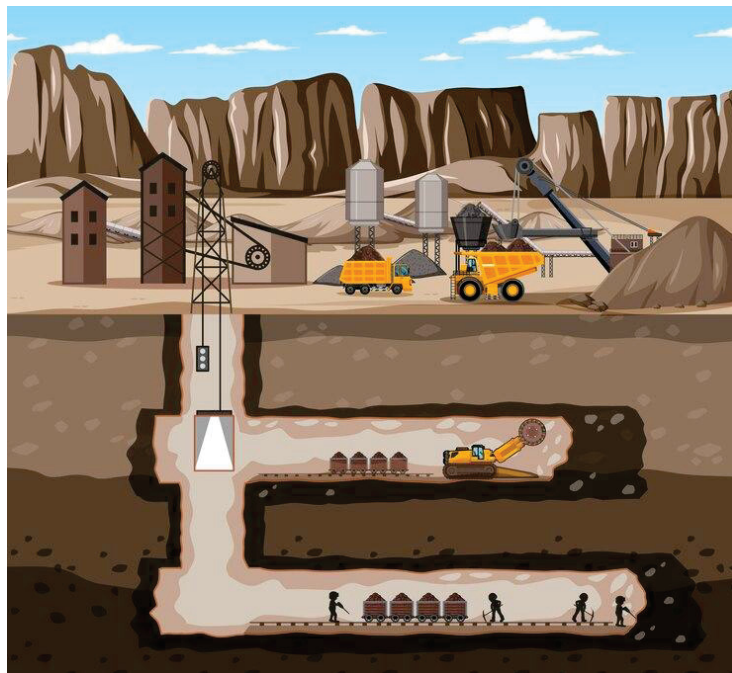


FONTE: Freepik (2024).

- **Minas Subterrâneas (S):** Também chamadas de “subsolo”, essas minas são utilizadas para a extração de minério abaixo da superfície da terra. A mineração

subterrânea é geralmente mais complexa e cara devido à necessidade de construção de túneis e galerias, mas é necessária quando o minério está localizado em profundidades que tornam a extração a céu aberto inviável. A FIGURA 20 ilustra o esquema de uma mina subterrânea:

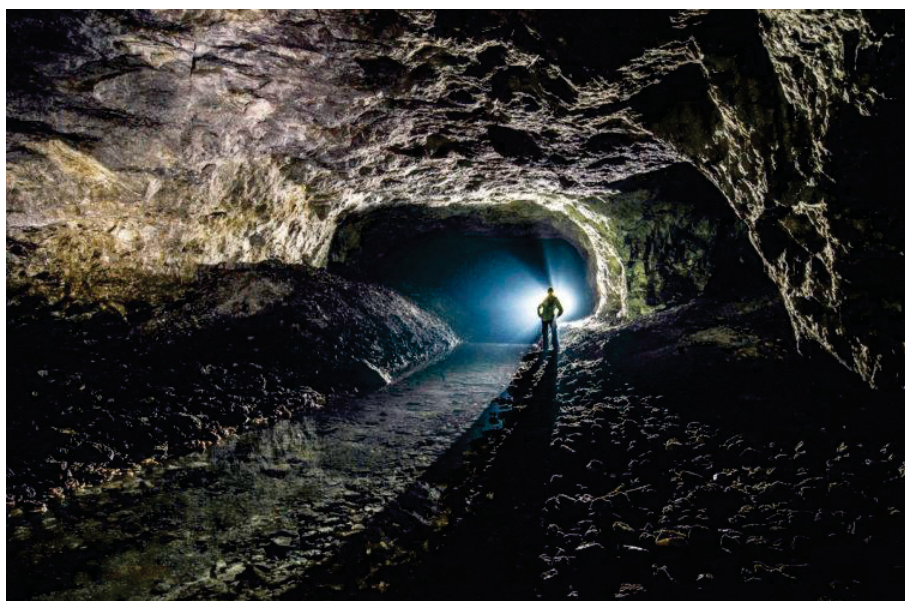
FIGURA 20 - ESQUEMA DE UMA MINA SUBTERRÂNEA



FONTE: Freepik (2024).

A FIGURA 21 apresenta uma foto de uma mina subterrânea:

FIGURA 21 - EXEMPLO DE UMA MINA A SUBTERRÂNEA



FONTE: Blog da Engenharia (2024).

Com a apresentação dos fundamentos essenciais sobre jazidas, reservas e tipos de minas, conclui-se este subcapítulo, oferecendo ao leitor um panorama abrangente das condições técnicas e econômicas que estruturam a atividade mineradora no Brasil. Na sequência, será analisado o panorama atual da indústria extrativa mineral brasileira, ampliando a compreensão sobre o setor e seu papel na economia nacional.

2.4 PANORAMA DA INDÚSTRIA EXTRATIVA MINERAL BRASILEIRA

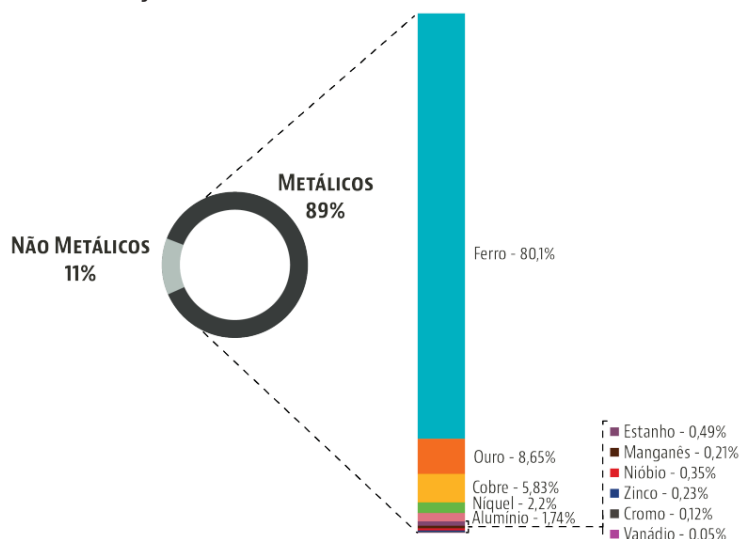
Este subcapítulo trata do setor mineral brasileiro e analisa o panorama da produção mineral no ano de 2021, com base nas atividades delimitadas pela Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), apresentada nas delimitações descritas na metodologia desta dissertação. Serão destacadas as substâncias metálicas mais relevantes e discutida a distribuição geográfica da mineração no país, com foco nos locais que concentram as principais reservas minerais. Essa abordagem busca proporcionar uma visão abrangente do setor mineral, considerando as limitações metodológicas estabelecidas e alinhando a análise ao recorte temporal dos choques externos estudados.

O ano de 2021 foi escolhido por três razões principais: primeiro, por ser o período em que ocorreu o primeiro choque externo analisado neste trabalho, a pandemia de COVID-19; segundo, porque, quando o trabalho foi iniciado em 2022, os dados de 2021 eram os últimos completos e consolidados disponíveis nas bases consultadas, e que serão detalhadas na metodologia desta dissertação, permitindo oferecer um retrato mais atual do setor naquele momento; e, terceiro, porque, mesmo com a disponibilidade de dados mais recentes em 2024 e 2025, a análise do GRÁFICO 5 demonstra que, nos cinco anos anteriores a 2021, a produção total mineral cresceu cerca de 7% e a produção de minério de ferro aumentou aproximadamente 9%, variações que não alteram significativamente o panorama setorial. Assim, manter 2021 como ano-base assegura coerência com o recorte temporal dos choques estudados e garante uma fotografia atualizada, sem comprometer a robustez da caracterização do setor.

Dessa forma, este subcapítulo avança para examinar a estrutura do setor mineral a partir da fotografia de 2021. Na composição do valor da produção da IEM por grupo de produtos, as substâncias pertencentes à classe dos minerais metálicos

representaram aproximadamente 89% do valor total da produção mineral no Brasil, de acordo com dados da Agência Nacional de Mineração (ANM), órgão do Governo Federal vinculado ao Ministério de Minas e Energia (MME), no ano de 2021, conforme ilustrado na FIGURA 22:

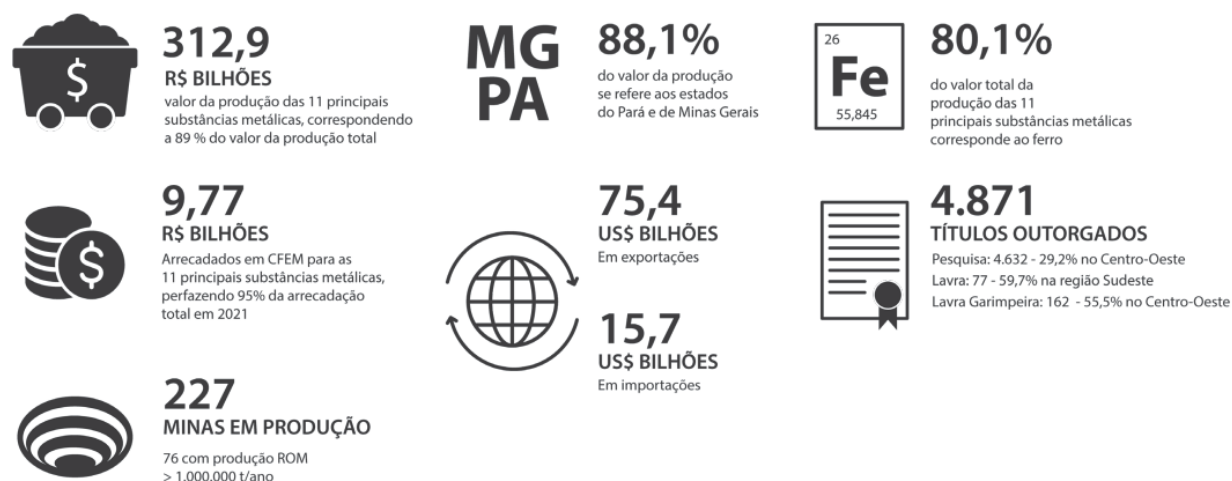
FIGURA 22 - PARTICIPAÇÃO DAS PRINCIPAIS SUBSTÂNCIAS METÁLICAS NO VALOR DA PRODUÇÃO MINERAL COMERCIALIZADA NO ANO DE 2021



FONTE: ANM, vinculada ao MME (2022).

Neste ano, havia registros de títulos ativos de pesquisa e lavra na ANM para 37 substâncias metálicas. Entretanto, conforme a FIGURA 22, dentre essas, 11 substâncias se destacaram por representar 99,7% do valor total de produção dessa classe, sendo elas: alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco. O valor total da produção dessas onze substâncias atingiu R\$ 312,9 bilhões, com destaque para a significativa contribuição do ferro, cuja produção, concentrada principalmente nos estados do Pará e Minas Gerais, compôs a maior parte desse montante. O ferro foi responsável por 80,1% da produção mineral comercializada, seguido pelo ouro (8,65%) e pelo cobre (5,83%). A FIGURA 23 apresenta estas informações, de forma resumida, e outras estatísticas relevantes sobre as principais substâncias metálicas em 2021, conforme dados MME:

FIGURA 23 - ESTATÍSTICAS SOBRE AS PRINCIPAIS SUBSTÂNCIAS METÁLICAS - ALUMÍNIO, COBRE, CROMO, ESTANHO, FERRO, MANGANÊS, NIÓBIO, NÍQUEL, OURO, VANÁDIO E ZINCO - NO ANO DE 2021

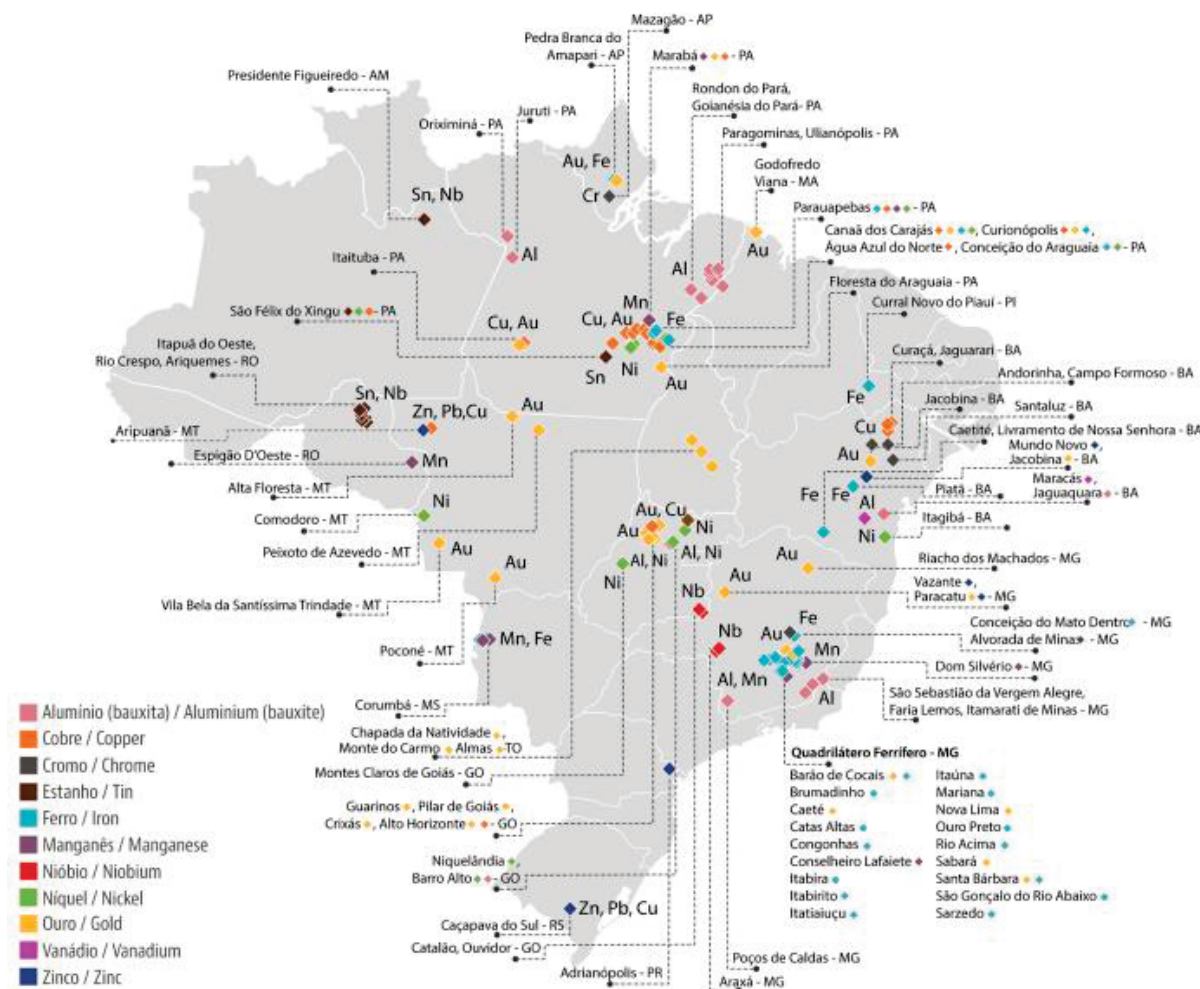


FONTE: ANM, vinculada ao MME (2022).

Esses dados, apresentados na FIGURA 23, complementam a análise ao evidenciar não apenas a magnitude econômica das principais substâncias metálicas, mas também aspectos relevantes como o volume de exportações e a quantidade de minas em operação. Destaca-se, ainda, a concentração geográfica da produção, com Minas Gerais e Pará respondendo por 88,1% do valor gerado, tópico que será abordado em maior profundidade no capítulo sete desta dissertação.

Demonstrada a relevância econômica e produtiva da IEM, direciona-se agora a análise para a distribuição geográfica das atividades mineradoras no território nacional, com ênfase nos polos de extração e beneficiamento dos minérios, contendo a localização das principais reservas e minas, considerando o ROM e as usinas por tipo de minério, como ilustrado na FIGURA 24, que apresenta um mapa do Brasil evidenciando as principais reservas minerais:

FIGURA 24 - LOCALIZAÇÃO DAS PRINCIPAIS RESERVAS MINERAIS BRASILEIRAS DE ALUMÍNIO, COBRE, CROMO, ESTANHO, FERRO, MANGANÊS, NIÓBIO, NÍQUEL, OURO, VANÁDIO E ZINCO NO ANO DE 2021



FONTE: ANM, vinculada ao MME (2022).

As reservas indicadas para cada município não representam a totalidade das reservas existentes, sendo possível a ocorrência de outras substâncias que não estão listadas na FIGURA 24. A seleção das principais reservas apresentadas na FIGURA 24 foi realizada com base nos dados declarados em Relatórios Anuais de Lavra, Relatórios de Reavaliação de Reservas e Relatórios Finais de Pesquisa, aprovados pela ANM. Para tal, foram considerados os principais municípios onde essas reservas estão localizadas.

A TABELA 1 exhibe as substâncias em relação ao porte das minas e à modalidade de lavra, conforme dados referentes ao ano de 2021:

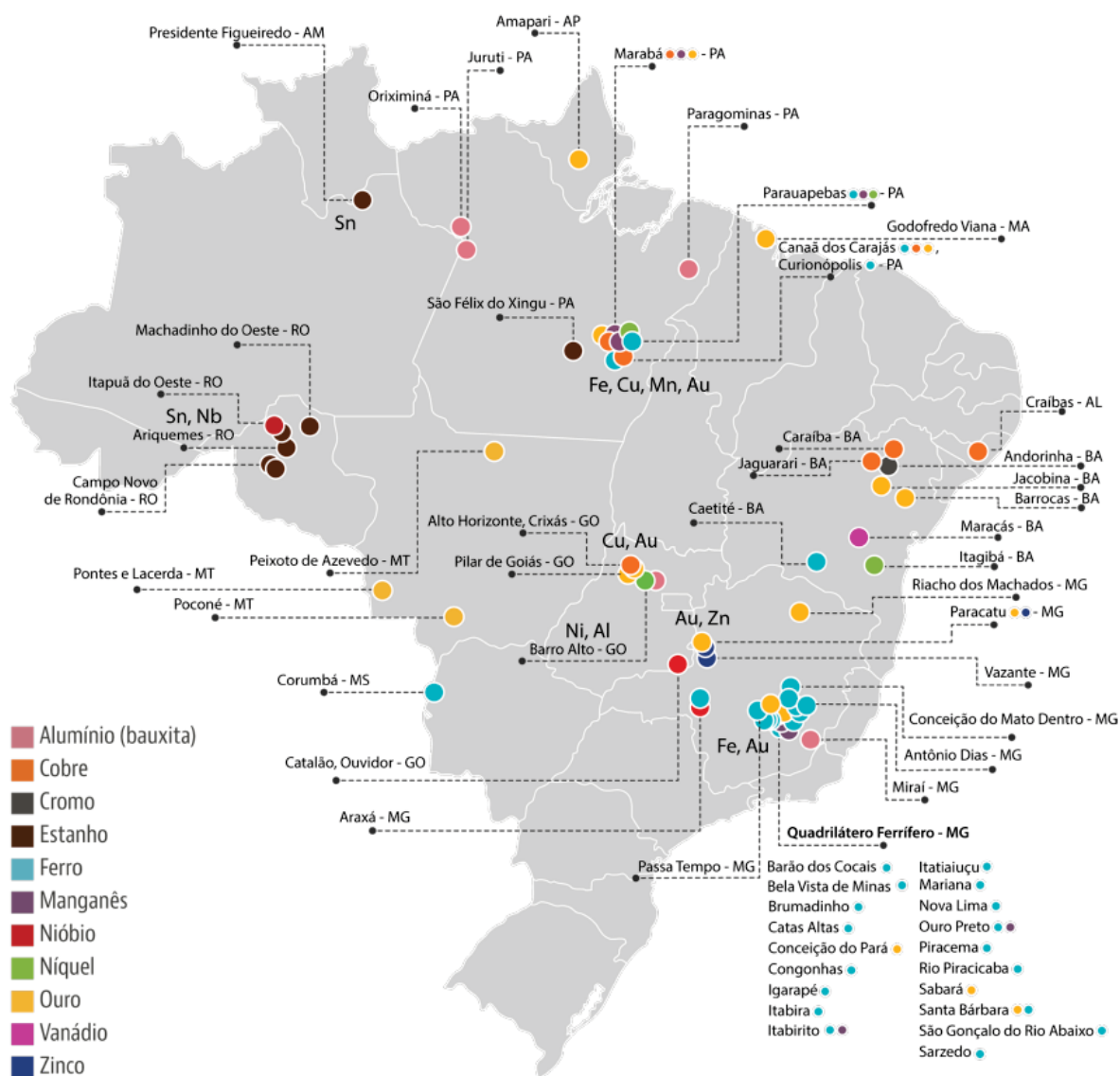
TABELA 1 - PORTE E MODALIDADE DE LAVRA DAS MINAS NO ANO DE 2021

Substância	Grandes			Médias			Pequenas			Subtotal			Total
	CA	M	S	CA	M	S	CA	M	S	CA	M	S	
Brasil	68		8	66		16	61	1	5	195	1	29	227
Alumínio(Bauxita)	4			8			19			31			31
Cobre	4		1	2		2	1			7		3	10
Cromo			1	1			1			2		1	3
Estanho	5			8			4			17			17
Ferro	46			26			10			82			82
Manganês				4		1	12			16		1	17
Nióbio	3									3			3
Níquel	3						1			4			4
Ouro*	4		4	16		13	13	1	5	33	1	22	56
Vanádio	1									1			1
Zinco			2	1						1		2	3

FONTE: Elaboração pelo autor, a partir de dados do MME, referentes ao ano de 2021 (2024).

Observa-se na TABELA 1 que as minas de ferro possuem a maior quantidade de operações no país, seguidas pelas minas de ouro. O cobre, embora ocupe a terceira posição em volume de produção, concentra sua extração principalmente no estado do Pará, nos projetos Salobo e Serra dos Carajás, ambos administrados pela Vale. Esse dado é ilustrado na FIGURA 25, que apresenta as minas com produção ROM superior a 1.000.000 toneladas por ano:

FIGURA 25 - MINAS COM PRODUÇÃO ROM > 1.000.000 t/ANO NO ANO DE 2021



FONTE: ANM, vinculada ao MME (2022).

As substâncias que ocorrem em um mesmo minério são contabilizadas apenas em relação à substância principal, evitando, assim, a duplicidade de contagem. Da mesma forma, substâncias obtidas como subprodutos não são computadas separadamente. A TABELA 2 apresenta a quantidade e o porte das usinas referentes ao ano de 2021:

TABELA 2 - QUANTIDADE E PORTE DAS USINAS NO ANO DE 2021
(continua)

Substância	Grandes	Médias	Pequenas	Total
Brasil	82	51	25	158
Alumínio	5	3	3	11
Cobre	5	2		7

TABELA 2 - QUANTIDADE E PORTE DAS USINAS NO ANO DE 2021
(conclusão)

Substância	Grandes	Médias	Pequenas	Total
Cromo	1	2	3	6
Estanho	4	4	1	9
Ferro	47	21	5	73
Manganês		6	7	13
Nióbio	4	1		5
Níquel	3	1		4
Ouro	11	10	6	27
Vanádio	1			1
Zinco	1	1		2

FONTE: Elaboração pelo autor, a partir de dados do MME, referentes ao ano de 2021 (2022).

Essa caracterização, encontrada na TABELA 2, relacionada à concentração de usinas de beneficiamento voltadas ao minério de ferro no Brasil, proporciona uma base sólida para compreender as dinâmicas operacionais do setor, bem como a dependência econômica do país em relação à extração e exportação desse recurso, especialmente ao se considerar o número de usinas de ferro em comparação às destinadas a outros metais.

O capítulo apresentado permitiu aprofundar a compreensão sobre a evolução histórica e a atual caracterização do setor mineral brasileiro, com ênfase na extração e no beneficiamento do minério de ferro. A análise apresentou os fundamentos técnicos que sustentam a cadeia produtiva mineral, abordando conceitos essenciais como jazidas, reservas, lavra, tipos de minas e processos de beneficiamento, os quais contribuem para o entendimento das operações e especificidades que caracterizam o setor. A partir da contextualização histórica, técnica e econômica aqui desenvolvida, evidencia-se que a mineração brasileira enfrenta desafios e oportunidades que extrapolam questões meramente produtivas, incluindo aspectos relacionados à eficiência operacional, sustentabilidade e inserção competitiva em um mercado global em transformação. A discussão desenvolvida neste capítulo, dialoga principalmente com o objetivo específico a) desta dissertação, e também com os demais, ao dar a dimensão do setor mineral brasileiro, importante para a compreensão deste estudo.

Nesse sentido, o próximo capítulo avança para a análise das transformações tecnológicas em curso, destacando a ascensão da Indústria 4.0 e a crescente demanda por minerais estratégicos, fundamentais para a transição energética e digital.

3 INDÚSTRIA 4.0: INOVAÇÕES E MINERAIS ESTRATÉGICOS ASSOCIADOS A NOVA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

A Indústria 4.0 inaugura uma nova era na produção industrial, marcada pela automação, conectividade e integração de sistemas físicos e digitais. Utilizando tecnologias avançadas, como, inteligência artificial (IA, também conhecida pela sua sigla em inglês AI – *Artificial Intelligence*), *big Data*, IoT e robótica. Essa revolução tecnológica promove a criação de fábricas altamente eficientes, com capacidade de monitoramento e ajuste em tempo real, aumentando a produtividade e reduzindo impactos ambientais (Orecchini, 2018). Reconhecida por sua natureza inovadora e pelo papel central na convergência de tecnologias emergentes, a Indústria 4.0 promove a transformação digital nos setores produtivos, com impactos significativos na eficiência, sustentabilidade e inovação (Schwab, 2017). Além disso, minerais estratégicos como o nióbio e o lítio, essenciais para ligas especiais, baterias e tecnologias de armazenamento de energia, e elementos de terras raras, fundamentais para componentes eletrônicos de alto desempenho, são apontados como recursos-chave para viabilizar essa transformação tecnológica (Ferreira *et al.*, 2018; Golev *et al.*, 2014; Oliveira, 2020).

A elaboração deste capítulo, dedicado à Indústria 4.0 e aos minerais estratégicos associados a essa nova revolução industrial, confere a este trabalho um caráter atual, contemporâneo e relevante, ao abordar um tema cuja discussão acadêmica formal ainda é incipiente e carece de publicações robustas em periódicos de grande impacto. Esse enfoque busca, além de analisar os impactos e as demandas geradas pela Indústria 4.0, discutir a importância do posicionamento estratégico do Brasil na cadeia global de minerais essenciais para essa transição tecnológica, como o nióbio, o lítio e os elementos de terras raras, que são fundamentais para tecnologias digitais e sustentáveis. Dessa forma, este subcapítulo pretende oferecer reflexões que possibilitem compreender as mudanças que moldam a economia e a sociedade contemporâneas, evidenciando como o setor mineral brasileiro pode se consolidar como ator relevante neste novo cenário industrial, ampliando suas oportunidades e, potencialmente, contribuindo para impulsionar o desenvolvimento industrial do país, sobretudo frente a contextos de choques externos.

Este capítulo apresenta, inicialmente, os fundamentos e principais tecnologias associadas à Indústria 4.0, contextualizando suas implicações para o setor mineral

brasileiro. Em seguida, aborda como as inovações tecnológicas têm transformado as operações de mineração, com exemplos práticos de automação, sensoriamento em tempo real e manutenção preditiva. Por fim, discute os minerais estratégicos, como nióbio, lítio e terras raras, essenciais para a Indústria 4.0 e para a transição energética, destacando o potencial do Brasil como fornecedor desses recursos.

3.1 CONCEITO E PRINCIPAIS ASPECTOS DA INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0, ao integrar automação avançada, IoT, IA, *big data* e robótica, redefine a abordagem da produção indústria. Este subtópico aprofunda os principais conceitos e tecnologias que estruturam essa revolução tecnológica, destacando seus fundamentos e a sinergia entre os sistemas físicos e digitais, essenciais para o avanço da eficiência operacional e da sustentabilidade. No âmbito industrial, a interconectividade de dispositivos e sistemas permite o controle remoto e o monitoramento contínuo de processos complexos, possibilitando o uso de sensores para prever falhas, realizar manutenção preditiva e maximizar a eficiência de recursos (Ferreira *et al.*, 2018). A seguir, serão apresentadas as definições destes principais elementos da Indústria 4.0:

- **IoT:** caracteriza-se pela conexão entre dispositivos físicos, sensores e sistemas por meio da internet, possibilitando o monitoramento e controle em tempo real dos processos produtivos. Essa tecnologia é fundamental para integrar o mundo físico ao digital, sendo indispensável na criação de fábricas inteligentes e na implementação de sistemas produtivos altamente conectados (Orecchini, 2018).
- **IA:** consiste no desenvolvimento e aplicação de algoritmos e modelos computacionais avançados que conferem às máquinas a capacidade de realizar análises, tomar decisões e aprender continuamente. Essa tecnologia, central no contexto da Indústria 4.0, é utilizada para prever comportamentos, identificar padrões e automatizar processos com base em dados complexos e de larga escala, otimizando operações e reduzindo erros humanos (Ferreira *et al.*, 2018; Orecchini, 2018).
- **Big data:** se refere ao processo sistemático de coleta, armazenamento e análise de grandes volumes de dados complexos, com o objetivo de identificar padrões e extrair *insights* estratégicos (Orecchini, 2018).

- **Robótica:** envolve o emprego de máquinas programáveis capazes de executar tarefas de maneira autônoma ou semiautônoma, promovendo maior precisão e eficiência nas linhas de produção. No âmbito da Indústria 4.0, a robótica desempenha papel essencial na automação de atividades repetitivas ou perigosas, contribuindo para maior segurança e produtividade (Orecchini, 2018). Ferreira *et al.* (2018) ressaltam que essa tecnologia é um dos pilares centrais para transformar processos industriais em operações mais inteligentes e otimizadas.

Especificamente no setor de mineração, as tecnologias da Indústria 4.0 destacadas anteriormente têm promovido transformações significativas, permitindo melhorias substanciais em eficiência operacional, segurança e sustentabilidade. A integração de equipamentos autônomos, sistemas de análise de dados em tempo real e plataformas de *big data* redefine o monitoramento e o controle das operações produtivas, otimizando processos e reduzindo custos (Hermann, 2016; Kagermann; Wahlster; Helbig, 2013). Tradicionalmente associada a riscos elevados, como acidentes de trabalho e impactos ambientais, a mineração encontra na Indústria 4.0 soluções eficazes para mitigar esses desafios, reduzindo a exposição de trabalhadores a condições adversas e maximizando o uso sustentável de recursos naturais (Schwab, 2017). Além disso, a aplicação dessas tecnologias consolida a Indústria 4.0 como uma oportunidade estratégica para o setor mineral brasileiro, elevando sua competitividade no cenário global e reforçando o compromisso com práticas de sustentabilidade.

No próximo subcapítulo, serão exploradas as aplicações concretas da Indústria 4.0 no setor mineral brasileiro, detalhando como essas inovações contribuem para a modernização e sustentabilidade de uma área estratégica para a economia nacional.

3.2 APLICAÇÕES DA INDÚSTRIA 4.0 NO SETOR MINERAL BRASILEIRO

Conforme discutido no subcapítulo anterior, a incorporação de tecnologias da indústria 4.0 tem revolucionado o setor de mineração no Brasil, promovendo avanços em segurança, eficiência e sustentabilidade. A seguir, são apresentadas algumas das principais aplicações dessas tecnologias no setor mineral brasileiro:

- **Automação de equipamentos pesados:** O emprego de caminhões e escavadeiras autônomos nas operações de mineração proporciona maior segurança e eficiência em áreas remotas, com ganhos significativos na redução de custos e otimização de uso dos equipamentos (Razzi *et al.*, 2019).
- **Sensoriamento e análise de dados em tempo real:** Sensores instalados em equipamentos possibilitam a coleta contínua de dados críticos, como temperatura, pressão e vibração. A análise desses dados em tempo real permite a antecipação de falhas, otimização da produtividade e redução do tempo de inatividade dos equipamentos (Hermann, 2016).
- **Gêmeo Digital:** O uso de gêmeos digitais - réplicas virtuais de operações físicas - oferece uma plataforma de simulação que permite testes e ajustes no ambiente digital antes da implementação no campo. Essa tecnologia facilita o planejamento de operações, permitindo identificar potenciais problemas antes de sua ocorrência (Schluse; Rossmann, 2016).
- **Manutenção preditiva:** A manutenção preditiva, com sensores conectados a sistemas de IA, permite prever falhas mecânicas e elétricas, viabilizando intervenções preventivas. Essa prática reduz o tempo de paralisação dos equipamentos, prolonga a vida útil dos componentes e contribui para a segurança das operações (Ferreira *et al.*, 2018).
- **Integração digital da cadeia de valor:** A integração digital da cadeia de valor, que abrange desde a extração até a distribuição dos recursos minerais, oferece uma visão abrangente e integrada do processo produtivo. Essa visão permite ajustes rápidos em resposta às mudanças de mercado e necessidades operacionais, promovendo uma gestão mais eficiente e alinhada às demandas do setor (Kagermann; Wahlster; Helbig, 2013).

Essas aplicações da Indústria 4.0 na mineração demonstram como a tecnologia está promovendo operações mais seguras, eficientes e sustentáveis, elevando a competitividade do setor mineral brasileiro no contexto global (World Steel Association, 2020). A AngloGold Ashanti, por exemplo, implementou tecnologia de realidade virtual em seu Centro de Memória em Nova Lima, Minas Gerais, permitindo que visitantes e funcionários explorem ambientes de mineração de forma imersiva,

promovendo uma compreensão mais profunda dos processos e aumentando a segurança operacional (Teles, 2023).

A Indústria 4.0 tem promovido transformações significativas na mineração de ferro no Brasil, impulsionando avanços em eficiência, segurança e sustentabilidade por meio de tecnologias associadas à nova revolução industrial. No próximo subcapítulo, serão abordadas as transformações proporcionadas pela Indústria 4.0 no setor de mineração de ferro, com uma análise sobre as oportunidades e desafios que envolvem a extração desse minério.

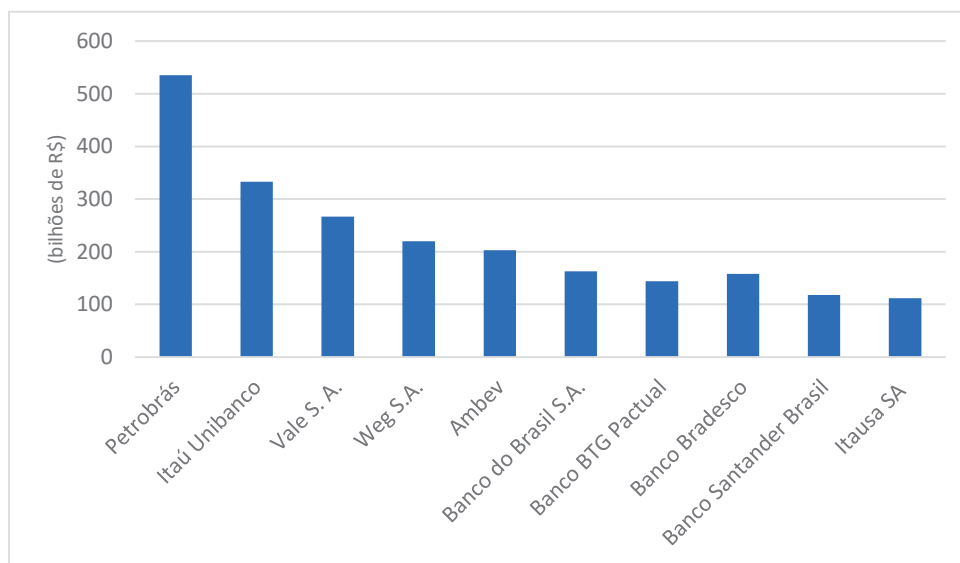
3.3 TRANSFORMAÇÕES DA INDÚSTRIA 4.0 NO SETOR DE MINERAÇÃO DE FERRO

A Indústria 4.0 tem impulsionado mudanças significativas no setor de mineração de ferro brasileiro, um dos segmentos centrais da atividade extrativa nacional. Este subcapítulo explora um estudo de caso da Vale, a maior mineradora e exportadora de minério de ferro do Brasil e uma das principais do mundo (Johnston; Khartit; Velasquez, 2024), seguido de uma análise das aplicações de tecnologias da Indústria 4.0 em outras empresas do setor, oferecendo uma perspectiva das inovações implementadas no cenário brasileiro.

3.3.1 Estudo de caso: transformações da indústria 4.0 na mineradora Vale

Para demonstrar que a Vale ocupa uma posição de destaque não apenas no setor mineral, mas também no cenário econômico brasileiro, é importante observar sua presença entre as maiores empresas do país. De acordo com dados recentes compilados pela Exame (2024), as maiores empresas do Brasil, aquelas com maior valor de mercado, se concentram, em grande parte, no setor financeiro. O GRÁFICO 6 a seguir apresenta as 10 maiores empresas brasileiras com maior valor de mercado listadas na bolsa de valores brasileira Brasil, Bolsa, Balcão (B3), com dados extraídos da Exame (2024), destacando a Vale como uma das poucas empresas não financeiras desse seleto grupo:

GRÁFICO 6 - AS 10 MAIORES EMPRESAS DO BRASIL NA BOLSA DE VALORES B3 (02/09/2024)



FONTE: Elaborado pelo autor, a partir de dados da Exame (2024).

