



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CAMPUS ACADÊMICO DO AGRESTE - CAA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

MARIA CRISTIANE NEVES DE CARVALHO

**MINERAIS ESTRATÉGICOS NO LIXO ELETRÔNICO: uma contribuição para a
economia circular**

CARUARU - PE

2025

MARIA CRISTIANE NEVES DE CARVALHO

**MINERAIS ESTRATÉGICOS NO LIXO ELETRÔNICO: uma contribuição para a
economia circular**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECAM, da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), como requisito parcial para obtenção do título de mestra em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Gestão e Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Prof. Dr^a. Simone Machado Santos

Coorientador: Prof. Dr. José Francisco de Oliveira Neto

CARUARU - PE

2025

MARIA CRISTIANE NEVES DE CARVALHO

**MINERAIS ESTRATÉGICOS NO LIXO ELETRÔNICO: uma contribuição para a
economia circular**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Gestão e Tecnologia Ambiental

Aprovado em: 18 /02/ 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Simone Machado Santos (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Sobral (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Com todo amor e gratidão, aos meus amados pais, Geraldina Josefa e José Heleno, eles são minha maior fonte de inspiração em cada passo dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso meus agradecimentos a ti, oh Deus, pela dádiva da vida, e por iluminar meu caminho para vencer todos momentos de dificuldades enfrentados em todos esses anos de estudos. Sou grata por ter me presenteado com pessoas generosas que me fortaleceram e auxiliaram em minha jornada até este momento.

Expresso profunda gratidão à minha família, sobretudo, aos meus pais, José Heleno e Geraldina Josefa, pelos valiosos ensinamentos e princípios compartilhados. Muito obrigada pela paciência e amor incondicional que nunca me faltaram. Também agradeço à minha irmã, Maria Cristina, pelo apoio em diversos momentos desafiadores da vida.

Ao meu esposo Mikhael Marcos, que esteve sempre presente, me tranquilizando quando necessário, me apoiando e auxiliando em vários momentos, meu singelo agradecimento. Aos meus amigos, agradeço por terem sido meu ponto de apoio graças a vocês não estive só ao longo dessa jornada.

Expresso meus agradecimentos aos integrantes do Laboratório de Engenharia Ambiental (LEA), pelo apoio fundamental durante a pesquisa para desenvolvimento dos resultados obtidos até aqui, em especial ao meu coorientador José Neto.

A UFPE, pela condição proporcionada durante minha trajetória na graduação e no mestrado, simultaneamente a todos os professores que transmitiram conhecimento com tanta atenção e dedicação. Me sinto grata por fazer parte do processo de interiorização do ensino superior no estado de Pernambuco.

Para finalizar, meus singelos agradecimentos a minha orientadora, Simone Machado Santos, foi um privilégio que a vida me ofertou, graças a ela estou tendo a oportunidade de realizar essa pesquisa, oportunidade única vivenciada durante minha trajetória acadêmica.

RESUMO

Os avanços tecnológicos e o desenvolvimento de novos produtos resultam no aumento da geração de lixo eletrônico, ocasionando o agravamento nos desafios de coleta e destinação adequada desses materiais. A composição dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos é caracterizada pela alta quantidade em matérias-primas minerais. Algumas dessas matérias-primas minerais são classificadas como "críticas" e/ou "estratégicas", por conta da variação do risco de suprimento e da importância econômica entre países e blocos econômicos, sendo sua escassez e redução de oferta preocupações crescentes. Considerando que esses minerais se encontram em quantidades limitadas, em locais específicos do planeta, e são fundamentais para o avanço tecnológico de diversas áreas. Controversamente, tem-se a problemática que a redução do seu fornecimento resulta em aumento de preços. Nesse sentido, este trabalho apresenta aspectos das diferentes governanças sobre os minerais, adotadas no Brasil, União Europeia, Estados Unidos, China, países selecionados por sua relevância neste tema. Adicionalmente, desenvolveu-se uma revisão sistemática sobre as matérias primas críticas, avaliando disponibilidade ou fornecimento, avaliações geopolíticas, economia circular e ações de governança. Para finalizar, avaliou-se o potencial econômico de recuperação de minerais estratégicos contidos em placa de circuito impresso (PCI), no município de Caruaru-PE. Os resultados mostraram que os três metais que apresentaram maior valor econômico foram: cobre, níquel e ouro, representando, aproximadamente, 90,2% do valor total, em ambos os cenários. Nesse sentido, o reaproveitamento desses materiais provenientes das PCIs pode representar um aporte financeiro à gestão de resíduos sólidos, além do que a recuperação desses metais possibilita uma economia mais circular.

Palavras-chaves: Resíduos sólidos. Resíduos eletroeletrônicos. Matéria-Prima Mineral. Potencial econômico.

ABSTRACT

Technological advances and the development of new products have led to an increase in electronic waste generation, exacerbating the challenges of collection and proper disposal of these materials. The composition of waste from electrical and electronic equipment is characterized by a high concentration of mineral raw materials. Some of these mineral raw materials are classified as "critical" and/or "strategic" due to variations in supply risk and economic importance across countries and economic blocs, making their scarcity and supply reduction growing concerns. These minerals are found in limited quantities in specific locations around the planet and are essential for technological advancements in various fields. However, the reduction in their supply controversially leads to price increases. In this context, this study presents aspects of different governance strategies for minerals adopted in Brazil, the European Union, the United States, and China, selected due to their relevance to this topic. Additionally, a systematic review was conducted on critical raw materials, evaluating availability and supply, geopolitical assessments, circular economy approaches, and governance actions. Finally, the economic potential for recovering strategic minerals contained in printed circuit boards (PCBs) in the municipality of Caruaru, Pernambuco, Brazil, was assessed. The results showed that the three metals with the highest economic value were copper, nickel, and gold, accounting for approximately 90.2% of the total value in both evaluated scenarios. In this regard, the reuse of materials recovered from PCBs can represent a financial contribution to solid waste management, while the recovery of these metals supports a more circular economy.

Keywords: Solid waste. Waste Electrical and Electronic. Mineral raw materials. Supply risk.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificações dos EEE por linhas (branca, marrom, azul e verde).....	20
Figura 2 - Placas de Circuito Impresso em tamanhos variados.....	27
Figura 3 - Estrutura de uma PCI com dupla camada.....	28
Figura 4 - Linha do tempo: evolução e características das Listas de Matérias-Primas da UE.....	35
Figura 5 - Os três eixos de avaliação da criticidade de metais dos EUA.....	42
Figura 6 - Fluxograma metodológico da pesquisa.....	45
Figura 7 - Fluxograma de filtragem de conjunto de dados de pesquisa para revisão sistemática e análise bibliométrica.....	47
Figura 8 - Rede de citações dos artigos disponibilizados pelo VOSviewer.....	56
Figura 9 - Rede de coocorrência das palavras-chave definidas pelos autores disponibilizados pelo VOSviewer.....	57
Figura 10 - Potencial de geração de cada mineral estratégico por PCI no Cenário 1 e Cenário 2 no município de Caruaru – PE A) 2025 B)2030 C)2035 D)2040 E)2045..	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Percentual do desempenho da Coleta e reciclagem de REEE no contexto: Global e Brasil em 2022.....	25
Gráfico 2 - Percentual da composição dos REEE (%).....	25
Gráfico 3 - Resultados da avaliação da criticidade da UE para o ano de 2023.....	39
Gráfico 4 - Evolução Populacional do Município de Caruaru-PE entre os anos de 1991 e 2022	49
Gráfico 5 – a) Variação na quantidade de publicações escolhidas pelo método Prisma entre 2015 e 2024 b) Distribuição dos autores por país da instituição	55
Gráfico 6 - Comparativo entre métodos de cálculo para projeção populacional.....	66

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 - Localização da área de estudo.....	48
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística regionais e mundial sobre geração e coleta dos REEEs, entre 2010 e 2022.....	23
Tabela 2 - Percentuais de PCIs e elementos por tipo de dispositivo eletrônico (%)..	29
Tabela 3 – Matérias-primas críticas, principais países fornecedores da UE e seu nível de governança.....	36
Tabela 4 - Matérias-primas estratégicas, principais países fornecedores da UE e seu nível de governança.....	37
Tabela 5 - Percentual de geração de REEE por tipo de EEE.....	53
Tabela 6 - Percentuais de PCIs e minerais estratégicos por tipo de EEE (%).....	53
Tabela 7 - Preços médios de venda de minerais estratégicos.....	54
Tabela 8 - Características Gerais Dos Artigos Sobre MPCs.....	59
Tabela 9 - Estimativas Populacionais para os Métodos: Decrescente de crescimento, logística, geométricos e aritméticos.....	65
Tabela 10 - Projeção da geração anual de REEE para os cenários 1 e 2.....	67
Tabela 11 - Estimativa geração de PCI (em kg/ano) por tipo de EEE no Cenário 1..	68
Tabela 12 - Estimativa da geração de PCI (em kg/ano) por tipo de EEE para o Cenário 2.....	69
Tabela 13 Avaliação do potencial econômico de Minerais estratégicos dos REEE em Caruaru-PE para os Cenários 1 e 2.....	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - As 10 maiores empresas no mercado de gerenciamento de REEE em 2023	26
Quadro 2 - Classificação e características das PCIs	28
Quadro 3 - Lista dos 24 minerais do Plano Nacional de Recursos Minerais de 2016 da China	33
Quadro 4 - Lista de elementos/minerais críticos para os EUA	40
Quadro 5 - Principais Órgãos de interesse no governo brasileiro nos minerais	43
Quadro 6 - Primeira lista de minerais estratégicos para o Brasil	44
Quadro 7 - Métodos de Avaliação Geoeconômica Utilizados no Estudo de Masoudi et al. (2017)	62

LISTA DE SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ACV	Análise de Ciclo de Vida
ADV	<i>Advantage minerals</i> (minerais vantajosos)
Ag	Prata
Al	Alumínio
ANM	Agência Nacional de mineração
As	Arsênio
Au	Ouro
Be	Berílio
Bi	Bismuto
Br	Bromo
CAA	Campus Acadêmico do Agreste
Cd	Cádmio
CE	Comissão Europeia
Cl	Cloro
CNPM	Conselho Nacional de Política Mineral
Co	Cobalto
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	Cromo
CRM	<i>Critical raw material</i> (matéria-prima crítica)
CRT	<i>Cathode Ray Tube</i> (Tubo de Raios Catódicos)
Cu	Cobre
DVD	<i>Digital Versatile Disc</i> (Disco Versátil Digital)
EEE	Equipamento Elétrico e Eletrônico
e-waste	<i>eletronic waste</i> (lixo eletrônico)
ETR	Elementos de Terras Raras
EI	<i>Economic Importance</i> (importância econômica)
ESP	<i>Economic Scarcity Potential</i> (Potencial de Escassez Econômica)
ESSENZ	<i>Integrated Method to Assess Resource Efficiency</i> (Método Integrado para Avaliar a Eficiência de Recursos)
EUA	Estados Unidos da América
Fe	Ferro
GeoPolRisk	<i>Geopolitical Supply Risk method</i> (Risco Geopolítico de fornecimento)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i> (Análise de Ciclo de Vida)
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (Display de Cristal Líquido)
LEA	Laboratório de Engenharia Ambiental
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
Li	Lítio
LIBs	<i>Lithium-Ion Batteries</i> (baterias de lítio-íon)

MMA	Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
MME	Ministério de Minas e Energia
MPC	Matéria-prima crítica
N/A	<i>Not applicable</i> (Não Aplicável)
Ni	Níquel
ONU	Organização das Nações Unidas
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
Pb	Chumbo
PCI	Placa de circuito impresso
Pd	Paládio
PE	Pernambuco
PPGECAM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses</i>
REEE	Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos
RMIS	<i>Raw Materials Information System</i> (Sistema de Informação sobre Matérias-Primas)
SR	<i>Supply-risk</i> (risco de fornecimento)
Sb	Antimônio
SEI	<i>Strategic Emerging Industry</i> (Indústria Emergente Estratégica)
SESP	Secretaria de Serviços Públicos E Sustentabilidade
SGB	Serviço Geológico do Brasil
Sn	Estanho
SRM	<i>Strategic Raw Material</i> (matéria-prima estratégica)
STAP	<i>Staple minerals</i> (minerais básicos)
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
UE	União Europeia
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UNITAR	<i>United Nations Institute for Training and Research</i> (Instituto das Nações Unidas para Formação e Pesquisa)
USGS	<i>United States Geological Survey</i> (Pesquisa Geológica dos Estados Unidos)
VHS	<i>Video Home System</i> (Sistema de Vídeo Doméstico)
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS	20
3.1.1 Panorama da geração de REEE	21
3.1.2 Composição REEE	25
3.1.3 Mercado de materiais provenientes de REEE	26
3.2 AS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	27
3.3 MATÉRIAS-PRIMAS MINERAIS	30
3.3.1 Matérias-primas minerais: uma perspectiva internacional e brasileira	32
3.3.1.1 <i>República Popular da China</i>	32
3.3.1.2 <i>União Europeia</i>	34
3.3.1.3 <i>Estados Unidos da América</i>	39
3.3.1.4 <i>República Federativa do Brasil</i>	42
4. MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DO CENÁRIO DAS MATÉRIAS-PRIMAS CRÍTICAS: ECONOMIA CIRCULAR, DESAFIOS GEOPOLÍTICOS E GOVERNANÇA	45
4.1.1 Filtragem de conjunto de dados	45
4.1.2 Análise Bibliométrica	47
4.1.3 Análise Sistemática	47
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	48
4.3 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE METAIS	49
4.3.1 Estimativa Populacional	49
4.3.1.1 <i>Projeção Aritmética</i>	49
4.3.1.2 <i>Projeção Geométrica</i>	50
4.3.1.3 <i>Projeção Logística</i>	50
4.3.1.4 <i>Projeção Decrescente de Crescimento</i>	51
4.3.2 Geração de REEE	51
4.3.3 Percentual de PCI e Matérias-Primas Minerais Estratégicas em Relação a Cada EEE	53
4.3.4 Potencial econômico das PCIs	54

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1 GESTÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS CRÍTICAS: TENDÊNCIAS GLOBAIS	55
5.1.1 Parâmetros de produção científica	55
5.1.2 Análise bibliométrica	56
5.1.3 Caracterização das pesquisas analisadas	58
5.1.3.1 <i>Estudos com foco na disponibilidade ou fornecimento de MPCs</i>	61
5.1.3.2 <i>Estudos com foco nas avaliações geopolíticas</i>	61
5.1.3.3 <i>Estudos com foco na economia circular</i>	63
5.1.3.4 <i>Estudos com foco em governança</i>	64
5.2 ESTIMATIVA DA RECUPERAÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS ESTRATÉGICAS	65
5.2.1 Projeção Populacional	65
5.2.2 Geração de REEE	66
5.2.3 Estimativa da geração de placas de circuito impresso	67
5.2.4 Potencial econômico: recuperação de matérias-primas estratégicas	71
5.3 CONTRIBUIÇÃO PARA ECONOMIA CIRCULAR	74
6. CONCLUSÕES	76
REFERÊNCIAS	79
APÊNDICE A - CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS ARTIGOS SOBRE MPCs	87

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico tem ocasionado um crescimento significativo na produção de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), também conhecidos como lixo eletrônico. Os REEE podem ser vistos como ameaça ambiental, por causa da presença de substâncias perigosas e tóxicas. Por outro lado, eles também representam uma fonte potencial de materiais valiosos/críticos, cujas fontes primárias estão sob risco significativo de fornecimento (Srivastav et al., 2023).

Atualmente a sociedade enfrenta diversos desafios relacionados ao esgotamento dessas matérias-primas e à poluição ambiental. Garantir o abastecimento de matérias-primas minerais é tema prioritário para muitos países, sobretudo para aqueles que apresentam elevada dependência de importações. Alguns desses recursos naturais apresentam elementos essenciais e têm oferta limitada e/ou restrita (Zanoletti; Cornelio & Bontempi, 2021).

Fatores geológicos, tecnológicos, geopolíticos, econômicos, ambientais e sociais podem ameaçar o fornecimento dessas matérias-primas. Todos esses fatores levam a uma potencial disputa global por recursos, que deverá se intensificar num futuro próximo, onde a dependência dessas matérias-primas pode superar a atual dependência do petróleo (European Commission, 2023).

Algumas matérias-primas têm especificidades, tendo em vista que o risco de suprimento e sua importância econômica variam entre países ou blocos econômicos, sendo classificadas como "críticas" devido às incertezas que causam em seus mercados (Ferreira de Castro; Peiter; Góes, 2021). A nomenclatura dessas matérias-primas minerais varia entre os países, refletindo diferentes prioridades econômicas, estratégicas e políticas.

A gestão de REEE apresenta desafios globais significativos. Em 2022, cerca de 13,8 milhões de toneladas de REEE foram documentados como coletados e reciclados em todo o mundo, representando aproximadamente 22,3% do total gerado. No Brasil, o cenário é ainda mais crítico, apenas 79 mil toneladas de REEE foram documentados como coletados e reciclados no mesmo período, o que corresponde aproximadamente 3,95% do total gerado (Baldé et al., 2024).

A promoção do desenvolvimento sustentável, através da conversão de resíduos em recursos, está ganhando cada vez mais atenção no mundo. O crescente

quantitativo de REEE gerado, anualmente, está se tornando uma das maiores fontes de resíduos sólidos. Portanto, a conversão direta de resíduos sólidos em materiais funcionais é uma alternativa promissora (Jiang et al., 2023). Nesse sentido, a reciclagem dos REEE é uma fonte importante de matérias-primas secundárias e leva a uma economia mais circular.

Dessa forma, essa pesquisa também fornece uma visão abrangente das tendências globais em torno da gestão de matérias-primas críticas, destacando o risco de fornecimento associado à sua disponibilidade. Adicionalmente, a pesquisa, desvenda o papel fundamental da recuperação de matérias-primas críticas, a partir de REEE, como forma de incentivo à e proteção ambiental.

Ademais, esta pesquisa forneceu uma visão geral sobre as matérias-primas estratégicas contidas nos REEE, utilizando o município de Caruaru, como local de pesquisa e de estudo de caso. Para o estudo de caso, realizou-se a estimativa da geração de REEE e placas de circuito impresso (PCIs) no município de Caruaru para dois cenários distintos: o Cenário 1, baseado na curva com os menores valores de projeção populacional (logística) e o Cenário 2, fundamentado na maior projeção populacional (geométrica).

A partir dos montantes de REEE estimados, procedeu-se ao estudo do potencial econômico de recuperação de matérias-primas minerais (que são consideradas estratégicas para o Brasil) e estão contidas nas PCIs desses resíduos. Esses resultados fornecem dados sobre o valor econômico dos minerais estratégicos, através da projeção do valor total para os anos: 2025, 2030, 2035, 2040 e 2045.

Esta pesquisa está alinhada aos ODS (Objetivos de desenvolvimento sustentável) de números: 9 (indústria, inovação e infraestrutura), 12 (consumo e produção responsáveis e 17 (fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável).

Neste contexto, este estudo teve como objetivo avaliar o potencial econômico e de recuperação de minerais estratégicos contidos nas PCIs dos REEE, gerados no município de Caruaru.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial de recuperação de minerais estratégicos contidos nas placas de circuito impresso dos resíduos de equipamento eletroeletrônicos, gerados no município de Caruaru.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Fornecer uma visão abrangente das tendências globais em torno da gestão de matérias-primas críticas, destacando o risco de fornecimento associado à sua disponibilidade.
- b) Estimar os quantitativos de minerais estratégicos presentes nas Placas de Circuito Impresso (PCIs);
- c) Avaliar o potencial econômico dos minerais estratégicos provenientes das PCIs gerados no município de Caruaru.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

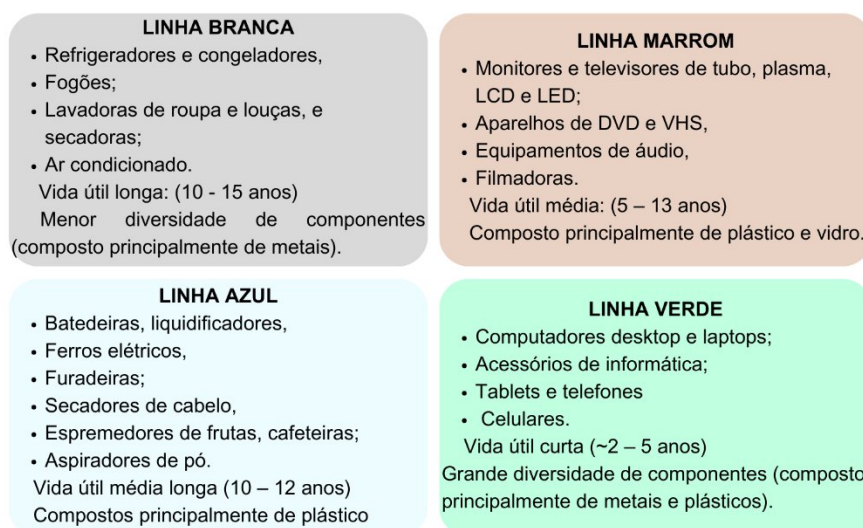
3.1 RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

Os equipamentos eletroeletrônicos (EEE) são amplamente utilizados em ambientes domésticos e empresas, incluindo produtos como eletrodomésticos de cozinha, brinquedos, ferramentas musicais e dispositivos de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC), como *smartphones* e *notebooks*. Além desses usos cotidianos, os EEE estão cada vez mais presentes em setores como transporte, saúde, sistemas de segurança e geração de energia, incluindo a fotovoltaica (Forti et al., 2020).

Ademais, com a expansão da Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*), mais EEE estão sendo utilizados em sensores e dispositivos para casas e cidades inteligentes, ocasionando um aumento no quantitativo desses EEE (Forti et al., 2020). Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) quando algum item de EEE é descartado, ele se transforma em REEE (resíduos de equipamentos eletroeletrônicos), conhecidos como lixo eletrônico, do inglês *electronic waste* (Wagner et al., 2022).

No plano nacional, conforme a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2013), os EEE incluem todos os produtos cujo funcionamento depende do uso de corrente elétrica ou de campos eletromagnéticos. Esses produtos podem ser classificados em quatro linhas principais (branca, marrom, azul e verde), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Classificações dos EEE por linhas (branca, marrom, azul e verde)



Fonte: Adaptado de ABDI (2013).

A classificação das linhas de EEE ao longo do tempo é fundamental para compreender e gerenciar o ciclo de vida deles, além dos impactos associados à sua destinação final.

3.1.1 Panorama da geração de REEE

A Entretanto, para agravar mais a situação, o Brasil documentou a coleta e reciclagem formal de apenas cerca de 79 mil toneladas de REEE gerados (Baldé et al., 2024). Representando aproximadamente 3,95% de REEE gerados no país, essa baixa taxa de coleta é um desafio significativo para a gestão de REEE, o que indica a necessidade de melhorias em infraestrutura de reciclagem e políticas de incentivo à coleta e ao descarte adequado desses resíduos.

Tabela 1 apresenta estatísticas da geração mundial de REEE por região e sub-região, entre 2010 e 2022, no qual está incluso as seguintes informações: região, sub-região, população, geração de REEE *per capita* e total, além das taxas de coleta e reciclagem formalmente documentados desses resíduos.

Os dados indicam que, entre 2010 e 2022, a população mundial aumentou de aproximadamente 6,89 bilhões para 7,89 bilhões de pessoas. Entretanto, a geração de REEE apresentou um crescimento muito mais acentuado. Em 2010, o mundo gerou aproximadamente 34,2 milhões de toneladas de REEE, já em 2022 esse valor subiu para aproximadamente 61,9 milhões de toneladas (Baldé et al., 2024).

Essa discrepância evidencia que o aumento da população não acompanhou a quantidade de REEE gerados. Enquanto a população cresceu cerca de 14,5% nesse período, a geração de REEE quase dobrou, com aumento de aproximadamente 81%. Esse contraste reflete um consumo crescente de eletrônicos e uma vida útil cada vez mais curta, resultando em aumento significativo na quantidade de REEE *per capita*.