Como pode ser observado no GRÁFICO 6, o cenário das maiores empresas brasileiras é dominado por seis instituições financeiras. Entretanto, a presença da Vale, juntamente com a Petrobras, WEG e Ambev, demonstra a força de setores produtivos tradicionais, como mineração, energia e indústria, mesmo em um contexto dominado por grandes instituições financeiras. Esse cenário não apenas evidencia a relevância da Vale na economia nacional, contribuindo significativamente para a geração de receita, exportações e desenvolvimento tecnológico, mas também valida sua escolha como objeto deste estudo, destacando sua importância para compreender as transformações tecnológicas impulsionadas pela Indústria 4.0 no setor mineral. Diante desse contexto, serão apresentadas a seguir as principais transformações da Indústria 4.0 aplicadas às operações da Vale, com foco nas tecnologias que promovem eficiência, sustentabilidade e competitividade na mineração brasileira.

A multinacional Vale destaca-se pelo investimento em caminhões autônomos, plataformas de *big data* e sistemas de manutenção preditiva baseados em inteligência artificial, tecnologias que permitem o monitoramento remoto e a operação otimizada das minas, resultando em maior eficiência e redução de custos operacionais (Vale, 2019). Em 10 de janeiro de 2019, a Vale inaugurou, em Vitória, Espírito Santo, o Centro de Inteligência Artificial (*AI Center*), voltado ao desenvolvimento e monitoramento de projetos de inteligência artificial para suas operações globais. O *AI*

Center conta com aproximadamente 50 especialistas, entre cientistas e engenheiros de dados, dos quais 15 atuam diretamente no centro, dando suporte a milhares de ativos como caminhões e correias transportadoras, beneficiando todas as unidades operacionais da empresa ao redor do mundo. Este centro foi criado com o propósito de intensificar a integração e a colaboração entre as equipes de projeto, promovendo uma sinergia global e facilitando o compartilhamento de conhecimento (Vale, 2019).

Dentre as aplicações da IA, destaca-se sua capacidade de simular processos de tomada de decisão humana e realizar tarefas de elevada complexidade. No âmbito dos projetos desenvolvidos pela Vale, a IA permite a coleta e análise sistemática de milhões de dados, gerando *insights* valiosos que auxiliam na previsão de problemas e fundamentam decisões estratégicas de maneira mais assertiva. Em 2019, a empresa já contava com 13 linhas de projetos em colaboração com suas áreas de negócios, abrangendo ferrosos, metais básicos, carvão e setores corporativos. Como parte do programa de transformação digital da Vale, a IA visa elevar a produtividade, eficiência operacional, segurança, performance financeira e promover a inovação. Quando lançado, o programa propôs reduzir o custo de produção de minério de ferro em US\$ 0,50/t até 2023, focando na otimização da manutenção, desempenho de ativos e integração da cadeia de valor, apoiado por tecnologias como Internet das Coisas, IA, aplicativos móveis e robótica (Vale, 2019). De acordo com uma reportagem de 2019, publicada no site da Vale e utilizada na construção deste subtópico, o *AI Center* foi projetado para gerar ganhos de eficiência estimados em R\$ 136 milhões nos anos seguintes. Em 2019, os projetos desenvolvidos já haviam proporcionado uma economia anual de aproximadamente R\$ 74 milhões, com melhorias na manutenção de ativos, como caminhões e trilhos ferroviários, nos processos de beneficiamento e pelotização e nos controles de saúde, segurança e integridade corporativa.

Conforme descrito pela Vale (2019), os principais projetos em andamento no *AI Center*, que utilizam tecnologias da Indústria 4.0, são apresentados a seguir, destacando suas contribuições para as economias relatadas pela empresa:

- **Prevenção de fratura de trilhos:** Na Estrada de Ferro Carajás, a IA é utilizada para prever fraturas nos trilhos, que estão entre os problemas mais graves e frequentes das operações ferroviárias. A solução identifica fraturas específicas, aumentando a segurança e reduzindo as interrupções na ferrovia.

- **Manutenção de rodeiros de trem:** Sensores instalados ao longo da ferrovia monitoram desgaste e impactos nos rodeiros, temperatura, ruído de rolamentos e deslocamento de truques. Modelos matemáticos projetam o comportamento dos rodeiros, permitindo um planejamento eficaz de manutenção e aquisição de peças, resultando em uma economia de R\$ 2,3 milhões em um ano.
- **Manutenção de ativos de mina:** Na mina de Salobo, no Pará, a IA aumentou a vida útil dos pneus dos caminhões fora de estrada em cerca de 30% em um ano, gerando uma economia de R\$ 28 milhões. Outro projeto envolve o trem de força dos caminhões e outros equipamentos móveis, abrangendo 15 operações em três países, com um potencial de economia superior a R\$ 10 milhões.
- **Redução de consumo de combustível:** Em parceria com a Universidade de Queensland, desenvolveu-se um sistema para reduzir o consumo de diesel em caminhões fora de estrada, testado em Minas Gerais, com um potencial de economia de R\$ 1,5 milhão ao ano.
- **Otimização de processos na pelletização:** A IA analisou dados da produção de pellets, gerando recomendações para condições operacionais ideais. As melhorias reduziram custos em cerca de R\$ 12 milhões anuais, através da redução no uso de carvão e gás natural e menor consumo de energia elétrica.
- **Análise de dados para segurança:** Em parceria com a área de Saúde e Segurança, este projeto utiliza dados demográficos e históricos de incidentes para identificar trabalhadores mais expostos a riscos. O sistema calcula a probabilidade de incidentes em áreas específicas, melhorando a gestão de segurança e priorizando ações preventivas.

Esses projetos ilustram como a aplicação das tecnologia da indústria 4.0 integradas nas operações da Vale potencializa a eficiência, reduz custos e promove uma gestão mais sustentável e segura em suas atividades industriais.

3.3.2 Transformações da Indústria 4.0 em outras mineradoras de extração do minério de ferro

Além da Vale, outras empresas do setor também têm incorporado práticas da Indústria 4.0 em suas operações. A Anglo American, por exemplo, utiliza caminhões

autônomos e sistemas de monitoramento em tempo real em uma de suas minas em Minas Gerais, promovendo a segurança e eficiência operacional. Com o uso de sensores, a empresa é capaz de detectar e analisar condições críticas de operação, permitindo a antecipação de falhas e a realização de intervenções preventivas (Anglo American, 2024).

A Usiminas e a ArcelorMittal têm investido significativamente em tecnologias da Indústria 4.0, com foco no uso de algoritmos de IA para análise de dados de produção, manutenção preditiva e gestão logística, promovendo uma integração operacional mais ágil e precisa (Instituto Minere, 2019). A Usiminas destaca-se pela adoção de IA em sistemas de manutenção preditiva, antecipando falhas em equipamentos e aumentando a eficiência operacional (Bertene, 2024b). Por sua vez, a ArcelorMittal utiliza sensores e algoritmos para monitoramento em tempo real de ferramentas de corte, otimizando sua manutenção e desempenho. Ambas as empresas também exploram o uso de gêmeos digitais, que permitem a simulação e o ajuste de operações antes da implementação física, minimizando riscos e aprimorando o planejamento das atividades extrativas (Bertene, 2024a).

A adoção de tecnologias digitais e de *big data* no setor de mineração de ferro no Brasil tem desempenhado um papel crucial na promoção da sustentabilidade, possibilitando um monitoramento mais eficaz do consumo de energia e uma gestão aprimorada dos resíduos gerados. Essa abordagem integrada contribui significativamente para a redução dos impactos ambientais das operações e para o atendimento das crescentes demandas internacionais por práticas mais sustentáveis. Entre as empresas que lideram a aplicação dessas tecnologias estão a CSN, a Anglo American e a Usiminas, que têm utilizado essas inovações para alinhar suas práticas aos padrões globais de sustentabilidade (Vilela, 2021). Essa modernização tecnológica também inclui o uso de ferramentas avançadas, como a realidade virtual, que vem transformando processos industriais no setor mineral brasileiro, tema que será aprofundado no próximo parágrafo.

As mineradoras de ferro no Brasil têm implementado tecnologias avançadas para aprimorar a eficiência e reforçar a sustentabilidade, com uso de realidade virtual para treinamentos e simulações operacionais. A CSN, por exemplo, investiu aproximadamente R\$ 20 milhões em novas tecnologias no Centro de Pesquisas e Inovação em Volta Redonda, Rio de Janeiro, incluindo a instalação de um Laboratório de Simulação e Realidade Virtual. Essa iniciativa visa modernizar processos e

produtos da empresa, permitindo experiências imersivas que contribuem para a prevenção de riscos em diversas etapas da fabricação do aço (Companhia Siderúrgica Nacional, 2022). Desde junho de 2022, a Samarco adotou o uso de óculos de realidade virtual para treinamento de seus empregados nas unidades de Germano, em Minas Gerais, e Ubu, no Espírito Santo (Samarco, 2022).

A Indústria 4.0 tem promovido transformações importantes na mineração de ferro no Brasil, ao incorporar tecnologias digitais, automação e inteligência artificial nas operações do setor. Esses avanços têm contribuído para maior eficiência, sustentabilidade e segurança, alinhando a mineração às demandas da economia digital. No próximo subcapítulo, serão abordados os minerais estratégicos que sustentam essas inovações, com destaque para o nióbio, o lítio e as terras raras.

3.4 MINERAIS ESTRATÉGICOS PARA A INDÚSTRIA 4.0: NIÓBIO, LÍTIO E TERRAS RARAS

Em outra vertente da Indústria 4.0, destaca-se a dependência por minerais estratégicos, essenciais para a evolução de tecnologias avançadas, como dispositivos eletrônicos, sistemas de armazenamento de energia e veículos elétricos. Entre os minerais mais significativos para essa transformação destacam-se o nióbio, o lítio e as terras raras, recursos que o Brasil possui em abundância e com grande potencial de exploração. Estes elementos são fundamentais para impulsionar a competitividade e a inovação tecnológica no cenário industrial global (Holanda, 2021).

Neste subcapítulo, serão discutidas as funções estratégicas de minerais específicos no contexto da Indústria 4.0 e na transição para uma economia de baixo carbono no Brasil. Inicialmente, será abordado o nióbio, enfatizando sua importância na produção de ligas de alta resistência, supercondutores e outras tecnologias avançadas, bem como a necessidade de agregar valor ao produto nacionalmente. Em seguida, a análise focará no lítio, destacando seu papel crucial na fabricação de baterias de íon de lítio, indispensáveis para o armazenamento de energia e a mobilidade elétrica, além de sua relevância para a sustentabilidade ambiental. Por último, o subtópico examinará o potencial das terras raras, cujas jazidas estão concentradas em regiões estratégicas do país, e que são amplamente aplicadas em dispositivos eletrônicos, turbinas eólicas e outras tecnologias.

3.4.1 A importância do nióbio para a indústria 4.0 e a transição para uma economia de baixo carbono no Brasil

O Brasil possui a maior reserva de nióbio globalmente, com jazidas concentradas principalmente em Araxá, Minas Gerais, e Catalão, Goiás. Esse metal é fundamental para a produção de ligas de alta resistência, amplamente empregadas nas indústrias automotiva, aeroespacial e na produção de supercondutores, sendo estes últimos essenciais para tecnologias de alta eficiência energética (Ferreira *et al.*, 2018). O uso do nióbio em supercondutores, por exemplo, é uma inovação relevante para a Indústria 4.0, pois viabiliza o desenvolvimento de tecnologias que demandam elevada eficiência energética com um impacto ambiental reduzido (Oliveira, 2020).

Ademais, a aplicação do nióbio em ligas de aço para veículos elétricos e turbinas eólicas fortalece a transição para uma economia de baixo carbono. Contudo, para que o Brasil aproveite plenamente o potencial desse recurso, é necessário investir no beneficiamento e na produção de componentes de maior valor agregado, evitando assim a exportação de matérias-primas em estado bruto (Ferreira *et al.*, 2018).

Além das aplicações industriais já consolidadas, o nióbio possui grande potencial em novas áreas tecnológicas. Recentemente, pesquisas exploraram o uso desse metal em baterias de íon de nióbio, que apresentam vantagens como maior estabilidade térmica e capacidade de carregamento rápido em comparação às baterias de íon de lítio convencionais (Oliveira, 2020). Tais características tornam o nióbio promissor para o armazenamento de energia em veículos elétricos, alinhando-se às demandas da Indústria 4.0 e da mobilidade sustentável (International Energy Agency, 2021). Ao integrar essa tecnologia ao mercado, o Brasil poderia não apenas ampliar sua cadeia de valor, mas também consolidar sua posição como líder na produção de soluções inovadoras para a economia verde, promovendo uma transição energética mais eficiente e sustentável.

3.4.2 O papel do lítio na transição energética

O lítio é fundamental para a produção de baterias de íon de lítio, utilizadas em veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia renovável. As maiores reservas de lítio no Brasil estão localizadas em Minas Gerais, especialmente na Mina

de Grota do Cirilo, que representa um ponto estratégico para o desenvolvimento de uma cadeia produtiva de baterias no país (Orecchini, 2018). A demanda por lítio no mercado global tem crescido rapidamente, impulsionada pela necessidade de soluções de energia limpa. O Brasil, ao fortalecer a exploração e o beneficiamento de lítio, pode se tornar um ator importante no mercado de baterias de alta performance, garantindo uma posição relevante na transição energética global (Li; Wang; Xu, 2017).

Além do potencial econômico, o lítio desempenha um papel crucial na promoção de uma economia de baixo carbono, visto que seu uso em baterias é uma alternativa essencial para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e diminuir as emissões de gases de efeito estufa (Oliveira, 2020). A produção de baterias no Brasil não apenas amplia o valor agregado do lítio nacional, mas também fomenta o desenvolvimento tecnológico local, fortalecendo a indústria nacional de energia renovável (Silva; Oliveira; Souza, 2021). Estudos indicam que a produção de baterias de íon de lítio é uma das áreas de crescimento mais promissoras na transição energética global, com expectativa de que o mercado de baterias se expanda a uma taxa anual superior a 15% até 2030, impulsionado pelo crescimento dos setores de veículos elétricos e armazenamento de energia (International Energy Agency, 2021).

3.4.3 Terras raras: um potencial a ser desenvolvido

As terras raras constituem um grupo de 17 elementos químicos, incluindo os 15 lantanídeos⁶⁶, além do ítrio e do escândio, que compartilham propriedades físicas e químicas similares. Esses elementos apresentam características únicas, como alto potencial magnético, luminescência e capacidade de condução, o que os torna insumos essenciais para uma variedade de indústrias tecnológicas (Golev *et al.*, 2014). A demanda por terras raras tem crescido exponencialmente nas últimas décadas, impulsionada por seu uso em setores estratégicos, como a fabricação de dispositivos eletrônicos, ímãs permanentes, baterias de alta capacidade e tecnologias

⁶⁶Os lantanídeos são uma série de 15 elementos químicos localizados na tabela periódica, que vão do lantânio (La) ao lutécio (Lu), com números atômicos de 57 a 71. Esses elementos são conhecidos por terem propriedades físicas e químicas semelhantes, como alta reatividade e uma forte tendência a formar compostos com características magnéticas e luminescentes. Devido a essas propriedades, os lantanídeos são amplamente utilizados em tecnologias avançadas, como ímãs permanentes, lasers, dispositivos eletrônicos, catalisadores e em aplicações na indústria de energia, como turbinas eólicas e veículos elétricos. Apesar de serem chamados de "terras raras," alguns lantanídeos são relativamente abundantes na crosta terrestre, embora sua extração e separação possam ser desafiadoras e impactantes do ponto de vista ambiental.

de energia renovável. Nesse contexto, a exploração e o beneficiamento desses minerais são de grande relevância econômica e tecnológica, especialmente para países que buscam independência no fornecimento de materiais críticos (Massari; Ruberti, 2013).

A produção global de terras raras, no entanto, enfrenta desafios significativos, tanto ambientais quanto geopolíticos. A extração desses elementos requer técnicas complexas de mineração e processamento, que frequentemente resultam em impactos ambientais devido à geração de resíduos tóxicos e radioativos (Binnemans *et al.*, 2013). Além disso, a concentração das reservas e da produção em poucos países, como a China, confere a esses elementos um caráter estratégico, sujeito a disputas comerciais e políticas (Massari; Ruberti, 2013). Assim, torna-se essencial que países consumidores de terras raras desenvolvam políticas de sustentabilidade e diversificação de fornecedores, buscando reduzir a dependência externa e minimizar os impactos ambientais associados ao ciclo de produção dessas substâncias críticas (Golev *et al.*, 2014). A FIGURA 26 apresenta uma imagem das terras raras:

FIGURA 26 - AMOSTRAS DE ELEMENTOS TERRAS RARAS



FONTE: Instituto de Geociências (2024).

No que diz respeito ao potencial desses elementos no contexto da Indústria 4.0, especialmente considerando o cenário brasileiro, o país dispõe de jazidas

promissoras de terras raras, concentradas principalmente nos estados de Minas Gerais e Goiás, com destaque para o Projeto Catalão. Entre os elementos de maior relevância estão o neodímio e o samário, amplamente utilizados na fabricação de ímãs de alta potência, que são essenciais para tecnologias como turbinas eólicas, motores de veículos elétricos e dispositivos eletrônicos (Schwab, 2017).

Embora o Brasil ainda não figure entre os principais produtores mundiais de terras raras, suas reservas indicam um grande potencial. A criação de uma cadeia produtiva que inclua o beneficiamento desses minerais poderia fortalecer a posição do país no mercado global e contribuir para a oferta de componentes cruciais para a Indústria 4.0. Contudo, para concretizar esse potencial, é necessário investir em tecnologias de extração e beneficiamento, de modo a agregar valor e promover a produção sustentável de componentes avançados (Instituto Geológico, 2024). São encontrados no Brasil, cinco tipos de terras raras principalmente:

- **Neodímio (Nd):** Essencial na fabricação de ímãs permanentes de alta potência, o neodímio é utilizado em motores de veículos elétricos, turbinas eólicas e em dispositivos eletrônicos. Sua alta eficiência energética torna-o indispensável para sistemas que demandam economia de energia e durabilidade, características centrais da Indústria 4.0 (Magalhães, 2023).
- **Samário (Sm):** O samário, assim como o neodímio, é usado na produção de ímãs permanentes, especialmente em aplicações que requerem resistência térmica elevada. Essa característica é valiosa para motores e equipamentos que operam em altas temperaturas, como em certos sistemas de automação industrial e eletrônica de alta potência (Guimarães; Silva; Oliveira, 2022).
- **Cério (Ce):** Utilizado em catalisadores automotivos para reduzir emissões de poluentes, o cério contribui para a sustentabilidade ambiental, um pilar da Indústria 4.0. Também é empregado na fabricação de polidores de vidro e em processos de refino de petróleo (Smith; Johnson; Williams, 2020).
- **Praseodímio (Pr):** Outro elemento essencial na produção de ímãs de terras raras, o praseodímio é utilizado em ligas de alta resistência para motores de veículos elétricos e aeronaves. Sua aplicabilidade atende às exigências da Indústria 4.0 por materiais que aliam leveza e durabilidade (Agência Nacional De Mineração, 2021).
- **Lantânio (La):** Empregado em baterias de hidreto metálico de níquel, amplamente usadas em veículos híbridos, o lantânio é fundamental para tecnologias de

armazenamento de energia que impulsionam a mobilidade sustentável. Além disso, é utilizado em lentes de câmeras e equipamentos ópticos, favorecendo o desenvolvimento de dispositivos avançados (Oliveira, 2020).

As reflexões apresentadas ao longo deste capítulo evidenciam como a Indústria 4.0 e os minerais estratégicos assumem papel central no redesenho das cadeias produtivas, impondo ao setor mineral brasileiro a necessidade de adaptações para garantir competitividade, sustentabilidade e integração às novas exigências tecnológicas globais. As aplicações descritas, tanto em grandes mineradoras como a Vale quanto em outras empresas do setor, ilustram avanços significativos em eficiência, segurança e redução de impactos ambientais. Do mesmo modo, a análise sobre o nióbio, o lítio e as terras raras demonstram que o aproveitamento responsável e estratégico desses minerais pode fortalecer o posicionamento do Brasil na economia digital e de baixo carbono. Assim sendo, este capítulo dialoga diretamente tanto com a pergunta problema deste trabalho, o objetivo geral, e os objetivos específicos, especialmente, o e) desta dissertação, ao introduzir os conceitos associados a esta nova revolução industrial.

A seguir, o próximo capítulo examinará como choques externos recentes, notadamente a pandemia de COVID-19 e a invasão da Rússia à Ucrânia, impactaram o setor mineral brasileiro, evidenciando vulnerabilidades e destacando a importância de estratégias resilientes para enfrentar cenários adversos.

4 CHOQUES EXTERNOS: PANDEMIA DE COVID-19 E A INVASÃO DA RÚSSIA À UCRÂNIA

Na literatura, choques externos são caracterizados como eventos exógenos que impactam economias de forma abrupta, gerando instabilidade nos fluxos comerciais, nas cadeias de suprimentos e nos preços internacionais (Prebisch, 1950; Sachs, 1985). Esses choques podem ser de natureza econômica, política ou ambiental, afetando diretamente variáveis como taxa de câmbio, preços de exportação, custos de insumos, logística e balanço de pagamentos (Mundell, 1962; Fleming, 1962; Nurkse, 1953). As consequências desses choques variam conforme a estrutura econômica de cada país, sendo mais severas em economias com alta dependência de exportações de *commodities* (Prebisch, 1950).

De maneira geral, economias centrais, mais diversificadas, apresentam maior resiliência. Por outro lado, economias periféricas, dependentes de *commodities*, enfrentam maiores dificuldades para absorver esses impactos, sobretudo pela deterioração dos termos de troca, pela volatilidade dos mercados e pelo aumento dos custos operacionais (Prebisch, 1950; Cardoso; Faletto, 1979).

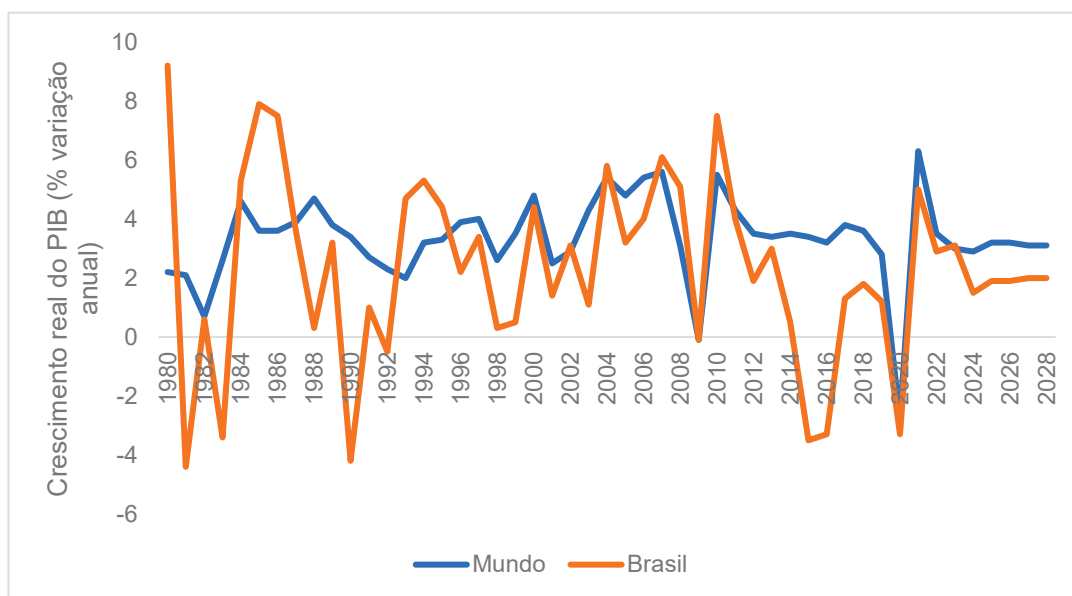
Este capítulo organiza-se em três partes principais. Primeiramente, apresenta-se uma visão geral dos choques externos e de seus impactos sobre a economia global. Em seguida, aborda-se a pandemia de COVID-19 e suas consequências específicas para a economia mundial e a indústria mineral. Por fim, discute-se a invasão da Rússia à Ucrânia, detalhando sanções econômicas e os impactos na cadeia de suprimentos, especialmente no fornecimento de nitrato de amônio, essencial para as operações de mineração, principalmente na América Latina.

4.1 VISÃO GERAL DOS CHOQUES EXTERNOS E SEUS IMPACTOS NA ECONOMIA GLOBAL

Este subcapítulo analisa como a pandemia de COVID-19 e a invasão da Rússia à Ucrânia impactaram o crescimento econômico global e brasileiro. Inicialmente, são apresentadas as tendências gerais, seguidas da análise dos efeitos específicos de cada evento. A partir dos dados consolidados no GRÁFICO 7, que apresenta a série histórica do crescimento real do PIB (variação percentual anual) do

Brasil e do agregado mundial, observa-se a trajetória das duas economias no período. A linha azul representa a média global, considerando 196 países, enquanto a linha alaranjada mostra o desempenho específico do Brasil. A construção do GRÁFICO 7 segue as limitações metodológicas detalhadas na metodologia desta dissertação:

GRÁFICO 7 - CRESCIMENTO REAL DO PIB (VARIAÇÃO PERCENTUAL ANUAL) - BRASIL E MUNDO (1980–2028)



FONTE: Elaborado pelo autor com dados do IMF DataMapper (2024).

A análise do GRÁFICO 7 evidencia dois movimentos críticos recentes. No ano de 2020, o PIB mundial sofreu uma retração de 3%. Em 2022, observa-se uma desaceleração do ritmo de crescimento global, com o PIB mundial apresentando queda de 46% em relação ao ano anterior, passando de 6,3% em 2021 para 3,4% em 2022, enquanto o PIB brasileiro registrou queda de 42%, caindo de 5,0% em 2021 para 2,9% em 2022.

A escolha dos choques externos analisados neste trabalho, a pandemia de COVID-19 e a invasão da Rússia à Ucrânia, fundamenta-se em sua relevância econômica e temporal, pois ambos provocaram impactos significativos na economia mundial e no desempenho das atividades minerais, especialmente no contexto brasileiro. Como evidenciado no GRÁFICO 7, a retração do PIB global em 2020 foi de 3%, associada às medidas de contenção à COVID-19, enquanto a desaceleração em 2022, marcada pela redução de 46% no crescimento do PIB mundial, relaciona-se às consequências econômicas da invasão da Rússia à Ucrânia. Além disso, esses

eventos constituíam os choques externos mais recentes no momento da redação desta dissertação.

Em complemento, conforme destacado na justificativa do trabalho, o autor, que à época ocupava posição de gestão no setor mineral latino-americano, observou durante a pandemia de COVID-19 a manutenção e até a ampliação da produção de minério de ferro no Brasil, mesmo em um cenário global de paralisações econômicas, o que motivou o aprofundamento deste estudo para investigar a resiliência do setor mineral como elemento estratégico para a economia nacional. Já no caso do conflito no Leste Europeu, também identificado pelo autor no exercício de suas atividades profissionais, destacaram-se os efeitos sobre a disponibilidade e os preços do nitrato de amônio, insumo essencial para as operações de lavra latino-americanas. A análise desses dois choques permite, assim, compreender como eventos geopolíticos e sanitários de grande escala impactam não apenas o desempenho econômico imediato, mas também a estrutura, os riscos e as vulnerabilidades do setor mineral, especialmente brasileiro, justificando sua seleção como foco deste capítulo.

Na sequência, os efeitos específicos de cada choque são analisados em detalhe, a começar pelo da pandemia de COVID-19.

4.2 PANDEMIA DE COVID-19

O primeiro caso de COVID-19 foi identificado na China em 17 de novembro de 2019, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, também conhecida pela sua sigla em inglês, WHO, que significa *World Health Organization*). Em 31 de dezembro de 2019, a OMS foi oficialmente alertada sobre um grupo de casos de pneumonia de causa desconhecida em Wuhan, na China, e, em 7 de janeiro de 2020, as autoridades chinesas confirmaram a identificação de um novo tipo de coronavírus. No dia 30 de janeiro de 2020, a OMS declarou o surto como uma emergência de saúde pública de importância internacional, o mais alto nível de alerta da organização (Organização Pan-Americana da Saúde, 2020).

A pandemia representou um choque externo de magnitude inédita na economia global contemporânea, revelando a fragilidade das cadeias de suprimentos internacionais e a interdependência dos mercados globais. Conforme destacam Ouissi *et al.* (2020), esse choque rapidamente assumiu a centralidade das preocupações

globais, gerando impactos expressivos nos mercados financeiros e nas cadeias logísticas.

A Organização Mundial do Comércio (OMC) estimou que o comércio global sofreria uma retração entre 13% e 32% em 2020. Na mesma linha, o Fundo Monetário Internacional (FMI) projetou uma contração do PIB global de até 3%, com quedas mais severas nos países em desenvolvimento, chegando a até 6,5% em alguns casos (Maliszewska; Mattoo; van der Mensbrugghe, 2020). Essas projeções refletiam o cenário de forte incerteza econômica, acentuado pelas medidas de contenção adotadas mundialmente.

Segundo Mou (2020), a combinação entre globalização, aumento da densidade populacional e mobilidade internacional contribuiu não apenas para a disseminação do vírus, mas também para amplificar seus impactos econômicos. Yildirim, Esen e Ertuğrul (2022) destacam que medidas como quarentenas, bloqueios regionais e restrições à circulação resultaram na interrupção de cadeias de suprimentos, na queda da produtividade e no aumento dos custos operacionais. Além disso, o aumento nas demissões, a redução da renda e o ambiente de elevada incerteza provocaram queda no consumo, levando ao fechamento de empresas e à retração generalizada das atividades econômicas, cujos impactos se espalharam rapidamente pelos parceiros comerciais e pelas cadeias globais de valor.

Para ilustrar de forma concreta, e com dados, os impactos que choques globais, neste caso, a da pandemia de COVID-19, podem provocar nas cadeias de suprimentos e nos preços de *commodities*, apresenta-se a seguir no GRÁFICO 8 a evolução do preço do minério de ferro, no período de janeiro de 2016 a julho de 2025, com base em dados extraídos da plataforma *Trading Economics*. O detalhamento das etapas de construção, limitações e considerações metodológicas relacionadas ao GRÁFICO 8 encontra-se descrito no capítulo de metodologia desta dissertação:

GRÁFICO 8 – EVOLUÇÃO DO PREÇO DO MINÉRIO DE FERRO EM USD POR TON (2016-2025)



FONTE: Elaborado pelo autor com dados da plataforma *Trading Economics* (2025).

A análise do GRÁFICO 8 revela oscilações marcantes nos preços do minério de ferro durante o período analisado. Em 2019, ano prévio ao início da pandemia de COVID-19, a *commodity* era negociada a cerca de 70 USD/t. Já em 2020, ano em que a crise sanitária global se instalou, o preço subiu para 110 USD/t, representando um aumento de aproximadamente 57% em relação a 2019. Em 2021, ainda em contexto de incertezas e oscilações relacionadas à pandemia, o preço do minério de ferro atingiu seu pico, alcançando uma média anual de 225 USD/t, um crescimento de 221% em comparação com o valor pré-pandêmico de 2019. Já em 2022, com a progressiva redução das restrições sanitárias, retomada gradual das cadeias de suprimentos e possível normalização parcial da oferta, o preço médio do minério de ferro recuou para 90 USD/t, representando uma queda de cerca de 60% em relação ao pico de 2021. Essa retração indica o início de uma tendência de acomodação dos preços, aproximando-os de níveis mais condizentes com a média histórica, o que sinaliza a transição para um cenário pós-pandemia, no qual os efeitos mais extremos do choque sanitário sobre o mercado de minério de ferro começam a se dissipar.

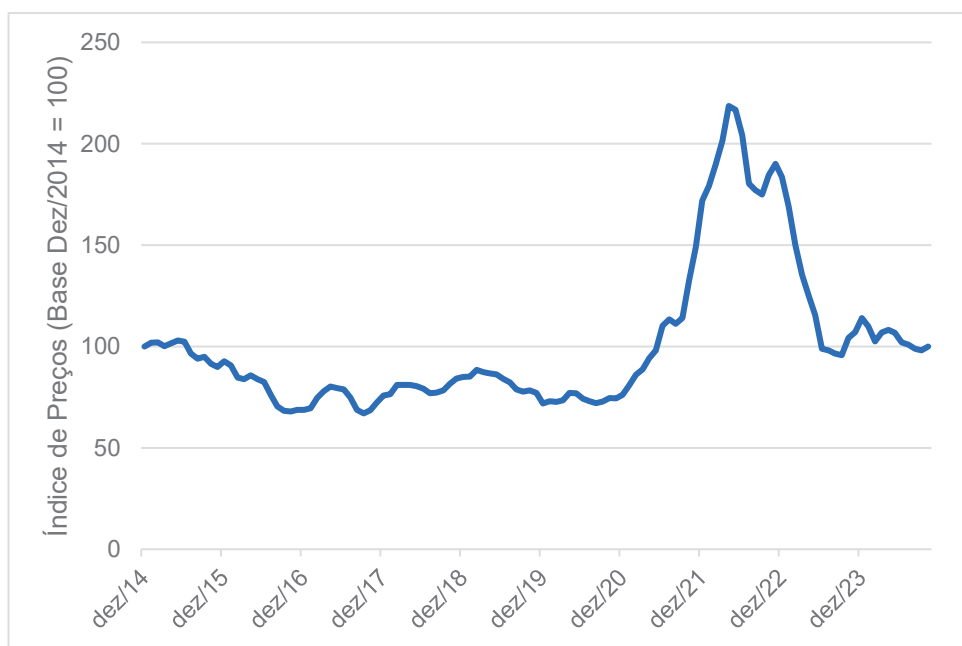
4.3 INVASÃO DA RÚSSIA À UCRÂNIA

Diferente de desastres naturais, eventos causados por ação humana, como conflitos armados, têm potencial para afetar simultaneamente oferta e demanda,

pressionando cadeias de suprimentos e mercados globais (Mishra *et al.*, 2021). A escalada militar da Rússia contra a Ucrânia, iniciada em 24 de fevereiro de 2022, gerou disrupções severas, especialmente nos mercados de *commodities*. O Banco Mundial (2022a) aponta que esse foi um dos maiores choques de preços desde a década de 1970, com repercussões particularmente acentuadas nos setores de alimentos e energia, além de efeitos indiretos sobre diversas cadeias produtivas. Rico *et al.* (2022) acrescentam que, nos cinco primeiros meses do conflito, a volatilidade dos preços de *commodities* foi significativamente maior em comparação a anos anteriores.

Entre os produtos mais afetados está o nitrato de amônio, insumo essencial tanto para a fabricação de explosivos utilizados na mineração quanto para a indústria de fertilizantes, com relevância direta para o agronegócio brasileiro. A Rússia, líder global na produção desse insumo, exerce papel central no fornecimento mundial (Banco Mundial, 2022b). Dados de plataformas como o *Federal Reserve Economic Data* (FRED) permitem acompanhar a evolução dos preços de compostos químicos associados, como amônia sintética, ácido nítrico e ureia, funcionando como importantes termômetros da crise. O GRÁFICO 9 ilustra esse comportamento, considerando como base dezembro de 2014:

GRÁFICO 9 - ÍNDICE DE PREÇOS AO PRODUTOR DE PRODUTOS QUÍMICOS: AMÔNIA SINTÉTICA, ÁCIDO NÍTRICO E COMPOSTOS DE AMÔNIO (2014-2024)



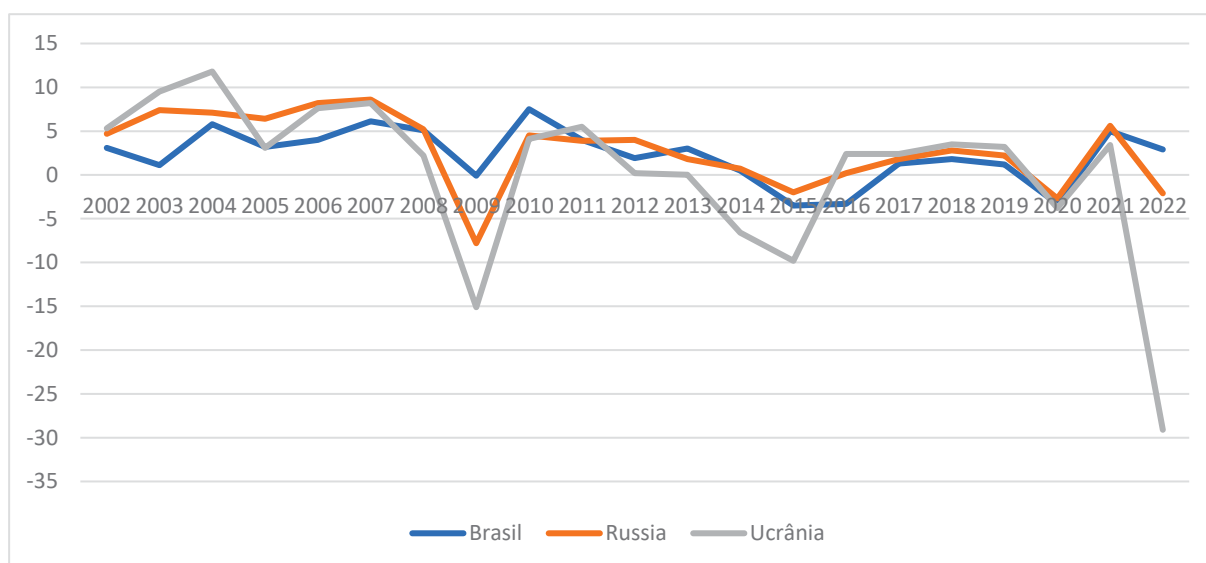
FONTE: Elaborado pelo autor com dados retirados a plataforma do FRED (2024).

Os dados do GRÁFICO 9 confirmam a tendência observada por Rico *et al.* (2022), com picos históricos entre fevereiro e junho de 2022, período inicial da invasão. Esse aumento foi impulsionado tanto pela interrupção logística quanto pelas sanções econômicas impostas à Rússia, que afetaram diretamente mercados de fertilizantes e de energia (Ozili, 2024). Além disso, a invasão desencadeou um efeito de contágio, impactando não apenas setores diretamente relacionados, como combustíveis e alimentos, mas também cadeias industriais e agrícolas indiretas, ampliando pressões inflacionárias e agravando restrições logísticas em escala global.

Tanto Rico *et al.* (2022) quanto Ozili (2024) convergem ao apontar que a combinação entre sanções econômicas, restrições comerciais e dependência global das exportações russas resultou em forte volatilidade de preços e efeitos econômicos que transcendem as fronteiras do conflito. Ozili (2024) também ressalta que os efeitos financeiros foram amplificados pela dificuldade de acesso a bens essenciais, contribuindo para o aumento da inflação global. Schnitkey *et al.* (2022) corroboram essa análise ao indicar que empresas de fertilizantes, especialmente nos Estados Unidos, atribuíram diretamente o aumento dos preços dos fertilizantes nitrogenados à invasão.

Para aprofundar essa análise, o GRÁFICO 10 compara o desempenho econômico de Brasil, Rússia e Ucrânia durante os choques recentes, com dados consolidados pelo *International Monetary Fund (IMF) DataMapper*:

GRÁFICO 10 - CRESCIMENTO REAL DO PIB (VARIAÇÃO PERCENTUAL ANUAL) - RÚSSIA, UCRÂNIA E BRASIL (2002–2022)



FONTE: Elaborado pelo autor com dados do IMF *DataMapper* (2024).

O GRÁFICO 10 evidencia que, embora Brasil, Rússia e Ucrânia tenham sido afetados tanto pela pandemia quanto pela invasão, os impactos foram distribuídos de maneira desigual. O Brasil apresentou crescimento de 2,9% em 2022, mesmo em um cenário global adverso. A Rússia, afetada pelas sanções internacionais e pelos custos do conflito, registrou retração de 3,4%. Já a Ucrânia sofreu um colapso econômico severo, com uma queda de 35% no PIB, reflexo direto dos efeitos da invasão em seu território, da destruição de infraestrutura produtiva e das perdas na atividade econômica. Além disso, observa-se que, tanto em 2020 (pandemia) quanto em 2022 (invasão da Rússia à Ucrânia), os três países experimentaram retrações, ainda que em intensidades distintas, refletindo a magnitude dos choques externos no desempenho econômico global.

4.3.1 Sanções econômicas aplicadas à Rússia e seus impactos na cadeia de suprimentos

As sanções econômicas são instrumentos frequentemente utilizados nas relações internacionais para pressionar Estados que descumprem normas ou promovem ações hostis, especialmente no contexto de conflitos armados (Drezner, 2014). A Rússia passou a ser alvo de medidas crescentes desde a anexação da Crimeia, em 2014, intensificadas a partir de 2022, como resposta à invasão da Ucrânia. As restrições foram implementadas por países como Estados Unidos, UE, Canadá, Reino Unido, Austrália, Japão e outros, afetando setores estratégicos como energia, finanças, transportes e comércio de fertilizantes e químicos industriais (Conselho da União Europeia, 2024).

Embora a eficácia política das sanções seja objeto de debate (Pomeranz, 2017), seus impactos econômicos sobre as cadeias globais de suprimentos são inegáveis. No setor de mineração, a restrição às exportações de nitrato de amônio, que é uma matéria-prima essencial na produção de explosivos industriais, configurou-se como um dos principais gargalos. As sanções agravaram os desafios logísticos, elevaram os custos operacionais e intensificaram a volatilidade dos preços internacionais do insumo, pressionando ainda mais os custos do setor e evidenciando a vulnerabilidade das cadeias de suprimentos, especialmente na América Latina.

A análise que será apresentada a seguir, em partes, é complementada pela experiência profissional do autor, que atuou como gerente sênior de suprimentos na

Orica, multinacional australiana líder na fabricação de explosivos para mineração civil, com presença relevante em operações no Brasil e na América Latina. Essa perspectiva prática, no entanto, é utilizada apenas como lente complementar às análises baseadas em dados secundários, relatórios públicos e literatura especializada, conforme os critérios metodológicos descritos no capítulo de metodologia desta dissertação.

Com as sanções impostas à Rússia, mineradoras com operações globais foram obrigadas a rever estratégias, visto que, mesmo em países que não aderiram formalmente às restrições, suas matrizes e fornecedores ficaram impedidos de adquirir nitrato de amônio de origem russa. Esse cenário gerou aumentos expressivos de custos, desafios de abastecimento e a necessidade de buscar fornecedores alternativos, em um mercado altamente concentrado e dependente de poucos players globais.

Neste contexto, foram analisadas as operações de mineradoras multinacionais com presença relevante na América Latina, que, devido à dependência de cadeias globais de suprimentos de explosivos, estiveram diretamente expostas aos impactos do conflito Rússia-Ucrânia. Os critérios para a seleção das operações estão detalhados no capítulo de metodologia, considerando aspectos como porte, relevância na produção de *commodities* metálicas e grau de dependência de insumos importados. Os dados foram organizados e serão apresentados no QUADRO 1:

QUADRO 1 - PRINCIPAIS OPERAÇÕES DE MINERADORAS AFETADAS NA AMÉRICA LATINA

Empresa	País de Origem	Operações na América Latina	Produto Principal
BHP	Austrália	Mina Escondida (Chile), Antamina (Peru), Samarco (Brasil)	Cobre, minério de ferro
Rio Tinto	Austrália	Mina Escondida (Chile)	Cobre
Anglo American	Reino Unido	Los Bronces (Chile), Sistema Minas-Rio e Barro Alto (Brasil), Quellaveco (Peru)	Cobre, minério de ferro, níquel
Lundin Mining	Canadá	Candelaria (Chile), Chapada (Brasil)	Cobre, ouro
Yamana Gold	Canadá	Jacobina (Brasil), Cerro Moro (Argentina)	Ouro, prata
Newmont Corporation	Estados Unidos	Yanacocha (Peru)	Ouro
Kinross Gold	Canadá	Paracatu (Brasil), La Coipa (Chile)	Ouro

FONTE: Dados organizados pelo autor, com base em informações públicas das empresas (2024).

Essas operações foram impactadas pela escassez de nitrato de amônio, pela alta volatilidade dos preços e por desafios logísticos decorrentes das sanções e do redesenho das cadeias de suprimentos. Entre os principais desafios enfrentados, destacam-se:

- Aumento dos custos operacionais, especialmente relacionados a insumos explosivos;
- Necessidade de renegociação de contratos com fornecedores;
- Dependência crescente de mercados como Estados Unidos, Canadá e Austrália;
- Pressão sobre a logística internacional, com prazos de entrega mais longos e maior risco de ruptura;
- Risco de paralisações temporárias ou de redução do ritmo de produção, especialmente em unidades com menor flexibilidade logística.

Esse cenário reforça a importância de estratégias de diversificação de fornecedores, gestão de riscos e fortalecimento da resiliência nas cadeias globais de suprimentos, elementos que se tornaram centrais para assegurar a sustentabilidade operacional do setor minerador na América Latina.

Este capítulo analisou os efeitos dos choques externos decorrentes da pandemia de COVID-19 e da invasão da Rússia à Ucrânia, destacando como esses eventos impactaram tanto a economia global quanto a brasileira. A partir da análise dos dados econômicos e da análise teórica sobre os desdobramentos sobre cadeias produtivas, ficou evidente que ambos os choques geraram disrupções significativas nos mercados de *commodities*, nas cadeias de suprimentos e nos custos operacionais de setores estratégicos, como a mineração.

Além dos efeitos macroeconômicos, o capítulo aprofundou a análise sobre um dos impactos específicos mais relevantes para o setor mineral: as restrições no fornecimento de nitrato de amônio, insumo essencial para a produção de explosivos utilizados na mineração. As sanções impostas à Rússia agravaram um cenário já tensionado, com efeitos diretos sobre custos, logística e estratégias de abastecimento das principais mineradoras com operações na América Latina.

As análises realizadas ao longo do capítulo contribuem diretamente para responder à pergunta central da pesquisa e aos objetivos específicos, ao evidenciar que choques externos recentes provocaram alterações significativas nos preços de

insumos estratégicos. No caso da pandemia, observou-se uma valorização expressiva do minério de ferro; já no contexto da invasão da Rússia à Ucrânia, verificaram-se restrições e aumentos nos preços do nitrato de amônio. Esse entendimento será fundamental para embasar as discussões que se seguem no próximo capítulo, que analisa as externalidades negativas da atividade mineradora no Brasil, com foco nos impactos socioambientais e nos efeitos econômicos associados a atividade de mineração.

5 EXTERNALIDADES NEGATIVAS DA ATIVIDADE MINERADORA NO BRASIL: ANÁLISE DOS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS E ECONÔMICOS

Este capítulo analisa duas das principais externalidades negativas associadas à atividade mineral no Brasil: os impactos socioambientais e os impactos econômicos. Na primeira parte, são discutidas as consequências da mineração sobre o meio ambiente e os territórios afetados, com ênfase nos desequilíbrios entre os benefícios econômicos e os custos sociais e ambientais, muitas vezes concentrados sobre populações vulneráveis. Em seguida, aborda-se a principal externalidade econômica da mineração, relacionada à especialização exportadora em *commodities* e seus reflexos sobre variáveis macroeconômicas estratégicas, como o câmbio e a estrutura produtiva. Com base em dados e literatura especializada, o texto analisa como a concentração da pauta exportadora em produtos de baixo valor agregado pode intensificar sintomas de desindustrialização e aumentar a vulnerabilidade da economia brasileira a choques externos. Embora os efeitos observados guardem semelhanças com os descritos no modelo clássico da “doença holandesa”, a análise adota uma perspectiva crítica e contextualizada, que considera as particularidades da inserção internacional do Brasil e os limites estruturais ao seu desenvolvimento industrial.

5.1 IMPACTO SOCIOAMBIENTAL DA ATIVIDADE DE MINERAÇÃO NO BRASIL

Os locais de ocorrência de mineração frequentemente apresentam características ambientais sensíveis, sendo cruciais para a preservação da biodiversidade, dos recursos hídricos, da paisagem e de outros recursos naturais de significativa relevância ambiental. Contudo, a atividade mineradora gera impactos negativos expressivos no equilíbrio dos ecossistemas, incluindo a redução ou destruição de habitats, afastamento da fauna, mortalidade de espécies terrestres e aquáticas, muitas vezes ameaçadas de extinção, interrupção de corredores de fluxo gênico e restrição de movimentos da biota, entre outros efeitos adversos (Mechi; Sanches, 2010).

Este subcapítulo tem como objetivo analisar os principais impactos socioambientais associados à atividade mineradora, abordando de maneira estruturada os desafios relacionados à preservação ambiental, os transtornos vivenciados pelas comunidades no entorno das minas e os riscos inerentes às

barragens de rejeitos. Inicialmente, examina-se como a mineração contribui para a degradação ambiental, com destaque para casos emblemáticos, como as disputas pelo uso do território na Serra do Gandarela. Em um segundo momento, avaliam-se os impactos diretos sobre as populações residentes nas proximidades das áreas mineradas, incluindo efeitos relacionados a ruídos, vibrações, poluição atmosférica e problemas de saúde pública, com base em relatos de comunidades afetadas. Por fim, discute-se a problemática das barragens de rejeitos, com uma análise detalhada dos desastres de Mariana e Brumadinho, que expuseram a vulnerabilidade dessas estruturas e suas consequências devastadoras para o meio ambiente e a sociedade. O subcapítulo encerra-se com uma análise dos desdobramentos do caso Mariana, destacando o acordo de reparação homologado no Brasil e o processo em tramitação no sistema judiciário do Reino Unido. Ao tratar de questões que, embora originadas em 2015, continuam em evolução, o subtópico reforça a atualidade da dissertação, evidenciando a relevância do tema nos âmbitos nacional e internacional.

5.1.1 Alterações ambientais e geração de áreas degradadas

Conforme apontado por Mechi e Sanches (2010), a atividade mineradora frequentemente resulta na remoção da vegetação natural e dificulta a regeneração da cobertura vegetal. Ainda que algumas áreas de mineração se mantenham em condições ambientais preservadas, com mínima intervenção humana, casos como o da Serra do Gandarela destacam-se pela disputa entre a exploração mineral e a criação de áreas de conservação. Localizada na região central de Minas Gerais, próxima à capital Belo Horizonte, a Serra do Gandarela abriga rica biodiversidade e um importante sistema de mananciais que abastecem a região metropolitana. Essa área, situada no Quadrilátero Ferrífero, ilustra de forma clara os conflitos de uso do território e os desafios associados à conservação ambiental frente à intensa pressão da atividade mineradora (Marent; Lamounier; Gontijo, 2011).

Além disso, Mechi e Sanches (2010) ressaltam que, em muitos casos, os solos mais férteis localizados na superfície são removidos, enquanto os solos remanescentes permanecem suscetíveis à erosão. Esse processo pode levar ao assoreamento dos corpos d'água circunvizinhos. A FIGURA 27, apresentada a seguir, ilustra a degradação ambiental resultante da mineração na região de Guararema/SP:

FIGURA 27 - DEGRADAÇÃO AMBIENTAL GERADA PELA MINERAÇÃO NA REGIÃO DE GUARAREMA/SP NO ANO DE 2010



FONTE: Revista da USP Estudos Avançados, Edição 24, p. 68 (2010).

Culminada a análise sobre as alterações ambientais e a consequente geração de áreas degradadas pela mineração, com destaque para os impactos na vegetação, nos solos e nos corpos d'água, o foco do estudo direciona-se para os transtornos enfrentados pelas populações que habitam no entorno das minas.

5.1.2 Transtornos à população que habita no entorno das minas

Segundo Rezende (2016), as atividades mineradoras geram impactos negativos significativos para as populações que residem no entorno das minas,

especialmente devido às vibrações e ruídos provenientes da extração mineral, que afetam tanto pessoas quanto animais.

Enríquez, Fernandes e Alamino (2011) relatam que, nas comunidades vizinhas ao Projeto Sossego, operado pela mineradora Vale no estado do Pará, os moradores relatam sérios transtornos causados pelo intenso ruído das máquinas e pelas detonações de explosivos. Entre os problemas mencionados estão danos estruturais nas residências, com rachaduras que resultaram na perda de habitações; mortes de animais devido ao estresse; vacas apresentando abortos frequentes ou reduzida capacidade de procriação; e galinhas que deixaram de produzir ovos.

Outro impacto relevante, apontado por Rezende (2016), é a poluição atmosférica diretamente associada às atividades mineradoras. A poeira e os gases emitidos decorrem tanto do uso de explosivos quanto do tráfego de veículos na lavra e nas operações de beneficiamento do minério. Braga *et al.* (2007) destacam que a exposição à atmosfera contaminada pode ocasionar doenças cardiovasculares nas populações próximas, sendo os efeitos dos poluentes gasosos e do material particulado comparáveis aos observados em grandes centros urbanos.

Finalizada a análise dos transtornos enfrentados pelas populações no entorno das minas, o foco passa a ser direcionado para as barragens de rejeitos, um dos passivos significativos da mineração.

5.1.3 Barragens de rejeitos de minérios: um passivo da mineração

Em novembro de 2015, ocorreu o rompimento de uma barragem de rejeitos construída pelo método a montante na cidade de Mariana, em Minas Gerais. Esse incidente resultou na liberação de aproximadamente 33 milhões de metros cúbicos de rejeitos, que se espalharam ao longo do vale, causando a morte de 19 pessoas e contaminando 668 km de cursos d'água, desde o Rio Doce até o Oceano Atlântico (Carmo *et al.*, 2017; Saes *et al.*, 2021). Este desastre é considerado um dos maiores da história da mineração, tanto pelo volume de rejeitos liberados quanto pela extensão dos danos ambientais causados, sendo um evento de proporções significativas na mineração global (Carmo *et al.*, 2017; Saes *et al.*, 2021). A barragem em questão era administrada pela mineradora Samarco.

Quatro anos depois, em 25 de janeiro de 2019, ocorreu um segundo desastre, a aproximadamente 150 km de Mariana, quando a barragem de rejeitos “B1” da mina

Córrego do Feijão, operada pela Vale, rompeu-se às 12h28min. O colapso liberou 11,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração de ferro, que devastaram instalações e escritórios da empresa, além de propriedades rurais na cidade de Brumadinho, Minas Gerais, resultando na morte de 270 pessoas (Freitas *et al.*, 2019; Rodrigues, 2024). Logo após o ocorrido, Fabio Schvartsman, presidente da Vale à época, declarou: “o dano ambiental será muito menor do que o Mariana, mas a tragédia humana deve ser maior” (Rodrigues, 2019).

De acordo com Saes *et al.* (2021), no primeiro dia após o desastre em Brumadinho, estimou-se que cerca de 13 milhões de metros cúbicos de rejeitos haviam sido lançados no ambiente. Até janeiro de 2024, três pessoas ainda permanecem desaparecidas (Rodrigues, 2024). Sob a perspectiva da saúde pública, a análise desses desastres vai além da contagem de mortes e danos à saúde. É essencial também identificar novos problemas e demandas sanitárias que possam surgir a médio e longo prazo, já que eventos dessa magnitude mobilizam praticamente toda a estrutura de saúde pública. Desastres tecnológicos como esses, frequentemente associados a contaminantes, demandam decisões rápidas e incertas para mitigar exposições e riscos, além de tratar doenças e agravos relacionados, seja em curto, médio ou longo prazo (Carmo *et al.*, 2017).

No âmbito internacional, Rico *et al.* (2008) conduziu uma extensa revisão de desastres envolvendo barragens de rejeitos, analisando 147 casos conhecidos ao redor do mundo, dos quais 26 ocorreram na Europa. Este estudo consolidou dados em um banco de informações detalhadas, incluindo localização das barragens, características físicas e construtivas, causas reais e presumidas dos rompimentos, além de consequências hidrodinâmicas, socioeconômicas e ambientais. A Europa ocupa o segundo lugar em incidentes registrados (18%), sendo que mais de um terço envolveu barragens com altura entre 10 e 20 metros. A principal causa de rompimento na região está associada a chuvas excepcionais, diferentemente da liquefação sísmica, que é a segunda causa mais comum em outras partes do mundo. Além disso, mais de 90% dos acidentes analisados ocorreram em minas ativas, enquanto apenas 10% envolveram lagoas de rejeitos abandonadas. Esses estudos destacam que barragens de rejeitos possuem vulnerabilidades específicas em comparação a outros tipos de estruturas de contenção, como as destinadas ao armazenamento de água. Entre as principais fragilidades estão o uso de aterros locais, a elevação progressiva das barragens com aumento de efluentes, lacunas regulatórias nos critérios de

projeto, ausência de requisitos rigorosos de monitoramento e manutenção, e os altos custos associados à conservação dessas estruturas após o encerramento das atividades mineradoras (Rico *et al.*, 2008).

Barragens de rejeitos apresentam características específicas que as tornam mais suscetíveis a falhas em comparação a outros tipos de estruturas de contenção, como barragens de retenção de água. Segundo Rico *et al.* (2008), entre essas particularidades estão: a construção a partir de materiais coletados localmente, como solo, estéril grosso, rejeitos de operações mineradoras e outros resíduos; o aumento progressivo da barragem com materiais sólidos, frequentemente acompanhado por um incremento considerável de efluentes e escoamento decorrente de precipitações; a ausência de regulamentação detalhada sobre critérios específicos de projeto; a carência de requisitos técnicos rigorosos relacionados à estabilidade, monitoramento e controle contínuo durante as fases de implantação, construção e operação; e os elevados custos de manutenção dessas estruturas após o encerramento das atividades mineradoras.

Na Europa, a crescente preocupação pública em relação aos riscos e aos potenciais impactos ambientais associados às barragens de rejeitos – sejam elas ativas, inativas ou abandonadas – tem se intensificado após a ocorrência de incidentes. Considerações preventivas que antevêm possíveis riscos podem minimizar impactos ambientais e otimizar os custos associados às ações corretivas (Rico *et al.*, 2008).

Retomando os dois maiores desastres no contexto brasileiro, em Mariana e Brumadinho, a experiência adquirida com o primeiro evento levou à criação de Comissões Parlamentares de Inquérito (CPIs) em 2019 para investigar as causas do segundo rompimento. Estudos voltados à análise de ambos os desastres revelaram como os mecanismos de gestão contribuíram para a imposição de riscos a determinados grupos sociais e para a socialização de custos privados.

No caso do rompimento da barragem de Brumadinho, destacou-se a subestimação dos riscos operacionais pela Vale, evidenciada pela ausência de medidas adequadas que poderiam ter evitado o desastre. Essa negligência resultou em danos expressivos à própria empresa. Em 2019, a Vale registrou um prejuízo financeiro de US\$ 1,683 bilhão, um contraste significativo em relação ao lucro líquido de US\$ 6,860 bilhões no ano anterior. Além disso, o Ministério Público brasileiro indiciou o presidente da Vale e outros 15 executivos e engenheiros por homicídio

devido à tragédia (Saes *et al.*, 2021). Assim, além dos impactos socioambientais de enorme proporção, o desastre gerou prejuízos auto infligidos tanto à empresa quanto aos seus gestores (Carmo *et al.*, 2017; Freitas *et al.*, 2019).

Concluída a análise das características e vulnerabilidades das barragens de rejeitos, com destaque para os desastres de Mariana e Brumadinho, direciona-se agora o foco para os acordos de reparação relacionados ao desastre de Mariana, explorando suas perspectivas no âmbito nacional e internacional.

5.1.3.1 Acordos de reparação no caso Mariana: perspectivas nacionais e internacionais

Em 6 de novembro de 2024, o Supremo Tribunal Federal (STF) homologou um acordo de significativa relevância no contexto do maior desastre socioambiental registrado no Brasil, resultante do rompimento da barragem de Fundão, localizada em Mariana, Minas Gerais. Este acordo, celebrado entre o governo federal, os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, além das mineradoras responsáveis, prevê o direcionamento de R\$ 132 bilhões para iniciativas de reparação socioambiental e econômica. Os recursos destinam-se à recuperação ambiental, compensação das vítimas, reconstrução das comunidades atingidas e ao financiamento de projetos de desenvolvimento sustentável nas áreas impactadas. A decisão do STF marca uma etapa crucial em um processo judicial iniciado em 2015, consolidando um precedente jurídico no tratamento de desastres ambientais de larga escala no Brasil (Supremo Tribunal Federal, 2024).

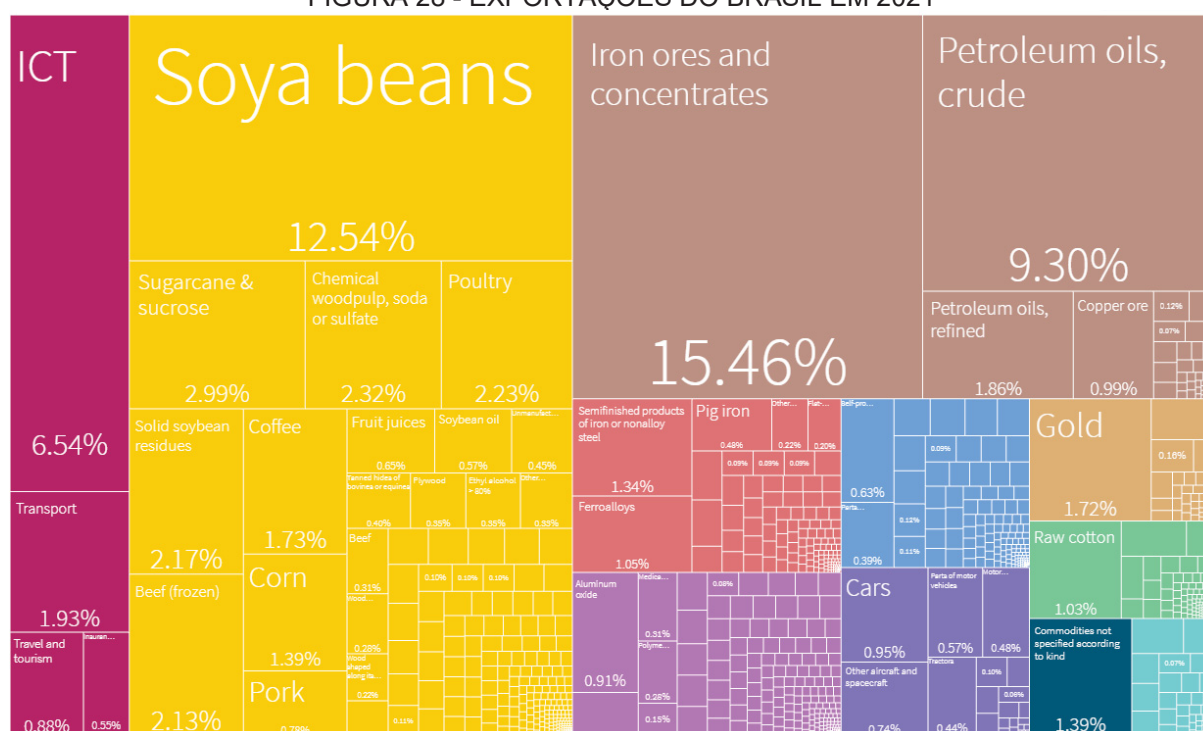
Conforme a Associated Press (2024), no cenário internacional, a mineradora BHP enfrenta um processo coletivo de grandes proporções no Tribunal Superior de Justiça do Reino Unido, que envolve mais de 600 mil reclamantes. A ação representa comunidades afetadas pelo desastre de Mariana e busca reparações pelos danos sofridos, incluindo perdas materiais, danos à saúde e prejuízos aos meios de subsistência. A BHP argumenta que o Brasil seria a jurisdição adequada para tratar do caso, mas os representantes das vítimas sustentam que o sistema judiciário brasileiro não conseguiu oferecer uma solução satisfatória e em tempo hábil, o que justifica a busca por justiça em âmbito internacional. Essa disputa ressalta os desafios enfrentados pelas vítimas em alcançar reparação efetiva e evidencia a complexidade de litígios ambientais transnacionais.

5.2 IMPACTO ECONÔMICO DA ATIVIDADE DE MINERAÇÃO NO BRASIL

O impacto econômico da mineração no Brasil pode ser analisado sob diferentes perspectivas, especialmente em contextos marcados por choques externos. Entre os efeitos mais relevantes, destacam-se a possível sensibilidade da taxa de câmbio à oscilação dos preços internacionais das *commodities*, com destaque para as minerais, e a pressão sobre a estrutura produtiva nacional decorrente do perfil exportador baseado em produtos de baixo valor agregado. Tal fenômeno é amplamente discutido pela literatura estruturalista latino-americana (Prebisch, 1950) e, mais recentemente, associado ao processo de reprimarização da economia brasileira (Nassif; Feijó; Araújo, 2020).

A literatura econômica já alertava para possíveis efeitos adversos da valorização excessiva de recursos naturais sobre a indústria nacional, fenômeno que, em determinados contextos, se aproxima da lógica do modelo conhecido como doença holandesa (Corden; Neary, 1982). No entanto, como apontam Nassif, Feijó e Araújo (2020), essa associação deve ser feita com cautela, sobretudo em economias com baixa densidade industrial e elevada dependência de exportações de *commodities*, como é o caso brasileiro. Essa estrutura pode ser observada na FIGURA 28, que apresenta a composição da pauta exportadora brasileira em 2021, com base em dados do *Atlas of Economic Complexity*, plataforma desenvolvida pela *Harvard University*. As delimitações metodológicas, detalhamento de fontes e os critérios adotados na utilização da FIGURA 28 a seguir serão apresentados no capítulo de metodologia:

FIGURA 28 - EXPORTAÇÕES DO BRASIL EM 2021



FONTE: Atlas of Economic Complexity (2023).

A FIGURA 28 revela com clareza a concentração da pauta exportadora brasileira em bens primários. Em 2021, produtos de base agropecuária, mineral e energética representaram cerca de 65,7% do total exportado pelo Brasil. Os principais itens do agronegócio foram a soja em grão (12,54%), o açúcar e a sacarose (2,99%) e a carne de frango (2,23%), compondo, junto a outros itens do setor, aproximadamente 33,5% das exportações. No caso dos bens minerais, destacam-se o minério de ferro (15,46%), o ouro (1,72%) e os minérios de cobre (0,99%), que juntos totalizaram 18,17% das exportações. Considerando outros produtos do setor mineral, o percentual se aproxima de 20%. Além disso, o petróleo bruto (9,30%) e seus derivados adicionam mais 1,9%, totalizando 11,2% relacionados à cadeia energética. Esses dados confirmam o forte peso dos bens primários na pauta exportadora brasileira.

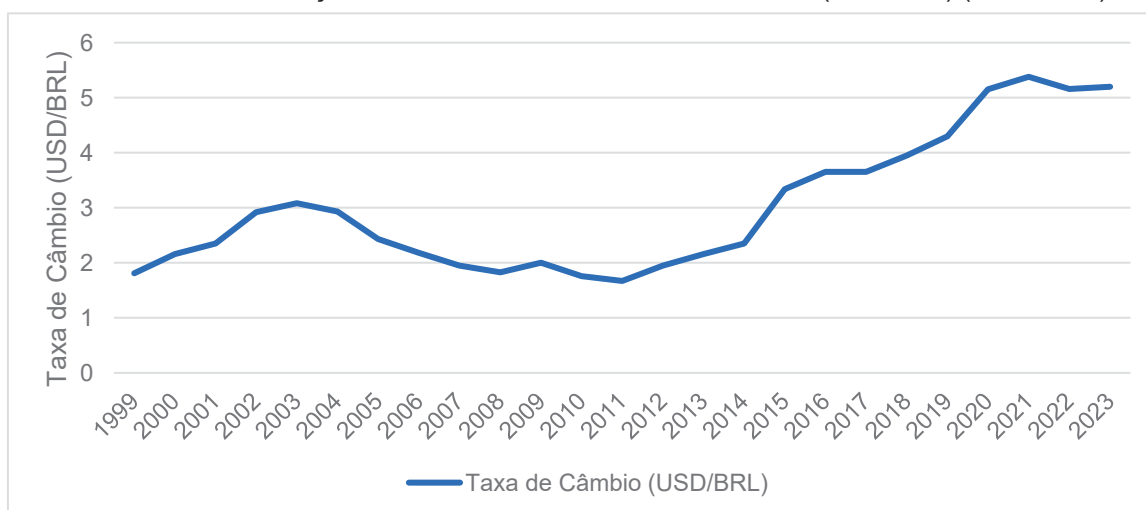
A composição da pauta exportadora brasileira, evidenciada na FIGURA 28, revela uma predominância de produtos primários, com destaque para o minério de ferro, que individualmente representa sozinho 15,46% das exportações nacionais. Esse padrão de especialização, ainda que não configure plenamente o modelo clássico descrito por Corden e Neary (1982), apresenta sintomas compatíveis com os efeitos associados à chamada doença holandesa. Trata-se, portanto, de

manifestações parciais decorrentes de uma inserção externa assentada em bens de baixo valor agregado, como os recursos minerais.

No caso brasileiro, a elevação dos preços internacionais do minério de ferro durante o choque externo da pandemia de COVID-19 contribuiu para intensificar a entrada de divisas no país, contribuindo para a valorização do real. Esse movimento cambial, embora possa atenuar pressões inflacionárias, compromete a competitividade dos setores industriais e manufatureiros voltados à exportação. Como destacam Oreiro e Marconi (2019), a apreciação prolongada da taxa de câmbio pode reforçar a reprimarização produtiva e reduzir a densidade industrial do país. De forma complementar, autores que analisam a inserção externa brasileira contemporânea alertam para o risco de aprofundamento da dependência externa e da vulnerabilidade estrutural em economias com elevada concentração exportadora em *commodities* (Nassif; Feijó; Araújo, 2020).

Essa dinâmica pôde ser observada durante o ciclo recente de valorização do minério de ferro, especialmente entre 2020 e 2021. Em 2019, o preço médio da tonelada de minério de ferro era de aproximadamente US\$ 70. No primeiro ano da pandemia, 2020, esse valor saltou para cerca de US\$ 110, representando um aumento de 57%. Já em 2021, o preço médio atingiu US\$ 225, o que representa uma elevação superior a 220% em relação ao patamar pré-pandemia. Entretanto, a relação entre a valorização acelerada do minério de ferro e a taxa de câmbio brasileira pode ser observada no GRÁFICO 11, que apresenta a evolução da taxa de câmbio comercial (USD/BRL) entre 1999 e 2023:

GRÁFICO 11 - EVOLUÇÃO DA TAXA DE CÂMBIO COMERCIAL (USD/BRL) (1999-2023)



FONTE: Elaborado pelo autor com dados do Banco Central do Brasil (2024).

Ao observar o GRÁFICO 11, nota-se que a taxa de câmbio passou de uma média de R\$ 3,95 por dólar em 2019 para R\$ 5,15 em 2020, o que representa um aumento de aproximadamente 30,4% no período, refletindo, em um primeiro momento, os impactos iniciais da pandemia. Entre 2020 e 2021, houve uma nova desvalorização do real, seguida por uma valorização da moeda, entre 2021 e 2022. Essa valorização cambial pode ser interpretada como coerente com o aumento da entrada de divisas no país entre 2020 e 2021, impulsionado pelo crescimento das exportações minerais em valor, especialmente no caso do minério de ferro, cujo preço internacional apresentou forte alta no período, conforme ilustrado no GRÁFICO 8. Durante o ano de 2022, com a gradual normalização das cadeias globais de suprimentos, observou-se uma retração nos preços de diversas *commodities* no mercado internacional. Um exemplo expressivo foi o minério de ferro, cujo preço médio recuou de US\$ 225 por tonelada em 2021 para US\$ 90 por tonelada em 2022, o que representa uma queda de aproximadamente 60%. Entre os anos de 2022 e 2023, nota-se uma certa estabilidade do câmbio, já que este, é um período onde os efeitos diretos da pandemia de COVID-19 já haviam suavizados, e o valor das *commodities*, principalmente a do minério de ferro, como visto, voltaram a patamares próximos ao do período pré-pandêmico.

Esse comportamento oscilante da taxa de câmbio brasileira ilustra a sensibilidade da moeda nacional aos ciclos de valorização e queda das *commodities* exportadas pelo país, especialmente aquelas de grande peso na pauta comercial. O caso do minério de ferro é exemplar: em 2021, representou aproximadamente 15,46% das exportações brasileiras totais. Sua influência sobre a entrada de divisas e, conseqüentemente, sobre a taxa de câmbio reforça a conexão estrutural entre a especialização exportadora do Brasil em bens primários e a dinâmica macroeconômica nacional.

Além da influência sobre o câmbio, o elevado grau de dependência das exportações brasileiras, especialmente em *commodities*, inclusive as minerais, também tende a acentuar a vulnerabilidade externa da economia nacional. Como discutido por Prebisch (1950), países periféricos especializados na exportação de bens primários enfrentam restrições estruturais ao desenvolvimento, sobretudo diante das oscilações nos termos de troca. Furtado (1974) reforça essa perspectiva ao destacar que a concentração em produtos de baixo valor agregado limita a capacidade de internalizar os ganhos do comércio exterior, reduzindo o potencial de indução de

processos endógenos de crescimento. No contexto contemporâneo, essa estrutura exportadora fragiliza a resiliência da economia brasileira frente a choques externos e tende a consolidar trajetórias de desindustrialização. Estudo de Coutinho *et al.* (1993) já apontava que a excessiva dependência de bens primários e a valorização cambial atuavam como obstáculos à construção de uma base industrial mais sofisticada e diversificada. O risco, portanto, extrapola as flutuações conjunturais, refletindo uma inserção internacional subordinada, com reduzido grau de autonomia estratégica. Em síntese, os impactos da atividade mineral no Brasil vão além dos efeitos fiscais e comerciais imediatos. A especialização exportadora em minério de ferro influencia diretamente variáveis macroeconômicas como a taxa de câmbio, a estrutura produtiva e a exposição externa. Embora os efeitos observados guardem semelhanças com os sintomas descritos pela literatura sobre a doença holandesa, é fundamental adotar uma leitura crítica e contextualizada, que considere as especificidades da economia brasileira.