Essa diferença também destaca a necessidade de melhorar as práticas de reciclagem e gestão de REEE. Atualmente, apenas uma pequena fração desses resíduos é coletada e reciclada formalmente, o que ocasiona perda substancial de recursos valiosos e aumenta os riscos ambientais e de saúde pública. As políticas e infraestruturas de reciclagem precisam ser aprimoradas para lidar com esse crescimento desproporcional na geração de lixo eletrônico.

Conforme estimativas levantadas no documento "*The Global E-waste Monitor 2024*", do Instituto das Nações Unidas para Treinamento e Pesquisa (*Unitar - United Nations Institute for Training and Research*), o Brasil gerou aproximadamente 2,4 milhões de toneladas de lixo eletrônico em 2022, o que equivale a uma geração *per capita* de 11,4 quilogramas por habitante (Baldé et al., 2024).

Entretanto, para agravar mais a situação, o Brasil documentou a coleta e reciclagem formal de apenas cerca de 79 mil toneladas de REEE gerados (Baldé et al., 2024). Representando aproximadamente 3,95% de REEE gerados no país, essa baixa taxa de coleta é um desafio significativo para a gestão de REEE, o que indica a necessidade de melhorias em infraestrutura de reciclagem e políticas de incentivo à coleta e ao descarte adequado desses resíduos.

Tabela 1 - Estatística regionais e mundial sobre geração e coleta dos REEEs, entre 2010 e 2022.

(continua)

Região	Sub-região	Nº de países por região	População (milhões)		Geração de REEE				REEE documentado como coletado e reciclado formalmente			
					(em kg <i>per capita</i>)		(em toneladas)		(em toneladas)		Taxa de coleta (%)	
			2010	2022	2010	2022	2010	2022	2010	2022	2010	2022
África	África Oriental	18	337	466	0,5	0,9	154	431	1,9	2,4	1,2	0,5
	África Central	9	131	193	1	1,6	131	307	0	0,1	0,0	0,0
	Norte da África	6	205	257	3,7	5,8	763	1.484	0	0	0,0	0,0
	África do Sul	5	59	68	5,4	8,5	317	578	0	23	0,0	4,0
	África Ocidental	16	308	424	1	2	275	752	0	0	0	0
	Total	54	1040	1408	2	3	1640	3551	2	25	0	1
Américas	Caribe	14	29	32	5,1	7,6	148	241	0	0,1	0,0	0,0
	América Central	8	155	178	6,1	10,2	940	1.811	31	60,3	3,3	3,3
	América do Norte	2	344	376	16,6	21,2	5.695	7.963	3.118	4.151	54,8	52,1
	América do Sul	12	391	435	5,8	10,1	2.285	4.413	0	117,1	0,0	2,7
	Total	36	918	1.021	9,9	14,1	9.068	14.427	3.149	4.328	34,7	30,0

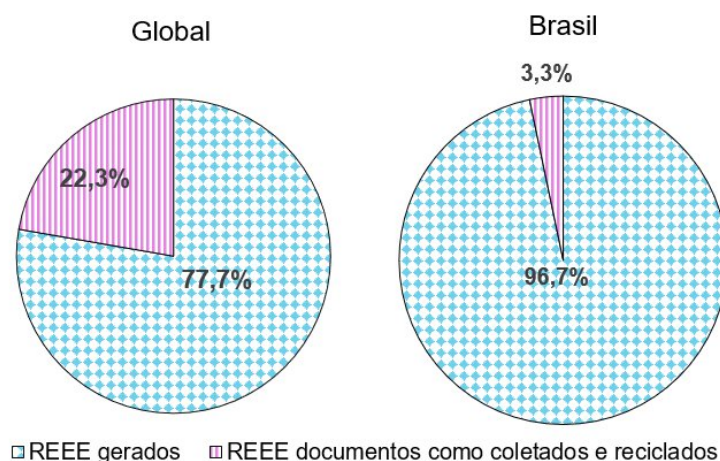
(conclusão)

Região	Sub-região	Nº de países por região	População (milhões)		Geração de REEE				REEE documentado como coletado e reciclado formalmente			
					(em kg per capita)		(em toneladas)		(em toneladas)		Taxa de coleta (%)	
Ásia	Ásia Central	5	63	77	2,5	5,2	161	396	0	12,8	0,0	3,2
	Ásia Oriental	7	1.554	1.638	4,9	9,9	7.672	16.292	1.027	3.225	13,4	19,8
	Sudeste Asiático	11	596	678	3,4	6,4	2.045	4.362	0	0	0,0	0,0
	Sul da Ásia	9	1.723	1.999	1,1	3,1	1.883	6.14	desconhecido	60,1	desconhecido	1,0
	Ásia Ocidental	17	232	286	6,5	10,3	1.498	2.957	2,6	270,1	0,2t	9,1
	Total	49	4.168	4.677	3,2	6,4	13.259	30.147	1.03	3.568	7,8	11,8
Europa	Europa Oriental	10	295	291	7,4	12,7	2.177	3.678	355	1.005	16,3	27,3
	Norte da Europa	10	99	106	18,4	23,2	1.824	2.456	940	1.042	51,5	42,4
	Sul da Europa	13	152	150	15,5	18	2.349	2.7	844	1.069	35,9	39,6
	Europa Ocidental	7	188	196	18,1	21,7	3.389	4.243	1.641	2.478	48,4	58,4
	Total	40	733	742	13,3	17,6	9.739	13.076	3.78	5.593	38,8	42,8
Oceania	Austrália e Nova Zelândia	2	26	31	16,8	21,9	441	684	desconhecido	292	desconhecido	42,8
	Melanésia	4	9	12	1,1	1,8	10	21	0	0	0,0	0,0
	Micronésia	5	0,3	0,3	1,4	2,6	0,4	0,8	0	0	0,0	0,0
	Polinésia	3	0,3	0,3	2,7	3,3	0,8	1,1	0	0	0,0	0,0
	Total	14	36	44	12,6	16,1	452	707	desconhecido	292	desconhecido	41,4
Global	Total	193	6.896	7.893	5	7,8	34.157	61.908	7.961	13.807	23,3	22,3

Fonte: Adaptado de Baldé et al. (2024).

Em comparação com a coleta global, apenas 13,8 milhões de toneladas foram coletados e reciclados formalmente, representando aproximadamente 22,3%. Essa disparidade apresentada no Gráfico 1, evidencia que embora o mundo enfrente desafios na gestão de REEE, a situação do Brasil é particularmente preocupante, com uma taxa de coleta muito inferior à média global.

Gráfico 1 - Percentual do desempenho da Coleta e reciclagem de REEE no contexto: Global e Brasil em 2022

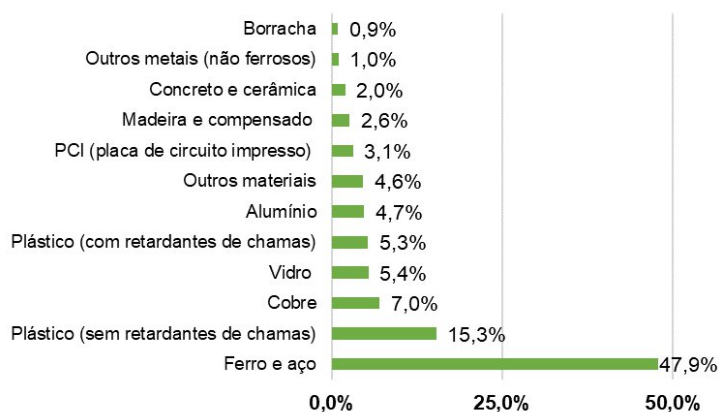


Fonte: Baldé et al. (2024).

3.1.2 Composição REEE

A composição dos EEE introduzidos no mercado é diferente dos REEE resultantes, devido às alterações na composição ao longo do tempo (Huisman et al., 2007). Segundo Oliveira Neto (2019) os REEE contêm uma vasta gama de materiais que variam com o tipo de produto que os gerou, com destaque para metais (tanto valiosos quanto perigosos) e plásticos, como apresenta o Gráfico 2.

Gráfico 2 - Percentual da composição dos REEE (%)



Fonte: Adaptado de Widmer et al. (2005).

3.1.3 Mercado de materiais provenientes de REEE

O valor dos metais comuns presentes no lixo eletrônico é bastante elevado. Assim, a reciclagem de REEE, tem grande potencial de ser um negócio lucrativo, e as 10 maiores empresas do mercado que estão investindo no gerenciamento de REEE estão listadas (Quadro 1), com respectivos países e continentes.

Quadro 1 - As 10 maiores empresas no mercado de gerenciamento de REEE em 2023

Empresas	País*	Continentes*	Atividades gerenciadas
<i>Aurubis</i>	Alemanha	Europa	Processa metais complexos, sucatas e materiais recicláveis, transformando-os principalmente em metais não ferrosos. A companhia atua nos dois segmentos de negócios: refino e processamento de metais e produtos laminados planos.
<i>Umicore</i>	Bélgica	Europa	Fornece soluções de mobilidade limpa para diversos setores, como energia, automotivo, produtos químicos, eletrônicos e fabricação de soluções baseadas em tecnologias limpas. Opera em três áreas de negócios: reciclagem, energia e tecnologias de superfície, e catálise.
<i>Sims Metal Management Limited</i>	EUA	América do Norte	Especializada na reciclagem de metais, fornece metais reciclados ferrosos e não ferrosos.
<i>Boliden</i>	Suécia	Europa	Opera em dois segmentos: Área de Negócios de Minas e Área de Negócios de Fundições de Metais.
<i>Stena Metall Group</i>	Suécia	Europa	Algumas das áreas de negócios são: reciclagem, de alumínio, recuperação de óleo, reciclagem de aço e reciclagem de componentes eletrônicos.
<i>Tetronics</i>	Reino Unido	Europa	Soluções de gestão de resíduos para os setores de construção, refino de metais, nuclear, petróleo e gás, químico, entre outros. Sua tecnologia de recuperação por plasma para gestão de REEE oferece alternativas para a recuperação de metais.
<i>Electronic Recyclers International, Inc.</i>	EUA	América do Norte	Oferece sistema de trituradores de painel plano, separação e processamento de vidro de CRT, soluções locais de apagamento de dados via USB e programa de coleta de reciclagem para baterias, lâmpadas e eletrônicos.
<i>Enviromental-Hub Holdings Ltda.</i>	Singapura	Ásia	Investe na gestão de propriedades comerciais e industriais, no comércio de metais ferrosos e não ferrosos, REEE, reciclagem de REEE, refino de platina, fundações e obras de construção.
<i>Triple M Metal LP</i>	Canadá	América do Norte	Serviços de reciclagem de sucata metálica ferrosa e não ferrosa, transformando-se em chapas metálicas, placas, extrusões, folhas, fios, barras, tubos e varas.
<i>Global Electric Electronic Processing</i>	Canadá	América do Norte	Atua na gestão de todo o ciclo de vida dos ativos de TI através da gestão de ativos eletrônicos e reciclagem de eletrônicos no fim de sua vida útil. Ademais, oferece soluções de serviço para reutilização e reciclagem de REEE.

* Local onde a companhia está sediada

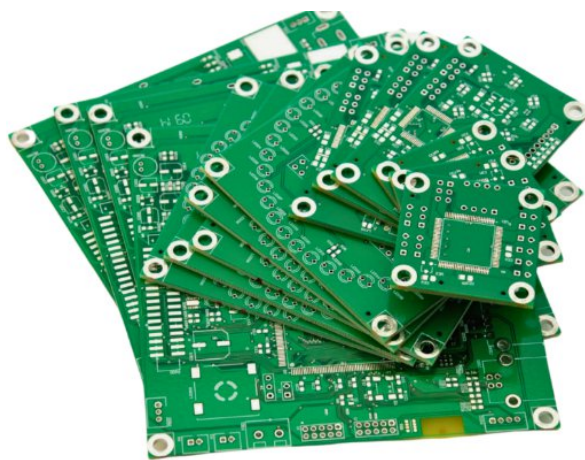
Fonte: Adaptado de *Meticulous Research* (2023).

O continente europeu destaca-se com o maior número de empresas líderes no gerenciamento de REEE, refletindo as políticas ambientais rigorosas relacionadas a esse tipo de resíduo nos países europeus. A América do Norte também demonstra uma forte presença neste mercado, com empresas nos Estados Unidos e Canadá investindo significativamente no setor.

3.2 AS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

As Placas de Circuito Impresso (PCI) são componentes essenciais na maioria dos sistemas eletrônicos, tornando-se indispensáveis na atualidade. As PCIs consistem em um substrato inerte onde são impressas ou depositadas pistas condutoras sobre um ou ambos os lados, na qual, a pista apresenta função de conectar eletricamente os componentes fixados na placa para que executem as suas funções (Oliveira, 2012). Um exemplo de PCI é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Placas de Circuito Impresso em tamanhos variados



Fonte: *Viasion* (2023).

Existem três tipos de PCIs, os de camada única e os de duas camadas/multicamadas. As PCIs ainda podem ser rígidas, flexíveis ou uma combinação das duas. No Quadro 2, estão dispostos os tipos de PCIs e algumas de suas principais características (material, espessura e aplicações).

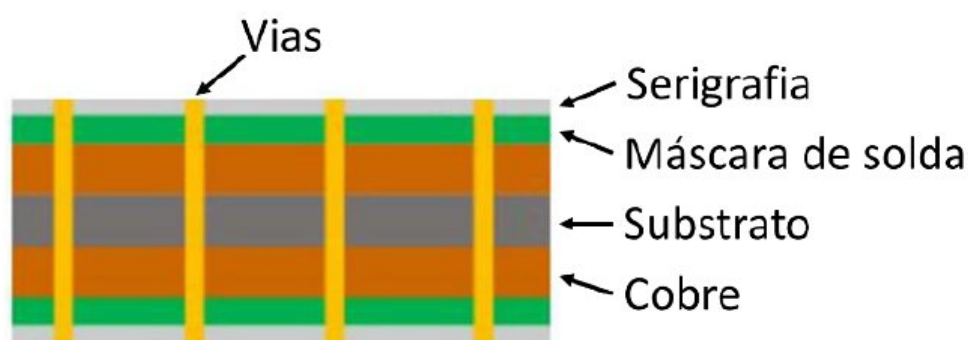
Quadro 2 - Classificação e características das PCIs

Tipo	Material	Espessura (mm)	Aplicações
PLACA SIMPLES (camada única)	Feita de cartão laminado e tecido de vidro	2 à 5	Dispositivos eletrônicos comuns.
PLACA DUPLA (duas camadas)	Feita de placa de resina epóxi e tecido de vidro	0,2 à 5	Equipamentos eletrônicos complexos, como computadores, instrumentação, etc.
PLACA MULTICAMADAS	Padrão condutor interno e laminação adesiva isolante, a camada externa é feita de placa revestida	1,2 à 2,5	Componentes de alta capacidade, fios curtos e retos, equipamentos eletrônicos com alto desempenho de blindagem.
PLACA FLEXÍVEL	Feita de uma camada flexível de plástico ou outro material isolante flexível	0,25 à 1	Placa simples, dupla e multicamada, usada para fabricar equipamentos eletrônicos com formatos complexos.
PLACA RÍGIDAS	Placa de folha de cobre prensada a quente com cola especial para placa de fiação impressa	-	Teclados de switches ou computadores.

Fonte: Adaptado de Xu & Liu (2015).

A Figura 3 indica os principais componentes das estruturas das PCI, basicamente apresentam camadas de substrato, trilhas impressas, máscaras de solda, serigrafias e vias.

Figura 3 - Estrutura de uma PCI com dupla camada



Fonte: Adaptado de Li; Eksteen & Oraby (2018).

Uma proporção significativa de REEE é constituída por PCIs, representando cerca de 8% em peso dos resíduos coletados de pequenos aparelhos (Waste &

Resources Action Programme Project, 2009 *apud* Luda, 2011) e 3% da massa global de REEE (Dalrymple et al., 2007).

Assim, a reciclagem sustentável de PCIs, pode ser um caminho para a resolução dos problemas socioambientais ligados ao processamento de REEE, em países em desenvolvimento (Kang et al., 2023). Não apenas para proteger o meio ambiente, mas conservar os recursos naturais, pois a redução do consumo contribui para evitar o esgotamento das matérias-primas existentes (Oliveira, 2012).

A Tabela 2 apresenta o percentual de geração de PCI para os seguintes EEE: computador de mesa (monitor e CPU), notebook, impressora, tablet, telefone celular, TV CRT, TV LCD/plasma e TV LED; e o percentual dos seguintes elementos para cada EEE: Ferro (Fe), Cobre (Cu), Prata (Ag), Ouro (Au), Paládio (Pd), Alumínio (Al), Berílio (Be), Bismuto (Bi), Cromo (Cr), Estanho (Sn), Zinco (Zn), Antimônio (Sb), Arsênio (As), Bromo (Br), Cádmio (Cd), Cloro (Cl), Chumbo (Pb) e Níquel (Ni).

Cada um desses EEE possui os mesmos metais críticos e/ou estratégicos em suas PCIs, a criticidade dos minerais varia com cada país ou bloco econômico.

Tabela 2 - Percentuais de PCIs e elementos por tipo de dispositivo eletrônico (%)

(continua)

Elementos	PC: monitor	PC: CPU	Notebook	Impressora	Tablet	Celular	TV Tubo	TV LCD/ Plasma	TV LED
PCI*	12	14	15	3	10	10	10	7	2
Ferro (Fe)**	3,4	1,3	3,7	14,1	3,7	1,8	3,4	6,93	6,93
Cobre (Cu)**	7,2	20	19	20	19	33	7,2	17,25	17,25
Prata (Ag)**	0,08	0,1	0,1	0,17	0,1	0,4	0,08	0,08	0,08
Ouro (Au)**	0,01	0	0,1	0,04	0,01	0,2	0,01	0,01	0,01
Paládio (Pd)**	0,002	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0,002	0,002
Alumínio (Al)**	6,2	1,8	1,8	3,38	1,8	1,5	6,2	10,05	10,05
Berílio (Be)**	0	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0	0	0
Bismuto (Bi)**	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
Cromo (Cr)**	0,02	0	0,1	0,54	0,1	0,1	0,02	0,02	0,02

(conclusão)

Elementos	PC: monitor	PC: CPU	Notebook	Impressora	Tablet	Celular	TV Tubo	TV LCD/ Plasma	TV LED
Estanho (Sn)**	0,18	8,3	1,6	0,69	1,6	3,5	0,18	0,73	0,73
Zinco (Zn)**	5,3	1,7	1,6	1,35	1,6	0,5	5,3	1,17	1,17
Antimônio (Sb) **	0,16	0,3	0,1	0,13	0,1	0,1	0,16	0,16	0,16
Arsênio (As)**	0	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0	0	0
Bromo (Br)**	0,39	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,39	0,39	0,39
Cádmio (Cd)**	0	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0	0	0
Cloro (Cl)**	0,31	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,31	0,31	0,31
Chumbo (Pb)**	1,4	2,1	1	0,79	1	1,3	1,4	1,09	1,09
Níquel (Ni)**	0,26	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	0,26	0,26	0,26

* % da massa do PCI em relação à massa de cada EEE. Adaptado de Babbitt; Althaf & Chen (2017).

** % da massa do metal em relação à massa do PCI. Adaptado de Cucchiella et al. (2016).

3.3 MATÉRIAS-PRIMAS MINERAIS

As matérias-primas minerais são a base da economia moderna e continuarão a desempenhar esse papel futuramente. Algumas matérias-primas possuem especificidades, uma vez que tanto o risco de suprimento quanto sua importância econômica variam entre países ou blocos econômicos. Elas são classificadas como "críticas" devido às incertezas que geram em seus mercados (Ferreira De Castro; Peiter; Góes, 2021).

A nomenclatura de matérias-primas minerais difere entre os países, refletindo prioridades econômicas, estratégicas e políticas distintas. No Brasil, a Resolução N° 2, de 18 junho de 2021, da "Política Pró-Minerais Estratégicos" oferece uma definição precisa de "minerais estratégicos", dividida em três classificações: "dependência de importações", "essenciais" e/ou "importantes" (Brasil, 2021a), enquanto na Europa são denominados "críticos" e/ou "estratégicos" (European Commission, 2023).

Ademais, minerais "críticos" e/ou "estratégicos" são conceitos que variam globalmente, sem uma definição universalmente aceita. Essas denominações são objeto de debates contínuos, à medida que avanços tecnológicos, interrupções na cadeia de suprimentos e crises globais influenciam a percepção de sua importância.

Um mineral pode ser considerado crítico e/ou estratégico para a economia de um país, mas não necessariamente para outro (Pope & Smith, 2023).

A escassez de matéria-prima “crítica” e a redução de sua oferta são preocupações crescentes. A concentração em alguns países/regiões e as consequentes incertezas sobre a oferta dessas matérias-primas levaram a picos frequentes de preços. Esses aumentos de preços ocorrem quando a demanda por novas aplicações excede a oferta, ou quando há especulação ou cotas comerciais (Slowinski; Latimer; Mehlman, 2013).

Juntamente com a geopolítica, questões ambientais, especialmente relacionadas à mineração, são fatores determinantes para o preço e a oferta de matérias-primas. A mineração e o processamento de minerais estão sempre associados a impactos na qualidade do ar, qualidade e quantidade da água, uso da terra, ecossistemas e saúde humana (Manhart et al., 2019; Topal; Öbek & Arslan, 2019).

Em 2010, a perturbação no comércio de elementos de terras raras causada por disputas territoriais entre China e Japão é o caso mais representativo da criticidade de matérias-primas, (Kim et al. 2019). Os conflitos políticos atuais têm se espalhado (por meio de guerras, golpes de estado, entre outros) em vários países de origem de matérias-primas críticas nos últimos tempos também. Na Guiné, as áreas de extração de cobalto são afetadas por conflitos e violações de direitos humanos. A extração de elementos de terras raras (ETR) na China é uma fonte de poluição, degradação ambiental e reclamações de comunidades locais (*International Institute For Sustainable Development*, 2019).

Esses conflitos tendem a afetar o mercado global dessas matérias-primas, causando escassez e flutuações de preços. Segundo a OECD (2022), estas vulnerabilidades na cadeia de abastecimento resultam de restrições às exportações, dependências bilaterais, falta de transparência e assimetrias de mercado e da concentração da produção em poucos países.

A reciclagem é uma fonte importante de matérias-primas secundárias e contribui para uma economia mais circular. No entanto, segundo Mathieux et al. (2017), o uso de matérias-primas críticas na economia da União Europeia ainda está longe de ser totalmente circular. A demanda por matérias-primas minerais está crescendo em vários setores e a contribuição da reciclagem ainda é pequena.

Muitas das matérias-primas minerais são encontradas no lixo eletrônico. A recuperação desses materiais a partir dos REEE envolve a melhoria do *design* dos equipamentos elétricos e eletrônicos e o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem inovadoras (Mathieux et al., 2017).

A presença de compostos perigosos que requerem tratamentos específicos no lixo eletrônico torna a reciclagem ainda mais difícil (Horta Arduin et al., 2020). Portanto, ainda há um longo caminho a percorrer para superar as barreiras tecnológicas e de gestão que impedem a recuperação de materiais, incluindo matérias-primas estratégicas e/ou críticas, do lixo eletrônico.

3.3.1 Matérias-primas minerais: uma perspectiva internacional e brasileira

Nesta seção, os dados compilados mostram as tendências atuais de gestão e os desafios dos minerais. Através da observação dos aspectos das diferentes governanças sobre os minerais, adotadas no Brasil, União Europeia, Estados Unidos da América, China, países selecionados por sua relevância neste tema.

3.3.1.1 *República Popular da China*

A China desempenha um papel central no fornecimento mundial de minerais estratégicos e/ou crítico da maioria desses elementos. O exemplo mais destacado do domínio chinês no mercado global são os ETR no setor (Ferreira de Castro; Peiter; Góes, 2021), elas são consideradas essenciais para uma ampla gama de produtos de alta tecnologia, desde *smartphones*, telas de LED e laptops até veículos elétricos e turbinas eólicas (Andersson, 2020). As maiores reservas mundiais comprovadas de ETR estão localizadas na China, com 44 milhões de toneladas (USGS, 2022a).