Este capítulo analisou duas externalidades negativas associadas à atividade mineral no Brasil: os impactos socioambientais e os impactos econômicos. Ao abordar essas dimensões, evidenciou-se como a mineração, gera não apenas riscos ambientais e sociais duradouros, mas também efeitos macroeconômicos que comprometem o desenvolvimento industrial do país. Tais impactos se agravam em períodos de choques externos, como os discutidos no capítulo anterior, quando a variação abrupta da demanda e dos preços internacionais intensifica tanto a pressão sobre territórios minerados quanto os efeitos sobre a taxa de câmbio e a estrutura produtiva. Assim, este capítulo amplia a compreensão sobre os limites e contradições dos benefícios obtidos pela atividade mineral, dialogando de forma direta com o objetivo específico d) desta dissertação, que é o de investigar as externalidades negativas da atividade mineradora no Brasil.

No capítulo seguinte, serão apresentados os fundamentos metodológicos que sustentam a análise empírica da presente dissertação, incluindo os critérios de seleção das empresas e indicadores, as fontes de dados e as limitações observadas na condução da pesquisa.

6 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os materiais e procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho, com o fito de estruturar os estágios do estudo, que se caracteriza como uma pesquisa aplicada, de tipo exploratória e descritiva, com abordagem qualitativa. Trata-se de uma abordagem qualitativa de caráter descritivo e interpretativo, apoiada em dados quantitativos primários e secundários, fundamentada na perspectiva estruturalista. A pesquisa volta-se à análise dos impactos dos choques externos, a pandemia de COVID-19 e a invasão da Rússia à Ucrânia, sobre o setor mineral brasileiro.

A escolha dessa abordagem justifica-se pela necessidade de compreender os desdobramentos estruturais e econômicos da atividade mineradora, especialmente no que se refere às vulnerabilidades decorrentes da dependência de *commodities*. Complementarmente, são utilizados dados quantitativos secundários, provenientes de bases públicas, relatórios corporativos e organismos multilaterais, de modo a sustentar a análise descritiva com elementos objetivos.

Nos subtópicos seguintes, serão detalhadas as etapas metodológicas que estruturam esta pesquisa, planejadas para fortalecer os alicerces teóricos e práticos que sustentam a investigação e garantir que os procedimentos estejam plenamente alinhados aos objetivos propostos e às discussões ao longo do trabalho.

6.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos adotados nesta dissertação foram estruturados em três etapas principais: levantamento e revisão bibliográfica, coleta de dados e tratamento, e análise dos dados. Cada etapa será detalhada nos subtópicos a seguir.

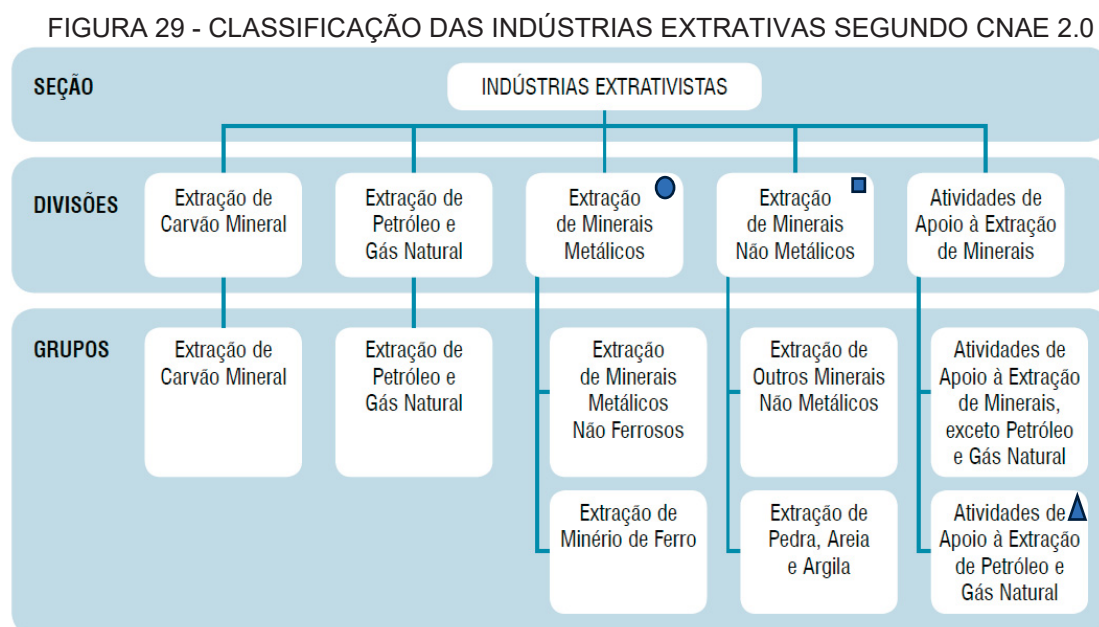
6.1.1 Levantamento e revisão bibliográfica

Nesta primeira etapa, o foco recai sobre uma revisão detalhada da literatura científica nacional e internacional, englobando livros, artigos acadêmicos, teses e dissertações, além de outras publicações de natureza acadêmica. Adicionalmente, foram realizados levantamentos e revisão bibliográfica em sites de notícias, jornais,

revistas e websites de empresas citadas no trabalho. Foram abordados os seguintes temas principais:

- **Impactos Econômicos da Atividade de Mineração:** analisaram-se os efeitos econômicos associados ao setor mineral, com foco nos impactos da dependência de *commodities* e nas vulnerabilidades geradas pela concentração das exportações em recursos minerais, especialmente em cenários de choques externos, como a pandemia de COVID-19 e a invasão da Rússia à Ucrânia.
- **Impactos Socioambientais da Atividade de Mineração:** Estudaram-se as externalidades negativas da atividade mineradora no meio ambiente e nas comunidades locais, com ênfase em aspectos como degradação ambiental, contaminação de recursos hídricos, perda de biodiversidade e impactos na qualidade de vida das populações afetadas. Também foram analisados desastres relacionados à mineração, como os incidentes com barragens de rejeitos, que evidenciam os desafios de sustentabilidade enfrentados pelo setor.
- **Evolução Histórica do Setor Mineral Brasileiro:** A trajetória do setor foi analisada desde o período colonial até o ano de 2024, com destaque para marcos históricos e transformações que consolidaram sua relevância econômica, com ênfase especial na extração de minério de ferro.
- **Caracterização do Setor Mineral Brasileiro em 2021:** Esta etapa inclui uma caracterização detalhada da IEM brasileira, com base na CNAE 2.0. A IEM abrange um conjunto de atividades econômicas com características próprias e diversificadas. Em virtude disso, torna-se crucial delimitar o escopo das atividades que serão objeto de análise neste estudo, baseando-se nas definições oferecidas pela CNAE. Essa classificação orienta pesquisas setoriais e outras iniciativas realizadas pelo IBGE. A CNAE é a classificação oficialmente adotada pelo Sistema Estatístico Nacional e pelos órgãos federais responsáveis pela gestão de registros administrativos, sendo administrada pelo IBGE. Suas principais aplicações incluem:
 - No sistema estatístico: Cadastro Central de Empresas;
 - Em pesquisas econômicas estruturais e conjunturais;
 - No Sistema de Contas Nacionais e na Renda Regional do Brasil;
 - Em levantamentos domiciliares;
 - Na Administração Pública: gestão de cadastros e registros administrativos nas esferas federal, estadual e municipal.

A versão 2.0 da CNAE possui uma estrutura hierárquica composta por 21 Seções, 87 Divisões, 285 Grupos, 673 Classes e 1301 Subclasses. Entre essas, a Seção dedicada à IEM é subdividida em divisões e grupos, conforme ilustrado na FIGURA 29:



FONTE: Adaptado de dados do IBGE (2007), com alterações feitas pelo autor (2024).

O foco de análise deste estudo será classificado como IEM, composto por um conjunto de atividades definidas pela CNAE, a saber:

- Divisão 07: Extração de Minerais Metálicos;
- Divisão 08: Extração de Minerais Não Metálicos;
- ▲ A divisão 14: Nesta divisão, a “Atividade de apoio à Extração de Petróleo e Gás Natural” não é considerada neste estudo pois esta atividade não utiliza explosivos com fins civis para a exploração de Petróleo e Gás Natural.

A análise dos dados relacionados à geração de empregos, renda e receita líquida pela IEM foi delimitada de acordo com dois critérios complementares:

- CNAE 2.0, para definir as atividades econômicas associadas ao setor mineral; e
- Cortes temporais distintos, determinados pela especificidade de cada dado analisado. A análise da geração de empregos considerou o

período de 1997 a 2021, alinhando-se ao recorte temporal adotado para as exportações de minério de ferro, enquanto a geração de renda de emprego pela IEM e a receita líquida de vendas foram delimitadas ao período de 2008 a 2021. Estas escolhas buscaram destacar a evolução do setor nos anos pré-pandêmicos e ressaltar o comportamento durante e após o choque da pandemia de COVID-19.

- **Indústria 4.0 e Minerais Estratégicos:** Foram analisados os potenciais da Indústria 4.0 e sua interseção com o setor mineral, explorando como a adoção de tecnologias avançadas na atividade mineradora, somada ao potencial que o Brasil possui devido à abundância de minérios estratégicos que compõem a nova revolução industrial, pode alavancar sua economia.

6.1.2 Coleta de dados

A coleta de dados realizada nesta pesquisa baseou-se em fontes primárias e secundárias, cujos detalhes serão apresentados nos subtópicos a seguir.

6.1.2.1 Fontes primárias

Foram coletados dados das seguintes fontes primárias:

- **Banco Central do Brasil:** Dados da taxa de câmbio comercial USD/BRL. A série histórica utilizada inicia-se em 1999, ano de adoção do regime de câmbio flutuante no Brasil. O recorte se estende até dezembro de 2023, refletindo os dados mais recentes disponíveis.
- **Plataforma ComexStat:** Plataforma administrada pela Secretaria de Comércio Exterior, vinculada ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC). Utilizada para acessar dados sobre exportações de minério de ferro, tanto em valor, dólares americanos com o *incoterm Free-on-Board* (FOB) quanto em quantidade física (toneladas). A delimitação temporal adotada para o período de 1997 a 2023 se justifica por dois fatores principais: (i) a privatização CVRD em 1996, que marcou uma nova etapa na mineração brasileira e consolidou a Vale como principal exportadora do país; e (ii) a padronização metodológica na plataforma ComexStat a partir de 1997, que permitiu maior consistência e comparabilidade na análise das séries históricas de exportação. Para garantir uma

análise estruturada, foi adotada a Classificação Internacional Industrial Uniforme (mais conhecida por sua sigla em inglês, ISIC, de *International Standard Industrial Classification of All Economic*), utilizada pela Subsecretaria de Inteligência e Estatística de Comércio Exterior (SITEC), que organiza as atividades econômicas segundo processos produtivos. Foram considerados os seguintes códigos ISIC:

- 0710: Extração de minério de ferro;
- 2410: Fabricação de ferro e aço básicos;
- 2431: Fundição de ferro e aço.

Além dos dados sobre o minério de ferro, também foram extraídas da plataforma ComexStat as informações sobre as exportações das demais 10 principais substâncias metálicas brasileiras no ano de 2021, organizadas para fins comparativos e de análise do comércio exterior do setor mineral.

- **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE):** O IBGE, dentre suas atribuições de organização de dados estatísticos nacionais, disponibiliza:
 - **Pesquisa Industrial Anual (PIA):** A PIA tem como principal objetivo identificar as características estruturais básicas da atividade industrial no Brasil e suas transformações ao longo do tempo, por meio de levantamentos anuais. A pesquisa utiliza como base o Cadastro Central de Empresas (CEMPRE), também produzido pelo IBGE, para o desenho da amostra. Embora tenha sido iniciada em 1966, a PIA foi adaptada, em 1996, aos novos parâmetros do modelo de produção de estatísticas industriais. A partir do ano de referência 2008, com resultados retroativos a 2007, passou a adotar a CNAE 2.0 para classificar as atividades econômicas, substituindo a estrutura anterior e permitindo uma melhor categorização e delimitação do setor industrial. Os dados analisados neste estudo foram extraídos das tabelas "Resultados das atividades industriais por unidades locais", que fornecem informações gerais sobre as empresas industriais com uma ou mais pessoas ocupadas, apresentadas por divisões de atividades do Brasil, regiões e unidades da federação. Essas informações, obtidas por meio da plataforma digital do IBGE, permitiram construir séries históricas e elaborar análises específicas sobre a geração de empregos,

renda e receita líquida no setor da IEM, alinhadas à classificação adotada pela CNAE 2.0.

- **CNAE 2.0:** Utilizada para delimitar as atividades associadas à mineração, permitindo categorizar e caracterizar o setor mineral brasileiro. Inclui a Seção B da CNAE (Indústrias extrativas), com foco nas divisões:
 - 07: Extração de minerais metálicos;
 - 08: Extração de minerais não metálicos;
 - 14: Atividades de apoio à extração de minerais, com exceção das atividades de apoio à extração de petróleo e gás natural, que não são objeto deste estudo.
- **Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA):** Os dados foram extraídos da base do SIDRA, uma plataforma pública mantida pelo IBGE, que consolida informações oficiais das Contas Nacionais. Foram coletadas séries anuais de 2000 a 2024 referentes ao PIB nominal do Brasil, ao PIB da IEM e ao PIB associado à atividade de extração de minério de ferro.
- **Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM):** Dados de arrecadação obtidos diretamente no site da CFEM, vinculada à Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral do MME. As informações foram utilizadas para analisar a arrecadação por estado, por tipo de minério e por evolução histórica anual.
- **Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento da Mineração (DIPEM):** A DIPEM é uma unidade técnica vinculada à ANM, responsável por organizar, sistematizar e divulgar estatísticas oficiais do setor mineral brasileiro. As informações produzidas pela DIPEM são amplamente utilizadas como referência pelo MME e constituem uma das principais bases de dados do setor no Brasil. Com base nos relatórios anuais disponibilizados pela DIPEM, foram extraídos os seguintes dados para compor a análise empírica desta pesquisa:
 - **Produção física anual de minério de ferro e minerais metálicos no Brasil:** Série histórica consolidada pela DIPEM/ANM, utilizada para avaliar a evolução da produção mineral no país. A série contempla o período de 2009 a 2022, que corresponde ao intervalo mais longo com dados padronizados e comparáveis disponíveis nos relatórios oficiais.

- **Investimentos no setor mineral:** Dados extraídos diretamente dos relatórios da DIPEM/ANM, disponíveis em formato estruturado a partir de 2013. As informações referem-se aos investimentos realizados por empresas do setor mineral no Brasil, com séries anuais compreendendo o período de 2013 a 2022.
- **Agência Nacional de Mineração (ANM):** Vinculada ao MME, Dados e informações detalhadas sobre diversos aspectos do setor mineral brasileiro, incluindo:
 - Participação das principais substâncias metálicas no valor da produção mineral comercializada no ano de 2021.
 - Localização das principais reservas minerais brasileiras, também relativas ao ano de 2021.
 - Porte e modalidade de lavra das minas em operação no Brasil relativas ao ano de 2021.
 - Quantidade e porte das usinas vinculadas ao setor mineral brasileiro relativas ao ano de 2021.
- **Bureau of Labor Statistics (BLS) (EUA):** Responsável pela coleta, produção e divulgação de estatísticas econômicas nos Estados Unidos, o BLS é a principal agência federal encarregada de informações sobre mercado de trabalho, inflação e produtividade. Entre seus principais indicadores está o *Producer Price Index* (PPI), que mede a variação média nos preços recebidos pelos produtores de bens e serviços, refletindo os custos no início da cadeia produtiva. Os dados obtidos diretamente do BLS foram utilizados para analisar tendências de preços no setor de produtos químicos no recorte temporal deste estudo, oferecendo informações precisas e atualizadas para embasar a pesquisa.

6.1.2.2 Fontes secundárias

Foram coletados dados das seguintes fontes primárias:

- **Relatórios empresariais:** Incluem catálogos de produtos e relatórios ao investidor de empresas como Vale, Yara International, Acron, Orica e CSN, que forneceram informações sobre operações, preços, tendências e indicadores econômicos relevantes. Especificamente, os dados sobre os preços do nitrato de amônio foram

extraídos dos relatórios anuais da Yara International e da Acron, dado que não há bases públicas de preços consolidados dessa *commodity*.

- **Relatórios de organismos internacionais:** Dados extraídos de publicações do FMI, incluindo a plataforma IMF *DataMapper*, e do Banco Mundial.
- **Trading Economics:** Plataforma global de análise macroeconômica e dados financeiros, utilizada amplamente por pesquisadores, analistas e gestores públicos e privados. Disponibiliza indicadores econômicos atualizados com base em fontes oficiais e institucionais, como bancos centrais, agências governamentais e organismos internacionais. Para esta pesquisa, foi utilizada a série histórica mensal do preço do minério de ferro (Iron Ore 62% Fe, CFR China) cotado em dólares por tonelada, disponível na seção de *commodities*. O recorte temporal vai de janeiro de 2016 até junho de 2025 (último dado disponível à época da finalização da dissertação). Apesar de ser considerada uma fonte secundária, é amplamente utilizada devido a sua cobertura e padronização internacional dos dados de *commodities*.
- **Atlas of Economic Complexity (EUA):** Desenvolvida pela *Harvard Kennedy School*, essa ferramenta fornece uma análise detalhada sobre fluxos comerciais globais e dinâmicas de exportação, permitindo mapear a inserção do Brasil no comércio internacional de *commodities*. Os dados obtidos foram utilizados para identificar as exportações brasileiras nos anos de 2020 e 2021.
- **FRED (EUA):** Esta é uma base de dados gerenciada pelo Federal Reserve Bank de St. Louis, sob a Secretaria de Estatísticas Econômicas dos EUA. Dados utilizados para análise do índice de preços ao produtor para produtos químicos, com foco em amônia, ácido nítrico e compostos de amônio. A série histórica utilizada tem início em dezembro de 2014 e vai até outubro de 2024, refletindo o dado mais recente disponível no fechamento deste trabalho.

6.1.2 Tratamento e análise dos dados

Os dados coletados foram tratados e analisados de forma a atender aos objetivos da pesquisa, utilizando procedimentos específicos para cada indicador. Esses processos incluíram organização, tratamento e apresentação, garantindo clareza e alinhamento metodológico às demandas da análise. A seguir, serão detalhados os dados coletados:

- **Exportações brasileiras, com ênfase no minério de ferro:** Os dados extraídos da plataforma ComexStat foram organizados em séries anuais com base na classificação ISIC, considerando tanto o valor (em dólares FOB) quanto a quantidade física (em toneladas) das exportações brasileiras de minério de ferro. Essas informações foram utilizadas para compor diferentes análises na dissertação, como a identificação dos principais países de destino das exportações, a evolução temporal dos embarques totais e segmentados por país (China e Estados Unidos) e a mensuração da participação do minério de ferro no valor total das exportações brasileiras ao longo do período de 1997 a 2023.
- **Preço do Nitrato de Amônio:** Diversos indicadores foram avaliados para a análise deste mercado. Os critérios utilizados para a seleção desses indicadores, assim como a lista completa dos analisados, estão detalhados no Apêndice A. Após uma avaliação criteriosa, foram selecionados os seguintes indicadores, com base em sua relevância e capacidade de refletir os impactos de choques externos no mercado de nitrato de amônio:
 - **FOB Mar Negro:** Representa o preço de exportação do nitrato de amônio no Mar Negro, um ponto estratégico para o comércio global de fertilizantes em razão da predominância da produção russa, sendo o principal índice utilizado para a formulação de preços dessa *commodity* produzida no país. Os dados para a construção deste indicador foram extraídos manualmente dos relatórios de investidores da Yara International, com defasagem de um mês, abrangendo o período de janeiro de 2019 a dezembro de 2022. O processo de coleta demandou esforço significativo de sistematização, razão pela qual a série histórica não foi estendida além desse intervalo.
 - **FOB Mar Báltico:** Captura os preços médios de fertilizantes exportados pela região báltica, uma rota estratégica para o mercado europeu, complementando a análise do Mar Negro ao refletir variações regionais. Os dados foram obtidos a partir dos relatórios de investidores da Acron, que compila informações de fontes de alta relevância no setor, como Fertecon, *Fertiliser Market Bulletin* (FMB) e The Market. A obtenção e sistematização dessas informações também exigiram esforço considerável, o que limitou a extensão da série. O recorte temporal adotado, de 2019 a 2024, foi definido com o objetivo de cobrir o período

imediatamente anterior ao choque externo e o momento mais atual disponível, considerando que os efeitos ainda estão em curso.

- **PPI:** Publicado pelo BLS, fornece informações sobre oscilações nos preços ao produtor de produtos químicos, com foco em amônia e ureia.
- **Geração de Emprego, Renda e Receitas Líquidas:** Os dados referentes à geração de emprego, renda e receitas líquidas pela IEM foram extraídos da PIA disponibilizada pelo IBGE e categorizados com base na CNAE 2.0. As informações foram organizadas e tratadas para a construção de gráficos específicos, com o intuito de evidenciar a evolução dessas variáveis ao longo dos anos. Os recortes temporais utilizados foram:
 - **Geração de Empregos:** 1996 a 2021;
 - **Geração de Renda:** 2008 a 2021;
 - **Receita Líquida de Vendas:** 2008 a 2021.
- **Preço Internacional do Minério de Ferro:** A série histórica mensal de preços foi extraída da plataforma *Trading Economics*, referente ao minério de ferro 62% Fe, CFR China, em dólares por tonelada. Os dados foram organizados e tratados para gerar uma média anual, padronizando a visualização em formato de gráfico de linha, de forma a destacar os movimentos de alta e baixa dos preços internacionais da *commodity* no período de 2016 a 2025. O dado de 2025 refere-se à média dos seis primeiros meses do ano (janeiro a junho), sendo identificado no gráfico com ressalva.
- **PIB do Brasil, IEM e do ferro:** As séries históricas foram sistematizadas a partir da plataforma SIDRA/IBGE, contemplando os seguintes dados brutos:
 - PIB nominal do Brasil (2000–2024);
 - PIB da Indústria Extrativa Mineral (2000–2024);
 - PIB do segmento de extração de minério de ferro (2000–2024);
 A partir desses dados, foram calculadas as seguintes razões de proporcionalidade:
 - Participação do PIB da IEM no PIB total do Brasil;
 - Participação do PIB do minério de ferro no PIB da IEM;
 - Participação do PIB do minério de ferro no PIB total do Brasil.
- **Produção física anual de minério de ferro e minerais metálicos no Brasil:** Os dados de produção física anual de minério de ferro e demais minerais metálicos foram sistematizados com base nos relatórios técnicos da DIPEM. A análise

considerou o período de 2009 a 2022, compatível com a padronização adotada pela ANM a partir de 2009. Anos anteriores não foram considerados devido à ausência de séries contínuas e comparáveis.

- **Investimentos no setor mineral:** As informações de investimento foram coletadas da mesma fonte e tratadas a partir das séries disponibilizadas entre 2013 e 2022. A sistematização considerou valores anuais consolidados por segmento mineral e categoria de investimento, permitindo avaliar a dinâmica de aportes financeiros no setor ao longo do tempo.
- **Receitas pela CFEM:** Os dados de arrecadação pela CFEM foram organizados em diversos gráficos, apresentando informações desagregadas por estado, por tipo de minério e por evolução histórica anual, possibilitando uma visão abrangente e detalhada das contribuições financeiras associadas à exploração mineral no Brasil. Para delimitar o indicador de arrecadação da CFEM por estado, foi utilizada a metodologia conhecida como *Cutoff Rule*. Essa técnica permitiu selecionar os cinco estados com maior arrecadação acumulada no período de 2020 a 2022, agrupando os demais sob a categoria "outros". Os estados escolhidos foram: Pará, Minas Gerais, Goiás, Bahia e Mato Grosso. Os critérios utilizados para a aplicação dessa metodologia, assim como a justificativa para a escolha desses estados, estão detalhados no Apêndice B.
- **Exportações de substâncias metálicas em 2021:** Os dados da ComexStat referentes ao ano de 2021 foram organizados de forma a permitir comparações entre as 11 principais substâncias metálicas exportadas pelo Brasil. A partir dessa base, foram produzidas: (i) uma tabela com os valores totais exportados por substância; (ii) uma tabela com os principais países de destino para cada uma dessas substâncias; e (iii) uma tabela síntese com o balanço comercial do setor metálico, comparando exportações e importações. Esses dados foram tabulados e organizados em colunas padronizadas, com valores expressos em milhões de dólares FOB.
- **Índice de preços ao produtor de produtos químicos (amônia sintética, ácido nítrico e compostos de amônio):** Os dados extraídos da base do FRED foram utilizados para gerar o índice de preços ao produtor de produtos químicos, com foco em amônia e compostos de amônio. O tratamento incluiu a padronização da base dez/2014 = 100, possibilitando a análise das oscilações nos preços ao longo do tempo.

- **Crescimento Real do PIB:** Os dados coletados da plataforma IMF *DataMapper* foram utilizados para gerar duas análises distintas:
 - **Crescimento Real do PIB - Mundo e Brasil:** Comparação das variações anuais do PIB mundial e do PIB brasileiro ao longo do período analisado, destacando as dinâmicas de crescimento e os períodos de crise econômica global e nacional
 - **Crescimento Real do PIB - Brasil, Ucrânia e Rússia:** Comparação das variações anuais do PIB desses países, com enfoque nos impactos decorrentes de eventos como a pandemia de COVID-19 e a invasão da Rússia à Ucrânia
- **Localização das principais reservas minerais brasileiras:** Dados da ANM (2021), apresentados em formato de mapa ou tabela, conforme disponibilizados pela fonte.
- **Porte e modalidade de lavra das minas:** Dados da ANM (2021), organizados em tabelas para destacar a tipologia das minas ativas no Brasil no período analisado.
- **Quantidade e porte de usinas:** Dados da ANM (2021), sistematizados para representar a distribuição e a capacidade das usinas vinculadas ao setor mineral.
- **Participação das principais substâncias metálicas no valor da produção mineral comercializada:** Dados extraídos dos relatórios da ANM de 2021. Não houve necessidade de tratamento, sendo apresentados conforme a fonte.
- **Taxa de câmbio comercial USD/BRL:** Série histórica obtida diretamente no Banco Central do Brasil, utilizada para construir gráficos que evidenciam os ciclos de valorização e desvalorização do real. A série inicia-se em 1999 devido à adoção do regime de câmbio flutuante, não havendo dados consistentes e comparáveis para períodos anteriores.

6.2 BASE DE DADOS

Os dados que embasam as análises desta pesquisa foram organizados e tratados, abrangendo indicadores selecionados a partir da coleta de dados. As fontes utilizadas, assim como os recortes temporais adotados, e uma breve descrição de cada indicador, estão detalhadas no QUADRO 2 a seguir:

QUADRO 2 - INDICADORES, BREVES DESCRIÇÕES, FONTES E RECORTES TEMPORAIS

(continua)

Indicador	Breve descrição	Fonte	Recorte Temporal
Preço do Nitrato de Amônio FOB Mar Negro	Valor médio da <i>commodity</i> FOB <i>Black Sea</i>	Relatórios aos investidores Yara International	2019-2022
Fertilizantes FOB Mar Báltico	Preço médio de fertilizantes exportados pela região báltica	Relatórios aos investidores Acron	2019-2024
Variação do preço de fertilizantes - PPI	Variação média dos preços recebidos pelos produtores na venda de bens e serviços no início da cadeia produtiva	BLS	2019-2024
Visão global das exportações brasileiras	Dados sobre composição da pauta exportadora do Brasil no ano.	<i>Atlas of Economic Complexity</i>	2020 e 2021
PIB do Brasil	Valor nominal anual do Produto Interno Bruto total do país.	SIDRA (IBGE)	2000–2024
PIB da IEM	Valor nominal anual da produção econômica da IEM, conforme segmentação das Contas Nacionais.	SIDRA (IBGE)	2000–2024
PIB da extração de minério de ferro	Valor estimado da atividade de extração de minério de ferro no contexto da IEM.	SIDRA (IBGE)	2000–2024
Participação da IEM no PIB do Brasil	Razão entre o PIB da IEM e o PIB total brasileiro, expressa em termos percentuais.	SIDRA (IBGE)	2000–2024
Participação do minério de ferro no PIB da IEM	Razão entre o PIB do ferro e o PIB da IEM, expressa em termos percentuais.	SIDRA (IBGE)	2000–2024
Participação do minério de ferro no PIB do Brasil	Razão entre o PIB do ferro e o PIB total do Brasil, expressa em termos percentuais.	SIDRA (IBGE)	2000–2024
Crescimento Real do PIB: Mundo e Brasil	Variação percentual anual do PIB mundial e brasileiro	IMF <i>DataMapper</i> (FMI)	1980-2028
Crescimento Real do PIB: Brasil, Rússia e Ucrânia	Variação percentual anual do PIB dos três países	IMF <i>DataMapper</i> (FMI)	2002-2022
Evolução da taxa de câmbio comercial (USD/BRL)	Série histórica da taxa de câmbio nominal de venda do dólar comercial em relação ao real brasileiro.	Banco Central do Brasil	1999–2023

QUADRO 2 - INDICADORES, BREVES DESCRIÇÕES, FONTES E RECORTES TEMPORAIS

(continua)			
Indicador	Breve descrição	Fonte	Recorte Temporal
Índice de Preços ao Produtor do para produtos químicos	Oscilações nos preços ao produtor de produtos químicos (amônia, ureia)	FRED	2014-2024
Preço do Minério de Ferro (USD/t)	Preço internacional da <i>commodity</i> (62% Fe, CFR China) cotado em dólares por tonelada	<i>Trading Economics</i>	2016–2025
Produção física anual de minério de ferro e minerais metálicos no Brasil	Série histórica da produção física, permitindo análise da evolução da produção mineral.	DIPEM/ANM (MME)	2000–2023
Investimentos no setor mineral brasileiro	Dados anuais sobre os investimentos realizados no setor mineral no Brasil.	DIPEM/ANM (MME)	2003–2023
Receitas por CFEM	Valores arrecadados por estados e minérios	CFEM (MME)	2009-2023
Exportações de substâncias metálicas brasileiras (2021) – por substância	Valor total exportado das 11 principais substâncias metálicas do Brasil	ComexStat (MDIC)	2021
Exportações de substâncias metálicas brasileiras (2021) – por país de destino	Valor das exportações por substância e por país de destino	ComexStat (MDIC)	2021
Balanço comercial das substâncias metálicas (2021)	Comparação entre exportações e importações das 11 substâncias metálicas	ComexStat (MDIC)	2021
Exportações de Minério de Ferro (valor e volume)	Valores e quantidades exportadas do Brasil, organizados por classificação ISIC, em US\$ FOB e toneladas	ComexStat (MDIC)	1997–2023
Participação do Minério de Ferro nas Exportações Totais	Percentual do valor FOB das exportações totais do Brasil representado pelo minério de ferro	ComexStat (MDIC)	1997–2023
Geração de Empregos pela IEM	Quantidade total de empregos gerados pela Indústria Extrativa Mineral	PIA (IBGE)	1996-2021

QUADRO 2 - INDICADORES, BREVES DESCRIÇÕES, FONTES E RECORTES TEMPORAIS

(conclusão)			
Indicador	Breve descrição	Fonte	Recorte Temporal
Geração de Renda pela IEM	Renda gerada pelo emprego na Indústria Extrativa Mineral	PIA (IBGE)	2008-2021
Receita Líquida de Vendas da IEM	Receita líquida de vendas gerada pela Indústria Extrativa Mineral	PIA (IBGE)	2008-2021
Receitas por CFEM	Valores arrecadados por estados e minérios	CFEM (MME)	2009-2023
Participação das principais substâncias metálicas	Dados sobre a contribuição das principais substâncias metálicas no valor da produção mineral comercializada	ANM (MME)	2021
Estatísticas sobre as principais substâncias metálicas	Informações estatísticas das substâncias metálicas mais relevantes	ANM (MME)	2021
Localização das principais reservas minerais	Localização geográfica das principais reservas minerais brasileiras	ANM (MME)	2021
Porte e modalidade de lavra das minas	Classificação das minas quanto ao porte e tipo de lavra	ANM (MME)	2021
Quantidade e porte das usinas	Número de usinas e classificação por porte	ANM (MME)	2021

FONTE: O autor (2025).

Os indicadores apresentados no QUADRO 2, referentes à participação das principais substâncias metálicas no valor da produção mineral comercializada e à localização das principais reservas minerais brasileiras, não demandaram tratamento adicional de dados. Esses indicadores foram diretamente extraídos do Relatório Anual da ANM de 2022, que contempla informações relativas ao ano de 2021, e apresentados conforme disponibilizados na fonte. Da mesma forma, os dados obtidos na plataforma *Atlas of Economic Complexity* também não exigiram procedimentos de tratamento. Uma das figuras gerados a partir dessa base foi utilizado para ilustrar a pauta exportadora brasileira em 2021, oferecendo um panorama geral da estrutura do comércio externo. A outra figura, correspondente ao ano de 2020, foi incorporado com o objetivo de evidenciar a progressão da pauta exportadora no contexto pandêmico, com destaque para a ampliação do peso relativo do minério de ferro. Para os demais

indicadores, os dados foram preparados, formatados e manipulados no *software Microsoft Excel 365®*, em formato .xlsx. As bases foram organizadas em arquivos individuais por indicador, tratadas e analisadas para definir o formato mais adequado de apresentação, seja em gráficos (barras, linhas, etc.) ou tabelas, priorizando a clareza e a eficiência na comunicação visual.

6.3 JUSTIFICATIVA DO USO DE DADOS DE COMÉRCIO EXTERIOR COMO INDICADOR EMPÍRICO

A escolha por utilizar dados de comércio exterior, especialmente os indicadores de exportação do minério de ferro e de formação do preço internacional do nitrato de amônio, como variáveis empíricas centrais neste trabalho, fundamenta-se na relevância dessas informações para mensurar os efeitos econômicos dos choques externos analisados. A pandemia de COVID-19 e a invasão da Rússia à Ucrânia provocaram disrupções significativas nas cadeias globais de produção e comércio, cujos reflexos mais imediatos foram sentidos no volume, no valor e nos preços das *commodities* comercializadas internacionalmente.

No caso do minério de ferro, as séries de exportação extraídas do ComexStat permitem observar, de forma objetiva, a contribuição do setor mineral para a balança comercial brasileira durante o período pandêmico. Esses dados estão diretamente relacionados aos objetivos de caracterização do setor e de mensuração de sua contribuição econômica, além de possibilitarem uma análise mais precisa sobre o impacto do choque externo representado pela pandemia. Para complementar essa abordagem, também foram considerados dados sobre a arrecadação da CFEM, geração de empregos diretos, renda e receita líquida do setor mineral, bem como a evolução dos preços internacionais do minério de ferro e a participação do setor mineral e do ferro no PIB. Esses indicadores reforçam a relevância o setor mineral, especialmente por meio da extração e exportação de ferro, desempenhou um papel relevante na sustentação da economia brasileira em um momento de retração global da pandemia de COVID-19. De forma análoga, no caso do nitrato de amônio, a utilização de dados sobre as variações nos indicadores de formação de preço internacional da *commodity* evidencia os efeitos da invasão da Rússia à Ucrânia sobre a cadeia produtiva da mineração, particularmente no tocante à vulnerabilidade a insumos estratégicos.

Essa abordagem empírica contribui diretamente para responder à pergunta-problema da pesquisa e está em plena consonância com o objetivo geral proposto. Além disso, dialoga com os objetivos específicos da pesquisa, especialmente os itens a), b), c) e f) desta dissertação. Ao evidenciar a relevância econômica do setor diante principalmente do choque externo da pandemia de COVID-19, a análise empírica fundamentada nos dados de comércio e nos demais indicadores econômicos também se alinha ao título do trabalho, ao abordar, com base em evidências, o papel desempenhado pelo setor mineral em contextos de crise internacional.

Dessa forma, o uso de dados de comércio exterior neste trabalho está metodologicamente justificado como estratégia empírica central para captar os impactos conjunturais dos choques externos e suas implicações estruturais para o setor mineral, especialmente o brasileiro. Ao serem analisados em conjunto com outros indicadores econômicos e setoriais, esses dados permitem alcançar os objetivos específicos da pesquisa, contribuir com a pergunta-problema e fornecer evidências robustas para sustentar a análise crítica proposta.

6.4 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DAS EMPRESAS E DELIMITAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

A seleção das empresas e operações analisadas nesta pesquisa foi realizada em dois recortes metodológicos:

- **Para análise dos impactos da pandemia sobre o setor de mineração de ferro:** Foram selecionadas as principais empresas atuantes na extração de minério de ferro no Brasil, considerando dois critérios fundamentais: porte econômico e nível de adoção de tecnologias associadas à Indústria 4.0.
- **Para análise dos impactos das sanções e da crise do nitrato de amônio:** A definição considerou a relevância econômica das empresas no setor mineral, a participação nas exportações brasileiras ou na produção global de minério de ferro e minerais metálicos, a presença na América Latina (Brasil, Chile, Peru e outros países) e a exposição às cadeias globais de suprimentos, especialmente no que se refere ao uso de insumos críticos como nitrato de amônio. A disponibilidade de dados públicos, por meio de relatórios anuais, relatórios de sustentabilidade e bases de dados governamentais, também foi critério determinante.