A China priorizou sua política interna desde a década de 1950, o que impactou significativamente a cadeia global de ETR; com o desenvolvimento de técnicas avançadas de extração e processamento de ETR (IBRAM, 2024). Porém, antes da década de 1990, o país tinha uma participação modesta no mercado de ETR e exportava concentrados de baixo valor. Porém, em 2000, o país se tornou o principal produtor e exportador mundial de ETR (Mancheri, 2015).

Historicamente, a China utilizou algumas restrições de exportação para fortalecer a competitividade das suas indústrias de alta tecnologia, um exemplo notável dessa estratégia foi a disputa com o Japão em 2010, quando a China restringiu

substancialmente as exportações de ETR em resposta a um conflito marítimo (IBRAM, 2024). Ainda, em 2010, a China elevou drasticamente as cotas fiscais na exportação de ETR, tungstênio e molibdênio e essa ação ocasionou impacto em países como os Estados Unidos, Japão e a União Europeia, que começaram a discutir a segurança do abastecimento desses elementos para o resto do mundo (IBRAM, 2024).

A China tem adotado uma estratégia protecionista histórica em relação aos seus recursos minerais, favorecendo sua indústria doméstica (Ferreira de Castro; Peiter; Góes, 2021). O país prevê que a lista seja atualizada a cada cinco anos, em conformidade com os planos quinquenais nacionais para o desenvolvimento econômico e social, com o objetivo de: (i) incentivar a exploração de minerais escassos, (ii) regular a quantidade de minerais com vantagens tradicionais, (iii) reduzir a produção de minerais quando houver excesso de capacidade, e (iv) garantir o fornecimento de minerais para indústrias emergentes estratégicas (IBRAM, 2024).

Conforme primeira política oficial e catálogo de “minerais estratégicos” o Plano Nacional de Recursos Minerais 2016-2020 (State Council, 2016), identificou-se a primeira lista com 24 minerais (Quadro 3), organizados em três grupos principais: (i) minerais energéticos, (ii) minerais metálicos e (iii) minerais não metálicos. Além disso, há uma subdivisão (iv) que abrange os minerais estratégicos (denominados minerais SEI), incluindo ETR’s, lítio e grafite. Também são mencionados (v) os minerais básicos, como petróleo, gás natural, ferro, cobre e alumínio, e (vi) os minerais vantajosos, para os quais não foram fornecidos exemplos.

Quadro 3 - Lista dos 24 minerais do Plano Nacional de Recursos Minerais de 2016 da China

	Energia						Minerais Metálicos														Minerais Não Metálicos			
Matéria Prima/Mineral	Petróleo	Gás Natural	Gás de Xisto	Carvão	Metano carbonífero	Urânio	Ferro	Cromo	Cobre	Alumínio	Ouro	Níquel	Tungstênio	Estanho	Molibdênio	Antimônio	Cobalto	Lítio	ETRs	Zircônio	Fósforo	Cloreto de potássio	Grafita cristalina	Fluorita
STAP*	X	X	X	X	X		x	x	x	x		x									x	x	x	x
SEI**										x		x	x		x	x	x	x	x	x			x	x
Adv***													x	x		x							x	

*STAP – *Staple minerals* (minerais básicos)

**SEI – *strategic emerging industry* (minerais emergentes industriais)

***ADV – *advantage minerals* – (minerais vantajosos)

Fonte: Adaptado de Andersson (2020).

3.3.1.2 União Europeia

A União Europeia (UE) é considerada uma das pioneiras globais na formulação de políticas especificamente voltadas para garantir o suprimento de matérias-primas (IBRAM, 2024), devido à escassez de reservas minerais. Em 2008, o Parlamento Europeu lançou a política chamada “*The Raw Materials Initiative: Meeting Our Critical Needs for Growth and Jobs in Europe*” (A Iniciativa sobre Matérias-Primas: Atendendo às Nossas Necessidades Críticas para Crescimento e Empregos na Europa) que tem como objetivo garantir um suprimento estável e um acesso não distorcido às matérias-primas, pois têm se tornado cada vez mais importantes e são vistas como fundamentais para o desenvolvimento e a competitividade (IBRAM, 2024).

Essa iniciativa da Comissão Europeia (CE) tem como base os seguintes três pilares: (i) uma avaliação do suprimento da Europa, considerando tanto a autossuficiência quanto a dependência significativa de importações; (ii) as mudanças no mercado mundial relacionadas à oferta e flutuação de preços, bem como novas estratégias industriais e riscos de crises de mercado; e (iii) a eficiência no uso de recursos por meio da redução do consumo de matérias-primas primárias e do desenvolvimento de iniciativas de reciclagem, substituição e priorização do uso de matérias-primas renováveis (IBRAM, 2024).

Desde 2011, a UE vem publicando regularmente (trienalmente) suas listas, a primeira lista publicada apresentou 14 matérias-primas. A lista mais recente foi publicada em 2023 e apresentou 34 matérias, a Figura 4 ilustra a evolução dessas listas de matérias-primas consideradas críticas e/ou estratégicas para a UE.

A CE oferece um sistema de informações sobre matérias-primas: Sistema de Informação sobre Matérias-Primas (*RMIS* ou *Raw Materials Information System*). A versão mais recente, *RMIS* 3.0, lançada em março de 2023, traz atualizações significativas no layout da *web*, interface visual e funções de pesquisa. O *RMIS* cobre todas as cadeias de valor de matérias-primas, principalmente metais e minerais, e considera o ciclo de vida completo dos materiais, fornecendo conhecimento sobre sustentabilidade, riscos de fornecimento e circularidade. O *RMIS* abrange áreas temáticas como política, demanda setorial, risco de fornecimento, economia circular, e sustentabilidade, com conhecimento acessível por material, setor, país e tema (*RMIS*, 2023).

Figura 4 - Linha do tempo: evolução e características das Listas de Matérias-Primas da UE



Fonte: Adaptado de IBRAM (2024).

A Tabela 3 apresenta a lista (de 2023) com 34 matérias-primas críticas (MPC), do inglês *critical raw materials (CRMs)*, com os principais fornecedores da UE, seu nível de governança e estágio de produção (seja extração ou processamento), divulgados pela Comissão Europeia. A Tabela 4, mostra a lista de 16 matérias-primas estratégicas (*SRMs – strategic raw materials*), com as mesmas informações.

CRM para UE são aquelas matérias classificadas como de grande importância para a economia e a disponibilidade está sujeita a um alto risco. Os dois principais parâmetros usados para determinação da criticidade do material para a UE são: Importância Econômica (*EI - economic importance*) e Risco de Suprimento (*SR - supply-risk*), a lista de *CRMs* é estabelecida com base nas matérias-primas que atingem ou excedem os limiares para ambos os parâmetros. Já as *SRM* são aquelas que desempenham um papel crucial em tecnologias voltadas para a transição verde e digital, além de objetivos de defesa e aeroespacial (European Commission, 2023).

Para a UE, a China representa a maior posição de destaque na cadeia produtiva para a maioria das matérias-primas críticas e/ou estratégicas que são elas:

bismuto, gálio, germânio, grafite natural, escândio, tungstênio, vanádio, grafite natural e magnésio.

Dentre alguns materiais que compõem a lista da UE de MPCs, que são de alto risco de suprimento, destaca-se o nióbio, cujas principais reservas se encontram no Brasil (seu nível de governança de 92%). Em 2022, foram exportadas cerca de 110 mil toneladas de ferro-nióbio, gerando uma receita de 2,7 bilhões de dólares, já as importações desse mineral foram insignificantes, evidenciando que o ferro-nióbio é um produto nacional de grande importância (IBRAM, 2024).

Tabela 3 – Matérias-primas críticas, principais países fornecedores da UE e seu nível de governança
(continua)

Matérias-primas críticas	Principais fornecedores da EU	Nível de governança ¹	Produção ²	
			Extração	Processamento
Antimônio	Turquia	63%	X	
Arsênico	Bélgica	59%		X
Alumínio/Bauxita	Guiné	63%	X	
Barita	China	45%	X	
Berílio	EUA	60%	X	
Bismuto	China	65%		X
Boro/boratos	Turquia	99%	X	
Cobalto	N/A*	N/A*	X	
Carvão metalúrgico	Polônia	26%	X	
Cobre	Polônia	19%	X	
Feldspato	Turquia	51%	X	
Espatoflúor	México	33%	X	
Gálio	China	71%		X
Germânio	China	45%		X
Háfnio	França	76%		X
Hélio	Catar	35%		X
Elementos Pesados de Terras Raras	N/A*	N/A*	N/A*	N/A*
Elementos leves de terras raras	N/A*	N/A*	N/A*	N/A*
Lítio	Chile	79%		X
Magnésio	China	97%		X
Manganês	África do Sul	41%	X	
Grafite Natural	China	40%	X	
Níquel – grau de bateria	Finlândia	38%	X	
Nióbio	Brasil	92%		X
Rocha fosfática	Marrocos	27%	X	
Fósforo	Cazaquistão	65%		X
Metais do Grupo Platina	N/A*	N/A*		X
Escândio	China	67%		X
Silício metálico	Noruega	35%		X

(conclusão)

Matérias-primas críticas	Principais fornecedores da EU	Nível de governança ¹	Produção ²	
			Extração	Processamento
Estrôncio	Espanha	99%	X	
Tântalo	Congo, D. R	35%	X	
Metal titânio	Cazaquistão	36%		X
Tungstênio	China	32%		X
Vanádio	China	62%	X	

¹O nível de governança é baseado nos seguintes fatores: Voz e responsabilidade; Estabilidade política e ausência de violência/terrorismo; Eficácia governamental; Estado de Direito; Controle da corrupção.

² Participação de cada país na produção global: extração ou processamento.

* Não disponível.

Fonte: Baseado de European Commission (2023).

Tabela 4 - Matérias-primas estratégicas, principais países fornecedores da UE e seu nível de governança

Matérias-primas estratégicas	Principais fornecedores da EU	Nível de governança ¹	Produção ²	
			Extração	Processamento
Bismuto	China	65%		X
Boro/boratos	Turquia	99%	X	
Cobalto	N/A*	N/A*	X	
Cobre	Polônia	19%	X	
Gálio	China	71%		X
Germânio	China	45%		X
Grau de bateria de lítio	Chile	79%		X
Magnésio	China	97%		X
Manganês	África do Sul	41%	X	
Grafite Natural	China	40%	X	
Níquel – grau de bateria	Finlândia	38%	X	
Metais do Grupo Platina	N/A*	N/A*	N/A*	N/A*
Elementos de terras raras para ímãs	N/A*	N/A*	N/A*	N/A*
Silício metálico	Noruega	35%		X
Metal titânio	Cazaquistão	36%		X
Tungstênio	China	32%		X

¹O nível de governança é baseado nos seguintes fatores: Voz e responsabilidade; Estabilidade política e ausência de violência/terrorismo; Eficácia governamental; Estado de Direito; Controle da corrupção.

² Participação de cada país na produção global: extração ou processamento. * Não disponível.

Fonte: Baseado de European Commission (2023).

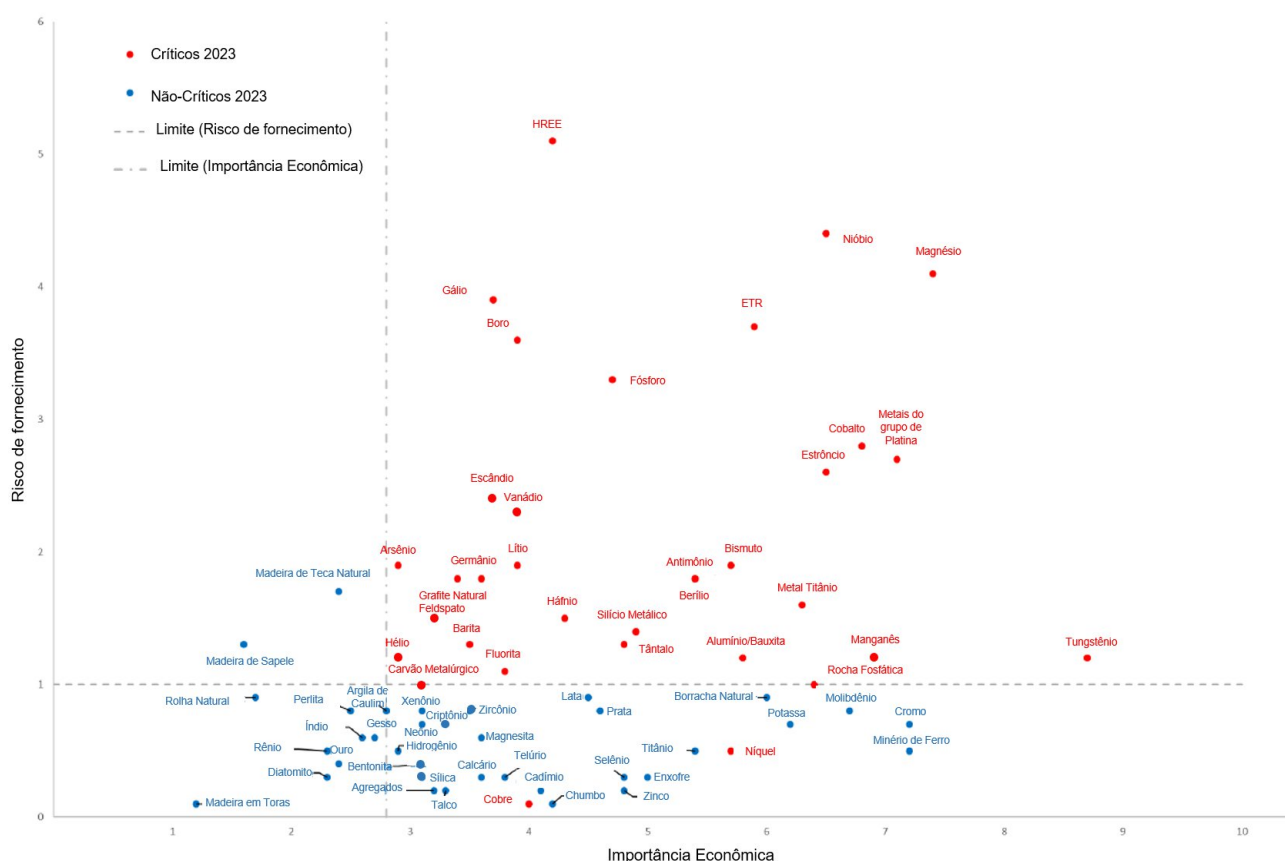
No Gráfico 3, estão representados os resultados globais da avaliação de criticidade de 2023 para o bloco europeu. As matérias primas críticas que estão destacadas em pontos vermelhos no Gráfico 3 estão situadas na zona de criticidade (Risco de fornecimento $\geq 1,0$ e Importância econômica $\geq 2,8$, arredondado para uma casa decimal).

Os pontos azuis não estão dentro da zona de criticidade para UE (European Commission, 2023), com base em pesquisas sobre as reservas de produção das matérias-primas globais e no monitoramento contínuo e multidisciplinar das cadeias produtivas industriais na Europa (Ferreira de Castro; Peiter; Góes, 2021). Os resultados obtidos propiciam identificar os diferentes níveis de preocupação e desenvolver planos e ações direcionadas para as matérias-primas de maior prioridade.

Embora o cobre e o níquel não atendam aos critérios das matérias-primas críticas, eles são classificados como Matérias-Primas Estratégicas para o bloco. Os pontos azuis indicam matérias-primas não críticas (European Commission, 2023). Mesmo que algumas matérias-primas não estejam classificadas como críticas, elas desempenham um papel importante na economia da UE.

A classificação de um material como não crítico não implica que sua disponibilidade e relevância econômica possam ser desconsideradas. Além disso, a disponibilidade de novos dados e possíveis mudanças nos mercados da UE e internacionais podem influenciar a lista de matérias-primas no futuro (European Commission, 2023).

Gráfico 3 - Resultados da avaliação da criticidade da UE para o ano de 2023



*O cobre e o níquel não atendem aos limites do CRM, mas estão na lista do CRM como matérias-primas estratégicas.

Fonte: Adaptado de European Commission, 2023.

3.3.1.3 Estados Unidos da América

Os Estados Unidos da América (EUA) possuem uma longa tradição de pesquisas sobre a disponibilidade e demanda de bens minerais. Desde o início do século XX, o Serviço Geológico dos Estados Unidos, do inglês *United States Geological Survey (USGS)* tem se dedicado ao mapeamento geológico para identificar potencialidades domésticas, além de conduzir estudos sobre a produção estrangeira de suprimentos minerais, especialmente aqueles escassos em seu território (IBRAM, 2024).

O USGS publica anualmente um relatório intitulado como *Mineral Commodity Summaries* (Sumários de Commodities Minerais). Este relatório fornece informações abrangentes sobre a produção, consumo, importação e exportação de minerais,

dados econômicos e estatísticas sobre uma ampla gama de *commodities* minerais, ele é importante para compreensão das tendências do mercado e as questões de fornecimento de minerais nos EUA e no mundo (USGS, 2024).

O Quadro 4 apresenta a última lista de MPCs dos EUA, publicada em 2022, ela apresenta 50 elementos, apresentando 15 *commodities* a mais em comparação à primeira lista publicada em 2018, maior parte do aumento na nova lista está relacionada a divisão dos ETRs e elementos do grupo da platina em entradas individuais, em vez de incluí-los como "grupos minerais". Ademais, essa lista de minerais críticos de 2022 adiciona níquel e zinco, enquanto remove hélio, potássio, rênio e estrôncio (USGS, 2022b).

Quadro 4 - Lista de elementos/minerais críticos para os EUA

(continua)

Minerais Críticos	Principais Aplicações
Alumínio	Quase todos os setores da economia
Antimônio	Baterias de chumbo-ácido e retardantes de chama
Arsênico	Semicondutores
Barita	Produção de hidrocarbonetos
Berílio	Agente de liga nas indústrias aeroespacial e de defesa
Bismuto	Pesquisas médicas e atômicas
Cério	Conversores catalíticos, cerâmica, vidro, metalurgia e compostos de polimento
Césio	Pesquisa e desenvolvimento
Cromo	Principalmente em aço inoxidável e outras ligas
Cobalto	Baterias recarregáveis e superligas
Disprósio	Ímãs permanentes, dispositivos de armazenamento de dados e <i>lasers</i>
Érbio	Fibras ópticas, amplificadores ópticos, lasers e corantes de vidro
Európio	Fósforos e barras de controle nuclear
Fluorita	Fabricação de alumínio, cimento, aço, gasolina e produtos químicos de flúor
Gadolínio	Imagens médicas, ímãs permanentes e fabricação de aço
Gálio	Circuitos integrados e dispositivos ópticos como LEDs
Germânio	Aplicações de fibra óptica e visão noturna
Grafite	Lubrificantes, baterias e células de combustível
Háfnio	Barras de controle nuclear, ligas e cerâmicas de alta temperatura
Hólmio	Ímãs permanentes, barras de controle nuclear e lasers
Índio	Telas de cristal líquido
Irídio	Revestimento de ânodos para processos eletroquímicos e como catalisador químico
Lantânio	Produzir catalisadores, cerâmica, vidro, compostos de polimento, metalurgia e baterias
Lítio	Baterias recarregáveis

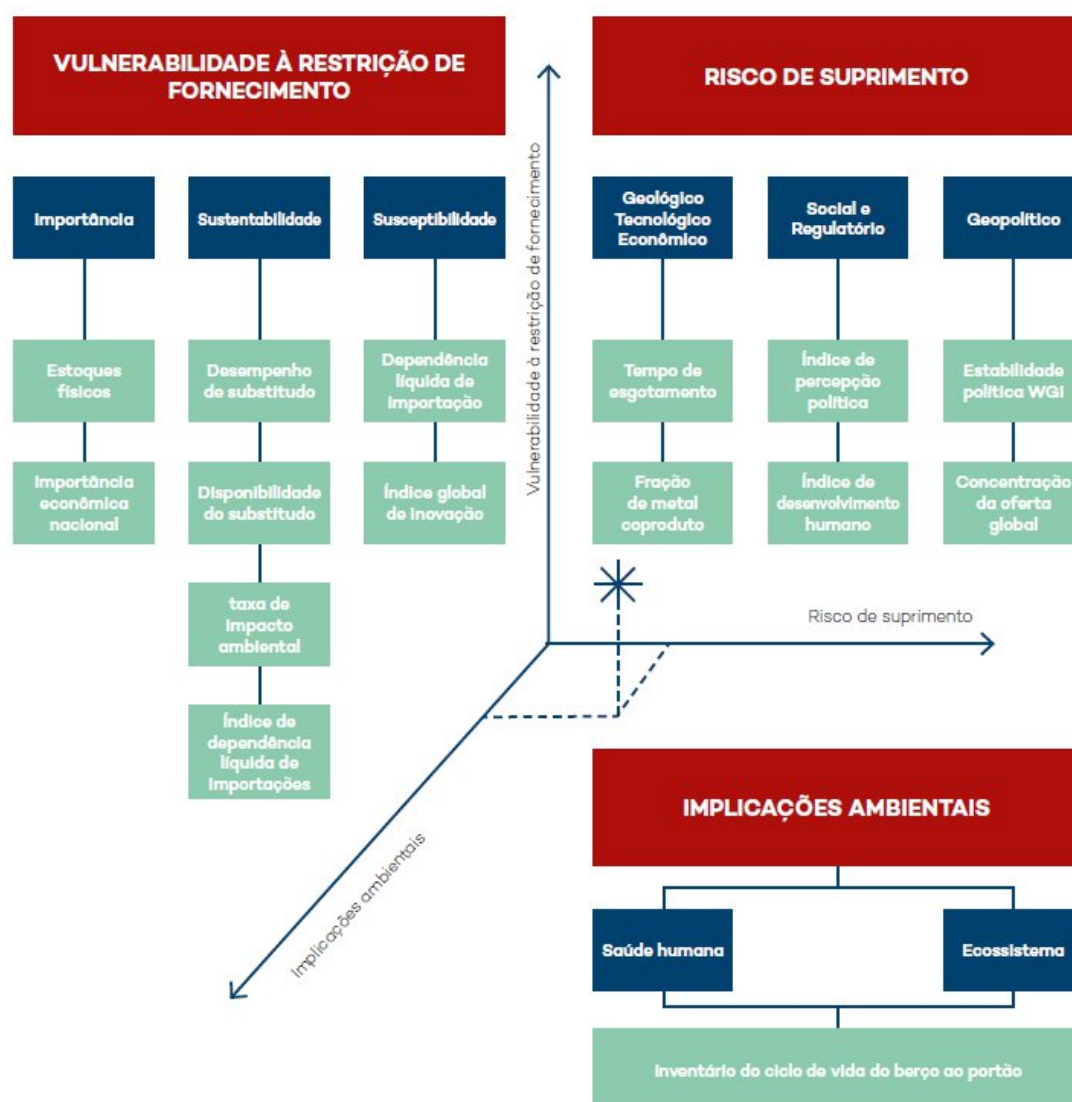
(conclusão)

Minerais Críticos	Principais Aplicações
Lutécio	Cintiladores para imagens médicas, eletrônicos e algumas terapias contra o câncer
Magnésio	Liga e para redução de metais
Manganês	Siderurgia e em baterias
Neodímio	Ímãs permanentes, catalisadores de borracha e em lasers médicos e industriais
Níquel	Para produção de aço inoxidável, superligas e baterias recarregáveis
Nióbio	Principalmente em aço e superligas
Paládio	Conversores catalíticos e como agente catalisador
Platina	Conversores catalíticos
Praseodímio	Ímãs permanentes, baterias, ligas aeroespaciais, cerâmicas e corantes
Ródio	Conversores catalíticos, componentes elétricos e como catalisador
Rubídio	Pesquisa e desenvolvimento em eletrônica
Rutênio	Catalisador, bem como contatos elétricos e resistores de chip em computadores
Samário	Ímãs permanentes, como absorvente em reatores nucleares e em tratamentos contra o câncer
Escândio	Ligas, cerâmicas e células de combustível
Tântalo	Componentes eletrônicos, principalmente capacitores e em superligas
Telúrio	Células solares, dispositivos termoeletrônicos e como aditivo de liga
Térbio	Ímãs permanentes, fibras ópticas, lasers e dispositivos de estado sólido
Túlio	Várias ligas metálicas e em lasers
Estanho	Revestimentos protetores e ligas para aço
Titânio	Pigmento branco ou ligas metálicas
Tungstênio	Principalmente para fazer metais resistentes ao desgaste
Vanádio	Principalmente como agente de liga para ferro e aço
Itérbio	Catalisadores, cintilômetros, lasers e metalurgia
Ítrio	Cerâmica, catalisadores, lasers, metalurgia e fósforos
Zinco	Principalmente na metalurgia para produzir aço galvanizado
Zircônio	Cerâmicas de alta temperatura e ligas resistentes à corrosão.

Fonte: Adaptado de USGS (2022b).

A metodologia atual de avaliação da criticidade de minerais adotada nos EUA, foi proposta pelo renomado professor Graedel, da Universidade de Yale, um dos mais referenciados autores na área de MPCs (Graedel et al., 2012). A metodologia considera as três dimensões ilustradas na Figura 5: (i) vulnerabilidade à restrição de suprimento; (ii) risco de suprimento e (iii) implicações ambientais.

Figura 5 - Os três eixos de avaliação da criticidade de metais dos EUA



Fonte: IBRAM (2024).

3.3.1.4 República Federativa do Brasil

O Brasil é amplamente reconhecido como um dos principais líderes no mercado global de *commodities* minerais, especialmente as metálicas (Ferreira De Castro; Peiter; Góes, 2021). A exploração de minérios está em todas as regiões do país, abrangendo uma ampla variedade de minerais, com destaque para a expressiva exportação de minério de ferro (Ministério de Minas e Energia, 2024).

Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME) os principais órgãos de interesse no governo brasileiro nos estão dispostos no Quadro 5 com as principais competências.

Quadro 5 - Principais Órgãos de interesse no governo brasileiro nos minerais

Órgãos brasileiros	Competências
Conselho Nacional de Política Mineral (CNPM)	Órgão responsável por assessorar o Presidente da República na criação de políticas e diretrizes voltadas para o setor mineral. Entre Suas responsabilidades estão a elaboração de políticas sustentáveis para os diferentes segmentos do setor mineral, incluindo a segurança de barragens, o alinhamento de programas e ações com outras políticas públicas setoriais, e a integração da mineração com a estratégia nacional de transição energética. O conselho é presidido pelo Ministro de Minas e Energia e é composto de mais 16 ministros, incluindo os da Fazenda, das Relações Exteriores e do Meio Ambiente e Mudança do Clima.
Ministério de Minas e Energia (MME)	Órgão da administração pública federal direta responsável por: políticas nacionais de geologia, exploração e produção de recursos minerais; política nacional de transformação mineral; diretrizes para o planejamento do setor; elaboração e aprovação de outorgas; participação em negociações internacionais; e fomento ao desenvolvimento e adoção de novas tecnologias. O Ministério exerce suas competências através da Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral.
Agência Nacional de Mineração (ANM)	Autoridade que tem como objetivo gerir os recursos minerais da União, além de regular e fiscalizar as atividades envolvidas com o aproveitamento dos recursos minerais no país. Dentre as suas várias competências incluem: decidir sobre direitos minerários e outros requerimentos em procedimentos administrativos de outorga ou de fiscalização da atividade de mineração; expedir os títulos minerários e os demais atos referentes à execução da legislação minerária; decidir requerimentos de lavra e outorgar concessões de lavra das substâncias minerais de que trata o art. 1º da Lei nº 6.567/78.
Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM)	Empresa responsável por: levantamentos geológicos e geofísicos, avaliar os recursos minerais do Brasil, conduzir levantamentos hidrogeológicos, gerenciar informações geológicas, e análises químicas e minerais no laboratório de análises minerais.
Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)	Órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente, instituído pela Lei 6.938/81, regulamentada pelo Decreto 99.274/90. O Conselho possui cinco setores: Órgãos federais, estaduais e municipais, setor empresarial e entidades ambientalistas. Dentre as diversas competências do CONAMA estão: estabelecer normas e critérios para o licenciamento de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras, a ser concedido pela União, pelos Estados, pelo Distrito Federal e Municípios; determinar, quando julgar necessário, a realização de estudos sobre as alternativas e possíveis consequências ambientais de projetos públicos ou privados, principalmente no caso de obras ou atividades de significativa degradação ambiental, em especial nas áreas consideradas patrimônio nacional.
Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA)	Órgão responsável, dentre outros diversos assuntos pela política nacional do meio ambiente; política nacional dos recursos hídricos; política de preservação, conservação e utilização sustentável de ecossistemas, biodiversidade e florestas; estratégias, mecanismos e instrumentos regulatórios e econômicos para a melhoria da qualidade ambiental e o uso sustentável dos recursos naturais; políticas para a integração da proteção ambiental com a produção econômica.
Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA)	Autoridade vinculada ao MMA, com os fins: exercer o poder de polícia ambiental; executar ações das políticas nacionais de meio ambiente nas atribuições federais, que envolvem o licenciamento ambiental, o controle da qualidade ambiental, a autorização para o uso de recursos naturais, e a fiscalização, monitoramento e controle ambientais, conforme as diretrizes estabelecidas pelo MMA.
Órgãos estaduais e municipais	Todo estado possui um Órgão a cargo dos temas ambientais, com competências similares às do Ibama. Alguns municípios também dispõem de Órgãos similares.

Fonte: Adaptado do Ministério de Minas e Energia (2024).

No Brasil, a primeira lista de minerais estratégicos foi divulgada através da Resolução nº 2, em 18 de junho de 2021 (Brasil, 2021a). A lista contém 23 recursos

minerais e está apresentada no Quadro 6, de acordo com os três critérios estabelecidos no Plano Nacional de Mineração (Brasil, 2021b).

Quadro 6 - Primeira lista de minerais estratégicos para o Brasil

Critérios do art. 2º do Decreto n.º 10.657	Minerais
Bens minerais dos quais o País depende de importação em alto percentual para o suprimento de setores vitais da economia	Enxofre
	Minério de Fosfato
	Minério de Potássio
	Minério de Molibdênio
Bens minerais que têm importância pela sua aplicação em produtos e processos de alta tecnologia	Minério de Cobalto
	Minério de Cobre
	Minério de Estanho
	Minério de Grafita
	Minérios do grupo Platina
	Minério de Lítio
	Minério de Nióbio
	Minério de Níquel
	Minério de Silício
	Minério de Tálho
	Minério de Tântalo
	Minério de Terras Raras
	Minério de Titânio
	Minério de Tungstênio
Bens minerais que detêm vantagens comparativas e que são essenciais para a economia pela geração de superávit da balança comercial do país	Minério de Urânio
	Minério de Vanádio
	Minério de Alumínio
	Minério de Cobre
	Minério de Ferro
	Minério de Grafita
	Minério de Ouro
	Minério de Manganês
	Minério de Nióbio
	Minério de Urânio

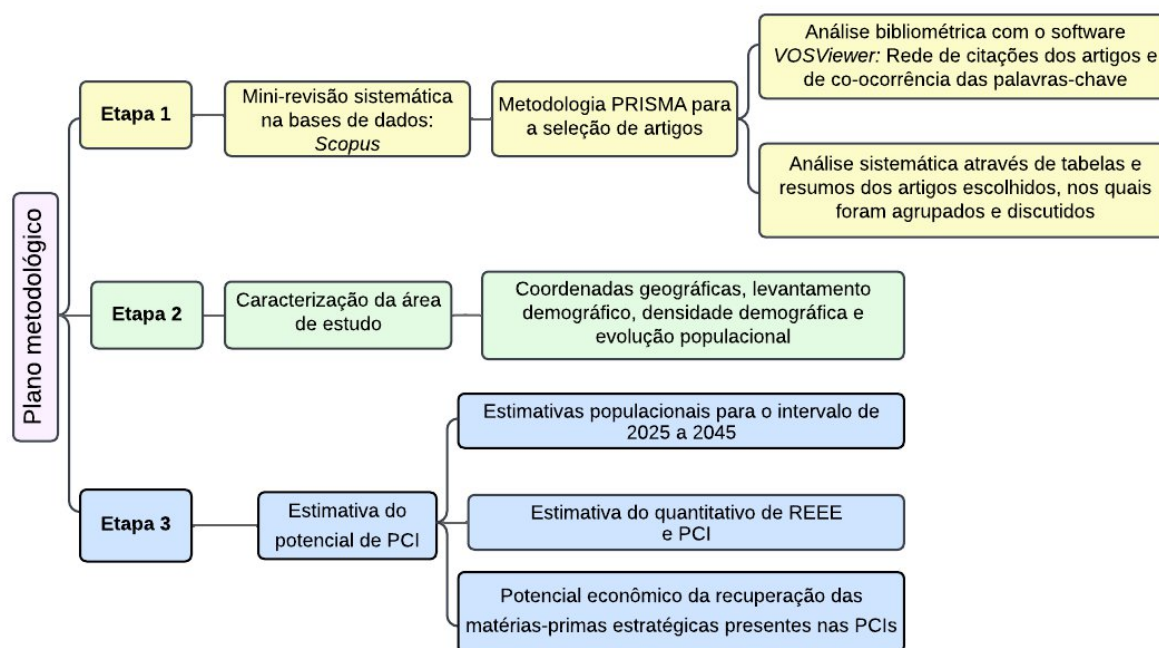
Fonte: Brasil (2021a).

O primeiro critério inclui minerais, em sua maioria importados, que são essenciais para o setor agrícola, em especial na produção de fertilizantes. O segundo grupo compreende minerais de alta tecnologia, usados na fabricação de baterias e em inovações voltadas para a Economia Verde; já o terceiro grupo é composto por minerais que oferecem uma vantagem comparativa e são encontrados em abundância no território brasileiro (Giorgio de Tomi; Giovanna Loredó; Vinicius Santos, 2024).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi estruturada em três etapas, conforme ilustrado na Figura 6, que são: mini-revisão sistemática, caracterização da área de estudo e estimativa do potencial de PCI.

Figura 6 - Fluxograma metodológico da pesquisa



Fonte: A autora (2025).

As três etapas do plano metodológico serão detalhadas nas próximas seções, para proporcionar uma melhor compreensão de cada uma delas.

4.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DO CENÁRIO DAS MATÉRIAS-PRIMAS CRÍTICAS: ECONOMIA CIRCULAR, DESAFIOS GEOPOLÍTICOS E GOVERNANÇA

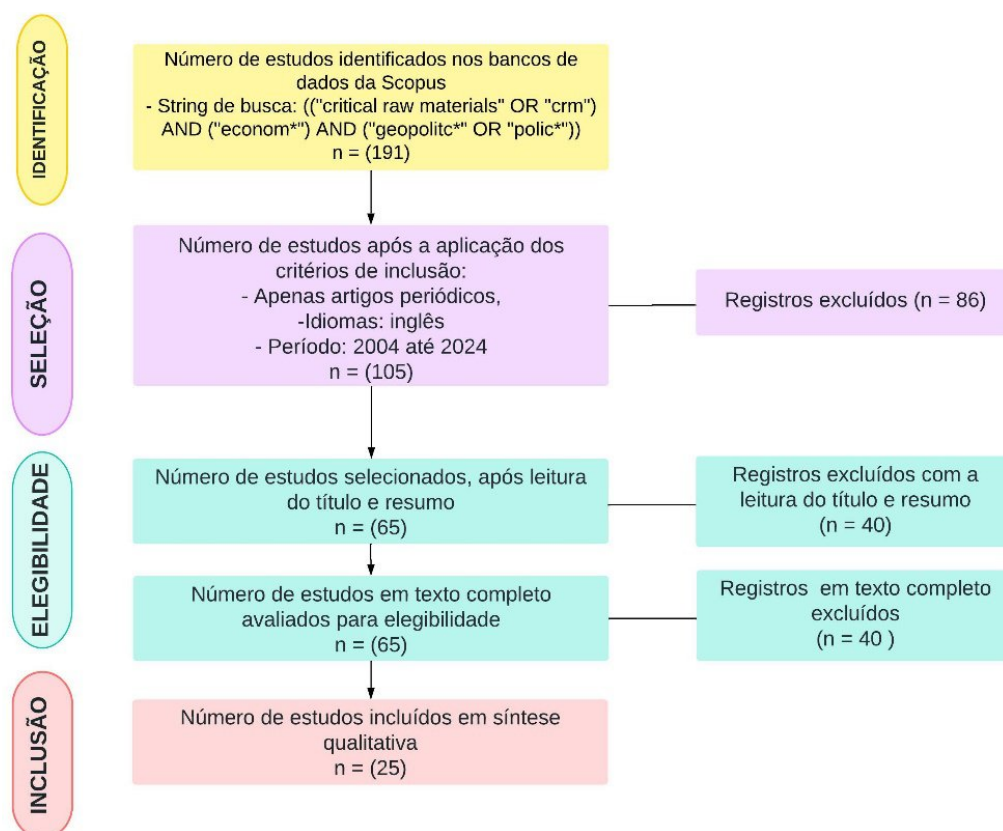
A pesquisa foi conduzida através de um modelo misto que empregou uma série de fases e procedimentos organizados com o propósito de explorar a visão geral, aplicabilidade e os resultados alcançados. Nesse sentido, o estudo foi dividido em três fases: filtragem de conjunto de dados, análise bibliométrica e análise sistemática.

4.1.1 Filtragem de conjunto de dados

A pesquisa foi realizada utilizando a plataforma *Scopus*, com posterior seleção de artigos segundo a metodologia *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses (PRISMA)*. O uso do *PRISMA* objetivou aprimorar a qualidade dos relatórios de uma revisão sistemática, oferecendo transparência no processo de seleção de artigos para a revisão (Knobloch; Yoon; Vogt, 2010). A Figura 7 detalha cada etapa de utilização da metodologia *PRISMA*.

- a) **Identificação:** Nessa etapa utilizou-se a seguinte *string* de busca: ("*critical raw materials*" OR "*crm*") AND ("*econom**" AND ("*geopolitic**" OR "*polic**"), resultando em 191 artigos;
- b) **Seleção:** Nessa fase os critérios de seleção foram apenas artigos periódicos em inglês e o período considerado foi entre 2004 e 2024. Assim, foram excluídos 86 artigos, resultando em 105 periódicos;
- c) **Elegibilidade:** Durante essa etapa realizou-se a leitura dos títulos e resumos dos 105 periódicos obtidos na etapa de seleção, resultando uma exclusão de 40 artigos.
- d) **Inclusão:** Nessa fase, os 65 artigos restantes, foram lidos, 40 foram excluídos por não se adequarem ao escopo da pesquisa, resultando na exportação de 25 artigos para análise bibliométrica.

Figura 7 - Fluxograma de filtragem de conjunto de dados de pesquisa para revisão sistemática e análise bibliométrica



Fonte: A autora (2025).

4.1.2 Análise Bibliométrica

A análise bibliométrica foi usada para resumir dados bibliométricos e oferecer uma compreensão mais profunda da estrutura intelectual e das tendências emergentes em um tópico ou campo de pesquisa específico (Oluwadele; Singh; Adeliyi 2023). A análise bibliométrica nessa pesquisa foi realizada com o uso do software VOSviewer.

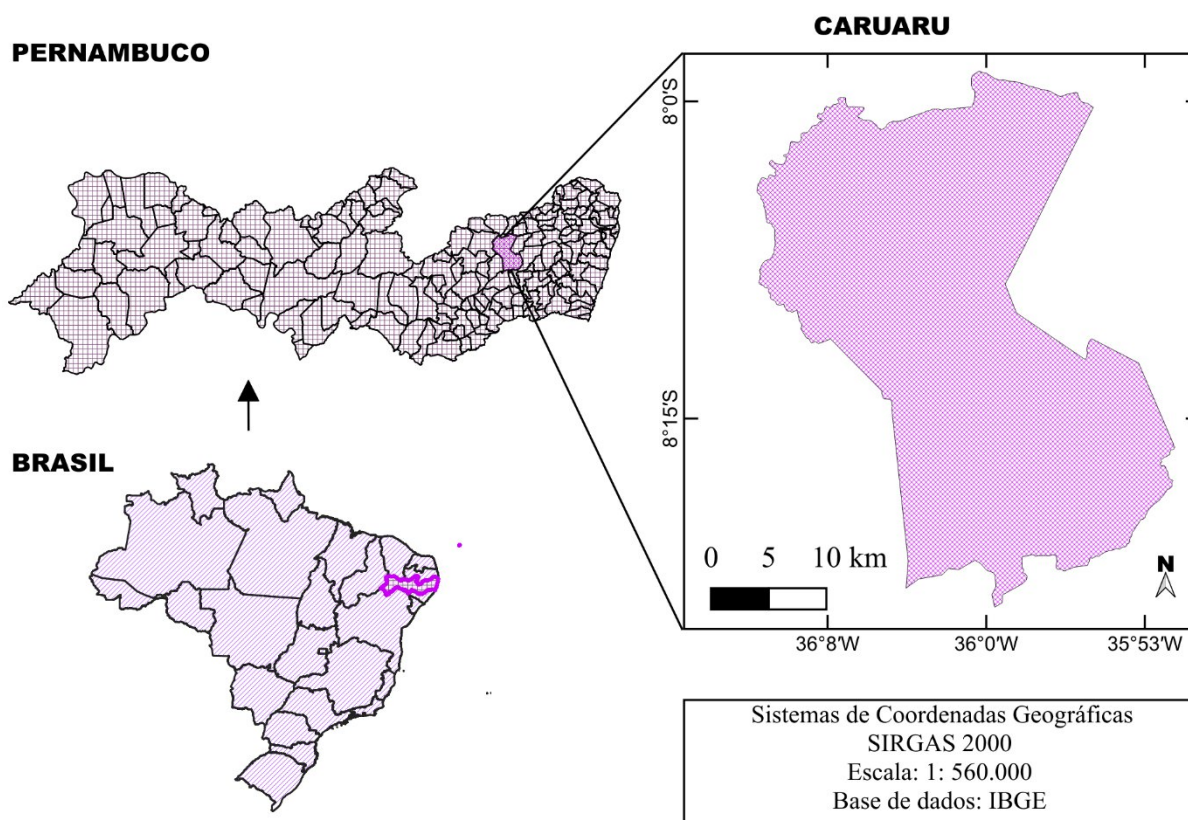
4.1.3 Análise Sistemática

Para a revisão sistemática, tabelas e resumos foram criados com o intuito de apresentar uma visão sobre as matérias-primas críticas (no contexto da economia circular), avaliando considerações de governança e geopolíticas. Os artigos foram agrupados em focos e discutidos, de acordo com os temas abordados.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é o município de Caruaru (Mapa 1), que está localizado no estado de Pernambuco, na região Nordeste, apresentando uma área de 923,15 km².

Mapa 1 - Localização da área de estudo

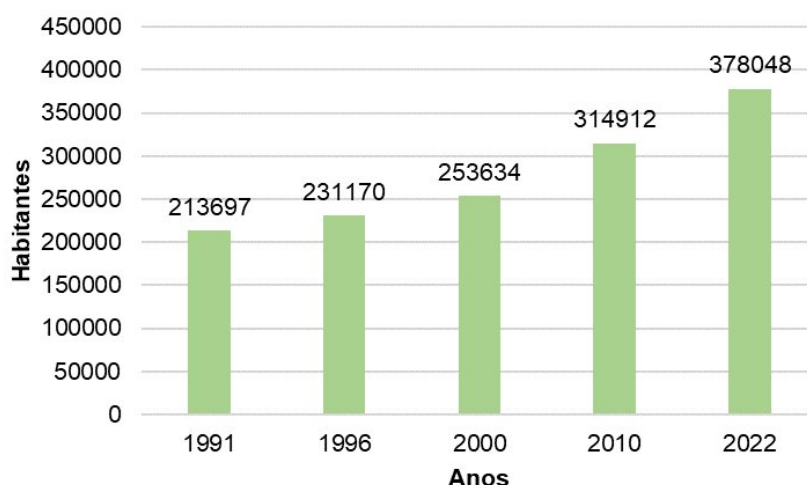


Fonte: A autora (2025).

Segundo dados do último censo feito pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), em 2022, a população do Município era de 378.048 pessoas, distribuídos entre 348.487 na zona urbana e 29.561 na zona rural, com uma densidade demográfica de 409,52 hab/km² (IBGE, 2022).

Já no censo realizado em 2010, a população era de 314.912 habitantes, o que demonstra um aumento de mais de 63 mil habitantes, representando um crescimento de aproximadamente 20% em um período de 12 anos. O Gráfico 4 apresenta a Evolução Populacional entre os anos de 1991 e 2022 (alguns desses dados são necessários para projeção populacional do município).

Gráfico 4 - Evolução Populacional do Município de Caruaru-PE entre os anos de 1991 e 2022



Fonte: Baseado do IBGE (2024).

4.3 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE METAIS

4.3.1 Estimativa Populacional

Para escolher a projeção mais adequada, foram utilizados os dados dos três últimos censos do IBGE (2000, 2010 e 2022), referentes ao município de Caruaru-PE (IBGE, 2024). As estimativas populacionais para o intervalo de 2025 a 2045, realizou-se com base em quatro modelos matemáticos de curvas de crescimento: aritmético, geométrico, logístico e taxa decrescente de crescimento.

4.3.1.1 *Projeção Aritmética*

Segundo Qasim o método de projeção aritmética usualmente é utilizado para estimativas de curto prazo (1 - 5 anos), ela pressupõe um crescimento populacional contínuo a uma taxa constante, as Equações 1 e 2, foram empregadas para efetuar a estimativa (1999).

$$k_a = \frac{P_1 - P_0}{t_1 - t_0} \quad (1)$$

$$P = P_0 + k_a * (t - t_0) \quad (2)$$

Onde: k_a = taxa de crescimento anual; P_1 = população do último censo; P_0 = população do antepenúltimo censo; t_1 = data do último censo t_0 = data do

antepenúltimo censo; t = ano que se pretende estimar a população e P = população estimada para o ano t .

4.3.1.2 *Projeção Geométrica*

O método de projeção geométrica avalia o crescimento populacional considerando uma fase de expansão acelerada, caracterizada por um padrão que acompanha o formato de uma curva exponencial (Damasceno et al., 2019). As Equações 3 e 4, foram utilizadas para realizar a estimativa (Qasim, 1999).

$$K_g = \frac{\ln P_1 - \ln P_0}{t_1 - t_0} \quad (3)$$

$$P = P_0 \cdot e^{K_g \cdot (t - t_0)} \quad (4)$$

Onde: k_g = taxa de crescimento geométrico; P_1 = população do último censo; P_0 = população do antepenúltimo censo; t_1 = data do último censo t_0 = data do antepenúltimo censo; t = ano que se pretende estimar a população e P = população estimada para o ano t .

4.3.1.3 *Projeção Logística*

O crescimento logístico populacional segue uma relação matemática, que estabelece uma curva em formato de "S", no qual a população se aproxima assintoticamente de um valor de saturação (Qasim, 1999). Os parâmetros podem ser determinados por regressão não linear, desde que sejam atendidas as condições: $P_0 < P_1 < P_2$ e $P_0 \cdot P_2 < P_1^2$ (Prefeitura Municipal De Marataízes, 2017).

A fórmula do crescimento logístico exige intervalos de tempo equidistantes, no qual o ponto de inflexão da curva ocorre no instante $[t_0 - \ln(c)/K_1]$ com $P_t = P_s/2$. Caso essas condições não sejam atendidas, os cálculos se tornam inválidos ou impossíveis de serem realizados (Prefeitura Municipal De Marataízes, 2017). As Equações 5, 6, 7 e 8, foram utilizadas para realizar a estimativa (Qasim, 1999).

$$P_s = \frac{2 \cdot P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 - P_1^2 \cdot (P_0 + P_2)}{P_0 \cdot P_2 - P_1^2} \quad (5)$$

$$K_1 = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln \left[\frac{P_0 \cdot (P_s - P_1)}{P_1 \cdot (P_s - P_0)} \right] \quad (6)$$

$$c = \frac{(P_s - P_0)}{P_0} \quad (7)$$

$$P_t = \frac{P_s}{1 + c \cdot e^{K_1 \cdot (t - t_0)}} \quad (8)$$

Onde: P_s = população de saturação estimada; P_0 = população no antepenúltimo censo; P_1 = população no penúltimo censo; P_2 = população no último censo; c = razão de crescimento inicial, t_0 = ano do antepenúltimo censo; t_1 = ano do penúltimo censo; t_2 = ano do último censo; K_1 = taxa de crescimento logístico, calculada com base nos dados dos censos; t = ano para o qual se deseja estimar a população; P_t = população estimada no ano t .