As etapas metodológicas detalhadas neste capítulo forneceram a base necessária para a realização das análises propostas, assegurando o alinhamento entre os objetivos da pesquisa, a pergunta problema e os procedimentos adotados. A metodologia foi concebida de forma abrangente, articulando diferentes abordagens analíticas, fontes de dados e técnicas de tratamento empírico. Esse desenho metodológico reflete o esforço em compreender criticamente os efeitos dos choques externos sobre o setor mineral brasileiro, com fundamentação teórica consistente e estratégia analítica bem definida. Ao consolidar informações dispersas, gerar indicadores inéditos e organizar os dados de maneira coerente com os objetivos da pesquisa, buscou-se garantir robustez à análise crítica proposta.

Na sequência, o próximo capítulo apresenta as evidências empíricas resultantes dessa abordagem, oferecendo elementos concretos para avaliar os efeitos econômicos da pandemia de COVID-19 e da invasão da Rússia à Ucrânia, bem como o papel desempenhado pelo setor mineral brasileiro nesse contexto.

7 IMPACTOS ECONÔMICOS DOS CHOQUES EXTERNOS E CONTRIBUIÇÃO DO SETOR MINERAL PARA A ECONOMIA BRASILEIRA

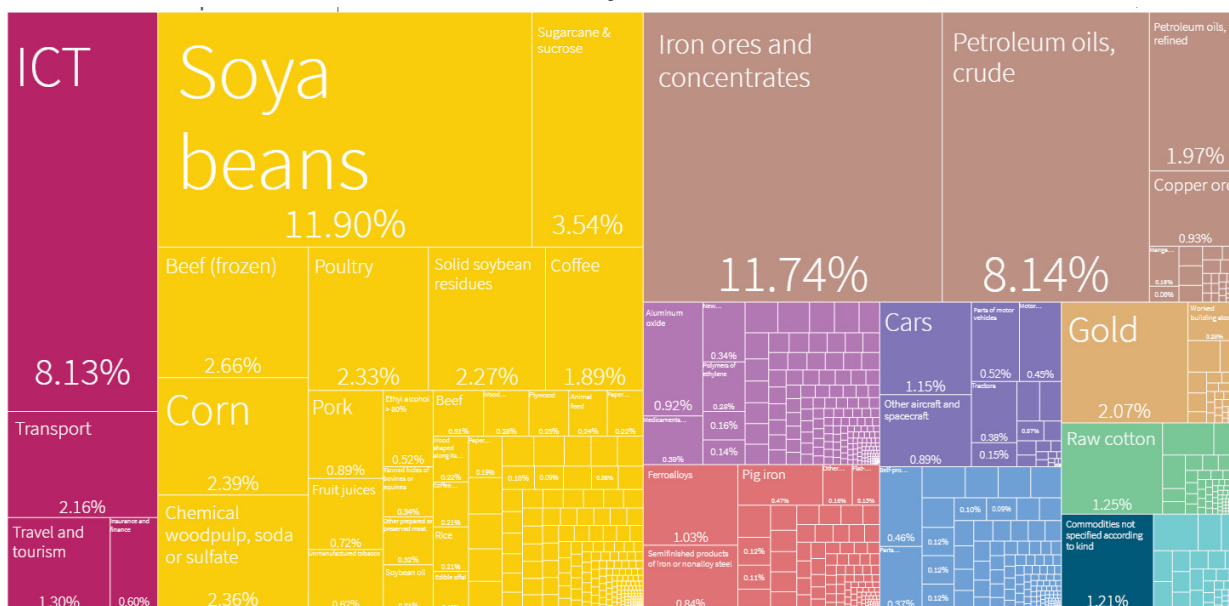
Este capítulo apresenta evidências empíricas que permitem compreender como os choques externos abordados nesta dissertação impactaram a dinâmica do setor mineral, com ênfase no contexto brasileiro. A primeira parte concentra-se na análise do comportamento do minério de ferro durante a pandemia de COVID-19 e sua contribuição para a sustentação da economia nacional. Em seguida, são examinados os efeitos da invasão da Rússia à Ucrânia sobre a cadeia global de suprimentos de nitrato de amônio, com implicações relevantes para a mineração. Além disso, o capítulo incorpora uma discussão sobre o papel das tecnologias associadas à Indústria 4.0 e dos minerais estratégicos no fortalecimento da eficiência e da resiliência do setor, bem como na consolidação de bases mais sustentáveis e inovadoras para o seu futuro, especialmente frente a instabilidades globais, como os choques externos.

Para isso, o capítulo tem início com a análise da participação do minério de ferro nas exportações brasileiras, destacando seu peso na pauta exportadora e examinando as oscilações de valor e volume das exportações em relação à dinâmica dos preços internacionais da *commodity*. Em seguida, analisa-se a evolução da arrecadação mineral via CFEM, assim como os efeitos da atividade mineradora na geração de emprego, renda e receitas líquidas. Por fim, investiga-se o impacto das sanções decorrentes da invasão da Rússia à Ucrânia sobre o mercado global de nitrato de amônio, com atenção às implicações para a mineração brasileira, especialmente no uso de explosivos industriais.

7.1 EXPORTAÇÕES DOS MINÉRIOS DO BRASIL

De acordo com dados do *Atlas of Economic Complexity*, o ferro e seus concentrados representaram, em 2020, 11,74% do total das exportações brasileiras, conforme ilustrado na FIGURA 30:

FIGURA 30 - EXPORTAÇÕES DO BRASIL EM 2020



FONTE: Atlas of Economic Complexity (2023).

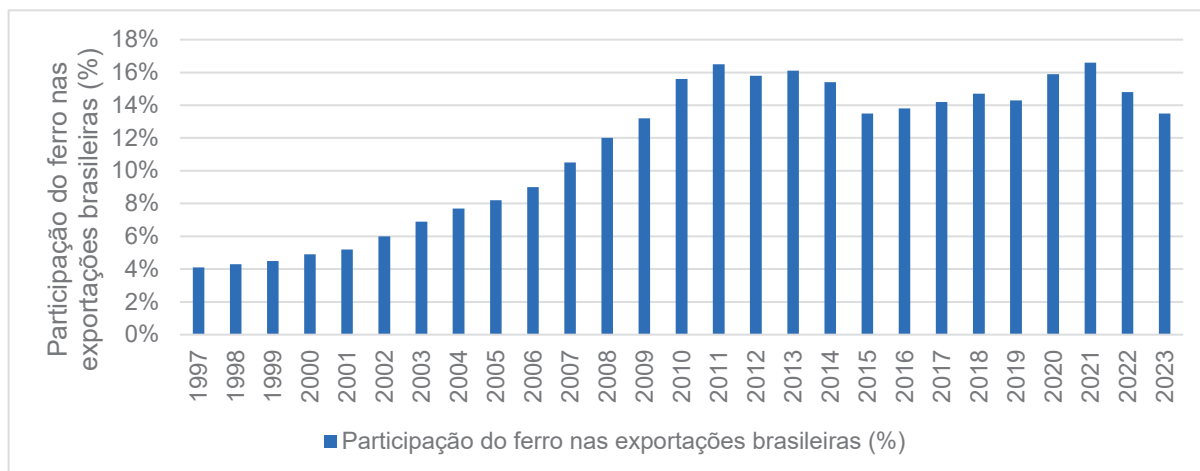
Analisando a FIGURA 30, observa-se que, entre os minerais exportados pelo Brasil, o ouro ocupou a segunda posição após o minério de ferro, representando 2,07% das exportações totais, seguido pelo cobre, com 0,93%. Ao comparar os dados da FIGURA 28, que utiliza a mesma base do *Atlas of Economic Complexity* e também apresenta as exportações do Brasil, mas em 2021, com os da FIGURA 30, constata-se um aumento significativo na participação do minério de ferro no total exportado pelo país, passando de 11,74% em 2020 para 15,46% em 2021, o que equivale a um incremento de 31.64%.

Com base na constatação anterior, de que o ano de 2021 registrou um aumento na participação do minério de ferro nas exportações brasileiras, com um crescimento de 31,64% em relação ao ano anterior, há indicativos de que esse incremento pode estar relacionado ao contexto marcado pela forte expansão das exportações dessa *commodity*, a princípio, em valor FOB, como efeito do choque externo da pandemia de COVID-19. Considerando a relevância desse ano para o setor mineral, em especial para as exportações de minério de ferro, as análises subsequentes serão delimitadas ao ano de 2021, permitindo uma abordagem mais detalhada, fundamentada nos resultados apresentados até o momento.

A fim de evidenciar o papel do minério de ferro na pauta exportadora brasileira, o GRÁFICO 12 apresenta a evolução de sua participação no total das exportações nacionais entre 1997 e 2023, com base em dados extraídos da plataforma ComexStat

e expressos em termos percentuais, sendo que eventuais limitações metodológicas relativas à construção desta série estão apresentadas no capítulo de metodologia:

GRÁFICO 12 – EVOLUÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO NAS EXPORTAÇÕES TOTAIS DO BRASIL EM VALOR FOB (% DO TOTAL) (1997–2023)



FONTE: Elaborado pelo autor com base em dados da plataforma ComexStat (2024).

A leitura do GRÁFICO 12 revela uma tendência estrutural de crescimento da participação do minério de ferro na pauta exportadora brasileira nas últimas décadas. Em 1997, essa substância representava cerca de 4% do total exportado pelo país. A partir de meados dos anos 2000, observa-se uma trajetória de alta consistente, intensificada a partir de 2009 e com pico em 2011 (acima de 16%). Durante o período da pandemia de COVID-19, em 2021, essa participação voltou a se aproximar dos níveis máximos da série histórica. A expressiva valorização do minério naquele ano impulsionou as receitas externas, compensando parcialmente a retração de outras atividades econômicas. Esse comportamento reforça a inferência de que o setor mineral, especialmente o minério de ferro, exerceu papel importante na atenuação dos impactos econômicos do choque externo da COVID-19 na economia brasileira. Embora tenha havido certa oscilação nos anos seguintes, o patamar médio manteve-se elevado em comparação com períodos anteriores, refletindo a consolidação do minério de ferro como principal item da balança comercial brasileira.

Ao apresentar uma perspectiva de longo prazo, o GRÁFICO 12 permite relativizar o peso do minério de ferro nas exportações e evitar generalizações. A série contribui para sustentar empiricamente a inferência de que o setor mineral, embora relevante para o desempenho da balança comercial e para a geração de divisas, impõe desafios importantes à diversificação produtiva e à resiliência estrutural da economia brasileira, sobretudo frente a choques externos.

Dando sequência à análise das exportações minerais brasileiras, os dados apresentados a seguir foram extraídos da plataforma ComexStat e organizados conforme o grau de processamento, de modo a refletir diferentes níveis de agregação de valor e compostos químicos. Os critérios adotados para a seleção e categorização desses dados encontram-se detalhados no capítulo de metodologia.

No ano de 2021, as exportações brasileiras de bens minerais totalizaram US\$ 75,4 bilhões FOB. Entre os principais produtos exportados destacaram-se minério de ferro, alumínio, cobre, ouro, nióbio, níquel, manganês, zinco, estanho, vanádio e cromo, conforme demonstrado na TABELA 3:

TABELA 3- VALOR DAS EXPORTAÇÕES BRASILEIRAS DE SUBSTÂNCIAS METÁLICAS SELECIONADAS EM 2021, POR GRAU DE PROCESSAMENTO (US\$ MILHÕES FOB)

Substância metálica	Total geral (US\$ milhões)	Produtos básicos (US\$ milhões)	Semimanufaturados (US\$ milhões)	Manufaturados (US\$ milhões)	Participação no total (%)
Ferro	56.757,5	55.868,8	854,2	34,6	75,24%
Ouro	5.294,9	0,3	5.294,3	-	7,02%
Cobre	4.682,9	2.903,8	1.606,6	172,5	6,21%
Níquel	2.136,3	1.695,8	440,5	-	2,83%
Nióbio	2.086,4	-	2.086,4	-	2,77%
Alumínio	1.395,5	1.105,2	285,8	4,5	1,85%
Manganês	519,7	503,1	16,6	-	0,69%
Estanho	81,7	80,7	0,6	0,4	0,11%
Zinco	61,0	46,1	14,9	-	0,08%
Tungstênio	14,0	14,0	-	-	0,02%
Cromo	11,8	11,8	-	-	0,02%
Total	75.432	62.229	10.509	694	100%

FONTE: Elaborado pelo autor com base em dados extraídos da plataforma ComexStat (2024).

A análise das exportações brasileiras de bens minerais em 2021, apresentada na TABELA 3, evidencia a predominância do minério de ferro como principal produto exportado, responsável por mais de 75% do total, com um valor de US\$ 56,7 bilhões FOB. Essa participação expressiva confirma a centralidade dessa *commodity* na estrutura do setor mineral e ressalta, ao mesmo tempo, a importância econômica da mineração para o país, em consonância com o objetivo específico f), e a vulnerabilidade decorrente da elevada concentração em poucos produtos, que é uma externalidade negativa (econômica), associada ao objetivo específico d). Além do ferro, outros bens minerais como ouro, alumínio e cobre também se destacaram, com contribuições expressivas de US\$ 5,3 bilhões FOB, US\$ 4,5 bilhões FOB e US\$ 4,4 bilhões FOB, respectivamente.

No entanto, observa-se que o Brasil ainda realiza uma exploração limitada de minerais estratégicos essenciais para o avanço da Indústria 4.0. Conforme discutido no subcapítulo 3.4 desta dissertação, esses recursos desempenham papel central em setores de alta tecnologia e na transição energética global. Entre os mais relevantes para essa transformação industrial, destacam-se o nióbio, o lítio e as terras raras, cujas reservas no território nacional apresentam elevado potencial de aproveitamento econômico e tecnológico. A análise da TABELA 3 evidencia, no entanto, que tais minerais permanecem subexplorados. O nióbio figura como a quinta substância metálica com maior valor de exportação FOB, totalizando US\$ 2,086 bilhões, o que corresponde a apenas 2,77% do total. Ainda assim, é comercializado exclusivamente na forma de produto semimanufaturado, sinalizando a oportunidade de ser transformado em bens manufaturados, com maior agregação de valor. A situação do cromo é ainda mais crítica: aparece apenas como a décima primeira substância na pauta exportadora, com valor total de apenas US\$ 11,8 milhões FOB (0,02% do total), exportado exclusivamente como produto básico, sem qualquer transformação industrial, o que indica baixa agregação de valor e limitada inserção em cadeias produtivas de maior sofisticação tecnológica. Os demais, possuem uma participação praticamente inexpressiva na extração mineral nacional, pois sequer figuram na TABELA 3.

Esse panorama revela um paradoxo estrutural do setor mineral brasileiro: embora o país ocupe posição de destaque na exportação de recursos básicos, como o minério de ferro, ainda carece de uma estratégia estruturada para o aproveitamento e a agregação de valor aos minerais estratégicos. Tais recursos, como o nióbio, o lítio e as terras raras, são fundamentais para impulsionar a competitividade industrial, sustentar a inovação tecnológica e viabilizar a transição para modelos produtivos mais avançados e sustentáveis, especialmente no contexto da Indústria 4.0. Os dados apresentados reforçam, portanto, tanto a importância econômica do setor mineral tradicional quanto a necessidade urgente de reorientar esforços para o desenvolvimento de cadeias produtivas integradas, baseadas em minerais críticos e voltadas para as demandas futuras da economia global. Tal transformação é indispensável para que o Brasil consolide uma posição mais ativa nas cadeias globais de valor, fortalecendo a resiliência, a eficiência e o papel estratégico do setor mineral diante das crescentes instabilidades internacionais. Essa constatação também reforça o atendimento ao objetivo específico e), ao evidenciar que o acesso a minerais

estratégicos localizados no território brasileiro pode contribuir de forma decisiva para a construção de um setor mais resiliente, eficiente e ambientalmente sustentável.

Na sequência, será apresentada na TABELA 4 os principais países importadores de bens minerais no ano de 2021, com base nos dados consolidados para o período:

TABELA 4 - VALOR DAS EXPORTAÇÕES DAS 11 PRINCIPAIS SUBSTÂNCIAS METÁLICAS NO ANO DE 2021 (POR PAÍS DESTINO)

(continua)

Classificação do Produto por Valor Agregado						Total Geral	
Produtos Básicos		Semimanufaturados		Manufaturados			
País	mUSD FOB	País	mUSD FOB	País	mUSD FOB	País	mUSD FOB
Total	49 057,86	Total	17 931,05	Total	8 443	Total	75 432
China	29 616,69	Estados Unidos	5 950,46	Estados Unidos	1 442,41	China	31 149,32
Japão	1 846,09	China	1 391,06	Argentina	1 129,72	Estados Unidos	7 922,64
Coreia do Sul	1 167,53	Reino Unido	933,73	Noruega	728,49	Japão	2 467,60
Alemanha	1 151,55	México	651,65	Chile	324,02	Argentina	2 431,58
Argentina	660,97	Índia	644,81	México	258,37	Coreia do Sul	1 691,38
Espanha	659,5	Argentina	640,89	China	141,58	Alemanha	1 441,93
Turquia	574,99	Japão	546,23	Peru	125,98	México	1 200,57
França	536,66	Coreia do Sul	469,39	Turquia	98,68	Reino Unido	1 166,76
Estados Unidos	529,78	Itália	285,94	Alemanha	78,93	Índia	849,7
Itália	417,04	Alemanha	211,45	Japão	75,28	Espanha	814,7
México	290,54	Espanha	121,27	Coreia do Sul	54,46	Turquia	778,71
Reino Unido	200,01	África do Sul	114,38	França	50,05	Itália	744,03
Índia	181,81	Turquia	105,03	Itália	41,05	Noruega	728,49
Arábia Saudita	100,94	Peru	57,97	Espanha	33,94	França	596,76
Chile	74,48	Rússia	50	Reino Unido	33,01	Chile	405,81
Vietnã	42,14	França	10,05	Índia	23,08	Peru	184,66
África do Sul	13,91	Chile	7,31	Arábia Saudita	16,3	África do Sul	139,89
Rússia	1,05	Vietnã	3,84	África do Sul	11,59	Arábia Saudita	117,26

TABELA 4 - VALOR DAS EXPORTAÇÕES DAS 11 PRINCIPAIS SUBSTÂNCIAS METÁLICAS NO ANO DE 2021 (POR PAÍS DESTINO)

(conclusão)

Classificação do Produto por Valor Agregado						Total Geral	
Produtos Básicos		Semimanufaturados		Manufaturados			
País	mUSD FOB	País	mUSD FOB	País	mUSD FOB	País	mUSD FOB
Peru	0,71	Arábia Saudita	0,01	Rússia	11,58	Rússia	62,64
Noruega	-	Noruega	-	Vietnã	0,32	Vietnã	46,29
Outros	10 991.46	Outros	5 735.56	Outros	3 764.65	Outros	20 491.68

FONTE: Elaborado pelo autor com base em dados extraídos da plataforma ComexStat (2024).

A análise das exportações brasileiras de bens minerais no ano de 2021 encontrados na TABELA 4 evidencia a predominância da China como principal destino, concentrando 41,3% do total exportado, com um valor US\$ 31,1 bilhões FOB. Esse dado reflete a forte dependência do mercado chinês, especialmente para produtos básicos, onde o país lidera com US\$ 29,6 bilhões FOB. Os Estados Unidos aparecem como o segundo maior destino, com destaque em todas as categorias de valor agregado, totalizando US\$ 7,9 bilhões FOB, sendo a maior parte em produtos semimanufaturados (US\$ 5,9 bilhões FOB). Japão e Coreia do Sul também figuram entre os principais importadores, reforçando a relevância do mercado asiático para o setor mineral brasileiro.

Conforme será apresentado na TABELA 5, o saldo da balança comercial, considerando bens minerais primários, semimanufaturados e manufaturados das 11 principais substâncias metálicas, totalizou US\$ 59,7 bilhões FOB no ano de 2021:

TABELA 5 - BALANÇO DO COMÉRCIO EXTERIOR DAS 11 PRINCIPAIS SUBSTÂNCIAS METÁLICAS NO ANO DE 2021

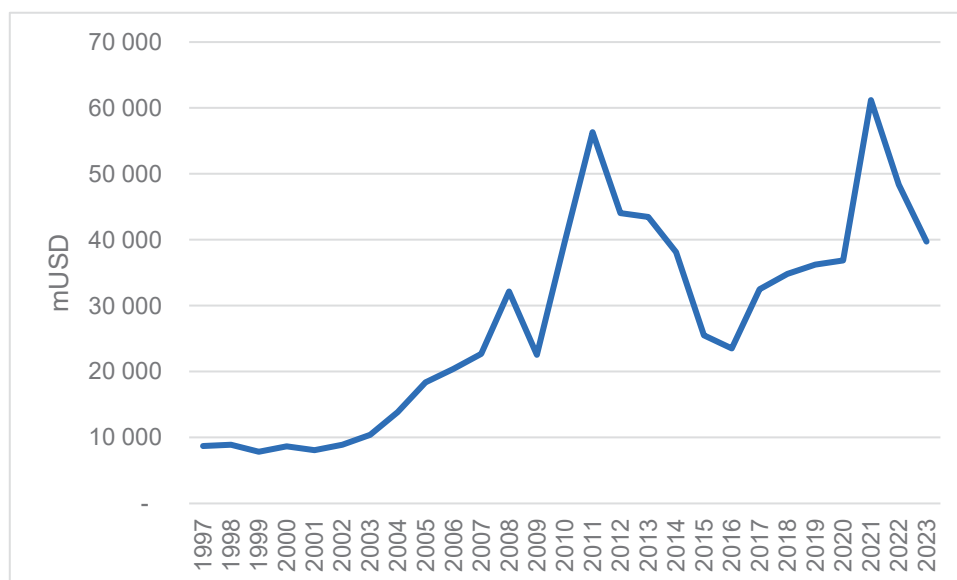
Tipo de Produto	Exportação	Importação	Saldo
	Valor (mUSD – FOB)	Valor (mUSD – FOB)	Valor (mUSD – FOB)
BRASIL	75 432,4	15 743,1	59 689,3
Produtos Básicos	49 057,9	1 276,2	47 781,7
Semimanufaturados	17 931,1	4 944,4	12 986,7
Manufaturados	8 443,5	9 522,6	- 1 079,1

FONTE: Elaborado pelo autor com base em dados extraídos da plataforma ComexStat (2024).

A avaliação do saldo da balança comercial das 11 principais substâncias metálicas em 2021 na TABELA 5 evidencia a predominância dos produtos básicos, que representaram US\$ 49 bilhões em exportações FOB, correspondendo a 65% do total, enquanto os manufaturados e semimanufaturados, juntos, somaram apenas 35%. Esse dado reflete a concentração das exportações brasileiras em *commodities* e a baixa diversificação de produtos minerais de maior valor agregado, um padrão que limita a capacidade do país de competir em mercados globais mais sofisticados.

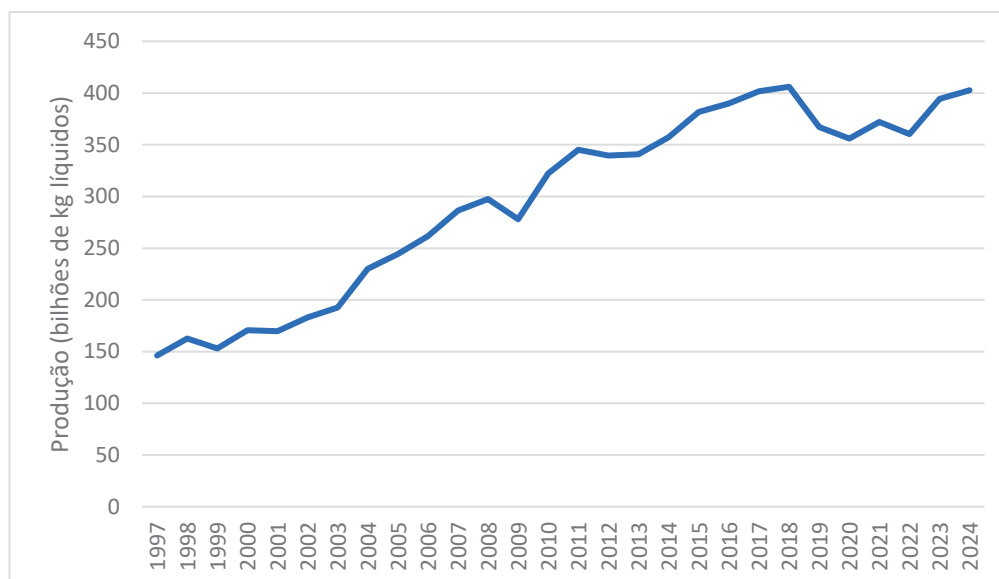
Dando continuidade às análises e considerando que os dados anteriores evidenciaram o protagonismo do minério de ferro nas exportações minerais brasileiras, especialmente em 2021, quando representou mais de 75% do valor total exportado, o foco passa a recair sobre a evolução histórica dessas exportações. O objetivo é examinar as variações nos valores FOB, em milhões de dólares americanos, e nos volumes exportados, em bilhões de quilos líquidos, entre 1997 e 2023, buscando identificar as principais tendências e oscilações ao longo do período. As limitações metodológicas associadas à construção desses gráficos já foram apresentadas no capítulo de metodologia. A seguir, apresentam-se os GRÁFICOS 13 e 14:

GRÁFICO 13 - EVOLUÇÃO DA EXPORTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DO BRASIL EM VALOR FOB (1997–2023), EM MILHÕES DE USD



FONTE: Elaborado pelo autor com base em dados extraídos da plataforma ComexStat (2024).

GRÁFICO 14 - EVOLUÇÃO DA EXPORTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DO BRASIL EM QUANTIDADE FOB (1997–2023), EM BILHÕES DE KG



FONTE: Elaborado pelo autor com base em dados extraídos da plataforma ComexStat (2024).

Os GRÁFICOS 13 e 14 permitem uma análise combinada da evolução das exportações brasileiras de minério de ferro, tanto em termos de valor FOB quanto de quantidade física. Observa-se que, enquanto o volume exportado apresenta uma trajetória de crescimento relativamente estável e consistente ao longo do período, os valores FOB são marcados por fortes oscilações, refletindo a volatilidade dos preços internacionais. Entre 1997 e 2002, tanto os valores quanto os volumes permaneceram relativamente estáveis. A partir de 2003, inicia-se um ciclo de crescimento expressivo nas exportações, que se estende até 2008, quando o valor exportado atinge aproximadamente US\$ 32 bilhões FOB. No mesmo intervalo, o volume exportado também cresce, mas de forma mais linear e menos abrupta, evidenciando que parte relevante do aumento nos valores está associada à elevação dos preços internacionais e não exclusivamente ao aumento físico das exportações.

Entre 2008 e 2022, o comportamento dos dois indicadores se distancia de forma mais evidente. Enquanto os volumes exportados seguem trajetória crescente e praticamente contínua, os valores FOB são fortemente impactados por oscilações nos preços globais, especialmente em função de choques externos. Dois picos se destacam: 2011, quando o valor FOB atinge US\$ 56,4 bilhões, e 2021, que registra o recorde histórico de US\$ 61,2 bilhões. Em ambos os casos, os volumes exportados não apresentam crescimento proporcional, reforçando que os aumentos foram

motivados, principalmente, pela valorização da *commodity* no mercado internacional. O pico de 2021, em especial, está diretamente associado ao choque externo da pandemia de COVID-19, conforme analisado no capítulo quatro desta dissertação, que demonstrou como as rupturas nas cadeias globais provocadas pela pandemia resultaram em flutuações expressivas nos preços internacionais de diversas *commodities*. Assim, pode-se inferir com dados empíricos que a elevação extraordinária no valor das exportações brasileiras em 2021 reflete, na prática, os efeitos econômicos discutidos teoricamente naquele capítulo. Esse efeito torna-se evidente ao observar que, nos anos seguintes, embora os volumes se mantenham elevados, os valores FOB retrocedem, acompanhando a normalização dos preços no mercado internacional.

Com base nos dados de 2019 e 2021, é possível reforçar esse diagnóstico de maneira concreta. Durante esse intervalo, o volume exportado manteve-se praticamente estável, com variação nula em torno de 370 bilhões de kg, enquanto a receita saltou de aproximadamente US\$ 22,7 bilhões para US\$ 61,2 bilhões FOB, o que representa um aumento de cerca de 169%. Esse descolamento entre valor e volume confirma que o crescimento da receita foi impulsionado majoritariamente pela valorização da *commodity* no mercado global e não por aumento físico nas exportações. Os dados de preço médio do minério de ferro no mesmo período corroboram essa análise, com um salto de 70 USD/t em 2019 para 225 USD/t em 2021, o que corresponde a um crescimento de 221%. Essa dependência do preço internacional torna o setor particularmente sensível à volatilidade externa, reforçando a vulnerabilidade estrutural da pauta exportadora brasileira, como discutido no capítulo sobre choques globais, e conecta-se diretamente ao objetivo específico c) desta dissertação de analisar as externalidades econômicas associadas à dependência de *commodities* minerais. Além disso, esses dados também reforçam os objetivos específicos a) e b) da pesquisa, ao evidenciarem que o aumento das exportações em valor durante a pandemia de COVID-19 ocorreu sobretudo pela elevação do preço internacional do minério, o que contribuiu diretamente para a geração de divisas e superávit comercial no período, mesmo com queda no volume exportado em 2020. Tal comportamento ilustra o papel do setor mineral como amortecedor macroeconômico em tempos de crise.

A TABELA 6 apresenta os principais países de destino das exportações brasileiras de ferro, considerando os valores acumulados das exportações FOB em dólares americanos no período de 1997 a 2023:

TABELA 6 - PAÍSES DE DESTINO DAS EXPORTAÇÕES DE MINÉRIO DE FERRO DO BRASIL EM VALOR FOB (1997–2023), EM MILHÕES DE USD

País	mUSD FOB
Total	697 754
China	247 693
Estados Unidos	83 064
Japão	43 792
Países Baixos (Holanda)	28 156
Argentina	26 985
Coreia do Sul	25 650
Alemanha	21 463
Malásia	17 005
Itália	16 186
França	12 295
Outros	175 460

FONTE: Elaborado pelo autor com base em dados extraídos da plataforma ComexStat (2024).

Os dados da TABELA 6 evidenciam que a China foi o principal parceiro comercial do Brasil nesse período, concentrando aproximadamente 35% do total exportado, equivalente a US\$ 247,7 bilhões FOB. Esse número reforça a relevância do mercado chinês como principal destino do minério de ferro brasileiro. Em seguida, destacam-se os Estados Unidos e o Japão, que ocupam, respectivamente, a segunda e a terceira posição entre os principais importadores.

Com o objetivo de compreender de forma mais detalhada a evolução dos destinos das exportações brasileiras de minério de ferro e identificar qual foi o principal destino dessas exportações durante 2021, a apresentação dos resultados segue com a divisão em três intervalos temporais:

- 1997 a 2002
- 2003 a 2008
- 2009 a 2022

Os dados consolidados para cada período são apresentados na TABELA 7:

TABELA 7 - PAÍSES DE DESTINO DAS EXPORTAÇÕES DE MINÉRIO DE FERRO DO BRASIL EM VALOR FOB (1997–2022), EM MILHÕES DE USD

Países	1997 a 2002	Países	2003 a 2008	Países	2009 a 2022
Total	39 138	Total	105 866	Total	515 028
Estados Unidos	7 775	China	17 766	China	211 100
Japão	3 647	Estados Unidos	15 803	Estados Unidos	53 041
Alemanha	2 962	Japão	7 517	Japão	31 390
China	2 293	Alemanha	6 503	Países Baixos (Holanda)	23 533
Argentina	2 136	Coreia do Sul	5 544	Argentina	17 832
Coreia do Sul	1 949	Argentina	5 466	Coreia do Sul	17 475
Itália	1 680	Itália	3 831	Malásia	14 208
Bélgica	1 554	Taiwan	3 264	Alemanha	11 796
Taiwan	1 308	França	2 752	Itália	10 262
França	1 134	México	2 733	Omã	8 325
Outros	12 696	Outros	34 681	Outros	116 061

FONTE: Elaborado pelo autor com base em dados extraídos da plataforma ComexStat (2024).

Conforme dados da TABELA 7, nos primeiros anos da análise, entre 1997 e 2002, os Estados Unidos destacaram-se como o principal destino das exportações brasileiras de minério de ferro, seguidos pelo Japão. Nesse período, a China ocupava apenas a quarta posição entre os principais parceiros comerciais do Brasil, reflexo de uma economia que ainda não havia consolidado o modelo de industrialização acelerada e os grandes investimentos em infraestrutura que caracterizariam as décadas seguintes.

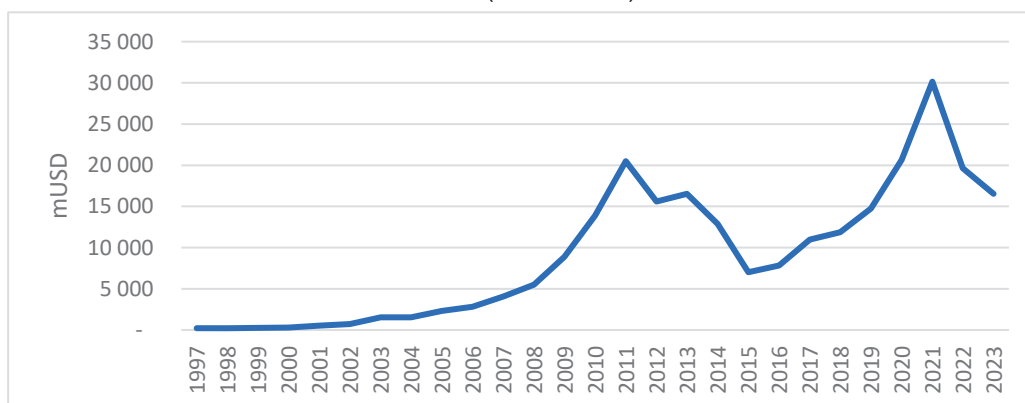
Entre 2003 e 2008, a China começou a emergir como o maior parceiro comercial brasileiro nesse setor, posicionando-se próxima dos Estados Unidos, mas já demonstrando uma tendência de liderança. Durante esse intervalo, a China foi responsável por 17% do valor total das exportações de minério de ferro do Brasil, enquanto os Estados Unidos representaram 15%.

No período de 2009 a 2022, a China consolidou-se como o principal destino das exportações brasileiras de minério de ferro, concentrando 41% do total exportado. Nesse mesmo período, os Estados Unidos, que mantiveram a segunda posição, importaram pouco mais de 10% do valor FOB das exportações brasileiras de ferro. Ao analisar as TABELAS 3 e 6, confirma-se que, durante o ano de 2021, a China foi o principal destino das exportações brasileiras de minério de ferro, destacando-se entre as 11 principais substâncias metálicas, com o minério de ferro ocupando a posição de mineral mais exportado.

Ao consolidar os dados apresentados, verifica-se que, em 2021, o Brasil exportou 243 milhões de toneladas de minério de ferro para a China. Esse volume representou em torno de US\$ 30,6 bilhões FOB, o equivalente a 68% do total das exportações brasileiras de minério de ferro naquele ano. Esses números reforçam a posição estratégica da China como o maior parceiro comercial do Brasil no setor mineral. Além disso, o comportamento observado em 2021 evidencia a influência do choque externo causado pela pandemia de COVID-19, que intensificou a demanda chinesa por minério de ferro, consolidando sua posição como principal destino das exportações brasileiras.

Considerando a liderança da China como maior parceiro comercial do Brasil nos blocos mais recentes da análise, destaca-se a evolução das importações de minério de ferro por este país ao longo do período de 1997 a 2023, conforme ilustrado no GRÁFICO 15:

GRÁFICO 15 - EVOLUÇÃO DA EXPORTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DO BRASIL PARA A CHINA EM VALOR FOB (1997–2023), EM MILHÕES DE USD

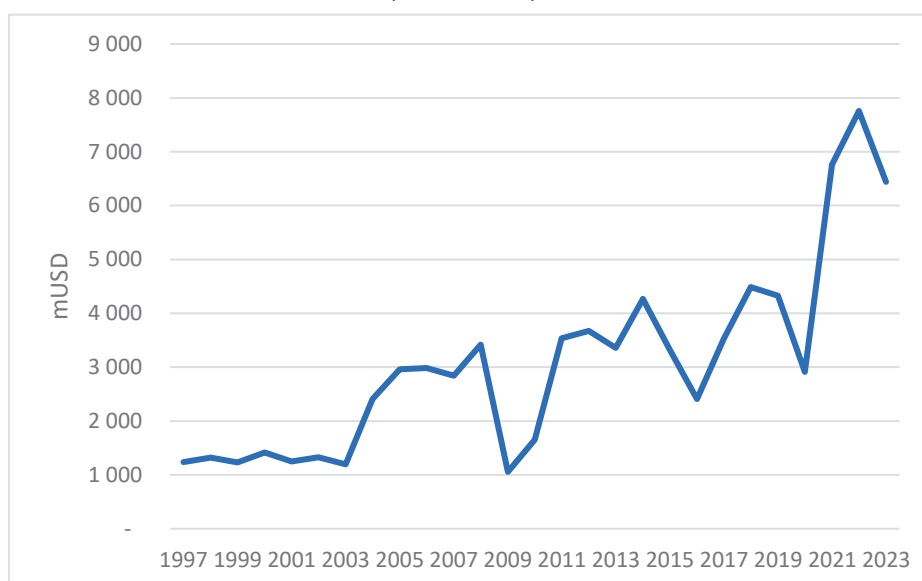


FONTE: Elaborado pelo autor com base em dados extraídos da plataforma ComexStat (2024).