4.3.1.4 *Projeção Decrescente de Crescimento*

Na projeção decrescente de crescimento a suposição é de que, à medida que a população cresce, a taxa de crescimento diminui progressivamente. A população tende a se estabilizar em um valor de saturação ao longo do tempo, os parâmetros desse comportamento podem ser determinados por meio de regressão não linear, as Equações 9, 10 e 11, foram utilizadas para realizar a estimativa (Qasim, 1999).

$$P_s = \frac{2 \cdot P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 - P_1^2 \cdot (P_0 + P_2)}{P_0 \cdot P_2 - P_1^2} \quad (9)$$

$$K_d = \frac{-\ln[(P_s - P_2)/(P_s - P_0)]}{t_2 - t_0} \quad (10)$$

$$P_t = P_0 + (P_s - P_0) \cdot \left[1 - e^{-K_d \cdot (t - t_0)} \right] \quad (11)$$

Onde: P_s = população de saturação estimada; P_0 = população no antepenúltimo censo; P_1 = população no penúltimo censo; P_2 = população no último censo; t_0 = ano do antepenúltimo censo; t_2 = ano do último censo; K_d = taxa decrescente de crescimento populacional; t = ano para o qual se deseja estimar a população; P_t = população estimada no ano t .

4.3.2 Geração de REEE

Para estimar o quantitativo de REEE por ano, utilizou-se o valor de geração de REEE anual *per capita* de 4,36 kg/hab/ano para Caruaru - PE, para o ano de 2019, obtido por (Oliveira Neto, 2019). O método utilizado para encontrar esse valor é o de aproximação de Robinson (*Robinson's approach*), que considera o estoque de equipamentos, o peso médio de cada dispositivo e sua vida útil, foi utilizado para a quantificação da geração anual de resíduos eletrônicos (Robinson, 2009).

O método de Robinson se destaca pela praticidade, pois utiliza dados facilmente obtidos, como o peso do EEE [W], o número de EEE [N] e a vida útil média do EEE [L]. A estimativa da geração de REEE, em kg por ano, é calculada através da Equação 12.

$$E = \frac{W \cdot N}{L} \quad (12)$$

O número total de EEE [N] é dividido em duas categorias principais: os equipamentos que estão em uso [O] e aqueles que se encontram armazenados [S]. Com isso, a Equação 12 é reformulada como está na Equação 13.

$$E = \frac{W \cdot (O + S)}{L} \quad (13)$$

Os valores O, S e L foram obtidos através da aplicação de questionários, enquanto para o W foram adotados valores encontrados na literatura.

A geração de REEE e PCIs foi estimada para os seguintes nove aparelhos: computador de mesa (monitor e CPU), notebook, impressora, tablet, telefone celular, TV CRT, TV LCD/plasma e TV LED.

Para quantificar o percentual de geração, por aparelho e por ano, considerou-se a estimativa da geração que estão dispostas na Tabela 5 (geração obtida por (Oliveira Neto, 2019)), no qual, foi considerado a situação mais crítica, maior valor de peso médio de cada equipamento. Ademais, o percentual de cada equipamento, foram obtidos através da relação: (Geração média por equipamento / somatório do potencial da geração total) *100.

Os quantitativos de equipamentos eletroeletrônicos foram obtidos na pesquisa de campo realizada por Oliveira Neto (2019). O estudo foi conduzido nos bairros de

classe média-alta Maurício de Nassau e Universitário, localizados na cidade de Caruaru-PE, abrangendo o ano de 2019.

Tabela 5 - Percentual de geração de REEE por tipo de EEE

EEE	Geração (kg/ano)	Percentual = (Geração por equipamento/ Potencial de geração total) * 100%
Computador de mesa (monitor)	890,00	17,88%
Computador de mesa (CPU)	593,33	11,92%
Notebook	612,41	12,30%
Impressora	583,80	11,73%
Tablet	33,83	0,68%
Telefone celular	68,20	1,37%
TV CRT (tubo)	1.205,28	24,21%
TV LCD/Plasma	720,00	14,46%
TV LED	271,40	5,45%
Total	4978,25	

Fonte: Adaptado de Oliveira Neto (2019).

Conforme a classificação da ABDI (2013), apresentada na Figura 1 (seção 3.1) os EEE escolhidos pertencem as categorias: Linha Marrom (vida útil média) e Linha Verde (vida útil curta).

4.3.3 Percentual de PCI e Matérias-Primas Minerais Estratégicas em Relação a Cada EEE

Para cálculo do percentual das matérias-primas minerais foram utilizados os dados da Tabela 6 que apresenta a fração representativa das PCIs de cada EEE e a porcentagem de cada um dos elementos que são considerados estratégicos (para o Brasil), que são: ferro, cobre, ouro, alumínio, estanho e níquel.

Tabela 6 - Percentuais de PCIs e minerais estratégicos por tipo de EEE (%)

Elementos	PC: monitor	PC: CPU	Notebook	Impressora	Tablet	Celular	TV Tubo	TV/ LCD Plasma	TV LED
PCI*	12	14	15	3	10	10	10	7	2
Ferro (Fe)**	3,4	1,3	3,7	14,1	3,7	1,8	3,4	6,93	6,93
Cobre (Cu)**	7,2	20	19	20	19	33	7,2	17,25	17,25
Ouro (Au)**	0,01	0	0,1	0,04	0,01	0,2	0,01	0,01	0,01
Alumínio (Al)**	6,2	1,8	1,8	3,38	1,8	1,5	6,2	10,05	10,05
Estanho (Sn)**	0,18	8,3	1,6	0,69	1,6	3,5	0,18	0,73	0,73

Níquel (Ni)**	0,26	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	0,26	0,26	0,26
*% da massa do PCI em relação à massa de cada EEE Fonte: Adaptado de Babbitt; Althaf & Chen (2017). ** % da massa do metal em relação à massa do PCI Fonte: Adaptado de Cucchiella et al. (2016).									

4.3.4 Potencial econômico das PCIs

A Tabela 7 fornece uma visão dos preços médios de venda de minerais estratégicos (considerados no Brasil), em duas unidades monetárias: dólares americanos (USD) e reais brasileiros (R\$), os preços refletem as médias anuais ou semestrais para o período especificado. Esses dados serão utilizados para avaliar o valor econômico dos minerais presentes em PCI e a viabilidade de sua recuperação a partir dos REEE, para o município de Caruaru - PE.

Tabela 7 - Preços médios de venda de minerais estratégicos

Mineral estratégicos	Preço médio (USD/kg)*	Preço médio (R\$/kg)**	Período
Ferro (Fe)	0,75	4,65	2022: Anual
Cobre (Cu)	8,75	54,25	2023: janeiro – junho
Ouro (Au)	55,98	347,08	2022: Anual
Alumínio (Al)	2,85	17,67	2023: janeiro - agosto
Estanho (Sn)	0,034	0,21	2022: Anual
Níquel (Ni)	24,25	150,3	2022: Anual

*USGS (2024)
**Dólar dos Estados Unidos (USD) equivale a 6,20 reais brasileiros (R\$) em 02/01/2025.
Fonte: A autora (2025).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

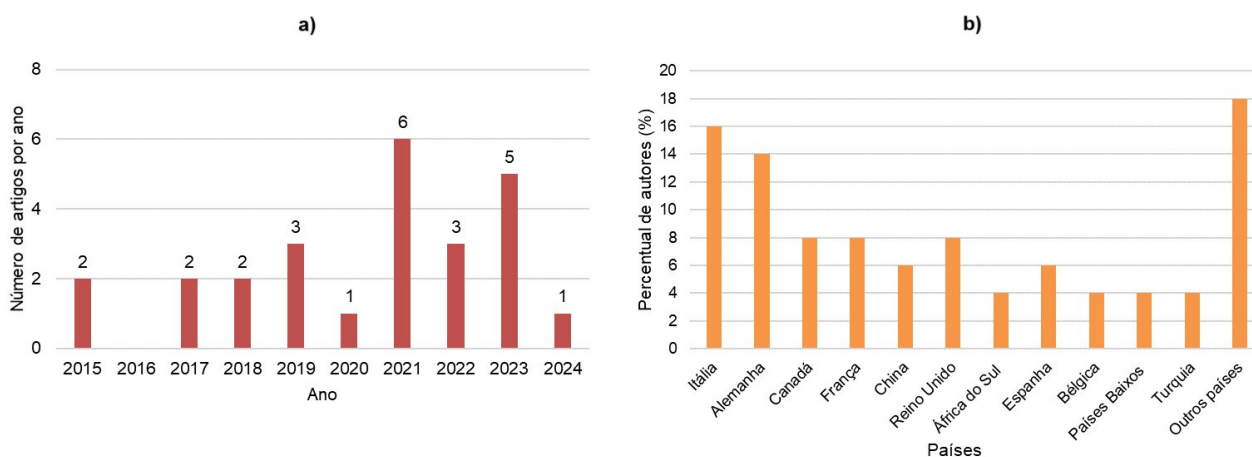
Nesta Seção 5, são apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo da pesquisa, com o intuito de avaliar os dados coletados e situá-los no contexto de minerais estratégicos e/ou crítico.

5.1 GESTÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS CRÍTICAS: TENDÊNCIAS GLOBAIS

5.1.1 Parâmetros de produção científica

O Gráfico 5a apresenta o número de publicações, ao longo dos anos, e o Gráfico 5b apresenta a distribuição de artigos por país de origem (da instituição de pesquisa).

Gráfico 5 – a) Variação na quantidade de publicações escolhidas pelo método Prisma entre 2015 e 2024 b) Distribuição dos autores por país da instituição



Fonte: A autora (2025).

Os anos de 2021, 2022 e 2023 mostram um aumento significativo nas publicações (Gráfico 5a), mostram um aumento significativo nas publicações, representando juntos aproximadamente 56% dos artigos selecionados, uma das causas foram os impactos gerados pela pandemia COVID-19.

No Gráfico 5b, a Itália se destaca, contribuindo com 16% do total de autores. Em seguida, vem a Alemanha com percentual de 14%. Além disso, os principais estudos identificados provêm de países europeus, representando aproximadamente 73% do total. Essa predominância de países europeus reflete o papel relevante da

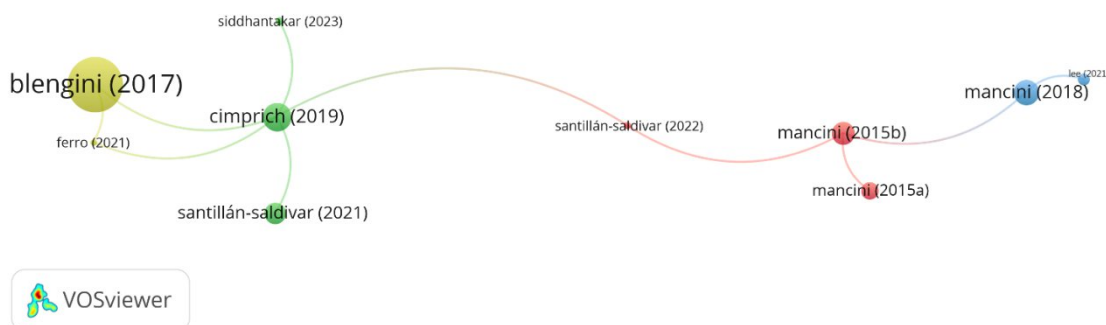
União Europeia nas discussões sobre matérias-primas críticas, governança e economia circular.

5.1.2 Análise bibliométrica

O *VOSviewer* possibilitou a criação de mapas de redes bibliométricas, que permitiram avaliar, visualmente, padrões complexos de relacionamentos entre vários elementos como rede de citações, países das instituições, palavras-chave e documentos em conjuntos de dados bibliométricos.

As Figura 8 e Figura 9 apresentam as redes das relações de citações e palavras-chave, respectivamente. Cada ponto nessas figuras representa um círculo e seu tamanho é proporcional à frequência de citações ou palavra-chave. As linhas que conectam os círculos representam os caminhos específicos percorridos para o compartilhamento das informações.

Figura 8 - Rede de citações dos artigos disponibilizados pelo *VOSviewer*



Fonte: A autora (2025).

Na rede de citações, o tamanho do círculo representa o número total de citações do artigo e as linhas entre os círculos representam a ocorrência de citações entre artigos. A rede de citação dos artigos é composta por 10 círculos que representam os artigos da pesquisa, alocados em 4 *clusters* (amarelo, verde, vermelho e azul).

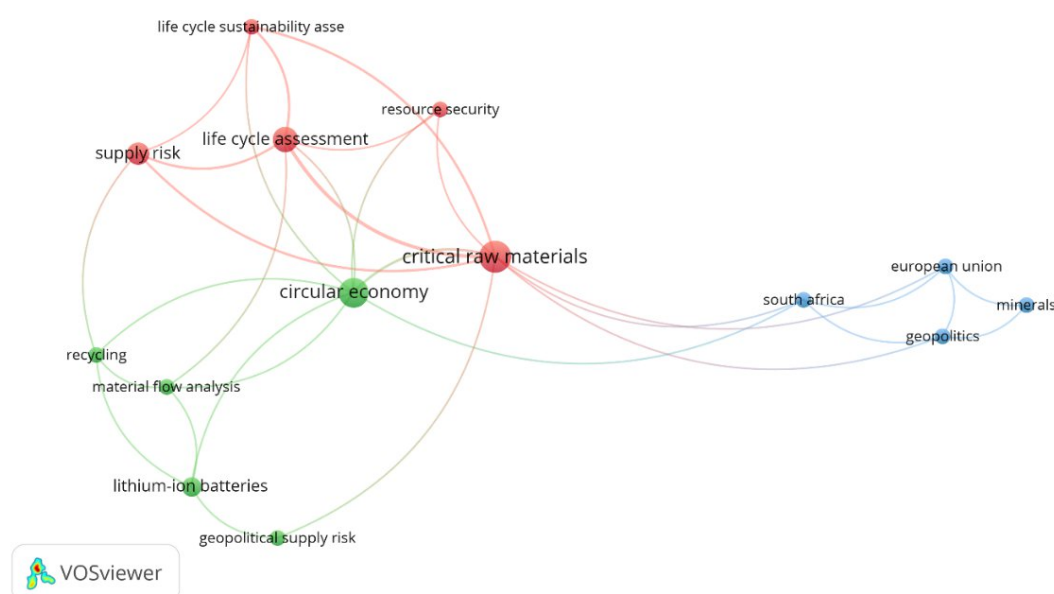
No *cluster* verde, o trabalho de Cimprich et al. (2019) foi citado pelos 4 seguintes trabalhos: Siddhantakar et al. (2023), Santillán-Saldivar et al. (2021), Ferro et al. (2021) e Santillán-Saldivar et al. (2022).

O *cluster* vermelho contém o trabalho de Santillán-Saldivar et al. (2022), fazendo ligação entre o *cluster* vermelho e verde, que cita os trabalhos de Mancini et al. (2015b), e Cimprich et al. (2019) todos esses três artigos se concentram na avaliação de criticidade de recursos naturais, utilizando e comparando diferentes métodos, no contexto da Análise do Ciclo de Vida (*LCA - life cycle assessment*).

O *cluster* azul é composto pelos trabalhos Mancini et al. (2018) e Lee & Cha (2021). Os 17 artigos restantes não foram utilizados por não possuírem qualquer ligação; ou seja, não citaram e não foram citados por nenhum artigo encontrado.

Por fim, dentre os estudos que formam a rede de citações, a pesquisa de Blengini et al. (2017) é o trabalho com maior média de citações por ano, seguido por Cimprich (2019) e Mancini (2018).

Figura 9 - Rede de coocorrência das palavras-chave definidas pelos autores disponibilizados pelo VOSviewer



Fonte: A autora (2025).

A análise de coocorrência, apresentada na Figura 9, foi formada de acordo com as palavras-chave determinadas pelos autores dos artigos. Para facilitar a visualização, critérios de exclusão como o uso de um tesauro (repertório alfabético de termos usados na indexação e na classificação de documentos) e a restrição do número mínimo de ocorrências (para essa análise são duas) foram atribuídos.

Das 119 palavras encontradas anteriormente, após a aplicação dos critérios mencionados, apenas 14 permaneceram, divididas em 3 *clusters* (vermelho, azul e verde). A palavra-chave com maior frequência é *critical raw materials* (matéria-prima crítica), ela está localizada centralmente e faz ligação com os todos os *clusters*.

O *cluster* verde contém 5 círculos, correspondentes às palavras: *circular economy* (economia circular), *recycling* (reciclagem), *material flow analysis* (análise de fluxo de material), *lithium-ion batteries* (baterias de íon de lítio) e *geopolitical supply risk* (risco geopolítico de fornecimento). Algumas dessas palavras-chave são encontradas nas pesquisas que discutem sobre a avaliação da gestão dos elementos presentes nas baterias de lítio, como Song et al. (2019), Giosuè et al. (2021) e Santillán-Saldivar et al. (2022).

No *cluster* ao lado (cor vermelha), encontram-se 5 palavras-chave: *supply risk* (risco de fornecimento), *critical raw materials* (matéria-prima crítica), *life cycle assessment* (análise do ciclo de vida), *life cycle sustainability assessment* (análise de sustentabilidade do ciclo de vida) e *resource security* (segurança de recursos). A palavra-chave *life cycle assessment* está relacionada aos trabalhos: Mancini, Benini & Sala (2015a), Santillán-Saldivar et al. (2022), Mancini et al. (2018), Cimprich et al. (2019) e Ferro et al. (2021). Já o *cluster* cor azul, contém 4 palavras-chave: *minerals*, *geopolitics*, *South Africa* e *Europa Union*, referem-se ao artigo de Zhang et al. (2023).

Por fim, através da avaliação do tamanho do círculo da rede de coocorrência das palavras-chave, as que apresentaram com maior frequência foram: *critical raw materials* (matéria-prima crítica), *circular economy* (economia circular), *life cycle assessment* (análise do ciclo de vida) e *supply risk* (risco de fornecimento).

5.1.3 Caracterização das pesquisas analisadas

O Apêndice A apresenta o detalhamento de cada um dos 25 artigos selecionados para a revisão: autoria, citações normalizadas, focos, objetivos da pesquisa e principais resultados. Os artigos selecionados foram discutidos em grupos temáticos, de acordo com os focos principais do estudo: (i) disponibilidade ou fornecimento de MPC; (ii) avaliações geopolíticas; (iii) economia circular e (iv) ações de governança.

Tabela 8 - Características Gerais Dos Artigos Sobre MPCs

(continua)

ID	Referências	Citações normalizadas	Focos*			
			Disponibilidade / fornecimento de MPC	Avaliações Geopolíticas	Economia Circular	Ações de governança
1	(Wesselkämper et al., 2024)	3	✓		✓	
2	(Filho et al., 2023)	2,86	✓			✓
3	(Santillán-Saldivar et al., 2021)	1,9		✓	✓	
4	(Blengini et al., 2017)	1,75	✓			✓
5	(Christmann, 2021)	1,45			✓	✓
6	(Van Oorschot et al., 2022)	1,42	✓		✓	
7	(Song et al., 2019)	1,4	✓			✓
8	(Mancini, et al., 2015b)	1,17	✓	✓		✓
9	(Zanoletti; Cornelio & Bontempi, 2021)	1,08	✓			
10	(Siddhantakar et al., 2023)	1,07	✓	✓		
11	(Hao et al., 2018)	1,03		✓		✓
12	(Talens Peiró et al., 2019)	1			✓	
13	(Mancini; Benini; Sala, 2018)	0,97	✓	✓		
14	(Lee & Cha, 2021)	0,9	✓		✓	✓
15	(Santillán-Saldivar et al., 2022)	0,87	✓	✓		
16	(Mancini, Benini, et al., 2015a)	0,83	✓			✓
17	(Liu et al., 2021)	0,72	✓			✓
18	(Gibaga et al., 2022)	0,71	✓			
19	(Müller, 2023)	0,62	✓	✓		
20	(Cimprich et al., 2019)	0,6	✓			
21	(Giosuè et al., 2021)	0,54			✓	✓

(conclusão)

ID	Referências	Citações normalizadas	Focos*			
			Disponibilidade / fornecimento de MPC	Avaliações Geopolíticas	Economia Circular	Ações de governança
22	(Ferro; Bonollo & Cruz, 2021)	0,41			✓	
23	(Zhang et al., 2023)	0,36		✓		
24	(Masoudi et al., 2017)	0,25	✓	✓		✓
25	(Jędrusiak; Bielowicz; Drobniak, 2023)	0,09			✓	

Fonte: A autora (2025).

5.1.3.1 *Estudos com foco na disponibilidade ou fornecimento de MPCs*

Nas pesquisas foram identificados dezessete estudos que estavam empregados, direta ou indiretamente, na disponibilidade ou fornecimento das MPCs.

O acelerado desenvolvimento econômico da China e de outras economias emergentes, impulsionou a demanda por metais e minerais, ocasionando preocupações acerca da possível escassez desses recursos. Isso, por sua vez, levantou a questão da garantia de abastecimento dos recursos (Masoudi et al., 2017).

A segurança dos recursos envolve acesso a eles por motivos econômicos e geopolíticos, a disponibilidade de recursos para as atuais e futuras gerações é essencial para a sustentabilidade. Isso envolve a ocorrência geológica e física do recurso, com a capacidade tecnológica de extraí-lo (Mancini; Benini; Sala, 2018).

A disponibilidade de matérias-primas pode ser ameaçada por diversos fatores: geológicos, tecnológicos, geopolíticos, econômicos, ambientais e sociais. Nas avaliações de criticidade, são considerados aspectos relacionados aos mercados de matérias-primas à economia (concentração de mercado, consumo e demanda), à tecnologia (potencial de reciclagem, substitutibilidade, subprodutos, etc.) e às preocupações geopolíticas (governança e estabilidade política dos países produtores), (Mancini; Benini; Sala, 2018).

Desde 2011, a metodologia da UE monitora a situação das matérias-primas e informa decisores sobre medidas para garantir o abastecimento seguro, incluindo diversificação das fontes de suprimento, reciclagem e substituição (Blengini et al., 2017). Dessa forma, ao monitorar a situação das matérias-primas e identificação daquelas que são críticas, a UE e outros países podem direcionar seus esforços para garantir um abastecimento seguro desses minerais.

No entanto, diversos países como o Brasil não apresentam uma metodologia de maneira formal de criticidade de forma oficial, indicando uma lacuna importante, pois os minerais são essenciais para a economia e segurança dos países; assim um cálculo formal de criticidade permitiria a esses países priorizar ações estratégicas, melhorar a resiliência da economia diante a possíveis interrupções de fornecimento e consequentemente acelerar o desenvolvimento da transição energética.

5.1.3.2 *Estudos com foco nas avaliações geopolíticas*

Foram identificadas nove pesquisas que estavam empregadas, direta ou indiretamente, nas avaliações geopolíticas das MPCs.

A revisão e monitoramento dos métodos de avaliação de MPCs nos países desenvolvidos são extremamente importantes e valiosos para a escolha de políticas adequadas para países em desenvolvimento que possuem esses recursos (Masoudi et al., 2017). De acordo com Cimprich et al. (2019), algumas ferramentas que auxiliam

na compreensão e na avaliação de como fatores geopolíticos podem afetar a disponibilidade e o acesso a MPCs, são: *GeoPolRisk*, *ESP* e *ESSENZ*.

Em frente às MPCs, algumas metodologias para avaliação têm sido desenvolvidas em contextos governamentais e pesquisas, e a inclusão da segurança dos recursos na ACV é defendida por diversos autores (Mancini; Benini; Sala, 2018).

Em pequena ou em grande escala, a ACV é eficaz na identificação de pontos críticos e oportunidades de melhoria relacionadas às MPCs; pois fornece informações como a criticidade e as cadeias de suprimentos. Porém, avanços metodológicos podem aumentar seu potencial, assim, reformulações na categoria de impacto do esgotamento e na utilização das informações sobre recursos são necessárias para torná-las mais relevantes para negócios e políticas (Mancini et al., 2015b).