As curvas apresentadas no GRÁFICO 15 reafirmam a relação direta entre o aumento das exportações brasileiras de minério de ferro e a crescente demanda chinesa por esse recurso ao longo do período analisado. Esse comportamento reafirma a consolidação da China como o principal destino das exportações, contribuindo de maneira significativa para a expansão dos valores FOB registrados pelo Brasil.

Para fins de comparação, o GRÁFICO 16 também apresenta a evolução das exportações destinadas aos Estados Unidos, destacando um crescimento mais modesto em relação ao mercado chinês, o que reforça o papel predominante da China no comércio exterior brasileiro de minério de ferro:

GRÁFICO 16 - EVOLUÇÃO DA EXPORTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DO BRASIL PARA OS EUA EM VALOR FOB (1997–2023), EM MILHÕES DE USD



FONTE: Elaborado pelo autor com base em dados extraídos da plataforma ComexStat (2024).

Embora os Estados Unidos também tenham aumentado as importações de minério de ferro proveniente do Brasil, o comportamento apresentado no GRÁFICO 16 ao longo do período analisado revela diferenças significativas em relação aos padrões observados nos outros dois gráficos, que mostram a evolução das exportações totais de minério de ferro do Brasil e das importações realizadas pela China. Essas diferenças refletem características distintas na dinâmica comercial entre o Brasil e os Estados Unidos, quando comparadas à relação com a China.

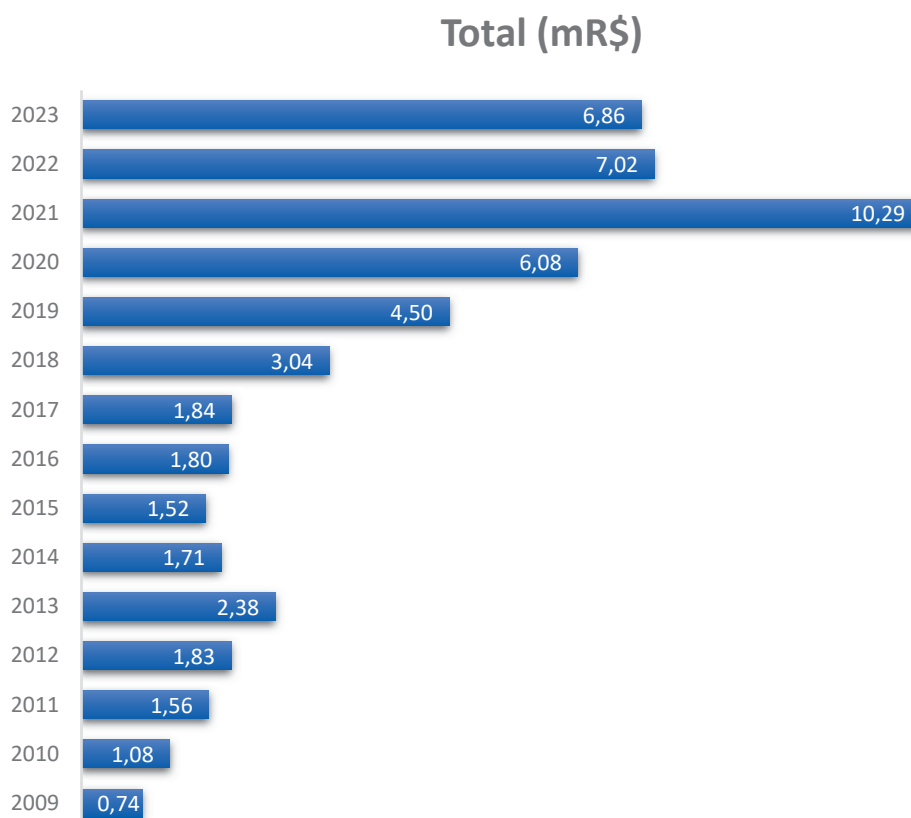
A análise conjunta dos dados reforça a vulnerabilidade característica dos preços das *commodities*, que são definidos pelo mercado internacional e escapam ao controle do país ou das empresas exportadoras. Essa fragilidade ficou ainda mais evidente em cenários de choques externos, como o observado durante a pandemia de COVID-19, quando as exportações de minério de ferro atingiram um pico em 2021, seguido por uma retração até 2023. Esse comportamento ilustra a dependência estrutural da economia brasileira em relação a dinâmicas globais de mercado, especialmente em períodos de instabilidade econômica mundial. Delimitados os principais mercados de destino do minério de ferro brasileiro e evidenciada sua relevância econômica, direciona-se agora a análise para a CFEM. No próximo subtópico, serão examinados os aspectos financeiros e normativos dessa compensação, considerando seu impacto na gestão dos recursos minerários e na arrecadação pública no Brasil.

7.2 A CFEM COMO POLÍTICA DE ARRECADAÇÃO E DESENVOLVIMENTO NO SETOR MINERAL

A Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM), instituída pela Constituição Federal de 1988, Art. 20, § 1º, destina-se aos Estados, ao Distrito Federal, aos Municípios e aos órgãos da administração federal, como contraprestação pela exploração econômica dos recursos minerais presentes em seus respectivos territórios. Essa compensação é obrigatória para todos autorizados a extrair substâncias minerais com fins econômicos. O pagamento deve ser efetuado mensalmente, até o último dia útil do segundo mês subsequente ao fato gerador. O cálculo da CFEM é realizado com base no valor do faturamento líquido obtido com a venda do produto mineral. O faturamento líquido corresponde ao valor de comercialização do produto mineral, descontados tributos, despesas com transporte e seguro incidentes no ato da comercialização. Nos casos em que não há venda, como quando o produto é consumido, transformado ou utilizado pelo próprio minerador, o valor da CFEM é determinado pela soma das despesas diretas e indiretas incorridas até o momento de sua utilização (Brasil, 2017).

Em 2019, a arrecadação proveniente da CFEM ultrapassou R\$ 4,6 bilhões. Em 2020, o valor arrecadado cresceu significativamente, alcançando R\$ 6,08 bilhões, um aumento de quase 35% em relação ao ano anterior. No ano de 2021, a arrecadação atingiu R\$ 10,29 bilhões, representando um crescimento expressivo de 68,9% em comparação com 2020 e estabelecendo um novo recorde até aquele ano. Já em 2022, houve uma redução de 31,81% na arrecadação, totalizando R\$ 7,01 bilhões. Esses recursos foram distribuídos entre municípios produtores e afetados pela mineração, estados e a União, de acordo com a legislação vigente (Agência Nacional de Mineração, 2024). O GRÁFICO 17, elaborado com base em dados de fontes primárias da CFEM, apresenta a evolução da arrecadação entre os anos de 2009 e 2023. Esse período inclui o recorte temporal do choque externo da pandemia de COVID-19, permitindo observar as variações ocorridas e proporcionando uma compreensão mais detalhada das transformações no setor mineral ao longo do tempo:

GRÁFICO 17 - ARRECADAÇÃO ANUAL DA CFEM (2009-2023)



FONTE: Elaboração pelo autor, a partir de dados do CFEM (ANM), vinculada ao MME (2024).

Com base nos dados apresentados no GRÁFICO 17, a arrecadação anual da CFEM entre 2009 e 2023 apresenta uma tendência de crescimento ao longo dos anos. A trajetória ascendente, embora não linear, evidencia o papel cada vez mais relevante do setor mineral na geração de receitas públicas.

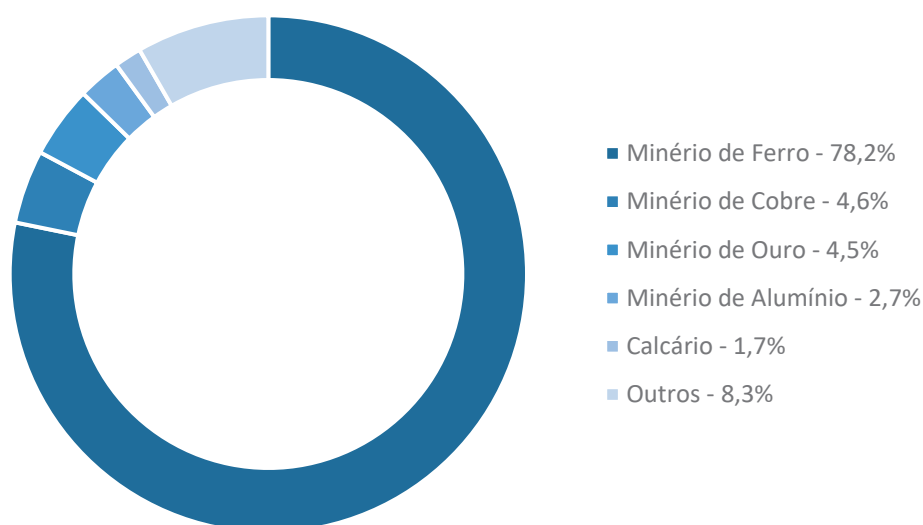
Para fins de análise comparativa, o ano de 2019 destaca-se como marco pré-pandemia, oferecendo uma base importante para avaliar os efeitos econômicos do choque externo provocado pela COVID-19 sobre a arrecadação mineral brasileira, conforme discutido no capítulo quatro. Entre 2019 e 2021, observa-se um aumento expressivo na arrecadação, que saltou de R\$ 4,50 bilhões para R\$ 10,29 bilhões, representando um crescimento de aproximadamente 128,67%. Esse avanço está diretamente relacionado à valorização das *commodities* minerais no período, especialmente o minério de ferro, cujo preço internacional subiu cerca de 221%, atingindo seu segundo maior pico na série histórica analisada no GRÁFICO 8. Esse dado reforça que, mesmo diante de uma crise global, o setor mineral manteve desempenho robusto, contribuindo não apenas para o superávit comercial, conforme

analisado no subcapítulo anterior, mas também para o fortalecimento das contas públicas por meio do aumento na arrecadação da CFEM. Contudo, a queda para R\$ 7,02 bilhões em 2022, equivalente a uma retração de 31,81%, evidencia o fim do ciclo de alta e a exposição do setor à volatilidade externa.

Além do aspecto arrecadatório, os recursos provenientes da CFEM representam uma fonte essencial de financiamento para estados e municípios afetados pela mineração, desempenhando função redistributiva e de apoio ao desenvolvimento regional. Apesar das oscilações, interpretadas como reflexo de ciclos econômicos globais, a arrecadação segue como instrumento estratégico para a viabilização de políticas públicas em territórios mineradores. O comportamento registrado no GRÁFICO 17 reforça os vínculos entre os choques externos e a resiliência fiscal do setor mineral, evidenciando seu papel como amortecedor macroeconômico em contextos de crise.

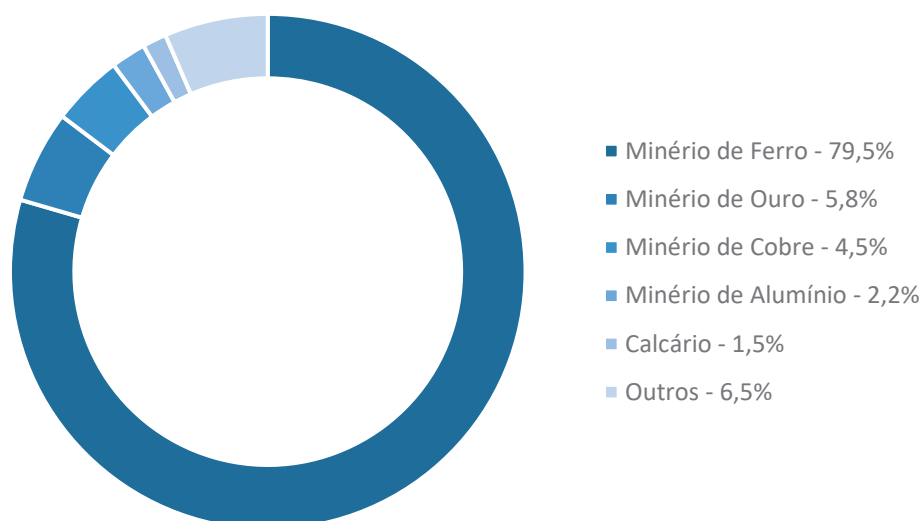
Na sequência, os GRÁFICOS 18, 19, 20 e 21 ilustram a distribuição da arrecadação da CFEM pelas principais substâncias metálicas nos anos de 2019, 2020, 2021 e 2022. O uso de gráficos de pizza reflete a integração entre rigor acadêmico associado a práticas corporativas, destacando a clareza e a objetividade na apresentação dos dados:

GRÁFICO 18 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA ARRECADAÇÃO DA CFEM POR SUBSTÂNCIA MINERAL EM 2019



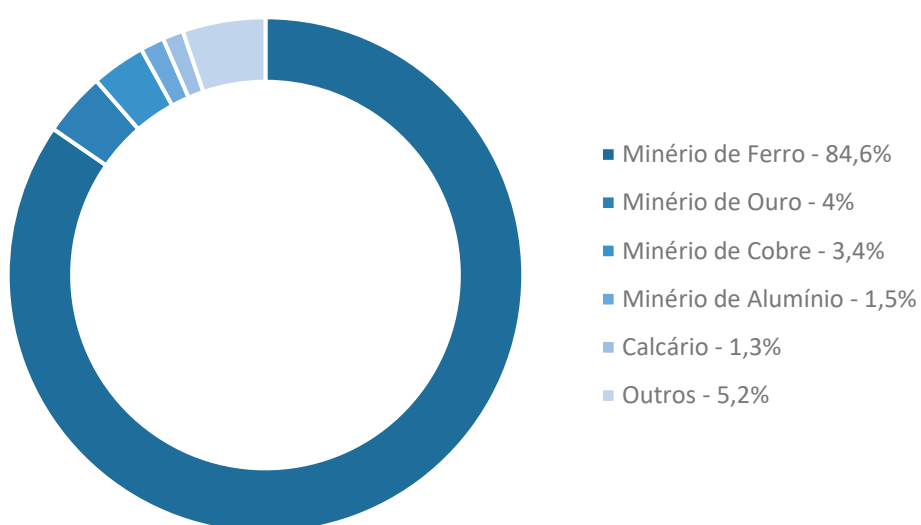
FONTE: Elaboração pelo autor, a partir de dados do CFEM (ANM), vinculada ao MME (2024).

GRÁFICO 19 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA ARRECADAÇÃO DA CFEM POR SUBSTÂNCIA MINERAL EM 2020



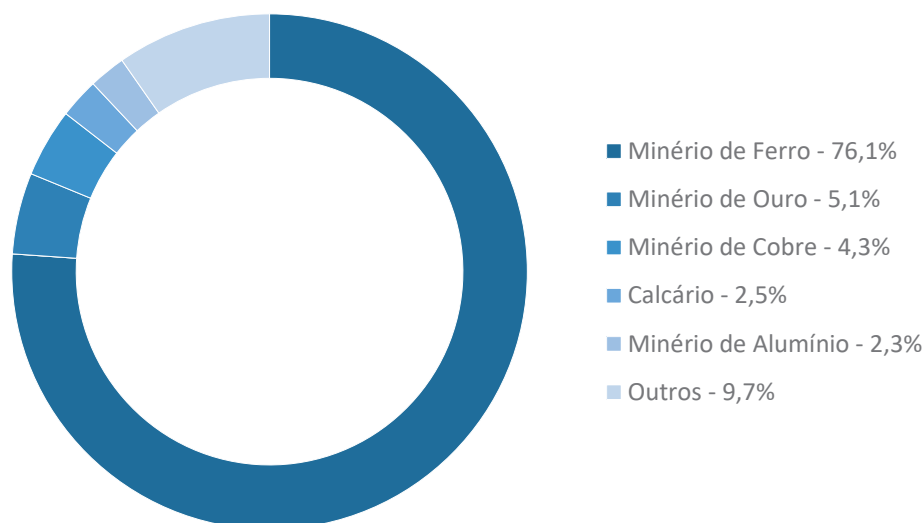
FONTE: Elaboração pelo autor, a partir de dados do CFEM (ANM), vinculada ao MME (2024).

GRÁFICO 20 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA ARRECADAÇÃO DA CFEM POR SUBSTÂNCIA MINERAL EM 2021



FONTE: Elaboração pelo autor, a partir de dados do CFEM (ANM), vinculada ao MME (2024).

GRÁFICO 21 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA ARRECADAÇÃO DA CFEM POR SUBSTÂNCIA MINERAL EM 2022



FONTE: Elaboração pelo autor, a partir de dados do CFEM (ANM), vinculada ao MME (2024).

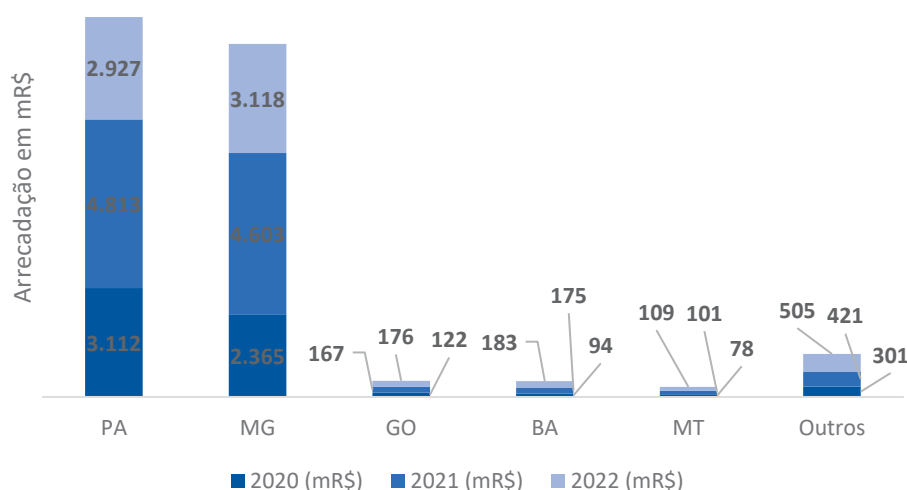
A análise dos gráficos apresentados evidencia a expressiva representatividade do minério de ferro na arrecadação da CFEM entre os anos de 2019 e 2022, consolidando-o como o principal recurso mineral do país do ponto de vista de arrecadação da CFEM. Durante esse período, o minério de ferro respondeu consistentemente por mais de 75% do total arrecadado. Esse destaque está em linha com os dados do GRÁFICO 5, do capítulo dois, que caracterizou o setor mineral brasileiro e que mostram que a participação da produção de minério de ferro na produção mineral total manteve-se acima de 35% ao longo de todo o período, superando 40% nos últimos anos da série. Esses dados reforçam a centralidade do ferro na estrutura produtiva mineral brasileira e justificam sua escolha como principal objeto de estudo desta dissertação, dada sua relevância econômica e estratégica no cenário global e nacional.

A análise comparativa entre os anos permite compreender como as oscilações na arrecadação refletem choques externos. No detalhe ano a ano, observa-se que a maior participação do minério de ferro na arrecadação ocorreu em 2021, seguida de 2020, ano da declaração da pandemia de COVID-19. Já em 2022, registrou-se a menor participação relativa no período considerado. Esse comportamento está alinhado com a trajetória de queda do preço internacional do minério, evidenciando a perda de força do mineral no pós-choque. Entre 2019 e 2021, a participação do minério de ferro na arrecadação total cresceu cerca de 40%,

reforçando seu papel como propulsor das receitas públicas no auge da valorização das *commodities*.

Dando continuidade à análise, o próximo tópico aborda a arrecadação da CFEM sob a perspectiva estadual. Conforme descrito no capítulo de metodologia, foi aplicada a *Cutoff Rule* para o recorte por estado no período de 2020 a 2022. Os estados selecionados foram Pará, Minas Gerais, Goiás, Bahia e Mato Grosso, por serem os cinco maiores arrecadadores, com base na arrecadação acumulada. Os demais estados foram agrupados na categoria "outros", de forma a facilitar a visualização e assegurar a clareza na apresentação dos dados. O GRÁFICO 22 apresenta a arrecadação por estado durante o período analisado:

GRÁFICO 22 - ARRECADAÇÃO DA CFEM POR ESTADO (2020-2022)



FONTE: Elaboração pelo autor, a partir de dados do CFEM (ANM), vinculada ao MME (2024).

De acordo com os dados do GRÁFICO 22, os estados do Pará e Minas Gerais destacaram-se como os maiores arrecadadores da CFEM no período de 2020 a 2022. O Pará foi responsável pela maior parte da arrecadação, acumulando valores de R\$ 3,11 bilhões em 2020, R\$ 4,81 bilhões em 2021 e R\$ 2,93 bilhões em 2022, totalizando R\$ 10,85 bilhões ao longo dos três anos. Minas Gerais ocupou a segunda posição, arrecadando R\$ 2.365 milhões em 2020, R\$ 4,6 bilhões em 2021 e R\$ 3.12 bilhões em 2022, somando R\$ 10,1 bilhões no período.

Os demais estados analisados apresentaram arrecadações significativamente menores. Goiás registrou um total acumulado de R\$ 465 milhões entre 2020 e 2022, enquanto a Bahia arrecadou R\$ 452 milhões no mesmo intervalo. Mato Grosso somou

R\$ 282 milhões em arrecadação nos três anos. Já os estados agrupados na categoria "outros" totalizaram R\$ 1,23 bilhões no período, destacando-se pela menor representatividade em comparação com os líderes Pará e Minas Gerais. Esses dados evidenciam a forte concentração de arrecadação nos dois estados principais, que juntos foram responsáveis por mais de 80% do total acumulado no período analisado, refletindo sua importância no setor mineral brasileiro.

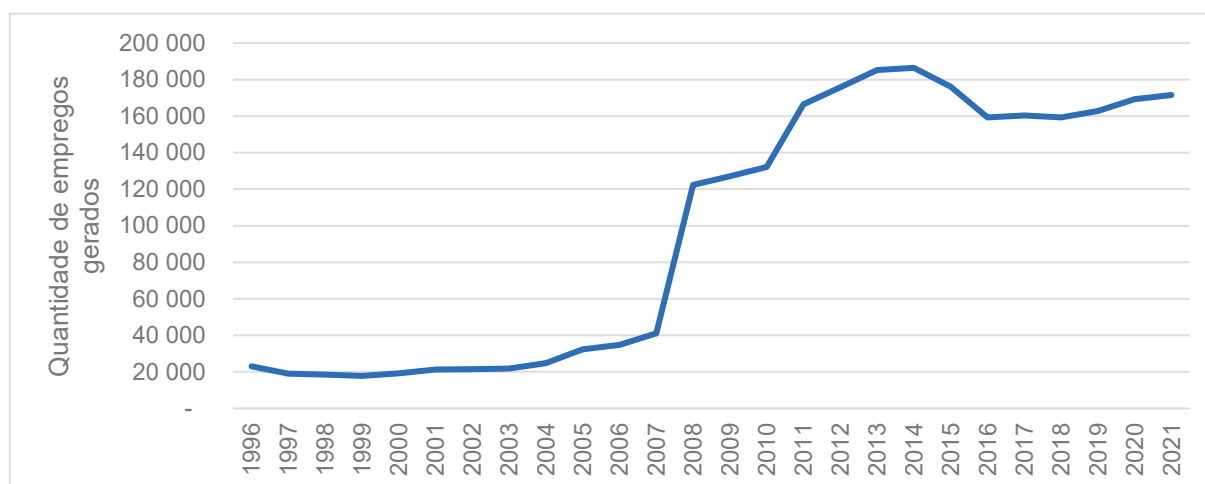
Após a análise detalhada da CFEM e de sua importância para o setor mineral brasileiro, especialmente no que se refere à sua contribuição econômica por meio da geração de receitas públicas, destaca-se também sua relevância no contexto do objetivo específico f) desta dissertação, que busca mensurar a contribuição econômica do setor mineral. O próximo subcapítulo concentra-se nos impactos econômicos da mineração, com ênfase na geração de empregos, renda e receitas líquidas.

7.3 GERAÇÃO DE EMPREGO, RENDA E RECEITAS LÍQUIDAS

Neste subcapítulo, apresentam-se as séries históricas relacionadas à geração de empregos, renda e receitas líquidas no Brasil pelas atividades da IEM. Os dados foram organizados e analisados com base nas delimitações temporais e conceituais previamente estabelecidas no capítulo de metodologia. Os resultados serão apresentados e analisados em três gráficos a seguir, uma escolha que permite uma visualização mais clara e objetiva.

A série histórica de geração de empregos é sintetizada e exibida no GRÁFICO 23, que destaca a evolução dos empregos diretos gerados pela IEM, conforme as divisões e limitações adotadas neste estudo:

GRÁFICO 23 - GERAÇÃO DE EMPREGO PELA IEM (1996-2021)



FONTE: Elaborado pelo autor com base em dados extraídos da PIA, em plataforma disponível pelo IBGE (2024).

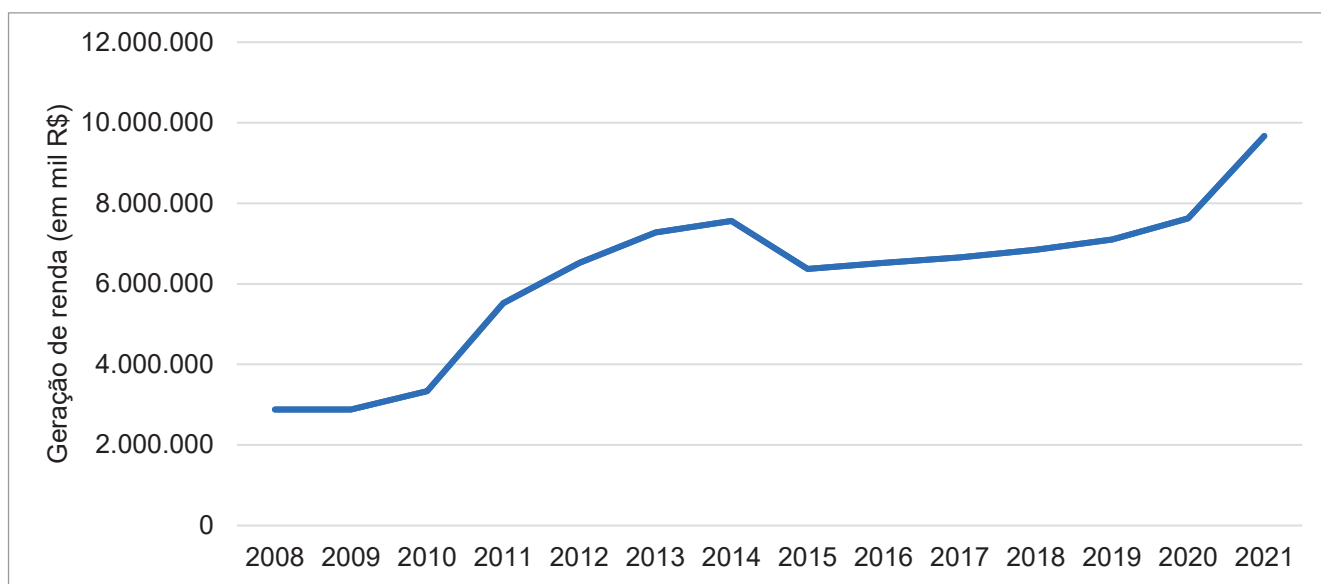
De acordo com o GRÁFICO 23, observa-se um aumento expressivo no número de empregos diretos gerados pelo setor mineral entre 2007 e 2008, salto que pode estar relacionado à CNAE 2.0, implementada pelo IBGE naquele ano, conforme detalhado no capítulo de metodologia desta dissertação. Essa mudança ampliou o escopo das atividades industriais extrativas mapeadas, impactando diretamente os dados de emprego a partir daquele ponto.

Dando continuidade à análise do GRÁFICO 23, nota-se que o crescimento no número de empregos no setor mineral retomou a partir de 2019. Esse padrão de crescimento se manteve ao longo dos dois anos seguintes, mesmo diante do choque externo provocado pela pandemia de COVID-19. Apesar do contexto adverso da economia global a partir de março de 2020, com forte desaceleração do comércio internacional e retração de empregos em diversos setores no Brasil, conforme visto no capítulo quatro desta dissertação, o setor mineral não apenas preservou seu nível de ocupação, como ampliou sua força de trabalho, indicando que a robustez da cadeia mineral contribuiu para a resiliência do setor diante do choque global e reforçou sua capacidade de geração de emprego mesmo em contextos de crise. Entre 2018 e 2019, o número de empregos aumentou em 2,26%. Em 2020, esse número subiu para 169.270, representando uma elevação de 3,97% em relação ao ano anterior. Já em 2021, o total chegou a 171.461 empregos, um crescimento adicional de 1,29% sobre o patamar de 2020. Esse crescimento sustentado ao longo do período coincide com

um pico das exportações brasileiras de minério de ferro em valor FOB durante a pandemia, conforme evidenciado no subcapítulo anterior.

No que diz respeito à geração de renda no setor, os dados são apresentados em valores denominados "em mil R\$". Dessa forma, para interpretar os valores indicados no GRÁFICO 24 a seguir, é necessário multiplicar os números apresentados por mil, a fim de se obter o montante real:

GRÁFICO 24 - GERAÇÃO DE RENDA PELA IEM (2008-2021)



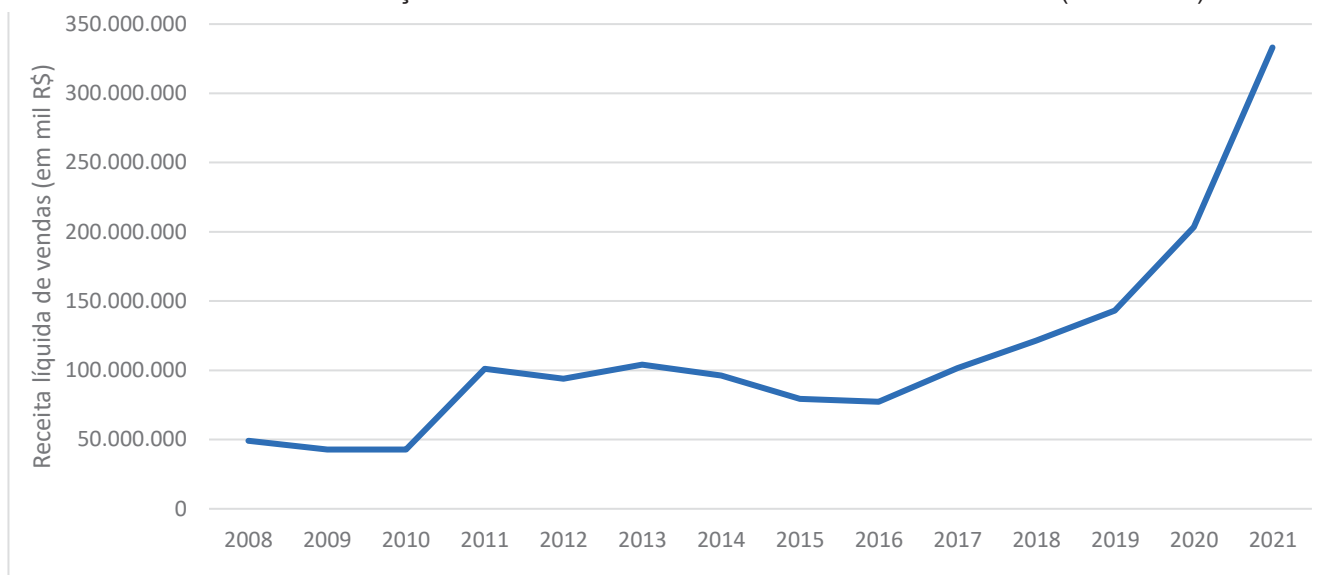
FONTE: Elaborado pelo autor com base em dados extraídos da PIA, em plataforma disponível pelo IBGE (2024).

O GRÁFICO 24 apresenta um salto significativo nas receitas a partir de 2010, com os valores se estabilizando em patamares relativamente mais elevados até 2014. Após um certo declínio e período de relativa estagnação entre 2015 e 2019, o setor experimentou uma nova alta em 2020 e 2021, período em que as receitas da mineração aumentaram devido à forte expansão das exportações de minérios durante o choque externo da COVID-19.

O GRÁFICO 25 apresenta a evolução da receita líquida de vendas ao longo do período analisado. Na PIA, esses valores são apresentados na categoria "em mil R\$", o que significa que, no GRÁFICO 25, os valores exibidos na série histórica, que

abrange os anos de 2008 a 2021, devem ser multiplicados por mil para se obterem os montantes reais:

GRÁFICO 25 - GERAÇÃO DE RENDA RECEITA LÍQUIDA DE VENDAS IEM (2008-2021)



FONTE: Elaborado pelo autor com base em dados extraídos da PIA, em plataforma disponível pelo IBGE (2024).

De acordo com o GRÁFICO 25, as receitas líquidas de vendas da IEM apresentaram um crescimento expressivo nos anos mais recentes da série. Entre 2019 e 2020, observa-se um aumento de aproximadamente 42%, seguido por um salto ainda mais acentuado de 64% entre 2020 e 2021. Esse desempenho evidencia uma expansão significativa da geração de renda no setor durante o período da pandemia de COVID-19, em linha com o pico das exportações observado no subcapítulo anterior. Contudo, ao comparar a evolução das receitas com a geração de empregos e salários, evidencia-se uma disparidade relevante. Enquanto a arrecadação e as receitas das cresceram em ritmo acelerado, o número de empregos e o volume de massa salarial não acompanharam a mesma tendência, conforme demonstrado nos gráficos anteriores. Essa assimetria reforça um dos pontos discutidos no capítulo cinco desta dissertação, ao indicar que parte expressiva dos ganhos econômicos permanece concentrada nas empresas, com limitada redistribuição via emprego e renda. Tal configuração pode ser interpretada como indício de uma externalidade negativa de natureza econômica, marcada por desequilíbrio na apropriação dos benefícios gerados pela atividade mineral.

Os resultados apresentados neste subcapítulo dialogam com o objetivo específico d), ao mensurar os impactos econômicos da pandemia de COVID-19 sobre

variáveis como emprego, renda e receita líquida, e com o objetivo f), ao revelar assimetrias na apropriação dos ganhos econômicos, que contribuem para a compreensão das externalidades negativas de natureza econômica associadas à atividade mineral. Compreendidos os impactos do choque externo da pandemia de COVID-19 sobre o setor no contexto de geração de emprego, renda e receitas líquidas, direciona-se agora a análise para os efeitos da invasão da Rússia à Ucrânia sobre o preço do nitrato de amônio.

7.4 EFEITOS DO CHOQUE EXTERNO DA INVASÃO DA RÚSSIA À UCRÂNIA NO PREÇO DO NITRATO DE AMÔNIO

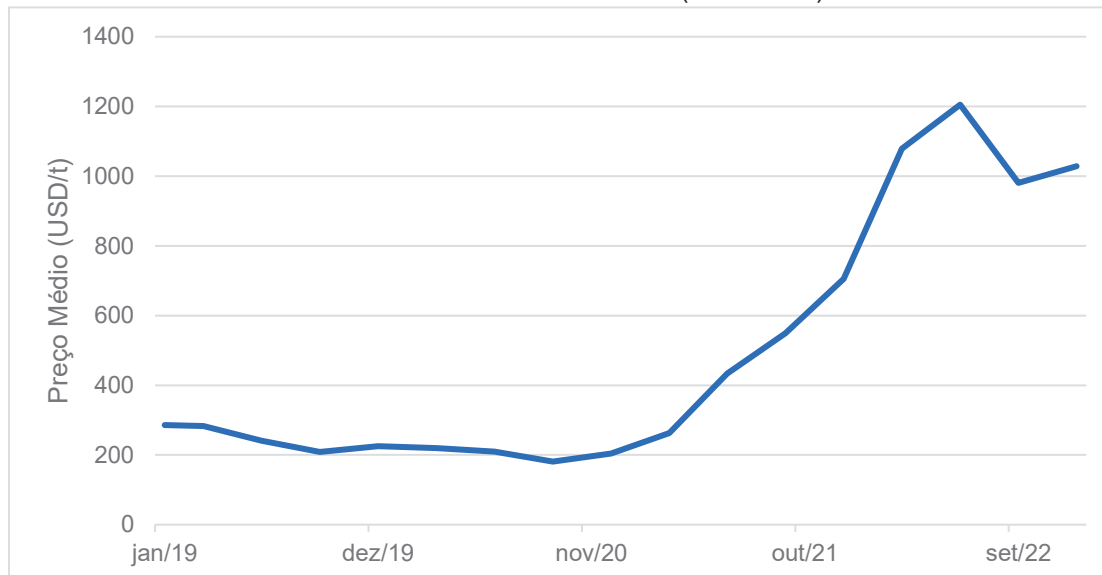
Conforme explorado no subtópico 4.3.1, que trata dos impactos da invasão da Rússia à Ucrânia, esse evento provocou disrupções significativas nas cadeias globais de suprimentos de *commodities* estratégicas. Diversos países e blocos econômicos impuseram sanções à Rússia, restringindo severamente o comércio de bens essenciais, incluindo fertilizantes nitrogenados. Essas medidas afetaram diretamente o nitrato de amônio, insumo estratégico tanto para a fabricação de explosivos utilizados na mineração quanto para fertilizantes na agroindústria, considerando que a Rússia é a maior produtora mundial dessa *commodity*. Como consequência, as sanções não apenas reduziram a oferta global do produto, como também provocaram elevações expressivas nos preços, evidenciando a volatilidade do mercado.

Para ilustrar os impactos destas sanções sobre os preços do nitrato de amônio, foram utilizados três indicadores distintos: (i) o indicador FOB Mar Negro, (ii) o indicador FOB do Mar Báltico, e (iii) o índice de preços ao produtor (PPI) do BLS. A análise conjunta desses dados permite compreender diferentes dimensões da dinâmica de preços, considerando distintas fontes geográficas e metodológicas.

O indicador FOB Mar Negro é amplamente reconhecido como a principal referência global para a precificação do nitrato de amônio, especialmente no mercado russo, que lidera a produção mundial desse insumo. Trata-se de um parâmetro utilizado para formular o preço do nitrato produzido na Rússia, cujo principal canal de escoamento é justamente o Mar Negro. O GRÁFICO 26, cujas limitações metodológicas estão detalhadas no capítulo de metodologia desta dissertação, retrata os preços médios mensais do nitrato de amônio com base no indicador FOB Mar

Negro, no qual o eixo vertical representa os preços em dólares por tonelada (USD/t) e o eixo horizontal apresenta o período analisado em anos:

GRÁFICO 26 - PREÇOS MÉDIOS TRIMESTRAIS DE NITRATO DE AMÔNIO COM BASE NO INDICADOR FOB MAR NEGRO (2019-2022)



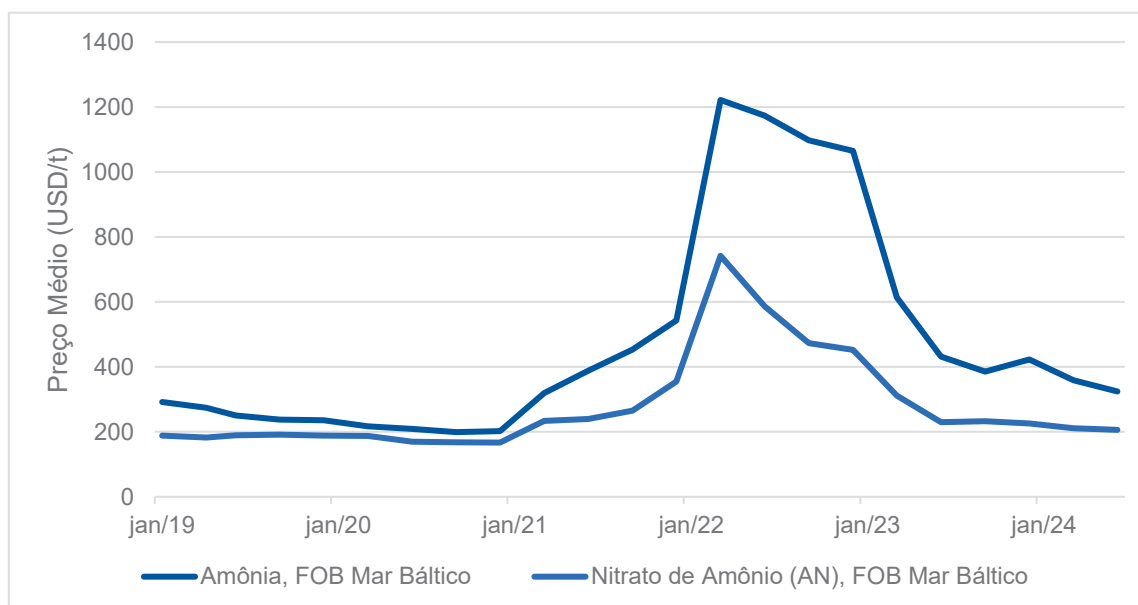
FONTE: Elaborado pelo autor com base em dados extraídos dos relatórios de investidores da Yara International (2024).

O GRÁFICO 26 demonstra uma relativa estabilidade nos preços do nitrato de amônio entre 2019 e 2020, com valores médios trimestrais oscilando entre aproximadamente 190 e 280 USD/t. A partir do segundo semestre de 2021, observa-se uma trajetória ascendente acentuada, intensificada no início de 2022, coincidindo com a invasão da Rússia à Ucrânia. O preço médio saltou de cerca de 710 USD/t no último trimestre de 2021 para um pico de aproximadamente 1.200 USD/t no segundo trimestre de 2022, representando um aumento superior a 69% em apenas dois trimestres. A posterior redução nos valores, observada a partir do terceiro trimestre de 2022, indica uma relativa adaptação do mercado, embora os preços tenham se mantido em patamar superior ao período pré-crise. O GRÁFICO 26, por se basear no principal indicador de preços globais de nitrato de amônio, oferece uma visão clara sobre como choques externos, como a invasão da Ucrânia, podem influenciar diretamente os mercados de *commodities* estratégicas.

Complementando essa análise, o GRÁFICO 27, cujas limitações metodológicas estão detalhadas no capítulo de metodologia desta dissertação, apresenta os preços médios trimestrais de dois produtos-chave do indicador FOR Mar

Báltico, amônia e nitrato de amônio, no período de janeiro de 2019 a junho de 2024, em que o eixo vertical representa o preço médio em dólares por tonelada (USD/t) e o eixo horizontal exibe o período analisado em anos:

GRÁFICO 27 - PREÇOS MÉDIOS TRIMESTRAIS DE FERTILIZANTES COM BASE NO INDICADOR FOB MAR BÁLTICO (2019-2024)

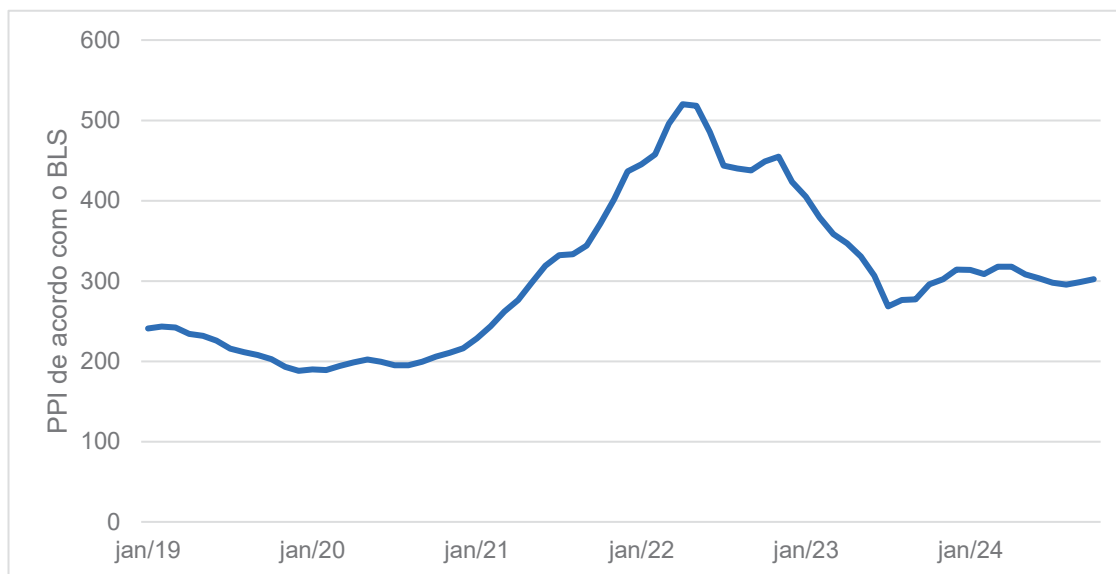


FONTE: Elaborado pelo autor com base em dados da Fertecon, FMB, The Market, obtidos através do relatório de investidores da Acron (2024).

A análise dos preços médios trimestrais pelo indicador FOB Mar Báltico no GRÁFICO 27 evidencia novamente uma estabilidade relativa no mercado de fertilizantes entre 2019 e 2021. Contudo, observa-se uma vez mais um aumento acentuado nos preços a partir de 2022, coincidindo com a invasão da Ucrânia pela Rússia. Após o pico de preços observado em 2022, o mercado parece ter iniciado um processo de estabilização gradual, com declínio nos valores até 2024.

Por fim, o GRÁFICO 28, cujas limitações metodológicas estão detalhadas no capítulo de metodologia desta dissertação, gerado com dados do BLS, apresenta o indicador de preços ao produtor de fertilizantes no eixo vertical (PPI) ao longo do tempo no eixo horizontal (ano), no período de janeiro de 2019 a outubro de 2024:

GRÁFICO 28 - VARIAÇÃO DO PPI PARA FERTILIZANTES SEGUNDO DADOS DO BLS (2019-2024)



FONTE: Elaborado pelo autor com base nos dados do BLS (2024).

Nota-se pelo GRÁFICO 28, pela terceira vez, por um terceiro indicador distinto, uma relativa estabilidade nos preços entre 2019 e 2021, seguida por um aumento acentuado em 2022, quando os valores atingiram o pico mais elevado. Embora o PPI do BLS não seja o índice principal, ele pertence a uma fonte primária americana, e reforça a tendência observada nos demais indicadores, corroborando a tese de que o choque geopolítico influenciou significativamente os preços do nitrato de amônio.

A análise integrada dos gráficos apresentados permite compreender, de forma clara, o impacto da invasão da Rússia à Ucrânia sobre a dinâmica de preços globais do nitrato de amônio, da amônia e dos fertilizantes em geral. Observa-se uma elevação abrupta dos preços a partir do primeiro trimestre de 2022, coincidindo com a intensificação do conflito e a imposição de sanções econômicas que restringiram severamente o comércio de insumos estratégicos oriundos da Rússia. Essa alta foi seguida por um movimento de estabilização, ainda que em patamares superiores aos níveis pré-invasão, refletindo a reorganização das cadeias de suprimento.

Os dados refletem a dinâmica de preços em um mercado diretamente influenciado por eventos geopolíticos significativos, destacando o impacto do choque externo da invasão da Ucrânia pela Rússia sobre os preços de fertilizantes. Esse comportamento se deve tanto às restrições comerciais impostas ao maior produtor mundial quanto à busca emergencial por novos fornecedores, em substituição ao

fornecimento tradicional. No contexto latino-americano, a ruptura abrupta da cadeia de suprimento russa levou empresas de mineração a recorrerem, com urgência, a alternativas como Yara (Suécia e Egito), Enaex (Chile) e Drey Moor (Geórgia), em operações *spot* que elevaram temporariamente os custos operacionais. A partir da experiência profissional do autor, pode-se inferir que o retorno a uma trajetória de preços mais estável foi impulsionado pela transição para contratos estruturados com esses novos fornecedores.

Assim, os gráficos não apenas ilustram a volatilidade do mercado no curto prazo, mas também ajudam a compreender os mecanismos de adaptação e resposta adotados por agentes econômicos em face de choques externos. A trajetória observada revela o papel crítico do nitrato de amônio enquanto *commodity* estratégica, tanto para o setor mineral quanto para o agronegócio, e reforça a importância de análises que integrem dados empíricos, indicadores econômicos e vivências práticas do setor. Dado a este contexto, este subcapítulo finalizará com uma análise das adaptações no mercado nacional e perspectivas globais para fornecedores de fertilizantes.

7.4.1 Adaptações no mercado nacional e perspectivas globais para fornecedores de fertilizantes

E para concluir os resultados, este subtópico explora como a combinação de choques externos, como o conflito na Ucrânia, e a estrutura fragilizada da produção interna, afetam mais a competitividade agrícola do país, que o setor mineral. São discutidas as respostas nacionais para mitigar essas vulnerabilidades, incluindo iniciativas de diversificação de fornecedores e fortalecimento da produção local, além de tendências globais que moldam o mercado de fertilizantes, com foco nas oportunidades e limitações para o setor brasileiro.

As sanções ocidentais à Rússia interromperam os embarques de insumos essenciais, como amônia, potássio e nitrato de amônio, afetando a oferta global. No entanto, ao não aderir às sanções, o Brasil se posicionou como um destino estratégico para os fertilizantes russos, que representavam uma alternativa para os produtores manterem a produção ativa e minimizarem os efeitos das restrições comerciais.

Entre 1998 e 2021, a dependência brasileira de fertilizantes importados aumentou significativamente, enquanto a produção nacional apresentou queda. Essa

estrutura fragilizada foi exacerbada pelo conflito na Ucrânia, pressionando custos agrícolas e elevando os preços dos alimentos. A dependência de fertilizantes importados é uma vulnerabilidade estratégica do Brasil, que demanda estratégias para diversificar fornecedores e investir na produção interna (Souza; Ribeiro, 2022).

A eliminação da alíquota de importação em 1997 desestimulou a produção nacional e consolidou o Brasil como um dos maiores consumidores globais de fertilizantes, com cerca de 85% de sua demanda suprida por importações (Brasil, 2022). Essa dependência estrutural amplia os impactos de choques externos, como o conflito na Ucrânia, afetando diretamente a competitividade do agronegócio nacional.

Diante desse cenário, iniciativas nacionais têm buscado mitigar os impactos das oscilações globais. O Plano Nacional de Fertilizantes (Brasil, 2022) propõe reduzir a dependência de importações para 60% até 2050, incentivando a produção local, diversificando fornecedores e modernizando a logística. Essas medidas visam promover maior segurança alimentar e competitividade para o setor agrícola.

No cenário global, a diversificação de fornecedores se mostra essencial. Empresas como Yara International, desempenham papéis estratégicos na garantia da oferta de nitrato de amônio e outros insumos essenciais na América Latina. Como apontado por Souza e Ribeiro (2022), iniciativas que fomentem o uso de fertilizantes organominerais e estratégias de diversificação podem fortalecer a resiliência do setor no Brasil. No entanto, a dependência de preços internacionais e a vulnerabilidade da logística interna continuam sendo desafios significativos. Carvalho e Pereira (2021) observam que as oscilações nos preços dos fertilizantes impactam diretamente a produtividade agrícola, destacando a necessidade de políticas públicas que assegurem maior previsibilidade e eficiência no uso desses insumos.

O mercado global de nitrato de amônio, avaliado em US\$ 18,38 bilhões em 2023, tem projeções otimistas, com expectativa de crescimento para US\$ 25,86 bilhões até 2031, segundo a *Coherent Market Insights* (2024). Esse aumento será impulsionado por:

- **Expansão das atividades de mineração**, principalmente em economias emergentes que demandam explosivos à base de nitrato de amônio.
- **Investimentos em infraestrutura**, que utilizam esses explosivos para construção de estradas, ferrovias e barragens.
- **Crescimento agrícola global**, que reforça a relevância do nitrato como fertilizante de alto rendimento.

No entanto, desafios permanecem. A volatilidade dos preços de matérias-primas, as regulamentações mais rígidas e a concorrência de substitutos, como o sulfato de amônio, podem limitar o crescimento. Apesar disso, o mercado brasileiro e a América Latina se destacam como regiões estratégicas para o setor, devido à combinação de demandas crescentes e pressões para maior autossuficiência.

A análise apresentada reforça a complexidade do mercado de nitrato de amônio no Brasil, influenciada tanto por dinâmicas globais quanto por particularidades locais. A necessidade de fortalecer a indústria nacional, enfrentar os desafios da dependência externa e equilibrar políticas de proteção econômica com os interesses de consumo interno permanece como uma questão central para o futuro do setor.

Os dados analisados neste subcapítulo complementam com evidências empíricas a análise sobre como a invasão da Rússia à Ucrânia afetou profundamente a cadeia global de suprimento de nitrato de amônio, elevando seu preço, restringindo o acesso a esse insumo essencial e desorganizando fluxos comerciais consolidados. Para o setor mineral brasileiro, tais impactos foram especialmente sentidos por empresas com menor capacidade de resposta tecnológica ou dependentes de contratos com fornecedores externos, principalmente, os russos. A experiência do autor reforça que, diante da escassez e da elevação de preços, a adoção de medidas emergenciais como compras *spot* tornou-se prática comum, gerando pressões adicionais sobre os custos de produção.

Esse cenário está diretamente relacionado à pergunta-problema da dissertação, ao demonstrar os impactos da invasão da Rússia à Ucrânia sobre o preço do nitrato de amônio, uma *commodity* essencial para a cadeia produtiva da mineração. Ao mesmo tempo, os achados aqui apresentados dialogam com o objetivo geral do trabalho, que é analisar os efeitos desse choque externo sobre a variação do preço do nitrato de amônio.

Em especial, este subcapítulo contribui para o cumprimento do objetivo específico (c), ao analisar os impactos da invasão da Rússia à Ucrânia sobre a volatilidade do preço do nitrato de amônio, com foco em suas implicações para a cadeia produtiva da mineração. A partir da análise dos indicadores de preços, da experiência prática relatada e da contextualização do mercado latino-americano, ficou evidente que este choque externo afetou tanto a estrutura de custos quanto a capacidade de resposta das empresas, principalmente quando não há alternativas internas de produção ou estoques estratégicos. Essa constatação reforça a importância de políticas industriais

voltadas à diversificação de fornecedores, à produção nacional de insumos estratégicos e à redução da vulnerabilidade externa do setor.

A análise desenvolvida ao longo deste capítulo confirma a centralidade do setor mineral brasileiro, principalmente em cenários de choques externos, como demonstrado no caso da pandemia de COVID-19. O minério de ferro, principal produto de exportação do setor, mostrou-se decisivo para sustentar o saldo comercial do país em 2021, com forte elevação das receitas cambiais, da arrecadação da CFEM e da manutenção, e até mesmo geração de novos empregos durante o período da pandemia. Entretanto, esse desempenho revela também fragilidades estruturais, como a excessiva concentração da pauta exportadora em *commodities* primárias, a forte dependência de insumos estratégicos importados e a elevação da renda mineral em proporção superior à geração de empregos, evidenciando um padrão de crescimento que aprofunda desigualdades e limita os efeitos redistributivos da atividade mineral.

A vulnerabilidade associada ao nitrato de amônio, evidenciada pela escalada de preços e pela restrição de fornecimento observada durante o choque externo da invasão da Rússia à Ucrânia, expôs a fragilidade da cadeia de suprimentos desta *commodity*, especialmente em setores dependentes da importação desse insumo. Esse contexto exige o repensar do uso, da forma de aquisição e da gestão de estoques de nitrato, com destaque para a adoção de soluções que reduzam a exposição a riscos externos. Nesse cenário, ganha relevância a Indústria 4.0 e suas tecnologias, que podem contribuir para a otimização do uso de insumos como o nitrato de amônio, mitigando riscos de desabastecimento ou de aumento abrupto de custos, ainda que sem substituí-los.

A partir dos dados empíricos apresentados, observa-se que este capítulo contribui diretamente para o cumprimento do objetivo específico b), ao analisar os impactos da extração e exportação de minério de ferro para a economia nacional durante o choque externo da pandemia de COVID-19. Além disso, também se relaciona ao objetivo específico c), ao analisar os impactos da invasão da Rússia à Ucrânia sobre a variação do preço do nitrato de amônio. Por fim, este capítulo reforça o objetivo específico f), ao mensurar a contribuição econômica do setor mineral brasileiro para a economia nacional, com ênfase na extração e exportação de minério de ferro, especialmente no contexto do choque externo da pandemia de COVID-19.

Ao analisar os efeitos dos choques externos sobre o setor mineral e a vulnerabilidade estrutural da cadeia produtiva brasileira com dados empíricos, este capítulo também se conecta com os fundamentos teóricos apresentados no capítulo dois, que caracterizou o setor mineral e destacou sua relevância histórica e econômica. Da mesma forma, reforça os argumentos do capítulo três, que abordou a Indústria 4.0 como estratégia para aumentar a eficiência produtiva, reduzir custos e permitir a ampliação da exploração de minerais estratégicos, elementos centrais para a construção de um setor mais adaptado às exigências do futuro. Além disso, este capítulo mantém relação direta com os capítulos quatro e cinco, ao apresentar dados empíricos que complementam a análise dos choques externos e das externalidades negativas, sobretudo as de natureza econômica, como o aumento do número de empregos que não foi acompanhado por uma elevação proporcional das remunerações. Dessa forma, os resultados aqui apresentados dialogam também com os objetivos específicos d) e e).

A apresentação das evidências empíricas desenvolvidas neste capítulo, em articulação com os fundamentos teóricos previamente discutidos, reforça a urgência de uma estratégia nacional integrada que combine política industrial, inovação tecnológica e segurança no suprimento de insumos, de modo a reduzir a dependência externa e fortalecer a resiliência do setor mineral frente a crises globais. Passa-se agora às considerações finais, onde serão sintetizados os principais achados do trabalho, suas contribuições teóricas e práticas, e apresentadas recomendações para futuras pesquisas e formulação de políticas públicas.

Encerrando a análise desenvolvida neste capítulo, observa-se que os resultados empíricos, quando articulados à discussão teórica previamente apresentada, evidenciam a necessidade de uma estratégia nacional que combine política industrial, inovação tecnológica e segurança no suprimento de insumos, a fim de reduzir a dependência externa e promover maior resiliência do setor mineral diante de choques globais. Passa-se agora às considerações finais, onde serão sintetizados os principais achados do trabalho, suas contribuições teóricas e práticas, e apresentadas recomendações para futuras pesquisas e formulação de políticas públicas.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação buscou responder à seguinte pergunta central: quais os impactos dos choques externos da pandemia de COVID-19 e da invasão da Rússia à Ucrânia sobre a dinâmica do setor mineral, com foco no contexto brasileiro, e qual o papel das tecnologias da Indústria 4.0 e dos minerais estratégicos na construção de um setor mais resiliente? Para tanto, o trabalho articulou análise teórica, levantamento empírico e investigação setorial, abordando os efeitos econômicos observáveis desses choques sobre variáveis como exportações, arrecadação e preços de *commodities* estratégicas, bem como o potencial da inovação tecnológica e da diversificação mineral para fortalecer a segurança produtiva e reduzir vulnerabilidades estruturais.

As evidências empíricas obtidas ao longo do trabalho permitiram responder de forma clara e objetiva à pergunta-problema. Verificou-se que, durante a pandemia de COVID-19, o setor mineral teve papel decisivo na manutenção do superávit comercial brasileiro, com destaque para o minério de ferro, cujas exportações atingiram US\$ 61 bilhões FOB em 2021, valor 39% superior ao de 2020. O desempenho também foi acompanhado por aumento de empregos diretos e pela arrecadação recorde da CFEM. Já o choque externo associado à invasão da Rússia à Ucrânia impactou fortemente o custo do nitrato de amônio, insumo essencial para a atividade mineral, que apresentou aumento de até 51% entre dezembro de 2021 e abril de 2022. Essa oscilação evidenciou a vulnerabilidade da cadeia produtiva mineral à dependência de insumos importados. Os dados também revelaram a elevada concentração da pauta exportadora brasileira e o risco sistêmico associado à estrutura produtiva primária.

Todos os objetivos específicos definidos na introdução foram plenamente atendidos. O trabalho caracterizou o setor mineral com foco na extração e exportação de minério de ferro em 2021, mensurou sua contribuição econômica por meio da análise de dados de exportações, emprego e arrecadação, avaliou as externalidades negativas socioambientais e econômicas associadas à atividade de mineração no Brasil, e examinou, de forma sistematizada, o papel das tecnologias da Indústria 4.0 e dos minerais estratégicos na construção de um setor mais resiliente. Cada objetivo foi diretamente abordado por um ou mais indicadores empíricos. Por exemplo, o impacto da pandemia foi mensurado pelas séries de comércio exterior e CFEM; o

efeito da invasão da Rússia à Ucrânia foi capturado pela análise dos preços internacionais de nitrato de amônio; a resiliência tecnológica foi avaliada a partir da literatura, de dados sobre reservas e produção de minerais estratégicos e da adoção de tecnologias em operações no Brasil; e os impactos ambientais foram examinados com base em dados oficiais, relatórios de incidentes e estudos de caso destacados no Capítulo cinco.

A complexidade metodológica enfrentada ao longo da pesquisa reforça o ineditismo e a robustez analítica do trabalho. Foram integradas diversas bases nacionais e internacionais, como ANM, ComexStat, FRED, FMI, relatórios corporativos, como o da Vale, Yara e Acron, com diferentes formatos, frequências e unidades. Foi necessário padronizar séries, realizar interpolação de dados, construir indicadores próprios e desenvolver representações gráficas inéditas, como a evolução da participação do minério de ferro na pauta exportadora ou a série de preços do nitrato de amônio. Esses dados não estão disponíveis de forma consolidada em relatórios oficiais, e sua construção exigiu tratamento técnico e cruzamento criterioso de informações. A metodologia adotada permitiu evidenciar empiricamente os efeitos concretos dos choques externos e subsidiar a análise crítica proposta nos capítulos analíticos.

Do ponto de vista científico, a pesquisa preenche uma lacuna importante na literatura ao tratar, com dados recentes, dos efeitos econômicos de choques externos sobre o setor mineral brasileiro, além de inserir a discussão sobre a Indústria 4.0 em um contexto ainda pouco explorado no setor extrativo. Do ponto de vista prático, o trabalho oferece subsídios relevantes para a formulação de políticas públicas voltadas à segurança de insumos estratégicos, à diversificação produtiva e à integração tecnológica. A análise reforça a necessidade de reduzir a vulnerabilidade estrutural do setor e aumentar sua resiliência frente a choques externos, especialmente diante da crescente complexidade das cadeias produtivas internacionais.

O trabalho também abre espaço para investigações futuras. Sugere-se aprofundar a análise da Indústria 4.0 a partir de estudos de caso em operações mineradoras específicas, investigar o papel de outros minerais estratégicos além do ferro, nióbio e cromo, incorporar de forma mais direta os impactos ambientais na análise econômica, a partir de dados já mapeados no capítulo cinco, e estender o modelo analítico para novos choques externos, como eventos climáticos extremos, mudanças regulatórias ou tensões geopolíticas em outras regiões.

Reafirma-se, por fim, que o setor mineral brasileiro pode e deve assumir papel estratégico em um cenário internacional cada vez mais volátil. Para isso, é imprescindível avançar na adoção de tecnologias da Indústria 4.0, fortalecer cadeias internas de fornecimento de minerais estratégicos e alinhar políticas públicas e estratégias empresariais à lógica da resiliência produtiva. Somente assim será possível garantir um desenvolvimento econômico mais seguro, autônomo e sustentável para o país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACRON. For analytics. 2024. Relatório a investidores. Disponível em: <https://www.acron.ru/en/investors/for-analytics/analytis-info/>. Acesso em: 27 nov. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro: prévia 2022**. Brasília: ANM, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Base de dados DIPEM – Estatísticas da Produção Mineral. Brasília: ANM, 2024. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Pesquisa/DadosEstatisticos>. Acesso em: 8 jun. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Boletim de recursos minerais: terras raras**. Brasília: ANM, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/noticias/boletim-terras-raras>. Acesso em: 7 nov. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. CFEM – Arrecadação por estado. Disponível em: https://sistemas.anm.gov.br/arrecadacao/extra/relatorios/arrecadacao_cfem.aspx. Acesso em: 21 nov. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Coleção Anuário Mineral Brasileiro. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/>. Acesso em: 7 nov. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Painel de Investimentos do Setor Mineral. GEO ANM, 2024. Disponível em: <https://geo.anm.gov.br/portal/apps/dashboards/3a3d30677bb743e2901818e906257ce4>. Acesso em: 17 jun. 2025.

ANGLO AMERICAN. Anglo American dá mais um passo rumo à mina moderna com lançamento de perfuratriz autônoma. **Anglo American Brasil**, 16 set. 2024. Disponível em: <https://brasil.angloamerican.com/pt-pt/imprensa/noticias/2024/16-09-2024>. Acesso em: 6 nov. 2024.

ANGLO AMERICAN BRASIL. Nossos negócios. 2024. Disponível em: <https://brasil.angloamerican.com/pt-pt/nossos-negocios>. Acesso em: 17 nov. 2024.

AMARAL, C. H. O. **Minério de ferro e uma análise histórica da sua relevância no contexto econômico e financeiro brasileiro**. 2024. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/260808>. Acesso em: 4 nov. 2024.

ANGLOGOLD ASHANTI. Centro de Memória. Disponível em: <https://www.anglogoldashanti.com.br/sobre/centro-de-memoria/>. Acesso em: 25 nov. 2024.

ASSOCIATED PRESS. Brazil mine disaster victims can proceed with \$12 billion lawsuit against BHP in Britain, judge rules. **Associated Press**, 21 out. 2024. Disponível em: <https://apnews.com/article/brazil-mine-disaster-bhp-lawsuit-britain-0c56e57e70c92b8dc99b04ac34962cf2>. Acesso em: 17 nov. 2024.

BAETA, N. P. Pioneirismo de Monlevade na implantação da siderurgia em Minas Gerais. **Revista da Fundação João Pinheiro**, v. 1, n. 2/4, p. 64-67, 1971.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Séries temporais – Taxa de câmbio comercial (venda). Brasília: BCB, 2024. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/historicotaxascambio>. Acesso em: 8 jun. 2025.

BANCO MUNDIAL. Choques nos preços de alimentos e energia decorrentes da guerra na Ucrânia. **Banco Mundial**, 26 abr. 2022a. Disponível em: <https://www.bancomundial.org/pt/news/press-release/2022/04/26/food-and-energy-price-shocks-from-ukraine-war>. Acesso em: 22 nov. 2024.

BANCO MUNDIAL. Commodity markets outlook: the impact of the war in Ukraine on commodity markets. **Banco Mundial**, Washington, D.C., abr. 2022b. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/37223>. Acesso em: 30 nov. 2024.

BERTENE, L. Manutenção preditiva de ferramentas de corte com IA na ArcelorMittal. **Compraço**, 9 set. 2024a. Disponível em: <https://compraco.com.br/ar/blogs/atualidades-e-noticias/manutencao-preditiva-de-ferramentas-de-corte-com-ia-na-arcelormittal>. Acesso em: 7 nov. 2024.

BERTENE, L. Usiminas e manutenção preditiva com inteligência artificial: otimizando a eficiência operacional. **Compraço**, 9 set. 2024b. Disponível em: <https://compraco.com.br/ar/blogs/atualidades-e-noticias/usiminas-e-manutencao-preditiva-com-inteligencia-artificial-otimizando-a-eficiencia-operacional>. Acesso em: 7 nov. 2024.

BHP. Escondida mine: the world's largest copper mine. Disponível em: <https://www.bhp.com/what-we-do/global-locations/chile/escondida>. Acesso em: 17 nov. 2024.

BINNEMANS, K.; JONES, P. T.; BLANPAIN, B.; GERVEN, T. V.; YANG, Y.; WALTON, A.; BUCHERT, M. Recycling of rare earths: a critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 51, p. 1-22, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652612006932?via%3Di> hub. Acesso em: 22 out. 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>.

BLOG DA ENGENHARIA. **Por que ventilar uma mina subterrânea? Parte 2.**

[Imagem]. Disponível em: <https://blogdaengenharia.com/engenharia/engenharia-de-agrimensura-e-cartografica/por-que-ventilar-uma-mina-subterranea-parte-2/>. Acesso em: 12 out. 2024.

BRAGA, A. L. F.; PEREIRA, L. A. A.; PROCÓPIO, M.; ANDRÉ, P.; PAULO, P. A.; SALDIVA, H. N. Associação entre poluição atmosférica e doenças respiratórias e cardiovasculares na cidade de Itabira, Minas Gerais, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 23, n. 4, p. 570-578, 2007. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/csp/a/SH7yDyS89QH667ZxGnxR49g/?lang=pt>. Acesso em: 22 out. 2023.

<https://doi.org/10.1590/s0102-311x2007001600017>

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. **Lei nº 13.540, de 18 de dezembro de 2017**. Altera as Leis nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989, e nº 8.001, de 13 de março de 1990, que dispõem sobre a compensação financeira pela exploração de recursos minerais (CFEM). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19 dez. 2017. Seção 1.

BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil**. Brasília, DF: SAE, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/planos/plano-nacional-fertilizantes>. Acesso em: 24 nov. 2024.

BRESSER-PEREIRA, L. C. Doença holandesa e sua neutralização: uma abordagem ricardiana. **Revista de Economia Política**, v. 28, n. 1, p. 47-71, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rep/a/XB87TMrKyHHSrR4RhJdd5Bt/>. Acesso em: 21 set. 2024.

<https://doi.org/10.1590/S0101-31572008000100003>

BUREAU OF LABOR STATISTICS. Producer Price Index: Fertilizer Materials. Disponível em: <https://www.bls.gov/>. Acesso em: 24 nov. 2024.

CALLAGHAN, W. S. Obstacles to industrialization: the iron and steel industry in Brazil during the old republic. 1981. Tese (Doutorado) – University of Texas, Austin, 1981.

CARDOSO, F. H.; FALETTO, E. **Dependência e desenvolvimento na América Latina**. Rio de Janeiro: Zahar, 1979.

CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y.; TOBIAS JUNIOR, R.; CAMPOS, I. C.; et al. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, n. 3, p. 145-151, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318643619_Fundao_tailings_dam_failures_The_environment_tragedy_of_the_largest_technological_disaster_of_Brazilian_mining_in_global_context. Acesso em: 21 nov. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>

CARVALHO, A.; PEREIRA, L. Preços e fertilizantes: uma análise econométrica da relação com a produção agrícola no Brasil. **Economia Agrícola e Sustentabilidade**, v. 12, n. 4, p. 98-115, 2021. Disponível em: <https://www.iea.sp.gov.br/out/arquivosRea.php>. Acesso em: 24 nov. 2024.

CARVALHO, J. M. de. **A Escola de Minas de Ouro Preto: o peso da glória**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2002.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. Centro de Pesquisas e Inovação da CSN usa simulação numérica e realidade virtual para otimizar resultados. **CSN ESG**, 29 dez. 2022. Disponível em: <https://esg.csn.com.br/news/centro-de-pesquisas-e-inovacao-da-csn-usa-simulacao-numerica-e-realidade-virtual-para-otimizar-resultados/>. Acesso em: 6 nov. 2024.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. Minério de ferro. Disponível em: <https://www.csn.com.br/homepage/minerio-de-ferro/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. Relatório Integrado 2023. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://ri.csn.com.br>. Acesso em: 26 nov. 2024.

CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. Sanções contra a Rússia explicadas. **Conselho da União Europeia**, 2024. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/sanctions-against-russia-explained/>. Acesso em: 23 nov. 2024.

CORDEN, W. M.; NEARY, J. P. Booming sector and de-industrialisation in a small open economy. **The Economic Journal**, v. 92, n. 368, p. 825-848, 1982. Disponível em: <https://academic.oup.com/ej/article/92/368/825/5220457>. Acesso em: 2 out. 2024. <https://doi.org/10.2307/2232670>

COUTINHO, L. G. et al. **Estudo da competitividade da indústria brasileira: relatório final**. Campinas: Instituto de Economia da UNICAMP, Instituto de Economia Industrial da UFRJ, Fundação Dom Cabral, Fundação Centro de Estudos do Comércio Exterior, 1993. Disponível em: <https://www.bibliotecaagptea.org.br/administracao/agroindustria/livros/ESTUDO%20DA%20COMPETITIVIDADE%20DA%20INDUSTRIA%20BRASILEIRA.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2024.

CRISTAL JR. Lavra a céu aberto: conheça esse método e 10 incríveis minas pelo mundo. Disponível em: <https://cristaljr.com/lavra-a-ceu-aberto-conheca-esse-metodo-e-10-incriveis-minas-pelo-mundo/>. Acesso em: 12 out. 2024.

DAVIS, G. A. Learning to love the Dutch disease: evidence from the mineral economies. **World Development**, v. 23, p. 1765-1779, 1995. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0305750X9500071J?via%3Dihub>. Acesso em: 21 nov. 2023.
[https://doi.org/10.1016/0305-750X\(95\)00071-J](https://doi.org/10.1016/0305-750X(95)00071-J)

DELOITTE. Basel 3.1 near-final rules: the fog starts to clear. **Deloitte**, 1 set. 2023. Disponível em: <https://www.deloitte.com/uk/en/industries/financial-services/blogs/basel-3-1-near-final-rules-the-fog-starts-to-clear.html>. Acesso em: 23 nov. 2024.

DINADRILL. Importância da perfuração de rochas na mineração. Disponível em: <https://dinadrill.com.br/noticia/importancia-da-perfuracao-de-rochas-na-mineracao>. Acesso em: 23 nov. 2024.

DORR, J. V. N. II. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **U.S. Geological Survey Professional Paper**, 641-A, 117 p., 1969. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/pp/0641a/report.pdf>. Acesso em: 17 out. 2024.

DREZNER, D. W. **The system worked: how the world stopped another great depression**. New York: Oxford University Press, 2014.

ENRÍQUEZ, M. A. R.; FERNANDES, F. R. C.; ALAMINO, R. C. J. A mineração das grandes minas e as dimensões da sustentabilidade. **Recursos naturais e sustentabilidade natural. Grande Minas**, v. 1, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/472/1/Vol_1_GRANDES_MINAS_TOTAL.pdf. Acesso em: 2 nov. 2024.

ESCHWEGE, W. L. von. **Pluto brasiliensis**. Tradução do original alemão por Domício de Figueiredo Murta. Brasília: Senado Federal, Conselho Editorial, 2011. 2 v. (722 p.): il. (Edições do Senado Federal; v. 140). Disponível em: https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/573547/000970489_Pluto_brasil_iensis.pdf. Acesso em: 2 nov. 2024.