Siddhantakar et al., (2023) analisou o risco geopolítico de fornecimento de hélio, através da ferramenta *GeoPolRisk*, para 10 importadores: China, Japão, Coreia do Sul, outros países asiáticos, Alemanha, França, Reino Unido, México, Canadá e Brasil; os resultados mostram mudanças nas rotas de abastecimento de hélio ao longo de 5 anos, alguns países enfrentaram interrupções no fornecimento.

Já o Leste Asiático demonstrou alta resiliência, ocasionado pela diversificação das fontes de hélio, já os países das Américas dependiam totalmente dos EUA para suprir sua demanda. Assim, a aplicação do método *GeoPolRisk* auxiliou para evidenciar a vulnerabilidade de cada país escolhido, devido a fatores geopolíticos (Siddhantakar et al., 2023). Os métodos utilizados no estudo de Masoudi et al. (2017) para investigação geoeconômica do mineral fluorita para o Irã, estão no Quadro 7.

Quadro 7 - Métodos de Avaliação Geoeconômica Utilizados no Estudo de Masoudi et al. (2017)

Método em Inglês	Tradução
<i>Anderson's Geopolitical Risk Assessment Model</i>	Modelo de Avaliação de Risco Geopolítico de Anderson
<i>National Research Council Method</i>	Conselho Nacional de Pesquisa
<i>Department of Energy Method</i>	Método do Departamento de Energia
<i>Department of Defense Method</i>	Método do Departamento de Defesa
<i>British Geological Survey Method</i>	Método do Serviço Geológico Britânico
<i>United States Geological Survey Method</i>	Método do Serviço Geológico dos Estados Unidos
<i>European Union Method</i>	Método da União Europeia
<i>United Nations Environment Programme Method</i>	Método do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
<i>Federal Institute of Geosciences and Raw Materials (BGR), Fraunhofer Institute of Systems and Innovation Research (ISI), Rhine-Westphalia Institute of Economic Research (RWI) - BGR/ISI/RWI method</i>	Método desenvolvido pelos seguintes institutos: Instituto Federal de Geociências e Materiais Brutos, Instituto Fraunhofer de Pesquisa em Sistemas e Inovação e Instituto de Pesquisa Econômica da Renânia-Vestfália

Fonte: Adaptado de Masoudi et al. (2017).

Diante do exposto, a combinação de ferramentas demonstra a relevância de considerar fatores geopolíticos nas governanças e estratégias relacionadas às

matérias-primas. Dessa forma, torna-se possível tomar decisões mais direcionadas para alcance da segurança e sustentabilidade ao acesso desses minerais.

5.1.3.3 *Estudos com foco na economia circular*

Durante a pesquisa identificou-se nove pesquisas que trataram, direta ou indiretamente, da economia circular das MPCs dos REEE. A seguir são apresentadas algumas discussões que foram identificadas nos estudos.

A necessidade de assegurar um fornecimento adequado de matérias-primas para *LIBs*, indicam a necessidade do manejo e reciclagem dos resíduos de baterias e acumuladores que os recicladores e os fabricantes devem participar (Giosuè et al., 2021).

A abordagem da comissão europeia sobre *LIBs*, segue várias etapas do "berço ao berço": projeto da bateria (incluindo padronização de materiais e rotulagem), mineração de matérias-primas (incluindo reciclagem), produção e uso de *LIBs* (recolha, reutilização e reciclagem); assim, visa-se minimizar o consumo de energia, as emissões de CO₂, a toxicidade ambiental e os recursos naturais, para criar oportunidades econômicas e gerenciar questões de segurança (Giosuè et al., 2021).

O método *Sony-Sumimoto* é um dos melhores exemplos de aplicação da economia circular, em que o Co(OH)₂ recuperado das *LIBs* da *Sony*, provenientes de dispositivos eletrônicos usados, é diretamente reutilizado na fabricação de novas células. Esse processo inclui a calcinação das células usadas e aproveita a cogeração resultante da queima dos eletrólitos (Bernardes, Espinosa, Tenório, 2004 apud Giosuè et al., 2021, p.4).

Conforme Christmann (2021), é essencial apoiar esforços para aumentar a circularidade dos recursos, como a produção com eco-eficiência dos minerais e o *design* ecológico de produtos, algumas iniciativas são levantadas: (i) Produção ecológica e socialmente eficiente de minerais e metais; e (ii) O desenvolvimento de ações que apoiem o uso circular de recursos (Concepção de materiais inovadores e eficientes em termos de recursos; Concepção de produtos utilizáveis e recicláveis graças ao ecodesign; O desenvolvimento da reutilização, recondicionamento e remanufatura de componentes específicos e reciclagem no fim de vida; A luta contra a obsolescência programada; ecologia industrial onde os resíduos de uma indústria são utilizados como recurso para outra.

Já no contexto elétrico, a maior demanda por metais é impulsionada pela necessidade de um sistema confiável e de baixo carbono. Embora o potencial para a mineração urbana aumente ao longo do tempo, atualmente muitos componentes desativados do sistema elétrico acabam armazenados sem utilização, resultando uma oportunidade perdida de reaproveitamento de metais valiosos (Van Oorschot et al., 2022). Assim, a possibilidade de reciclar completamente os metais pode ser

alcançada após a transição energética, desde que as taxas de reciclagem aumentem e a demanda por eletricidade se estabilize (Van Oorschot et al., 2022).

Assim, a partir das pesquisas levantadas sobre economia circular aplicado às MPCs, é perceptível a importância de estratégias que priorizem o reaproveitamento desses recursos ao longo de todo ciclo de vida dos produtos, desde a extração de matérias-primas até o descarte e recuperação final. Dessa maneira, a economia circular contribui não apenas para redução dos impactos ambientais, mas promove uma maior eficiência produtiva, por meio da otimização dos recursos.

5.1.3.4 *Estudos com foco em governança*

Foram identificados onze artigos que trataram de forma direta ou indireta da governança:

O desperdício das receitas minerais pelas "elites" políticas em alguns países ricos em recursos minerais, a corrupção, a busca de lucros a curto prazo, a evasão fiscal e a ausência de relatórios públicos transparentes sobre projetos de exploração e atividades mineiras, continuam sendo obstáculos ao desenvolvimento de uma boa governação, é necessário compreender os diversos papéis dos minerais e metais no suporte ao bem-estar individual e reconhecer sua importância estratégica (Christmann, 2021).

O governo da República da Coreia do Sul tem implementado uma série de políticas e iniciativas em rumo a gestão sustentável de resíduos, como exemplo destaca-se a Lei sobre a Circulação de Recursos de Equipamentos Elétricos, Eletrônicos e Veículos; do inglês *Act on the Resource Circulation of Electrical and Electronic Equipment and Vehicles*, instrumento jurídico a contribuir para o avanço da economia circular no país (Lee & Cha, 2021).

Para desenvolver-se como uma sociedade eficiente na circulação de recursos, a Coreia promulgou a Lei Estrutural sobre Circulação de Recursos, do inglês *Framework Act on Resource Circulation*, juntamente com leis subordinadas para sua melhor aplicação. O principal objetivo da lei é reduzir a geração de resíduos ao máximo possível, através do uso eficiente de recursos (South Korea, 2017).

Lee & Cha (2021) avaliaram a política atual da Coreia do Sul em relação à economia circular e à segurança de recursos, e reconhece a importância da gestão das MPCs para o contínuo crescimento econômico do país, pois quando os resíduos se transformarem em recursos circulares valiosos, eles deixarão de estar sujeitos às regulamentações devido ao fim da sua condição de resíduo.

A partir da análise realizada por Hao et al. (2018) sobre o comércio internacional de minério de ferro (base de dados: Comtrade da ONU), algumas recomendações de governança são sugeridas para os importadores: diversificação das fontes de

importação, fortalecimento da cooperação entre importadores e investimento em minas estrangeiras para melhorar a competitividade.

Em síntese, através das pesquisas escolhidas destacam-se algumas diretrizes para uma governança mais eficaz das MPCs, que são: necessidade de produção ecológica; iniciativas de *ecodesign*; redução a geração de resíduos ao máximo possível; economia circular e à segurança de recursos; diversificação das fontes de importação; fortalecimento da cooperação entre importadores; e implementação de políticas com destino a gestão sustentável dos resíduos.

5.2 ESTIMATIVA DA RECUPERAÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS ESTRATÉGICAS

5.2.1 Projeção Populacional

Na Tabela 9, são apresentados os valores das projeções populacionais para o município de Caruaru - PE, utilizando os métodos: decrescente de crescimento, aritmético, logístico e geométrico. As projeções são para o período de 2025 à 2045.

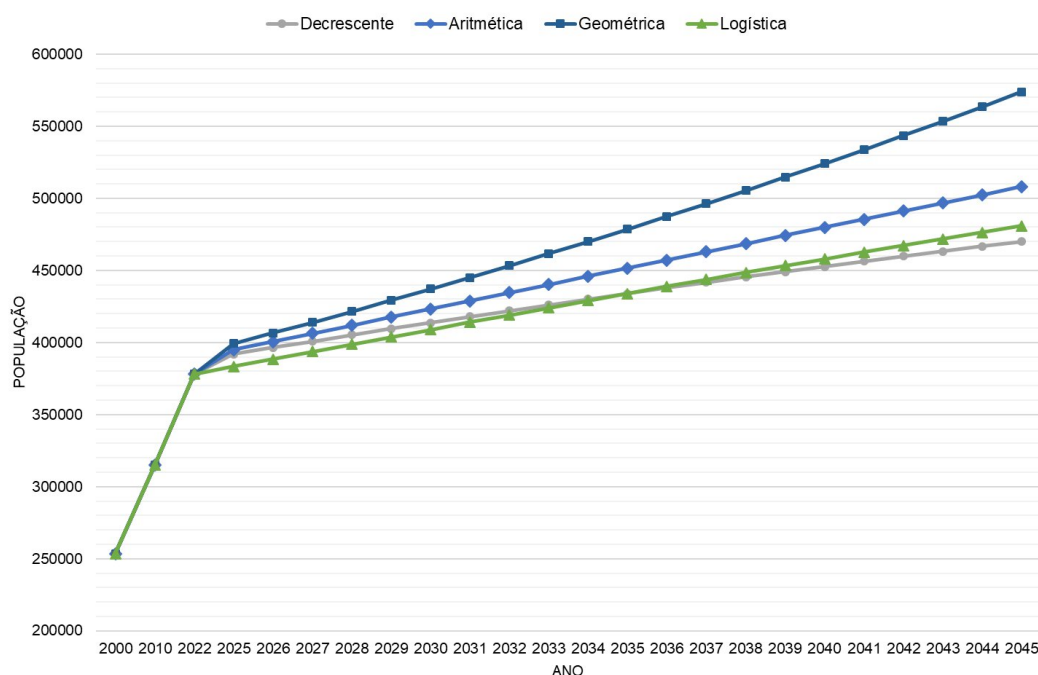
Tabela 9 - Estimativas Populacionais para os Métodos: Decrescente de crescimento, logística, geométricos e aritméticos

Ano	População Estimada			
	Decrescente de crescimento	Aritmético	Logístico	Geométrico
2025	391.972	395.014	383.261	399.194
2026	396.473	400.669	388.455	406.502
2027	400.904	406.324	393.628	413.945
2028	405.267	411.979	398.778	421.523
2029	409.564	417.634	403.902	429.240
2030	413.795	423.289	408.998	437.099
2031	417.961	428.945	414.063	445.101
2032	422.063	434.600	419.097	453.250
2033	426.102	440.255	424.096	461.548
2034	430.080	445.910	429.060	469.998
2035	433.997	451.565	433.984	478.602
2036	437.853	457.221	438.869	487.364
2037	441.651	462.876	443.712	496.287
2038	445.391	468.531	448.512	505.373
2039	449.073	474.186	453.266	514.625
2040	452.699	479.841	457.973	524.047
2041	456.270	485.496	462.633	533.641
2042	459.785	491.152	467.242	543.411
2043	463.247	496.807	471.800	553.359
2044	466.656	502.462	476.306	563.490
2045	470.013	508.117	480.758	573.807

Fonte: A autora (2025).

A partir dos dados obtidos na Tabela 9, geraram-se as curvas apresentadas no Gráfico 6. Assim, é possível observar as diferenças significativas nos resultados projetados pelos diferentes métodos de cálculo populacional.

Gráfico 6 - Comparativo entre métodos de cálculo para projeção populacional



Fonte: A autora (2025).

A partir das curvas apresentadas no Gráfico 6, dois cenários distintos foram considerados: o Cenário 1, baseado na curva com os menores valores de projeção populacional (logística) para representar um cenário de crescimento mínimo, e o Cenário 2, fundamentado na maior projeção populacional, refletindo um cenário de crescimento máximo (geométrica).

Com base nesses dois cenários populacionais, torna-se possível estimar a geração de REEE no município de Caruaru - PE, possibilitando um planejamento mais preciso e eficiente na gestão desses resíduos.

5.2.2 Geração de REEE

A Tabela 10 apresenta a projeção da geração anual de REEE para o município (a partir dos 9 equipamentos eletroeletrônicos pré-definidos na Seção 4.3.3), para os anos da população projetada (2025 à 2045), nos dois cenários na Seção 5.2.1. A

projeção da geração anual de REEE foi possível, utilizando-se a geração *per capita* de 4,36 kg/hab/ano, obtida por Oliveira Neto (2019), para o município de Caruaru.

Tabela 10 - Projeção da geração anual de REEE para os cenários 1 e 2.

Ano	Método logístico (em habitante)	Geração REEE anual no Cenário 1 (em kg/ano)*	Método geométrico (em habitante)	Geração REEE anual no Cenário 2 (em kg/ano)**
2025	383.261	1.671.017,96	399.194	1.740.485,84
2026	388.455	1.693.663,80	406.502	1.772.348,72
2027	393.628	1.716.218,08	413.945	1.804.800,20
2028	398.778	1.738.672,08	421.523	1.837.840,28
2029	403.902	1.761.012,72	429.240	1.871.486,40
2030	408.998	1.783.231,28	437.099	1.905.751,64
2031	414.063	1.805.314,68	445.101	1.940.640,36
2032	419.097	1.827.262,92	453.250	1.976.170,00
2033	424.096	1.849.058,56	461.548	2.012.349,28
2034	429.060	1.870.701,60	469.998	2.049.191,28
2035	433.984	1.892.170,24	478.602	2.086.704,72
2036	438.869	1.913.468,84	487.364	2.124.907,04
2037	443.712	1.934.584,32	496.287	2.163.811,32
2038	448.512	1.955.512,32	505.373	2.203.426,28
2039	453.266	1.976.239,76	514.625	2.243.765,00
2040	457.973	1.996.762,28	524.047	2.284.844,92
2041	462.633	2.017.079,88	533.641	2.326.674,76
2042	467.242	2.037.175,12	543.411	2.369.271,96
2043	471.800	2.057.048,00	553.359	2.412.645,24
2044	476.306	2.076.694,16	563.490	2.456.816,40
2045	480.758	2.096.104,88	573.807	2.501.798,52

*Estimativa populacional logística x 4,36 kg/hab/ano (REEE anual *per capita*)

**Estimativa populacional geométrica x 4,36 kg/hab/ano (REEE anual *per capita*)

Fonte: A autora (2025).

5.2.3 Estimativa da geração de placas de circuito impresso

As Tabelas 10 e 11 representam, respectivamente, o Cenário 1 e o Cenário 2. A Tabela 11 apresenta a estimativa da geração de PCI (kg/ano), por tipo de EEE (kg/ano), por tipo de EEE. Esses dados são necessários para a projeção das matérias-primas estratégicas presentes nesses componentes. A estimativa apresenta uma projeção em kg/ano de PCI (presente nos REEE) para o intervalo 2025 – 2045.

Tabela 11 - Estimativa geração de PCI (em kg/ano) por tipo de EEE no Cenário 1

ANO	PC: monitor (17,88%)* (12%)**	PC: CPU (11,92%)* (14%)**	Notebook (12,30%)* (15%)**	Impressora (11,73%)* (3%)**	Tablet (0,68%)* (10%)**	Celular (1,37%)* (10%)**	TV Tubo (24,21%)* (10%)**	TV LCD/ Plasma (14,46%)* (7%)**	TV LED (5,45%)* (2%)**
2025	35.853,36	27.885,95	30.830,28	5.880,31	1.136,29	2.289,29	40.455,34	16.914,04	1.821,41
2026	36.339,25	28.263,86	31.248,10	5.960,00	1.151,69	2.320,32	41.003,60	17.143,26	1.846,09
2027	36.823,18	28.640,25	31.664,22	6.039,37	1.167,03	2.351,22	41.549,64	17.371,56	1.870,68
2028	37.304,95	29.014,96	32.078,50	6.118,39	1.182,30	2.381,98	42.093,25	17.598,84	1.895,15
2029	37.784,29	29.387,78	32.490,68	6.197,00	1.197,49	2.412,59	42.634,12	17.824,97	1.919,50
2030	38.261,01	29.758,56	32.900,62	6.275,19	1.212,60	2.443,03	43.172,03	18.049,87	1.943,72
2031	38.734,83	30.127,09	33.308,06	6.352,90	1.227,61	2.473,28	43.706,67	18.273,40	1.967,79
2032	39.205,75	30.493,36	33.713,00	6.430,14	1.242,54	2503,35	44.238,04	18.495,56	1.991,72
2033	39.673,40	30.857,09	34.115,13	6.506,84	1.257,36	2.533,21	44.765,71	18.716,17	2.015,47
2034	40.137,77	31.218,27	34.514,44	6.583,00	1.272,08	2.562,86	45.289,69	18.935,24	2.039,06
2035	40.598,40	31.576,54	34.910,54	6.658,55	1286,68	2.592,27	45.809,44	19.152,55	2.062,47
2036	41.055,39	31.931,97	35.303,50	6.733,50	1.301,16	2.621,45	46.325,08	19.368,13	2.085,68
2037	41.508,44	32.284,34	35.693,08	6.807,80	1.315,52	2.650,38	46.836,29	19.581,86	2.108,70
2038	41.957,47	32.633,59	36.079,20	6.881,45	1.329,75	2.679,05	47.342,95	19.793,70	2.131,51
2039	42.402,20	32.979,49	36.461,62	6.954,39	1.343,84	2.707,45	47.844,76	20.003,50	2.154,10
2040	42.842,53	33.321,97	36.840,26	7.026,61	1.357,80	2.735,56	48.341,61	20.211,23	2.176,47
2041	43.278,47	33.661,03	37.215,12	7.098,10	1.371,61	2.763,40	48.833,50	20.416,88	2.198,62
2042	43.709,63	33.996,38	37.585,88	7.168,82	1.385,28	2.790,93	49.320,01	20.620,29	2.220,52
2043	44.136,02	34.328,02	37.952,54	7.238,75	1.398,79	2.818,16	49.801,13	20.821,44	2.242,18
2044	44.557,55	34.655,87	38.315,01	7.307,89	1.412,15	2.845,07	50.276,77	21.020,30	2.263,60
2045	44.974,03	34.979,80	38.673,14	7.376,19	1.425,35	2.871,66	50.746,70	21.216,77	2.284,75

*Percentual de geração por EEE

** Percentual de PCIs por tipo de EEE

Fonte: A autora (2025).

Tabela 12 - Estimativa da geração de PCI (em kg/ano) por tipo de EEE para o Cenário 2

ANO	PC: monitor (17,88%)* (12%)**	PC: CPU (11,92%)* (14%)**	Notebook (12,30%)* (15%)**	Impressora (11,73%)* (3%)**	Tablet (0,68%)* (10%)**	Celular (1,37%)* (10%)**	TV Tubo (24,21%)* (10%)**	TV LCD/ Plasma (14,46%)* (7%)**	TV LED (5,45%)* (2%)**
2025	37.343,86	29.045,23	32.111,96	6.124,77	1.183,53	2.384,47	42.137,16	17.617,20	1.897,13
2026	38.027,51	29.576,96	32.699,83	6.236,90	1.205,20	2.428,12	42.908,56	17.939,71	1.931,86
2027	38.723,79	30.118,51	33.298,56	6.351,09	1.227,26	2.472,58	43.694,21	18.268,19	1.967,23
2028	39.432,70	30.669,88	33.908,15	6.467,36	1.249,73	2.517,84	44.494,11	18.602,62	2.003,25
2029	40.154,61	31.231,37	34.528,92	6.585,76	1.272,61	2.563,94	45.308,69	18.943,19	2.039,92
2030	40.889,81	31.803,18	35.161,12	6.706,34	1.295,91	2.610,88	46.138,25	19.290,02	2.077,27
2031	41.638,38	32.385,41	35.804,81	6.829,11	1.319,64	2.658,68	46.982,90	19.643,16	2.115,30
2032	42.400,70	32.978,32	36.460,34	6.954,14	1.343,80	2.707,35	47.843,08	20.002,79	2.154,03
2033	43.176,97	33.582,08	37.127,84	7.081,46	1.368,40	2.756,92	48.718,98	20.369,00	2.193,46
2034	43.967,45	34.196,90	37.807,58	7.211,10	1.393,45	2.807,39	49.610,92	20.741,91	2.233,62
2035	44.772,34	34.822,93	38.499,70	7.343,11	1.418,96	2.858,79	50.519,12	21.121,63	2.274,51
2036	45.592,01	35.460,45	39.204,53	7.477,55	1.444,94	2.911,12	51.444,00	21.508,31	2.316,15
2037	46.426,74	36.109,68	39.922,32	7.614,45	1.471,39	2.964,42	52.385,87	21.902,10	2.358,55
2038	47.276,71	36.770,78	40.653,21	7.753,86	1.498,33	3.018,69	53.344,95	22.303,08	2.401,73
2039	48.142,22	37.443,95	41.397,46	7.895,81	1.525,76	3.073,96	54.321,55	22.711,39	2.445,70
2040	49.023,63	38.129,49	42.155,39	8.040,37	1.553,69	3.130,24	55.316,10	23.127,20	2.490,48
2041	49.921,13	38.827,55	42.927,15	8.187,57	1.582,14	3.187,54	56.328,80	23.550,60	2.536,08
2042	50.835,10	39.538,41	43.713,07	8.337,47	1.611,10	3.245,90	57.360,07	23.981,77	2.582,51
2043	51.765,72	40.262,22	44.513,30	8.490,10	1.640,60	3.305,32	58.410,14	24.420,80	2.629,78
2044	52.713,45	40.999,35	45.328,26	8.645,54	1.670,64	3.365,84	59.479,53	24.867,90	2.677,93
2045	53.678,59	41.750,01	46.158,18	8.803,83	1.701,22	3.427,46	60.568,54	25.323,20	2.726,96

*Percentual de geração por EEE

** Percentual de PCIs por tipo de EEE

Fonte: A autora (2025).

Através da estimativa (Tabela 11 e Tabela 12) de PCI, obteve-se a estimativa das frações das matérias-primas minerais estratégicas que podem ser obtidas na recuperação de PCIs para os Cenários 1 e 2. Esses quantitativos totais de cada matéria-prima mineral estratégica (das PCI) produzidos a partir dos REEE em Caruaru são resumidamente apresentados na Figura 10 (com intervalos de 5 anos).

Figura 10 - Potencial de geração de cada mineral estratégico por PCI no Cenário 1 e Cenário 2 no município de Caruaru – PE A) 2025 B)2030 C)2035 D)2040 E)2045



Fonte: A autora (2025).

Os resultados mostram que o cobre é o mineral mais abundante, dentro das PCIs, seguido do alumínio e do ferro. De acordo com Hagelüken (2006), a concentração de Cu em PCIs é superior às encontradas em minas de cobre naturais.

O processamento informal de lixo eletrônico tem no cobre e ouro os indicadores da viabilidade econômica do processo (Ilankoon et al., 2018). No entanto, a falta de uma classificação para os REEE e as baixas taxas de coleta, em países como Brasil, são problemas que, segundo Tabelin et al. (2021), limitam bastante a reciclagem completa desse tipo de resíduo.

Nesse sentido, a segregação e coleta de lixo eletrônico pode ser considerado um fator primordial para a prospecção e recuperação de minérios estratégicos de PCIs, representando um importante papel na sustentabilidade da gestão desses resíduos.

A Comissão Europeia considera que a disputa global por recursos se intensificará nos próximos anos e a dependência de matéria-prima mineral pode, em breve, superar a presente dependência do petróleo (European Commission, 2023). Considerando que muitos desses minérios, com destaque para o cobre, fazem parte da constituição das Tecnologias de Energia Renovável e Armazenamento Limpo, uma consequente elevada procura de cobre, segundo Tabelin et al. (2021) poderá causar desafios econômicos e socioambientais na cadeia de abastecimento.

Diante de um cenário futuro como esse, a recuperação secundária desses minérios ganha uma importância para além da sustentabilidade da gestão de REEE, contemplando inclusive o mercado produtor de tecnologias limpas.

5.2.4 Potencial econômico: recuperação de matérias-primas estratégicas

A Tabela 13 apresenta os resultados do potencial econômico dos minérios contidos nas PCIs. Esses resultados são relevantes, pois fornecem dados sobre o valor econômico desses materiais, a média do preço unitário e a projeção do valor total para os anos: 2025, 2030, 2035, 2040 e 2045.

Tabela 13 Avaliação do potencial econômico de Minerais estratégicos dos REEE em Caruaru-PE para os Cenários 1 e 2.

Ano	Mineral	Fração de minerais estratégicos em PCIs (kg/ano)*	Preço total por mineral (US\$/ano)*	Preço total por mineral (R\$/ano)*	Fração de minerais estratégicos em PCIs (kg/ano)**	Preço total por mineral (US\$/ano)**	Preço total por mineral (R\$/ano)**
2025	Ferro	5.568,5	4.176,4	25.893,5	5.800,0	4.350,0	26.970,0
	Cobre	22.616,9	197.897,9	1.226.966,8	23.557,2	206.125,5	1.277.978,1
	Ouro	403,3	22.576,7	139.975,8	420,1	23.517,2	145.806,6
	Alumínio	7.831,8	22.320,63	138.387,9	8.157,4	23.248,6	144.141,3
	Estanho	3.220,6	109,5	678,9	3.354,5	114,1	707,1
	Níquel	1.015,7	24.630,7	152.710,5	1.058,0	25.656,5	159.070,3
Total		U\$271.711,84	R\$1.684.613,40	Total	U\$283.011,84	R\$1.754.673,41	
2030	Ferro	5.942,4	4.456,8	27.632,2	6.350,7	4.763,0	29.530,8
	Cobre	24.135,7	211.187,4	1.309.361,7	25.794,0	225.697,5	1.399.324,5
	Ouro	430,4	24.093,8	149.381,5	460,0	25.750,8	159.655,0
	Alumínio	8.357,7	23.819,4	147.680,6	8.931,9	25.455,9	157.826,7
	Estanho	3.436,9	116,9	724,5	3.673,0	124,9	774,3
	Níquel	1.084,0	26.287,0	162.979,4	1.158,4	28.091,2	174.165,4
Total		U\$289.961,27	R\$1.797.759,85	Total	U\$309.883,32	R\$1.921.276,60	
2035	Ferro	6.305,5	4729,1	29.320,6	6.953,7	5.215,3	32.334,7
	Cobre	25.610,2	224.089,2	1.389.353,4	28.243,2	247.128,0	1.532.193,6
	Ouro	456,7	25.566,1	158.509,6	503,6	28.191,5	174.787,5
	Alumínio	8.868,3	25.274,7	156.702,9	9.780,0	27.873,00	172.812,6
	Estanho	3.646,8	124,0	768,7	4.021,8	136,7	847,8
	Níquel	1.150,2	27.892,35	172.932,6	1.268,4	30758,7	190.703,9
Total		U\$307.675,44	R\$1.907.587,71	Total	U\$339.303,24	R\$2.103.680,11	
2040	Ferro	6.654,0	4.990,5	30.941,1	7.614,0	5.710,5	35.405,1
	Cobre	27.025,8	236.475,7	1.466.149,7	30.925,0	270.593,7	1.677.681,3
	Ouro	481,9	26.976,8	167.255,9	551,5	30.872,9	191.412,4
	Alumínio	9.358,5	26.671,7	165.364,7	10.708,7	30.519,8	189.222,7
	Estanho	3.848,4	130,85	811,2	4.403,6	149,7	928,3
	Níquel	1.213,8	29.434,65	182.494,8	1.388,9	33.680,8	208.821,1
Total		U\$324.680,23	R\$2.013.017,44	Total	U\$371.527,56	R\$2.303.470,89	
2045	Ferro	6.985,0	5238,7	32.480,25	8.337,0	6.252,75	38.767,05
	Cobre	28.370,4	248.241,0	1.539.094,2	33.861,4	296.287,2	1.836.981,0
	Ouro	505,9	28.320,3	175.585,7	603,8	33.800,7	209.564,49
	Alumínio	9.824,1	27.998,7	173.591,8	11.725,5	33.417,7	207189,59
	Estanho	4.039,9	137,4	851,6	4.821,8	163,9	1.016,4
	Níquel	1.274,1	30.896,9	191.560,9	1.520,8	36.879,4	228.652,28
Total		U\$340.833,00	R\$2.113.164,59	Total	U\$406.801,74	R\$2.522.170,79	

Fonte: A autora (2025).

Nota: *Dados referentes ao Cenário 1 (Estimativa populacional logística)

** Dados referentes ao Cenário 2 (Estimativa populacional geométrica)

Os três metais que apresentaram maior valor econômico foram: cobre, níquel e ouro, representando, aproximadamente, 90,2% do valor total, em ambos os cenários. A mineração é marcada por externalidades, decorrentes do impacto das operações de mineração cada vez mais profundas, resultando em mudanças no planeta e no ambiente circundante da mina (Henckens, 2021).

O cobre é o metal que mais contribui para o valor total, ocasionado pela expressiva quantidade do metal nas PCI, com uma participação econômica de aproximadamente 72,8% do valor total. Apesar do ouro representar uma fração pequena em massa (kg/ano), ele apresenta um impacto econômico significativo, devido seu alto valor de mercado (347,08 R\$/kg). Já o níquel também apresenta um valor econômico expressivo (150,3 R\$/kg), especialmente considerando sua fração relativamente pequena.

Diante disso, o descarte adequado e a reciclagem de PCIs podem representar uma oportunidade econômica significativa no município. Porém, a limitação da pesquisa é que os procedimentos de recuperação não asseguram a obtenção integral de todos os elementos contidos nas PCIs. As taxas de perdas podem variar dependendo da escolha do processo ou da combinação de processos utilizados.

Inicialmente para recuperação de REEE são necessários tratamentos mecânicos para separação dos componentes. Em seguida, existem diversas técnicas que são capazes de permitir a recuperação dos metais, sendo algumas delas adaptações de processos tradicionais da mineração e metalurgia, normalmente aplicados na obtenção primária de matérias-primas (Xavier et al., 2023).

A operação em larga escala é uma das vantagens da técnica da pirometalurgia, pois não é necessário um pré-tratamento dos resíduos, como ocorre em outros processos metalúrgicos. No entanto, a presença de retardadores de chamas halogenados podem levar a formação de dioxinas, furanos, poluentes orgânicos polibromados, entre outras substâncias tóxicas. A conversão e recuperação de metais nesse processo não alcança os níveis obtidos na hidrometalurgia ou biometalurgia, principalmente devido às perdas em escória (Xavier et al., 2023).

As rotas de hidrometalurgia envolvem processos de dissolução de metais, através de soluções ácidas ou alcalinas, seguidos de etapas de separação e purificação para obtenção dos compostos metálicos (YANG et al., 2018). A biohidrometalurgia é uma técnica que utiliza microrganismos para extrair os metais

(CHAERUN; WINARKO; YUSHANDIANA, 2023) De maneira geral, a biohidrometalurgia é mais sustentável e econômica, porém mais lenta que a hidrometalurgia que é mais eficiente, porém mais cara e impactante ao meio ambiente.

Assim, futuras pesquisas deverão avaliar em detalhe, a eficiência das técnicas utilizadas na recuperação de metais presentes nessas PCIs. Alguns fatores que deverão ser considerados são o volume de resíduos processados, o percentual de metais efetivamente recuperados e as perdas observadas ao longo do processo de recuperação. Essa análise permitirá identificar quais métodos de recuperação que apresentam maior viabilidade econômica e menor impacto ambiental para o município de Caruaru – PE.

5.3 CONTRIBUIÇÃO PARA ECONOMIA CIRCULAR

Durante a avaliação dos artigos selecionados para a revisão sistemática, foram discutidos alguns métodos que contribuem para a economia circular, dentre eles a ACV, que é uma ferramenta amplamente utilizada. A ACV é uma metodologia comumente empregada para avaliar os impactos ambientais de produtos e serviços (Santillán-Saldivar et al., 2021).

Os padrões internacionais para ACV, organizam a metodologia em torno de quatro fases inter-relacionadas e iterativas: (1) definição de objetivo e escopo, (2) inventário do ciclo de vida (ICV), (3) avaliação de impacto do ciclo de vida (LCIA) e (4) interpretação do ciclo de vida (ISO 2006a, 2006b apud Santillán-Saldivar et al. 2021).

Diante do contexto das MPCs, diferentes metodologias para a avaliação têm sido desenvolvidas em contextos governamentais e de pesquisas, e a possibilidade de incluir o aspecto da segurança dos recursos na ACV tem sido defendida por diversos autores (Mancini; Benini; Sala, 2018).

Tanto em pequena quanto em grande escala, a ACV pode ser mais eficaz na identificação de pontos críticos e oportunidades de melhoria relacionadas às MPCs; tendo em vista, que ela fornece informações acerca de questões como a criticidade das mesmas, nas cadeias de suprimentos, beneficiando empresas e governos.

Entretanto, avanços metodológicos podem aumentar seu potencial para apoiar avaliações de recursos de forma mais sistemática, dessa forma, reformulações na categoria de impacto do esgotamento de recursos e na utilização das informações sobre recursos são necessárias para torná-las mais relevantes para negócios e

políticas (Mancini et al., 2015b). Métodos como *GeoPoIRisk*, *ESP* e *ESSENZ* podem ser uma alternativa de complemento a ACV, pois fornece uma visão do risco de fornecimento das MPCs.

Os estudos demonstraram que o uso da ACV é útil para compreensão do impacto ambiental das MPCs, e ela pode auxiliar para futuras pesquisas sobre as PCIs em REEE. Além disso, a partir dos resultados obtidos na seção 5.2 podem auxiliar para formulação de um ICV necessário para aplicação do método ACV.

Ademais, a estimativa do potencial econômico da recuperação de minerais estratégicos presentes nas PCIs, ela não apenas gera valor econômico, mas também se alinha aos princípios da economia circular, pois promove uma possível redução nos desperdícios e maior eficiência no uso dos recursos.

6. CONCLUSÕES

Sobre o estado da arte das MPCs: disponibilidade ou fornecimento; avaliações geopolíticas; economia circular e governança.

A revisão buscou estudos que explorassem as MPCs, examinando considerações geopolíticas, de governança e seus impactos econômicos. A avaliação bibliométrica quantitativa, realizada através de gráficos, revelou que os anos de 2021, 2022 e 2023, especialmente impulsionada pelos impactos decorrentes da pandemia de COVID-19.

Através da distribuição dos autores por país da instituição, foi perceptível a predominância de publicações europeias, destacando o papel central da União Europeia nas discussões sobre MPCs, refletindo uma preocupação estratégica com governança desses recursos.

Já a análise bibliométrica qualitativa, através do software *Vosviewer*, possibilitou a criação de mapas de redes bibliométricas, para análise visual das citações e palavras-chave dos artigos selecionados.

Entre os estudos selecionados que formaram a rede de citações, a pesquisa de Blengini et al. (2017) é o trabalho com maior média de citações por ano, seguido por Cimprich (2019) e Mancini (2018).

Já em relação à rede de coocorrência das palavras-chave, as que apresentaram com maior frequência foram: *critical raw materials* (matéria-prima crítica), *circular economy* (economia circular), *life cycle assessment* (análise do ciclo de vida) e *supply risk* (risco de fornecimento).

Através das pesquisas abordadas, tornou-se evidente que a disponibilidade e o fornecimento de MPCs são questões de relevância para a sustentabilidade econômica e ambiental dos países. Por outro lado, questões geopolíticas, tecnológicas, ambientais e de governança aumenta a preocupação acerca das MPCs.

Diante do contexto disponibilidade e fornecimento de MPCs vários países como o Brasil, não apresentam metodologias oficiais para avaliar a criticidade, indicando uma lacuna significativa, pois minerais são fundamentais para a economia e segurança nacional. Assim, a implementação de metodologias de criticidade permitiria

a esses países priorizar ações estratégicas para aumentar a resiliência econômica, diante a possíveis interrupções de fornecimento.

Em frente às avaliações geopolíticas, a combinação de ferramentas demonstra a relevância de considerar fatores geopolíticos nas governanças e estratégias relacionadas às matérias-primas. Dessa forma, torna-se possível tomar decisões mais direcionadas para alcance da segurança e sustentabilidade ao acesso desses minerais.

Por meio das pesquisas analisadas sobre governança das MPCs, evidenciam-se algumas diretrizes para torná-la mais eficaz, incluindo: necessidade de produção ecológica; incentivo a iniciativas de *ecodesign*; redução máxima da geração de resíduos; promoção da economia circular e da segurança de recursos; diversificação das fontes de importação; fortalecimento da cooperação entre importadores; e implementação de políticas com destino a gestão sustentável dos resíduos.

Sobre o potencial econômico dos minerais estratégicos extraídos das PCI

Por meio do quantitativo de minerais estratégicos foi estimado o potencial econômico dos minérios contidos nas PCIs. Esses resultados são relevantes, pois fornecem dados sobre o valor econômico desses materiais, a média do preço unitário e a projeção do valor total para os anos: 2025, 2030, 2035, 2040 e 2045.

Os resultados mostram que os três metais que apresentaram maior valor econômico foram: cobre, níquel e ouro, representando, aproximadamente, 90,2% do valor total, em ambos os cenários. Diante disso, o descarte adequado e a reciclagem de PCIs podem representar uma oportunidade econômica significativa ao município de Caruaru.

Neste sentido, destacam-se: (i) a necessidade de um sistema de logística reversa que permita o recolhimento dos REEE de forma efetiva; e (ii) a necessidade de investimentos em plantas de reciclagem de REEE que permitam a recuperação completa de materiais, neste caso de minerais estratégicos, considerados relevantes para o desenvolvimento nacional.

Devido às limitações da pesquisa, futuros estudos deverão avaliar o volume de resíduos processados, o percentual de metais efetivamente recuperados e as perdas observadas ao longo do processo de recuperação das técnicas de pirometalurgia,

hidrometalurgia e biohidrometalurgia aplicadas às PCIs. Além disso, seria necessária uma análise futura para identificar quais métodos de recuperação apresentam maior viabilidade econômica e menor impacto ambiental para o município de Caruaru – PE.

Sobre a contribuição para economia circular

Durante a avaliação dos artigos selecionados para revisão sistemática foram discutidos alguns métodos que contribuem para a economia circular, dentre eles a ACV, é uma ferramenta amplamente utilizada, ela é comumente empregada para avaliar os impactos ambientais de produtos e serviços.

Os estudos demonstraram que o uso da ACV é útil para compreensão do impacto ambiental das MPCs, e ela pode auxiliar para futuras pesquisas sobre as PCIs em REEE. Além disso, a partir das estimativas obtidas elas podem auxiliar para formulação de um ICV que é necessário para aplicação do método ACV. Assim, os dados obtidos serão úteis para futuras pesquisas, uma vez que permitirá uma análise mais detalhada dos fluxos de materiais e energia envolvidos nos processos de recuperação desses minerais.

Por fim, a estimativa do potencial econômico da recuperação de minerais estratégicos presentes nas PCIs, ela não apenas gera valor econômico, mas também se alinha aos princípios da economia circular, pois promove uma possível redução nos desperdícios e maior eficiência no uso dos recursos.

REFERÊNCIAS

- ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos: Análise de Viabilidade Técnica e Econômica**. 2013. Disponível em: <https://www.comexresponde.gov.br/portalmidic/arquivos/dwnl_1416934886.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- ANDERSSON, P. **Chinese assessments of “critical” and “strategic” raw materials: Concepts, categories, policies, and implications**. The Extractive Industries and Society, v. 7, n. 1, p. 127–137, 1 jan. 2020.
- BABBITT, C.; ALTHAF, S. & CHEN, R. **Sustainable materials management for the evolving consumer technology ecosystem**. 2017 Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-11/documents/babbitt_smmwebinar_102419_share.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- BALDÉ, C. P. et al. **THE GLOBAL E-WASTE MONITOR 2024**, 2024.
- BERNARDES, A. M.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. **Recycling of batteries: a review of current processes and technologies**. Journal of Power Sources, v. 130, n. 1–2, p. 291–298, 3 maio 2004.
- BLENGINI, G. A. et al. **EU methodology for critical raw materials assessment: Policy needs and proposed solutions for incremental improvements**. 2017.
- BRASIL. **Decreto N° 10.657, de 24 de março de 2021**. 2021b. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Decreto/D10657.htm>. Acesso em: 1 ago. 2024.
- BRASIL. **Resolução nº 2, de 18 de junho de 2021** - DOU - Imprensa nacional. 2021a.
- CHAERUN, S. K.; WINARKO, R.; YUSHANDIANA, F. **Biohydrometallurgy: Paving the Way for a Greener Future of Mineral Processing in Indonesia**. Current Research on Biosciences and Biotechnology, v. 5, n. 1, p. 299–307, 31 ago. 2023.
- CHRISTMANN, P. **Mineral Resource Governance in the 21st Century and a sustainable European Union**. Mineral Economics, v. 34, n. 2, p. 187–208, 1 jul. 2021.
- CIMPRICH, A. et al. **Raw material criticality assessment as a complement to environmental life cycle assessment: Examining methods for product-level supply risk assessment**. Journal of Industrial Ecology, v. 23, n. 5, p. 1226–1236, 2019.
- CUCCHIELLA, F. et al. **A profitability assessment of European recycling processes treating printed circuit boards from waste electrical and electronic equipments**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 64, p. 749–760, 1 out. 2016.

DALRYMPLE, I. et al. **An integrated approach to electronic waste (WEEE) recycling.** Circuit World, 2007. v. 33

DAMASCENO, A. M. et al. **Interpolation Methods Applied To The Population Growth Estimate.** Journal of Hyperspectral Remote Sensing, v. 9, n. 2, p. 80–87, 21 set. 2019.

EUROPEAN COMMISSION. **Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 Final Report.** European Commission, 2023.

FERREIRA DE CASTRO, F.; PEITER, C. C.; GÓES, G. S. **Minerais estratégicos e as relações entre brasil e china: oportunidades de cooperação para o desenvolvimento da indústria mineral brasileira.** Revista Tempo do Mundo, n. 24, p. 349–378, 10 mar. 2021.

FERRO, P.; BONOLLO, F.; CRUZ, S. A. **Product design from an environmental and critical raw materials perspective.** International Journal of Sustainable Engineering, v. 14, n. 1, p. 1–11, 2021.

FILHO, W. L. et al. **Understanding Rare Earth Elements as Critical Raw Materials.** Sustainability 2023, Vol. 15, Page 1919, v. 15, n. 3, p. 1919, 19 jan. 2023.

FORTI, V. et al. **The Global E-waste monitor 2020: Quantities, flows, and the circular economy potential,** 2020.

GIBAGA, C. R. L. et al. **The rare earth element (REE) potential of the Philippines.** Journal Of Geochemical Exploration, v. 242, 2022.

GIORGIO DE TOMI; GIOVANNA LOREDO; VINICIUS SANTOS. **Minerais Críticos e Estratégicos no Brasil: Uma Agenda de Soberania e de Clima - Soberania e Clima.** 2024. Disponível em: <<https://soberaniaeclima.org.br/publicacoes/artigos/minerais-criticos-e-estrategicos-no-brasil-uma-agenda-de-soberania-e-de-clima/>>. Acesso em: 2 ago. 2024.

GIOSUÈ, C. et al. **An exploratory study of the policies and legislative perspectives on the end-of-life of lithium-ion batteries from the perspective of producer obligation.** Sustainability (Switzerland), v. 13, n. 20, 2021.

GRAEDEL, T. E. et al. **Methodology of metal criticality determination.** Environmental science & technology, v. 46, n. 2, p. 1063–1070, 17 jan. 2012.

HAGELÜKEN, C. (PDF) **Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling.** Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/241271783_Improving_metal_returns_and_eco-efficiency_in_electronics_recycling>. Acesso em: 21 fev. 2024.

HAO, X. et al. **The import competition relationship and intensity in the international iron ore trade: From network perspective.** 2018.

HENCKENS, T. **Scarce mineral resources: Extraction, consumption and limits of sustainability**. Resources, Conservation and Recycling, v. 169, p. 105511, 1 jun. 2021. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105511

HORTA ARDUIN, R. et al. **Novel indicators to better monitor the collection and recovery of (critical) raw materials in WEEE: Focus on screens**. Resources, Conservation and Recycling, v. 157, p. 104772, 1 jun. 2020.

HUISMAN, Jaco; MAGALINI, Federico; KUEHR, Ruediger; MAURER, Claudia; OGILVIE, Steve; POLL, Jim; DELGADO, C.; ARTIM, Eniko; SZLEZAK, Jozsef; STEVELS, A. **Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)**. Official Journal of the European Union, v. 37, 2007.

IBGE. **Caruaru (PE) | Cidades e Estados | IBGE**. 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/caruaru.html>>. Acesso em: 8 jan. 2024.

IBGE. **Malha de Setores Censitários | IBGE**. 2024. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/26565-malhas-de-setores-censitarios-diviso-es-intramunicipais.html?edicao=26573>>. Acesso em: 8 jan. 2024.

IBRAM, I. B. DE M. **Fundamentos para políticas públicas em minerais críticos e estratégicos para o Brasil**. 1. ed, 2024.

ILANKOON, I. M. S. K. et al. **E-waste in the international context – A review of trade flows, regulations, hazards, waste management strategies and technologies for value recovery**. Waste Management, v. 82, p. 258–275, 1 dez. 2018.

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Green Conflict Minerals: The fuels of conflict in the transition to a low-carbon economy**. 2019. Disponível em: <<https://www.iisd.org/story/green-conflict-minerals/#group-Supply-Chain-Governance-ma3SSZAMof>>. Acesso em: 28 jul. 2024.

ISO. 14040:2006 **Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework**. Geneva: International Organization for Standardization, 2006a.

ISO. 14044:2006 **Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and Guidelines**. Geneva: International Organization for Standardization, 2006b.

JĘDRUSIAK, R.; BIELOWICZ, B.; DROBNIAK, A. **From waste to value: recovering critical raw materials from urban mines in the European Union and United States**. Gospodarka Surowcami Mineralnymi / Mineral Resources Management, v. 39, n. 3, p. 43–63, 2023.

JIANG, H. et al. **Ultrasound-enhanced catalytic degradation of simulated dye wastewater using waste printed circuit boards: catalytic performance and**

artificial neuron network-based simulation. Environmental Monitoring and Assessment, v. 195, n. 1, 1 jan. 2023.

KANG, K. D. et al. **Exfoliation of coarse printed circuit boards using dimethylacetamide: Production of copper concentrates.** Minerals Engineering, v. 191, p. 107963, 1 jan. 2023.

KIM, J. et al. **Raw material criticality assessment with weighted indicators: An application of fuzzy analytic hierarchy process.** Resources Policy, v. 60, p. 225–233, 1 mar. 2019.

KNOBLOCH, K.; YOON, U.; VOGT, P. M. **Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses (PRISMA) statement and publication bias.** 2 nov. 2010.

LEE, K. & CHA, J. **Towards improved circular economy and resource security in South Korea.** Sustainability (Switzerland), v. 13, n. 1, p. 1–14, 2021.

LI, H.; EKSTEEN, J.; ORABY, E. **Hydrometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards (WPCBs): Current status and perspectives – A review.** Resources, Conservation and Recycling, v. 139, p. 122–139, 1 dez. 2018.