EXAME. As 10 maiores empresas do Brasil - Petrobras, Vale e Itaú estão na lista. Exame, São Paulo, 21 nov. 2024. Disponível em: <https://exame.com/invest/guia/quais-sao-as-maiores-empresas-do-brasil/>. Acesso em: 22 dez. 2024.

FEDERAL RESERVE ECONOMIC DATA. PPI: Commodities: fuels and related products and power: gasoline (including other fuels). Disponível em: <https://fred.stlouisfed.org/series/WPU0652013A>. Acesso em: 22 nov. 2024.

FERREIRA, G. E. A competitividade da mineração de ferro no Brasil. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2001. 54 p. **Série Estudos e Documentos**, n. 50. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/259/1/sed-50.pdf>. Acesso em: 2 out. 2024.

FERREIRA, L.; SILVA, G. O.; ARAÚJO, R. C.; GOMES, G. O.; SILVA, G. O. E. Manutenção preditiva na Indústria 4.0: uma revisão sistemática. **Revista Produção Online**, v. 18, n. 2, p. 488-510, 2018. Disponível em: <https://www.producaoonline.org.br/rpo>. Acesso em: 2 nov. 2024.

FLEMING, J. M. Domestic financial policies under fixed and under floating exchange rates. **IMF Staff Papers**, v. 9, n. 3, p. 369–380, 1962. Disponível em: <https://www.elibrary.imf.org/view/journals/024/1962/003/article-A004-en.xml>. Acesso em: 23 out. 2024.
<https://doi.org/10.5089/9781451968873.024>

FISCHER, G. Minério de ferro, geologia econômica e redes de experts entre Wisconsin e Minas Gerais, 1881-1914. **História, Ciências, Saúde-Manguinhos**, v. 21, n. 1, p. 247-262, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hcsm/a/j4zXJVHG97bvbb7Fmr6DdRp/?lang=pt>. Acesso em: 2 out. 2024.
<https://doi.org/10.1590/S0104-59702014005000003>

FORBES BRASIL. Com sanções à Rússia, escassez de fertilizantes ameaça oferta global de alimentos. **Forbes Agro**, 23 mar. 2022. Disponível em: <https://forbes.com.br/forbesagro/2022/03/com-sancoes-a-russia-escassez-de-fertilizantes-ameaca-oferta-global-de-alimentos/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

FREEPIK. Paisagem da indústria de mina de carvão com subsolo. Disponível em: https://br.freepik.com/vetores-gratis/paisagem-da-industria-de-mina-de-carvao-com-subsolo_16456707.htm. Acesso em: 12 out. 2024.

FREITAS, C. M. D.; BARCELLOS, C.; ASMUS, C. I. R. F.; SILVA, M. A. D.; XAVIER, D. R. Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e saúde coletiva. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 35, e00052519, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csp/a/5p9ZRBrgkfrmtPBtSLcs9j/?lang=pt>. Acesso em: 22 ago. 2023.
<https://doi.org/10.1590/0102-311x00052519>

FUNDO MONETÁRIO INTERNACIONAL. *DataMapper – NGDP per capita growth rate (advanced economies)*. Washington, 2024. Disponível em: https://www.imf.org/external/datamapper/NGDP_RPCH@WEO/OEMDC/ADVEC/WEOWORLD. Acesso em: 22 nov. 2024.

FURTADO, C. **O mito do desenvolvimento econômico**. 2. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1974.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOLEV, A.; SCOTT, M.; ERSKINE, P. D.; ALI, S. H.; BALLANTYNE, G. R. Rare earths supply chains: current status, constraints and opportunities. **Resources Policy**, v. 41, p. 52-59, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301420714000282?via%3Dihub>. Acesso em: 23 out. 2024.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.03.004>

GONÇALVES, G. B. S.; SILVA, A. L. C.; PEROBELLI, F. S. Desenvolvimento econômico, mudanças estruturais e emissões de CO₂: uma análise para o Brasil no período 1970-2012. **Economia e Sociedade**, v. 24, n. 3, p. 663-692, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ee/a/TpcpwQnnJkYkTKqM5ZJnXtP/>. Acesso em: 18 jun. 2025.
<https://doi.org/10.1590/0101-4161201545153gbs>

GREENBERG, H. J.; LOH, L. W. T. An analysis of cut-off rules for optimization algorithms. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. SMC-4, n. 1, p. 108-112, jan. 1974. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5408533>. Acesso em: 22 nov. 2024.
<https://doi.org/10.1109/TSMC.1974.5408533>.

GUIMARÃES, A. P.; SILVA, R. T.; OLIVEIRA, M. F. Aplicações de terras raras na Indústria 4.0: oportunidades para o Brasil. **Revista Brasileira de Tecnologia**, v. 33, n. 2, p. 123-145, 2022. Disponível em: <https://www.revistatecnologia.com.br/artigos/aplicacoes-terras-raras-industria-4-0>. Acesso em: 7 nov. 2024.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for Industrie 4.0 scenarios: a literature review. In: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 49., 2016, Kauai. **Proceedings** [...]. Kauai: IEEE, 2016. p. 3928-3937.

HOLANDA, J. **Terras raras e nióbio**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Análises Sociais e Econômicas, 2021. Disponível em: <https://ibase.br/wp-content/uploads/2022/02/Terras-raras-e-niobio-Julio-Holanda.pdf>. Acesso em: 9 out. 2024.

INDEX MUNDI. Exportações por país - mapa comparativo entre países - mundo. Disponível em: <https://www.indexmundi.com/map/?l=pt&v=85>. Acesso em: 23 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Busca online CNAE. Disponível em: <https://concla.ibge.gov.br/busca-online-cnae.html>. Acesso em: 25 nov. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Documentação CNAE 2.0. Disponível em: <https://cnae.ibge.gov.br/documentacao/documentacao-cnae-2-0.html>. Acesso em: 25 nov. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Industrial Anual - Produto. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9044-pesquisa-industrial-anual-produto.html>. Acesso em: 20 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 18 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Panorama Mineração no Brasil 2024**. 1. ed. Brasília: IBRAM, 2024. 155 p. Disponível em: <https://publicbrasil.com.br/pdf/PanoramaMineracao/PMB2024.pdf>. Acesso em: 2 out. 2024.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS. Elementos terras raras: o que são, aplicações e desafios de produção. Disponível em: <https://igeologico.com.br/elementos-terras-raras-o-que-sao-aplicacoes-e-desafios-de-producao/>. Acesso em: 22 nov. 2024.

INSTITUTO GEOLÓGICO. **Relatório anual de recursos minerais**. Brasília: Instituto Geológico, 2024. Acesso em: 22 out. 2024.

INSTITUTO MINERE. Mineradora cria centro de inteligência artificial. **Instituto Minere**, 6 maio 2019. Disponível em: <https://institutominere.com.br/blog/mineradora-cria-centro-de-inteligencia-artificial>. Acesso em: 7 nov. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV outlook 2021: accelerating ambitions despite the pandemic**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>. Acesso em: 7 nov. 2024.

INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. Classification of Economic Activities. Disponível em: <https://ilostat.ilo.org/methods/concepts-and-definitions/classification-economic-activities/>. Acesso em: 19 nov. 2024.

JESUS, C. A. G. Minério de ferro e aço. In: RODRIGUES, A. F. S. (Ed.). **Economia mineral do Brasil**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 2009. p. 99-116. Disponível em: https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3966. Acesso em: 15 out. 2024.

JOHNSTON, M.; KHARTIT, K.; VELASQUEZ, V. Biggest mining companies. **Investopedia**, 24 set. 2024. Disponível em: <https://www.investopedia.com/biggest-mining-companies-5077594>. Acesso em: 7 nov. 2024.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: final report of the Industrie 4.0 Working Group**. Munich: Acatech – National Academy of Science and Engineering, 2013. Disponível em: <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>. Acesso em: 7 nov. 2024.

KINROSS GOLD CORPORATION. La Coipa, Atacama Region. 2024a. Disponível em: <https://www.kinross.com/operations/americas/La-Coipa-Chile-/default.aspx>. Acesso em: 17 nov. 2024.

KINROSS GOLD CORPORATION. Paracatu. 2024b. Disponível em: <https://kinrossworld.kinross.com/pt-br/location/paracatu/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

KOPPE, J. C. A lavra e a indústria mineral no Brasil - estado da arte e tendências tecnológicas. In: FERNANDES, F. R. C.; MATOS, G. M. M.; CASTILHOS, Z. C.; LUZ, A. B. da (Eds.). **Tendências tecnológicas Brasil 2015: geociências e tecnologia mineral**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. p. 81-102. Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1285/1/Tend%C3%AanciasParte2.1.pdf>. Acesso em: 17 out. 2024.

KOPPE, J. C.; COSTA, J. F. C. L. Operações de lavra em pedreiras. In: LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. (Ed.). **Manual de agregados para construção civil**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. p. 127-144. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/manual-de-agregados>. Acesso em: 3 nov. 2024.

LAMOSO, L. P. A exploração de minério de ferro no Brasil e no Mato Grosso do Sul. 2001. 309f. Tese (Doutorado em Geografia Humana) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.8.2001.tde-27072001-231952>. Acesso em: 27 out. 2024.

LI, J.; WANG, Y.; XU, Z. O papel do lítio na transição energética global. **Journal of Energy Storage**, v. 13, p. 10-23, 2017. Disponível em: [https://www.journalofenergystorage.com/article/S2352-152X\(17\)30001-2/fulltext](https://www.journalofenergystorage.com/article/S2352-152X(17)30001-2/fulltext). Acesso em: 7 nov. 2024.

LUNDIN MINING. Operations: overview. Disponível em: <https://lundinmining.com/operations/overview/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

MAGALHÃES, J. Elementos terras raras: o que são, aplicações e desafios de produção. **Igeológico**, 31 maio 2023. Disponível em: <https://igeologico.com.br/elementos-terras-raras-o-que-sao-aplicacoes-e-desafios-de-producao/>. Acesso em: 22 set. 2024.

MARENT, B. R.; LAMOUNIER, W. L.; GONTIJO, B. M. Conflitos ambientais na Serra do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero – MG: mineração x preservação. **Revista Geografias**, v. 7, n. 1, p. 99-113, 2011.

MALISZEWSKA, M.; MATTOO, A.; VAN DER MENSBRUGGHE, D. The potential impact of COVID-19 on GDP and trade: a preliminary assessment. **Policy Research Working Paper**. Washington, DC: World Bank, 2020. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10986/33605>. Acesso em: 23 out. 2024.

MASSARI, S.; RUBERTI, M. Rare earth elements as critical raw materials: focus on international markets and future strategies. **Resources Policy**, v. 38, n. 1, p. 36-43, 2013. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301420712000530?via%3Dihub>. Acesso em: 22 out. 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.07.001>

MATOS, R.; MELLO, E. M. R. de. As condições estruturantes da siderurgia mineira: recursos naturais, Estado e elite instruída. **Revista Geografias**, v. 8, n. 2, p. 60-75, 2012. Disponível em:

<https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/13342>. Acesso em: 2 nov. 2024.

<https://doi.org/10.35699/2237-549X..13342>

MAXWELL, K. A Inconfidência mineira: Brasil e Portugal 1750-1808. In: MAXWELL, K (Ed.). **A devassa da devassa**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1977.

MCKINSEY & COMPANY. **Global banking annual review 2024: attaining escape velocity**. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/financial-services/our-insights/global-banking-annual-review>. Acesso em: 23 nov. 2024.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ea/a/TNzjZ3HD8K6rCvSSWPtsZgC/?lang=pt>. Acesso em: 22 out. 2023.

<https://doi.org/10.1590/s0103-40142010000100016>

MINISTÉRIO DA ECONOMIA. Exportação brasileira – produto por fator agregado. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/>. Acesso em: 23 nov. 2024.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS. Comex Stat. Disponível em: <https://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>. Acesso em: 3 nov. 2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Novas regulamentações ambientais aplicadas ao setor mineral brasileiro**. Brasília: MMA, 2024.

MISHRA, A. K.; GUPTA, P.; KUMAR, P.; MEENA, M. D.; SRIVASTAVA, P. K. Compound natural and human disasters: managing drought and COVID-19 to sustain global agriculture and food sectors. **Science of the Total Environment**, v. 754, p. 142210, 2021. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720357399?via%3Dihub>. Acesso em: 29 nov. 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142210>

MUNDELL, R. A. Capital mobility and stabilization policy under fixed and flexible exchange rates. **The Canadian Journal of Economics and Political Science**, v. 29, n. 4, p. 475-485, 1962. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/canadian-journal-of-economics-and-political-science-revue-canadienne-de-economiques-et-science-politique/article/abs/capital-mobility-and-stabilization-policy-under-fixed-and-flexible-exchange-rates/1C0D6743C46645F447F2338146CA61B9>. Acesso em: 23 out. 2024. <https://doi.org/10.2307/139336>

MOU, J. Research on the impact of COVID-19 on global economy. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED EDUCATION AND ECONOMICS (AEECE), 2020, Weihai. **Proceedings** [...]. Weihai: IOP Publishing, 2020. p. 1-6.

NASSIF, A. Há evidências de desindustrialização no Brasil? **Revista de Economia Política**, v. 28, n. 1, p. 72-96, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rep/a/3rVWS9WjGrFFPS4yHMQnZzj/?lang=pt>. Acesso em: 17 out. 2024. <https://doi.org/10.1590/s0101-31572008000100004>

NASSIF, A.; FEIJÓ, C.; ARAÚJO, E. Desindustrialização, reprimarização e dependência externa: uma análise crítica da inserção externa da economia brasileira no período 2003-2018. **Revista de Economia Contemporânea**, v. 24, n. 3, 2020.

NEWMONT CORPORATION. Yanacocha (Peru). 2024. Disponível em: <https://www.newmont.com/operations-and-projects/global-presence/south-america/yanacocha-peru/yanacocha/default.aspx>. Acesso em: 17 nov. 2024.

NURKSE, R. **Problems of capital formation in underdeveloped countries**. Oxford: Oxford University Press, 1953.

OLIVEIRA, M. F. Baterias de lítio e a economia de baixo carbono: perspectivas para o Brasil. **Cadernos de Energia**, v. 15, n. 3, p. 99-112, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/344567890_Baterias_de_litio_e_a_economia_de_baixo_carbono_perspectivas_para_o_Brasil. Acesso em: 7 nov. 2024.

ORECCHINI, F. Industrial sustainability: challenges and perspectives for the new industrial revolution. **Sustainability**, v. 10, n. 11, p. 3821, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328964982_Industrial_Sustainability_Challenges_and_Perspectives_for_the_New_Industrial_Revolution. Acesso em: 7 nov. 2024.

OREIRO, J. L.; MARCONI, N. A desindustrialização e o desenvolvimento econômico no Brasil. **Revista de Economia Contemporânea**, v. 23, n. 1, p. 1–28, 2019.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **Histórico da pandemia COVID-19**. 2020. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/covid19/historico-da-pandemia-covid-19>. Acesso em: 30 nov. 2024.

ORICA. Produtos e serviços. **Catálogo**. Disponível em: <https://www.orica.com/products---services>. Acesso em: 23 nov. 2024.

ORICA LIMITED. FY2023 annual report. Relatório a investidores. Melbourne, Austrália: Orica Limited, 2023. Disponível em: <https://www.orica.com/annualreport>. Acesso em: 3 nov. 2024.

OUISSI, O.; IBRAHIMI, L.; ASSELLAOU, M.; OUBRICH, M. Sharing economy in a context of pandemic propagation: case of the COVID-19. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY MANAGEMENT, OPERATIONS AND DECISIONS (ICTMOD), 2020, Marrakech. **Proceedings** [...]. Marrakech: IEEE, 2020. p. 1-5. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/document/9380591>. Acesso em: 21 nov. 2023.

OZILI, P. K. Global economic consequences of Russian invasion of Ukraine. In: PIETRZAK, P. (Ed.). **Dealing with regional conflicts of global importance**. Hershey: IGI Global Scientific Publishing, 2024. p. 195-223.

PAES, J. **Siderurgia: curso de processos metalúrgicos**. FATEC So, 2024. Disponível em: <https://fr.slideshare.net/slideshow/apostiladesiderurgia/43510140>. Acesso em: 25 out. 2024.

PAIS, P. S. M.; GOMES, M. F. M.; CORONEL, D. A. Análise da competitividade das exportações brasileiras de minério de ferro, de 2000 a 2008. **Revista de Administração Mackenzie**, v. 13, n. 4, p. 121-145, 2012.

PEREIRA, W. C.; REMACRE, A. Z. Utilização de variável mineralógica na estimativa de reservas de minério de ferro. **Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 2, p. 123-129, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/WSVwvFBFYGnDV5CFx458Vtb/?lang=pt>. Acesso em: 2 nov. 2024.
<https://doi.org/10.1590/S0370-44672003000200011>

POMERANZ, L. Sanções econômicas como instrumento político nas relações internacionais: o caso da Federação Russa. **Revista Tempo do Mundo**, v. 3, n. 1, p. 181-200, 2017. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7389/1/TdM_v3_n1_Economic.pdf. Acesso em: 23 nov. 2024.

PREBISCH, R. **The economic development of Latin America and its principal problems**. Lake Success, New York: United Nations, Department of Economic Affairs, 1950. Relatório técnico. Disponível em: <https://repositorio.cepal.org/entities/publication/9a00fa5b-ad04-4520-ae4c-e3adba791790>. Acesso em: 23 out. 2024.

QUARESMA, L. F. **O mercado brasileiro de minério de ferro: sua instabilidade e a possibilidade de associação dos países exploradores**. 1987. 245 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, SP, 1987.

RADETZKI, M. Regional development benefits of mineral projects. **Resources Policy**, v. 8, n. 3, p. 193-200, 1982.

RAZZI, F.; SMITH, J.; LI, W.; GARCIA, M. Automation in mining: lessons learned and future trends. **Journal of Mining Engineering**, v. 45, n. 3, p. 215-230, 2019.

REDACCIÓN SECTOR MINERO ENERGÉTICO. Antamina lidera en producción y diversidad: un gigante del cobre, zinc y plata en el Perú. **Sector Minero Energético del Perú**, 26 ago. 2024. Disponível em: <https://sectorminero.com.pe/antamina-lidera-en-produccion-y-diversidad-un-gigante-del-cobre-zinc-y-plata-en-el-peru/noticias/empresas/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

REZENDE, V. L. A mineração em Minas Gerais: uma análise de sua expansão e os impactos ambientais e sociais causados por décadas de exploração. **Sociedade & Natureza**, v. 28, n. 3, p. 375-384, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/t88hDp8F66Rpt5FjQBDQFdn/?lang=pt>. Acesso em: 2 ago. 2023.
<https://doi.org/10.1590/1982-451320160304>

RADIO FRANCE INTERNATIONALE. Nitrato de amônia: um componente detonante conhecido por seus riscos. **Radio France Internationale**, 5 ago. 2020. Disponível em: <https://www.rfi.fr/br/mundo/20200805-nitrato-de-am%C3%B4nia-um-componente-detonante-conhecido-por-seus-riscos>. Acesso em: 21 nov. 2024.

RICO, M.; BENITO, G.; SALGUEIRO, A. R.; DÍEZ-HERRERO, A.; PEREIRA, H. G. Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 2, p. 846-852, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389407010837?via%3Di> hub. Acesso em: 21 nov. 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.050>

RICO, I.; ZIV, B.; OLEG, N.; OFIR, D. R. Russia's invasion of Ukraine increased the synchronisation of global commodity prices. **Australian Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 66, p. 775-796, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1467-8489.12496>. Acesso em: 22 nov. 2024.
<https://doi.org/10.1111/1467-8489.12496>

RIO TINTO. Non-managed operations. Disponível em: <https://www.riotinto.com/en/Operations/non-managed-operations>. Acesso em: 17 nov. 2024.

RODRIGUES, L. Brumadinho: famílias confiam que 3 corpos restantes serão encontrados. **Agência Brasil**, 26 jan. 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-01/brumadinho-familias-confiam-que-3-vitimas-restantes-serao-encontradas>. Acesso em: 21 nov. 2024.

RODRIGUES, L. Presidente da Vale: tragédia de Brumadinho é mais humana que ambiental. **Agência Brasil**, 25 jan. 2019. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-01/presidente-da-vale-tragedia-de-brumadinho-e-mais-humana-que-ambiental>. Acesso em: 21 nov. 2024.

ROSIÈRE, C. A.; VIEIRA, C. B.; SESHADRI, V.; CHEMALE, J. R. Classificação genética de minérios de ferro: problemas e vícios - proposta de uma classificação tipológica para a indústria. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 28., 1997, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 1997. p. 295-302.

RUCHKYS, U. A. Patrimônio geológico e geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: potencial para a criação de um geoparque da UNESCO. 2007. 211 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/MPBB-76LHEJ>. Acesso em: 21 nov. 2024.

SACHS, J. D. External debt and macroeconomic performance in Latin America and East Asia. **Brookings Papers on Economic Activity**, v. 1985, n. 2, p. 523-573, 1985. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2534445>. Acesso em: 2 ago. 2024. <https://doi.org/10.2307/2534445>.

SAES, B. M.; BENE, D. D.; NEYRA, R.; WAGNER, L. S.; ALIER, J. M. Environmental justice and corporate social irresponsibility: the case of the mining company Vale S.A. **Ambiente e Sociedade**, v. 24, p. 1-23, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/P95LHNfndSvCZtHWXZ8LmsC/?lang=en>. Acesso em: 22 out. 2023. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210014vu2021L4ID>

SAMARCO produz 20 milhões de toneladas de pelotas de minério de ferro desde a retomada. **Revista Mineração**, 22 jun. 2023. Disponível em: <https://revistamineracao.com.br/2023/06/22/samarco-produz-20-milhoes-de-toneladas-de-pelotas-de-minerio-de-ferro-desde-a-retomada/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

SAMARCO. Samarco adota uso de óculos de realidade virtual em treinamentos de empregados. **Samarco**, 2022. Disponível em: <https://www.samarco.com/samarco-adota-uso-de-oculos-de-realidade-virtual-em-treinamentos-de-empregados-as/>. Acesso em: 6 nov. 2024.

SCHNITKEY, G.; SWANSON, K.; COPPESS, J.; ZULAUF, C. Fertilizer prices higher and volatile. **Farmdoc Daily**, v. 12, n. 30, 2022. Disponível em: <https://farmdocdaily.illinois.edu/2022/09/fertilizer-prices-rates-and-costs-for-2023.html>. Acesso em: 22 nov. 2024.

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2017.

SCHLUSE, M.; ROSSMANN, J. From simulation to experimentable digital twins: simulation-based development and operation of complex technical systems. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SYSTEMS ENGINEERING (ISSE), 2016, Edinburgh, UK. **Proceedings** [...]. [S. l.]: IEEE, 2016. p. 1-6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7753162>. Acesso em: 23 out. 2024.

SILVA, O. P. A mineração em Minas Gerais: passado, presente e futuro. **Geonomos**, v. 3, n. 1, p. 77-86, 1995. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11523/8261>. Acesso em: 2 out. 2024.

SILVA, J. R.; OLIVEIRA, M. F.; SOUZA, L. A. O impacto das novas tecnologias na demanda do lítio. **Radar: Tecnologia, Produção e Comércio Exterior**, n. 65, p. 7-16, 2021. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/publicacao-item?id=e4adbf03-b0b2-4ca8-896d-dcabe023e02>. Acesso em: 21 nov. 2024.

SMITH, J.; JOHNSON, L.; WILLIAMS, R. Rare earth elements in modern technologies. **Journal of Materials Science**, v. 55, n. 10, p. 4567-4580, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-020-04321-5>. Acesso em: 7 nov. 2024.

SOUZA, C. R. S. de. O Brasil pegou a doença holandesa? 2009. 142 f. Tese (Doutorado em Economia) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.12.2009.tde-18122009-092539>. Acesso em: 2 out. 2024.

SOUZA, M.; RIBEIRO, C. Dependência externa de fertilizantes e o impacto no agronegócio brasileiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 215-230, 2022.

SUPREMO TRIBUNAL FEDERAL. Presidente do STF homologa acordo para reparação de danos causados pela tragédia em Mariana (MG). **Supremo Tribunal Federal**, 6 nov. 2024. Disponível em: <https://noticias.stf.jus.br/postsnovicias/presidente-do-stf-homologa-acordo-para-reparacao-de-danos-causados-pela-tragedia-em-mariana-mg/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

TAKEHARA, L. Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração sinter feed. 2004. 419 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2003.275850>. Acesso em: 2 out. 2024.

TELES, B. Explore o mundo da mineração com a tecnologia de realidade virtual da AngloGold Ashanti em Nova Lima. **Mineração Brasil**, 14 set. 2023. Disponível em: <https://mineracao-brasil.com/explore-o-mundo-da-mineracao-com-a-tecnologia-de-realidade-virtual-da-anglogold-ashanti-em-nova-lima/>. Acesso em: 7 nov. 2024.

TRADING ECONOMICS. Minério de ferro - contrato futuro - preços. 2025. Disponível em: <https://pt.tradingeconomics.com/commodity/iron-ore>. Acesso em: 7 jun. 2025.

UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. **Trade and development report 2020**. Genebra: United Nations Conference on Trade and Development, 2020. Disponível em: <https://unctad.org/webflyer/trade-and-development-report-2020>. Acesso em: 23 out. 2024.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Global iron ore production data**. Reston: USGS, 2017. Disponível em: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_ore/global_iron_ore_data.pdf. Acesso em: 2 nov. 2024.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2023**. Reston: USGS, 2023. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2024.

VAN WIJNBERGEN, S. J. G. The 'Dutch disease': a disease after all? **The Economic Journal**, v. 94, n. 373, p. 41-55, 1984. Disponível em: <https://academic.oup.com/ej/article-abstract/94/373/41/5189832?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 2 out. 2024. <https://doi.org/10.2307/2232214>

VALE. Vale cria centro dedicado às iniciativas de inteligência artificial. **Sala de Imprensa Vale**, 10 jan. 2019. Disponível em: <https://saladeimprensa.vale.com/pt/w/vale-cria-centro-dedicado-as-iniciativas-de-inteligencia-artificial>. Acesso em: 25 out. 2024.

VALE. Entenda como funciona o processo de pelotização nas usinas. **Vale**, 10 mar. 2021. Disponível em: <https://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/entenda-funciona-processopelotizacaousinas.aspx>. Acesso em: 23 nov. 2024.

VALE. Pará. Disponível em: <https://www.vale.com/pt/para>. Acesso em: 15 jun. 2025.

VALE. Relatório da administração 2023. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://vale.com/pt/investidoresbk>. Acesso em: 2 out. 2024.

VALE. Relatório de sustentabilidade 2023: compromisso com a Indústria 4.0 e eficiência operacional. Rio de Janeiro: Vale, 2023. Disponível em: <https://www.vale.com/pt/esg/biblioteca-de-documentos>. Acesso em: 2 out. 2024.

VALE. Relatório de produção e vendas 2024. Rio de Janeiro: Vale, 2024. Disponível em: <https://vale.com/documents/44618/5052971/Relat%C3%B3rio+de+Produ%C3%A7%C3%A3o+e+Vendas+2024.pdf>. Acesso em: 2 out. 2025.

VIEIRA, C. B. Avaliação da qualidade intrínseca de minérios de ferro para uso em altos-fornos. 1996. 248 f. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.

VILELA, P. R. Mineração brasileira investe em tecnologia para aumentar sustentabilidade. **Agência Brasil**, 26 maio 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-05/mineracao-brasileira-investe-em-tecnologia-para-aumentar-sustentabilidade>. Acesso em: 7 nov. 2024.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO-convened global study of origins of SARS-CoV-2: China Part**. Geneva: WHO, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/who-convened-global-study-of-origins-of-sars-cov-2-china-part>. Acesso em: 18 jun. 2025.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **World Steel in Figures 2020**. Bruxelas: World Steel Association, 2020. Disponível em: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/2020-World-Steel-in-Figures.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **World steel in figures 2023**. Bruxelas: World Steel Association, 2023. Disponível em: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2023.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

YAMANA GOLD. Producing mines. Disponível em: <https://yamana2021rd.q4web.com/portfolio/producing-mines/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

YARA INTERNATIONAL. Investor relations reports. 2024. Relatório a investidores. Disponível em: <https://www.yara.com/investor-relations/>. Acesso em: 24 nov. 2024.

YILDIRIM, D. Ç.; ESEN, Ö.; ERTUĞRUL, H. M. Impact of the COVID-19 pandemic on return and risk transmission between oil and precious metals: evidence from DCC-GARCH model. **Resources Policy**, v. 79, 2022, 102939. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142072200383X?via%3Dihub>. Acesso em: 30 nov. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102939>

APÊNDICE A - INDICADORES DE ANÁLISE DE FORMAÇÃO DO PREÇO DO NITRATO DE AMÔNIO O MERCADO GLOBAL: JUSTIFICATIVAS E SELEÇÃO FINAL

Este apêndice apresenta a lista completa dos indicadores analisados durante o desenvolvimento da pesquisa, bem como as justificativas para a seleção dos três principais indicadores utilizados para as análises finais relacionadas ao mercado de nitrato de amônio. Esses indicadores foram divididos em três categorias: indicadores de mercado, indicadores governamentais e indicadores de associações e relatórios empresariais.

- Indicadores de Mercado:
 - **Argus Media (Internacional):** Publica preços e análises de fertilizantes nitrogenados, incluindo nitrato de amônio.
 - **ICIS (Internacional):** Disponibiliza relatórios de preços globais e regionais de nitrato de amônio.
 - **Fertecon e Profercy (Internacional):** Monitoram os preços de fertilizantes no mercado global, com destaque para variações regionais e tendências de mercado.
 - **Banco Mundial (Internacional):** Fornece dados históricos de preços de *commodities*, utilizados para contextualizar variações econômicas.
 - **Green Markets (Brasil):** Oferece informações sobre tendências de preços e volumes de fertilizantes no mercado brasileiro.
- Indicadores Governamentais:
 - **BLS (EUA):** O índice PPI detalha as variações nos preços ao produtor de produtos químicos, incluindo compostos de amônio e ureia, diretamente relacionados ao nitrato de amônio.
 - **Banco Mundial (Internacional):** Além de dados de mercado, oferece análises econômicas sobre preços globais de fertilizantes, especialmente em cenários de choques externos.

- **Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) (Internacional):** Oferece índices de preços de fertilizantes e tendências globais, refletindo as flutuações do mercado.
 - **FRED (EUA):** Oferece séries temporais de preços ao produtor, incluindo compostos químicos utilizados como base para a produção de fertilizantes.
- Indicadores de Associações e Relatórios Empresariais:
 - **ANDA (Brasil):** Disponibiliza dados agregados sobre preços e volumes de fertilizantes no mercado brasileiro, com informações detalhadas sobre tendências e consumo.
 - **Relatórios de Empresas Russas (Rússia):** Incluem dados de preços FOB Mar Negro divulgados por empresas como EuroChem e Acron, principais exportadoras de nitrato de amônio.

Após a análise preliminar de todos os indicadores, foram selecionados os três principais que apresentaram maior relevância e conexão com os objetivos centrais da pesquisa. Esses indicadores foram escolhidos por sua confiabilidade, abrangência e capacidade de refletir os impactos do choque geopolítico causado pela invasão da Ucrânia pela Rússia no mercado global de fertilizantes, com foco no nitrato de amônio.

O FOB Mar Negro com Defasagem de 1 Mês foi selecionado como o mais relevante devido à sua ampla utilização como parâmetro global para a precificação do nitrato de amônio. O preço FOB reflete o valor da *commodity* exportada a partir do Mar Negro, uma rota estratégica para o comércio de fertilizantes, particularmente na Rússia, maior exportadora mundial desse insumo. A justificativa para sua escolha reside no fato de que o choque geopolítico causado pela invasão da Ucrânia pela Rússia gerou sanções econômicas que impactaram significativamente o mercado global de fertilizantes, e esse indicador permite acompanhar de forma precisa as flutuações de preços durante e após o conflito.

O PPI, publicado pelo BLS dos Estados Unidos, oferece uma perspectiva regional, detalhando as oscilações nos preços ao produtor de produtos químicos, como amônia e ureia, que são diretamente relacionados ao nitrato de amônio. Esse indicador complementa o FOB Mar Negro ao fornecer uma visão alternativa sobre os

preços ao produtor, refletindo tendências do mercado americano, um dos maiores consumidores de fertilizantes.

Por fim, o FOB Mar Báltico reflete os preços de exportação do nitrato de amônio a partir de países do leste europeu que utilizam o Mar Báltico como rota de comércio. Essa região tem relevância estratégica por sua proximidade com mercados europeus e por ser menos impactada diretamente por sanções econômicas em relação ao Mar Negro. A escolha deste indicador baseia-se na sua capacidade de capturar flutuações regionais de preços, oferecendo um contraponto ao FOB Mar Negro. O Mar Báltico é um importante via de exportação para fertilizantes destinados ao mercado europeu, sendo uma alternativa para análises em cenários de instabilidade global.

Os três indicadores selecionados foram escolhidos devido à sua robustez e pertinência temática, permitindo uma análise abrangente e integrada dos impactos do choque geopolítico no mercado global de nitrato de amônio. Essa seleção foi fundamentada nas contribuições de indicadores globais e regionais, que fornecem múltiplas perspectivas sobre as flutuações de preços em um contexto de alta volatilidade.

Os indicadores analisados, mas não utilizados diretamente na análise final, foram essenciais para contextualizar as dinâmicas do mercado global de fertilizantes e forneceram suporte para as decisões metodológicas tomadas ao longo da pesquisa.

APÊNDICE B - APLICAÇÃO DA *CUTOFF RULE* NA ANÁLISE DA ARRECADAÇÃO DA CFEM

A *Cutoff Rule* é uma técnica amplamente utilizada em análises econômicas e estatísticas para destacar os principais elementos que contribuem significativamente para um fenômeno e agrupar os demais em uma categoria genérica, como "outros". Essa metodologia é especialmente recomendada quando há alta concentração de valores em um pequeno grupo, facilitando a comunicação dos resultados e a interpretação visual.

De acordo com o Greenberg (1974), o processo de aplicação da *Cutoff Rule* envolve três etapas principais:

1. **Ordenação:** Os elementos são classificados em ordem decrescente de contribuição.
2. **Seleção:** Define-se um número limitado de itens principais (por exemplo, os cinco maiores).
3. **Agrupamento:** Os elementos restantes são combinados em uma categoria genérica, denominada "outros".

Essa abordagem tem sido amplamente adotada no contexto corporativo e econômico. De acordo com a McKinsey & Company (2024), a *Cutoff Rule* é utilizada em análises do setor bancário global, destacando os principais contribuintes para o desempenho do setor e agrupando os demais para simplificar a apresentação dos dados. De forma similar, a Deloitte (2023) também ressalta o uso dessa metodologia em seus relatórios sobre o setor financeiro, enfatizando os principais fatores que influenciam o mercado e agrupando as contribuições menores para facilitar a compreensão.

No contexto desta pesquisa, a *Cutoff Rule* foi aplicada para analisar os dados de arrecadação da CFEM por unidade federativa no período de 2020 a 2022. A aplicação desta técnica justificou-se pela alta concentração de arrecadação nos estados do Pará e Minas Gerais, que, juntos, representaram 89% do total arrecadado no período acumulado.

Para facilitar a análise e garantir clareza na apresentação dos dados, os cinco maiores arrecadadores (Pará, Minas Gerais, Goiás, Bahia e Mato Grosso) foram

selecionados, enquanto os demais estados foram agrupados na categoria "outros". Essa decisão permitiu a simplificação da visualização dos resultados, mantendo o foco nos elementos de maior impacto.

Os valores completos e detalhados de arrecadação por estado são apresentados na TABELA B.1 a seguir:

TABELA B.1 – ARRECADAÇÃO DA CFEM POR UNIDADE FEDERATIVA (2020-2022)

UF	2020 (mR\$)	2021 (mR\$)	2022 (mR\$)	Acumulado 2020 a 2022 (mR\$)	Representação no acumulado
PA	3.112	4.813	2.927	10.852	46%
MG	2.365	4.603	3.118	10.085	43%
GO	122	167	176	465	2%
BA	94	175	183	452	2%
MT	78	101	109	288	1%
SP	56	72	91	219	1%
MS	35	76	83	195	1%
SC	24	32	37	93	0%
AP	23	19	15	57	0%
RS	21	25	31	77	0%
MA	20	24	20	65	0%
PR	18	23	27	69	0%
RO	16	29	35	80	0%
DF	11	18	19	48	0%
SE	11	14	25	51	0%
AM	10	14	17	41	0%
CE	10	12	15	37	0%
ES	9	12	-	21	0%
RJ	8	-	-	8	0%
TO	-	15	18	34	0%
AL	-	-	21	21	0%
Outros	28	35	49	112	0%
Total	6.071	10.279	7.018	23.368	

FONTE: O autor (2024).

A aplicação da *Cutoff Rule* possibilitou evidenciar os cinco principais estados arrecadadores, simplificando a apresentação e proporcionando uma visualização mais clara da distribuição da arrecadação da CFEM entre as unidades federativas. Os critérios utilizados para a aplicação da metodologia e a lista completa de valores analisados estão documentados nesta seção.