LIU, H. et al. **Identification of high-risk agents and relationships in nickel, cobalt, and lithium trade based on resource-dependent networks.** Resources Policy, v. 74, 2021.

LUDA, M. P. **Recycling of Printed Circuit Boards.** *Integrated Waste Management*, v. 2, 2011. DOI: 10.5772/17220. Disponível em: <www.intechopen.com>.

MANCHERI, N. A. **World trade in rare earths, Chinese export restrictions, and implications.** Resources Policy, v. 46, p. 262–271, 1 dez. 2015.

MANCINI, L., SALA, S., RECCHIONI, M., BENINI, L., GORALCZYK, M., & PENNINGTON, D. **Potential of life cycle assessment for supporting the management of critical raw materials.** International Journal of Life Cycle Assessment, v. 20, n. 1, p. 100–116, 1 jan. 2015b.

MANCINI, L.; BENINI, L.; SALA, S. **Characterization of raw materials based on supply risk indicators for Europe.** International Journal of Life Cycle Assessment, v. 23, n. 3, p. 726–738, 1 mar. 2018.

MANCINI, L.; BENINI, L.; SALA, S. **Resource footprint of Europe: Complementarity of material flow analysis and life cycle assessment for policy support.** 2015a.

MANHART, Andreas; VOGT, Regine; PRIESTER, Michael; DEHOUST, Günter; AUBERGER, Andreas; BLEPP, Markus; DOLEGA, Peter; KÄMPER, Claudia; GIEGRICH, Jürgen; SCHMIDT, Gerhard; KOSMOL, Jan. **The environmental criticality of primary raw materials: a new methodology to assess global environmental hazard potentials of minerals and metals from mining.** Mineral Economics, v. 32, n. 1, p. 91–107, 5 abr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13563-018-0160-0>.

MASOUDI, S. M. et al. **Geeconomics of fluorspar as strategic and critical mineral in Iran**. Resources Policy, v. 52, p. 100–106, 2017.

MATHIEUX, F. et al. **Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy**. 2017.

METICULOUS RESEARCH. **Top 10 Companies in E-Waste Management Market**. Disponível em: <<https://meticulousblog.org/top-10-companies-in-e-waste-management-market/>>. Acesso em: 17 jul. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Guide for foreign investors in critical minerals for the energy transition in Brazil**. 2024.

MÜLLER, M. **The ‘new geopolitics’ of mineral supply chains: A window of opportunity for African countries**. South African Journal of International Affairs, v. 30, n. 2, p. 177–203, 3 abr. 2023.

OECD. **The supply of critical raw materials endangered by Russia’s war on Ukraine**. OECD Policy Responses on the Impacts of the War in Ukraine. Paris: OECD Publishing, 2022. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/trade/the-supply-of-critical-raw-materials-endangered-by-russia-s-war-on-ukraine_e01ac7be-en>. Acesso em: 28 jul. 2024.

OLIVEIRA NETO, J. F. DE. **Caracterização dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos produzidos em bairros de classe média-alta de Caruaru/PE**. Caruaru: Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

OLIVEIRA, P. C. F. DE. **Valorização de Placas de Circuito Impresso por Hidrometalurgia**. Lisboa: Universidade Técnica De Lisboa, 2012.

OLUWADELE, D.; SINGH, Y.; ADELIYI, T. T. **Trends and insights in e-learning in medical education: A bibliometric analysis**. Review of Education, v. 11, n. 3, 1 dez. 2023.

POPE N. & SMITH P. **Minerais críticos e estratégicos do brasil em um mundo em transformação**. Instituto Igarapé, 2023.

PREFEITURA MUNICIPAL DE MARATAÍZES. **Plano Municipal De Saneamento Básico e Gestão Integrada De Resíduos Sólidos de Marataízes**. Marataízes-ES 2017. Disponível em: <<https://www.marataizes.es.gov.br/uploads/documento/20180122165756-etapa-6-plano-final.pdf>>. Acesso em: 25 dez. 2024.

QASIM, S. R. **Wastewater treatment plants: planning, design and operation**. 2nd. ed. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1999.

RMIS. **RMIS - Raw Materials Information System**. 2023. Disponível em: <<https://rmis.jrc.ec.europa.eu/>>. Acesso em: 29 jul. 2024.

ROBINSON, B. H. **E-waste: An assessment of global production and environmental impacts**. Science of the Total Environment, 20 dez. 2009.

SANTILLÁN-SALDIVAR, J. et al. **An improved resource midpoint characterization method for supply risk of resources: integrated assessment of Li-ion batteries**. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 27, n. 3, p. 457–468, 2022.

SANTILLÁN-SALDIVAR, J. et al. **How recycling mitigates supply risks of critical raw materials: Extension of the geopolitical supply risk methodology applied to information and communication technologies in the European Union**. Resources, Conservation and Recycling, v. 164, 2021.

SIDDHANTAKAR, A.; SANTILLÁN-SALDIVAR, J.; KIPPES, T.; SONNEMANN, G.; RELLER, A.; YOUNG STEVEN, B.; **Helium resource global supply and demand: Geopolitical supply risk analysis**. Resources, Conservation and Recycling, v.193, 2023.

SLOWINSKI, G.; LATIMER, D.; MEHLMAN, S. **Dealing with shortages of critical materials**. Research Technology Management, v. 56, n. 5, p. 18–24, set. 2013.

SONG, J.; YAN, W.; CAO, H.; SONG, Q.; DING, H.; LV, Z.; ZHANG, Y.; SUN, Z. **Material flow analysis on critical raw materials of lithium-ion batteries in China**. Journal of Cleaner Production, v. 215, p. 570-581, abr. 2019.

SOUTH KOREA. **Framework Act on Resource Circulation**. Act No. 14839, 29 maio 2017. Disponível em: <https://elaw.klri.re.kr/eng_mobile/viewer.do?hseq=51210&type=part&key=39>. Acesso em: 3 jan. 2025

SRIVASTAV, A. L.; MARKANDEYA; PATEL, N.; PANDEY, M.; PANDEY, A. K.; DUBEY, A. K.; KUMAR, A.; BHARDWAJ, A. K.; CHAUDHARY, V. K. **Concepts of circular economy for sustainable management of electronic wastes: challenges and management options**. Environ Sci Pollut Res Int. 2023

STATE COUNCIL. **National Mineral Resources Plan (2016-2020)**. 2016. Disponível em: < <https://en.cgs.gov.cn/xwtt/201612/W020161222510373427768.pdf>> Acesso em: 29 mai. 2024.

TABELIN, C. B. et al. **Copper and critical metals production from porphyry ores and E-wastes: A review of resource availability, processing/recycling challenges, socio-environmental aspects, and sustainability issues**. Resources, Conservation and Recycling, v. 170, 1 jul. 2021.

TALENS PEIRÓ, L. et al. **Advances towards circular economy policies in the EU: The new Ecodesign regulation of enterprise servers**. 2019.

TOPAL, M.; ÖBEK, E.; ARSLAN, E. I. T. **Performance of Cladophora fracta for Bioaccumulation of Critical Raw Materials from Mine Gallery Waters**. Arabian Journal for Science and Engineering, v. 45, n. 6, p. 4531–4539, 1 jun. 2020.

USGS. **Annual Review 2022: Mining.** 2022b. Disponível em: <<https://apps.usgs.gov/minerals-information-archives/articles/USGS-Mineral-Review-2022.pdf>>. Acesso em: 6 nov. 2023.

USGS. **Mineral Commodity Summaries 2024.** Disponível em: <<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/commodity-statistics-and-information>>. Acesso em: 6 jun. 2024.

USGS. **RARE EARTHS.** 2022a. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-rare-earth.pdf>>. Acesso em: 6 fev. 2024.

VAN OORSCHOT, J. et al. **Towards a low-carbon and circular economy: Scenarios for metal stocks and flows in the Dutch electricity system.** Resources, Conservation and Recycling, v. 178, p. 106105, 1 mar. 2022.

VIASION. **Step-by-Step Guide: How PCBs Are Manufactured from Start to Finish.** Disponível em: <<https://www.viasion.com/blog/how-pcbs-are-manufactured/>>. Acesso em: 21 jul. 2024.

WAGNER, M.; BALDÉ, C. P.; LUDA, V.; NNOROM, I. C.; KUEHR, R.; IATONI, G. **Regional E-waste Monitor: for Latin-America, results for the 13 countries participating in project Unido-Gef 5554.** Sustainable Cycles Programme, 2022.

WASTE & RESOURCES ACTION PROGRAMME PROJECT, W. **Compositional analysis of kerbside collected small WEEE.** fev. 2009.

WESSELKÄMPER, J. et al. **A battery value chain independent of primary raw materials: Towards circularity in China, Europe and the US.** Resources, Conservation and Recycling, v. 201, 2024.

WIDMER, R.; OSWALD-KRAPF, H.; SINHA-KHETRIWAL, D.; SCHNELLMANN, M. & BÖNI, H. **Global perspectives on e-waste.** Environmental Impact Assessment Review, v. 25, n. 5 SPEC. ISS., p. 436–458, 2005.

XAVIER, L.H.; CONTADOR, L.; FREITAS, E.S.; MOFATI, L.M.; SILVA, R.S.; Fontes, A. **Diagnóstico da Mineração Urbana dos Resíduos Eletroeletrônicos no Brasil: projeto MINARE: relatório final.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2023.

XU, Y. & LIU, J. **Recent developments and perspective of the spent waste printed circuit boards.** Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, v. 33, n. 5, p. 392–400, 4 maio 2015.

YANG, Y. et al. **Selective recovery of lithium from spent lithium iron phosphate batteries: A sustainable process.** Green Chemistry, v. 20, n. 13, p. 3121–3133, 2018.

ZANOLETTI, A.; CORNELIO, A. & BONTEMPI, E. **A post-pandemic sustainable scenario: What actions can be pursued to increase the raw materials availability?** Public Health Emergency, v. 202, 2021.

ZHANG, S. E. et al. **Emerging criticality: Unraveling shifting dynamics of the EU's critical raw materials and their implications on Canada and South Africa.** RESOURCES POLICY, v. 86, 2023.

APÊNDICE A - CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS ARTIGOS SOBRE MPCs

(continua)

Referência	Citações normalizadas	Focos*	Objetivos	Principais resultados
(Wesselkämper et al., 2024)	3	1 e 3	O enfoque desse artigo é investigar a circularidade das seguintes MPCs: lítio (Li), cobalto (Co) e níquel (Ni); que estão presentes nas baterias de veículos elétricos. Ademais, a pesquisa identificou os pontos de equilíbrio (<i>break-even points</i>) previstos para alcançar a demanda por fornecimento desses minerais, identificando os anos em que os países (EUA, China e Europa) alcançam a circularidade.	Os resultados indicam que a China será a primeira a atingir a independência das matérias-primas (Li, Co, Ni) para baterias, atingindo-a para Li e Ni (mais de dez anos antes da Europa e dos EUA), já para o Co sete anos antes. Ademais, é apresentado resultados numéricos ideais para alcançar e acelerar a economia circular na China, Europa e EUA para Li, Co e Ni. Outro fator proposto na pesquisa é que a capacidade regional de reciclagem de baterias precisa ser expandida em linha com a produção de baterias e as vendas de veículos elétricos.
(Filho et al., 2023)	2,86	1 e 4	Trata-se de revisão sistemática da literatura para análise das complexidades da produção, consumo e recuperação de elementos de terras raras (ETR), enfatizando as tendências atuais e possíveis desafios associados a esses elementos.	O artigo apresenta a necessidade de ação adicionada e continuada para resolução dos desafios relacionados à reutilização e reciclagem de ETRs, para tornar o uso delas mais sustentável. Ademais, os autores sugerem algumas recomendações de governança com enquadramento conceitual dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU: • adotar iniciativas legislativas para reduzir a quantidade de ETRs contidas em produtos que são de uso único; • fornecimento de incentivos financeiros para melhorar os processos de recuperação e reutilização de produtos que contêm ETRs; • maior exploração dos programas de financiamento de pesquisa para encontrar alternativas adequadas e substitutos para os ETRs. Assim, possibilita-se uma oportunidade para explorar outras opções, especialmente as que podem ser mais sustentáveis.

(continuação)

Autores	Citações normalizadas	Focos*	Objetivos	Principais resultados
(Santillán-Saldivar et al., 2021)	1,9	2 e 3	É criado um método para ampliação do Risco Geopolítico de fornecimento (<i>GeoPolRisk</i> - <i>Geopolitical Supply Risk method</i>) para avaliar o risco de suprimento de MPCs, em complemento à ACV (Análise de Ciclo de Vida). Ademais, a pesquisa inclui a reciclagem doméstica como uma estratégia essencial da economia circular e captura dois mecanismos que a reciclagem doméstica pode afetar o risco de fornecimento: redução nas importações totais (<i>"reduction effect"</i>) e potencial redistribuição do mix de oferta de importações (<i>"redistribution effect"</i>). Considerou-se vários resultados, desde um cenário otimista (deslocar as importações dos parceiros comerciais de maior risco) até um cenário pessimista (deslocar as importações dos parceiros comerciais de menor risco). Para facilitação dos cálculos, o método foi testado para 13 matérias-primas: platina, paládio, magnésio, cobalto, tântalo, germânio, berílio, boro, silício metálico, grafite natural, elementos de terras raras, materiais do grupo do gálio, metais do grupo da platina. Dessa forma, testou se a reciclagem dessas matérias-primas mitiga o risco de fornecimento para a União Européia.	Após a aplicação do método, as seguintes orientações relacionadas as MPCs são sugeridas: • importar materiais reciclados de países estrangeiros pode oferecer benefícios ambientais quando comparados ao uso de materiais virgens. Por outro lado, isso não otimiza a mitigação dos riscos de fornecimento relacionados à geopolítica, pois esses riscos podem ser intensificados se os materiais reciclados forem importados de países ou regiões que são geopoliticamente instáveis; • o máximo potencial de mitigação de risco de fornecimento ocorre quando a reciclagem é realizada internamente e quando o material reciclado é reintegrado na economia nacional; • além disso, para mitigar o risco de fornecimento deve ser considerado o mix de oferta de importações, tendo em vista que o impacto da redistribuição algumas vezes supera o efeito de redução.

(continuação)

Autores	Citações normalizadas	Focos*	Objetivos	Principais resultados
(Blengini et al., 2017)	1,75	1 e 4	A pesquisa analisa dois eixos que são considerados na metodologia de criticidade da Comissão Europeia: risco de fornecimento e importância econômica. Os eixos foram adaptados pelo o centro de pesquisa científica da Comissão Europeia (<i>DG Joint Research Centre</i>), destacando a originalidade e/ou possíveis resultados. Além disso é discutido algumas metodologias de avaliação de criticidade usadas em outros países.	O artigo visa algumas atualizações específicas e incrementais na metodologia da Comissão Europeia para os dois eixos: • risco de fornecimento: (1) incorporação de barreiras e acordos comerciais; (2) adoção de uma abordagem mais sistemática para os estrangulamentos da cadeia de abastecimento; (3) inclusão da dependência das importações e uma visão mais precisa do fornecimento real à UE e (4) confirmação do papel proeminente da reciclagem, com uma melhoria substancial na qualidade e representatividade dos dados para a UE; • importância econômica: (1) uma atribuição mais detalhada e transparente das utilizações das matérias-primas aos seus setores correspondentes da Classificação Estatística das Atividades Econômicas na Comunidade Europeia, do inglês <i>Statistical Classification of Economic Activities in the European Community</i> e (2) a introdução de um índice de substituição específico.
(Christmann, 2021)	1,45	3 e 4	O estudo apresenta o aumento exponencial da demanda e produção global de minerais e metais e os impactos negativos que isso ocasiona ao meio ambiente, como emissões de CO ₂ e geração de resíduos sólidos. Além disso, apresenta a importância da gestão sustentável da produção de minerais e metais para atender à demanda futura e evitar conflitos sociais e ambientais.	Para UE alinhar o seu Plano de Ação com a economia circular, a pesquisa indica algumas recomendações: • reduzir a demanda por minerais e metais primários que são provenientes de minas, uma vez que os secundários podem ser obtidos através da reciclagem; • investir no desenvolvimento de uma infraestrutura pública de dados 3D para documentar o subsolo da EU e seus recursos minerais, águas subterrâneas e fontes de energia geotérmica, ampliado e dotado de mais recursos para criar um modelo 3D do subsolo até 1.000 m de profundidade, em áreas de alto potencial; • reduzir a dependência de importações e garantir que matérias-primas e produtos importados cumpram os padrões ambientais e sociais da UE; • harmonizar a tributação interna conforme os objetivos do Quadro Inclusivo da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico/G20 sobre Erosão da Base Fiscal e Transferência de Lucros • aumentar o investimento em pesquisa e inovação relacionadas a minerais, metais e materiais inovadores;

(continuação)

Autores	Citações normalizadas	Focos*	Objetivos	Principais resultados
(Van Oorschot et al., 2022)	1,42	1 e 3	É explorado o potencial de circularidade do sistema elétrico em uma transição para um sistema elétrico de baixo carbono até 2050, examinando os estoques e fluxos de metais, incluindo tecnologias de produção, armazenamento e transmissão de eletricidade. Os modelos são aplicados aos Países Baixos (localizados na Europa Ocidental) e cenários energéticos detalhados.	• Demonstrou-se que a transição energética aumenta a recuperação de metais na mineração urbana, mas o fluxo ainda é baixo em comparação com o necessário para um sistema elétrico de baixo carbono nas próximas décadas; • a demanda por metais é maior em cenários com alta autossuficiência em eletricidade renovável. • existem oportunidades para reduzir a demanda por recursos virgens e aumentar a recuperação de mineração urbana de metais; • o desenvolvimento de estoques e fluxos de metais presentes em tecnologias de armazenamento de eletricidade (solar e eólica) são sensíveis a alterações no mix tecnológico e pela eficiência no uso dos materiais; • melhorar a eficiência dos materiais e das tecnologias com pouca intensidade de MPCs pode reduzir a demanda por metais primários e aprimorar os ciclos de metais; • a circularidade pode ser ampliada com maiores taxas de coleta e recuperação, uma vez que diversos estoques em fim de vida não são coletados, tornando-os inativos.
(Song et al., 2019)	1,4	1 e 4	A pesquisa apresenta um método restrito a indústria chinesa, que fornece diretrizes eficazes para melhoramento das estratégias de gestão relevantes para os materiais críticos na indústria das baterias de lítio-íon, do inglês <i>Lithium-Ion Batteries (LIBs)</i> , no qual, nove elementos usados na produção das <i>LIBs</i> foram avaliados	• Dos nove elementos foram identificados quatro materiais como mais críticos para a produção de <i>LIBs</i>: Li e Co com alta criticidade; e Ni e grafite com criticidade médio-alta; • por meio da análise do processo de consumo, é estimado que altas quantidades de recursos secundários são armazenadas, enquanto a produção depende principalmente de recursos primários; • as melhorias na eficiência de coleta e recuperação ainda são insuficientes para lidar com um aumento repentino de resíduos na China, é necessário realizar esforços para redução do fluxo de materiais valiosos no meio ambiente; • é esperado que o estabelecimento de um sistema de gestão de resíduos de <i>LIB</i> em seu fim de vida, reduza os riscos na cadeia de abastecimento e promova a sustentabilidade dos MPCs.

(continuação)

Autores	Citações normalizadas	Focos*	Objetivos	Principais resultados
(Mancini, et al., 2015b)	1,17	1, 2 e 4	É realizado a exploração do potencial da ACV para ajudar as empresas e os governos a avaliarem de forma mais sistemática à gestão de MPC.	• A ACV está bem posicionada para fornecer informações sobre questões relacionadas aos recursos, e são de interesse tanto para empresas quanto para governos, como a criticidade das MPC; • é indicado que tanto em microescala quanto em macroescala, a ACV possui um grande potencial para identificar pontos críticos e oportunidades de melhoria no uso de matérias-primas, não se limitando apenas à questão da escassez; • alguns indicadores poderiam ser integrados à ACV para ampliar a relevância das informações sobre recursos em políticas e negócios, e assim aumentar o potencial de maneira mais eficaz;
(Zanoletti; Cornelio & Bontempi, 2021)	1,08	1	É analisado o impacto in the COVID-19 pandemic nas cadeias de abastecimento globais de matérias-primas, especialmente as críticas, e avalia ações para garantir a disponibilidade desses materiais em um cenário pós-pandemia.	• A pandemia de COVID-19 contribuiu para redução da disponibilidade de várias matérias-primas, indicando a necessidade de esforços estruturados e globais para enfrentamento da crise. • a produção e o consumo de matérias-primas devem ser garantidos de maneira sustentável, o que exigirá uma revisão das estratégias de gestão dos grandes depósitos de mineração; • o aumento da reciclagem de matérias-primas auxiliará no atingimento de alguns dos objetivos da UE, reduzindo a dependência de recursos finitos e na mitigação de resíduos.
(Siddhantakar et al., 2023)	1,07	1 e 2	Avalia o fornecimento global e da demanda de hélio, com especial atenção para os riscos geopolíticos associados a esse fornecimento. O método utilizado foi o <i>GeoPoIRisk</i> , no qual avaliou o risco de abastecimento de hélio para dez economias importadoras no período de 2015 a 2019.	• As importações de hélio têm um índice <i>GeoPoIRisk</i> relativamente alto, reforçando sua classificação como crítica; • três regiões globais distintas (Leste Asiático, Europa e Américas) apresentam padrões de oferta específicos e variações no <i>GeoPoIRisk</i>, dependendo do comércio específico; • o aumento da utilização de hélio, especialmente no Leste asiático, aponta desafios de abastecimento; • para o gerenciamento do fornecimento de hélio, é necessário considerar as abordagens: (1) os esforços devem ser direcionados para redução das perdas ao longo da cadeia de abastecimento; (2) explorar formas de reutilização do hélio nas suas aplicações mais críticas e (3) garantir uma combinação de abastecimento estável e de baixo risco que possa assegurar a continuidade das atividades essenciais que dependem deste recurso.

(continuação)

Autores	Citações normalizadas	Focos*	Objetivos	Principais resultados
(Hao et al., 2018)	1,03	2 e 4	A partir da base de dados (<i>Comtrade</i> da ONU) do comércio internacional de minério de ferro, é examinado as características gerais do padrão de competição na importação de minério de ferro, no período de 2000 a 2015. No qual, é calculado a intensidade da concorrência entre países importadores de minério de ferro que importam dos mesmos exportadores e os principais países que importam.	• Revelam que a concorrência global na importação de minério de ferro é intensa, desigual e em expansão; • apesar da Austrália e do Brasil serem os principais competidores, a demanda por minério australiano é mais intensa; • as relações competitivas na importação de minério de ferro, ocorrem principalmente entre a Europa e Ásia; • as intensidades totais da concorrência nas importações entre a China e Japão, assim como entre China Coreia do Sul, são consideravelmente maiores em relação a outras relações competitivas; • recomendações de governança sugeridas para os importadores: diversificar as fontes de importação; fortalecer a cooperação entre importadores e investir em minas estrangeiras para melhorar a competitividade.
(Talens Peiró et al., 2019)	1	3	Através de um estudo de caso (entre 2015 e 2018) na Europa, é apresentado uma análise crítica da implantação de estratégias e requisitos de eficiência de materiais para uma economia mais circular. Os materiais são aplicados a “servidores empresariais”, com vistas ao Ecodesign (diretrizes para o design de produtos, que apresenta fácil desmontagem, disponibilidade de <i>firmware</i> , exclusão de dados e uso de MPC), para apresentar estratégias que possam ser implementadas através das políticas de produtos europeus.	Inovações política propostas para avanço da economia circular: (1) promover uma interação antecipada entre formuladores de políticas, especialistas em eficiência de materiais e partes interessadas (<i>stakeholders</i>), visando a inclusão dos aspectos e metas da economia circular no produto, nas fases iniciais do processo político; (2) adotar a utilização de métricas inovadoras para monitorar a eficiência de materiais ao longo de todo o processo; (3) processo de coleta contínua de evidências técnicas detalhadas para fundamentar a avaliação da eficiência de materiais e promover discussões constantes com as partes interessadas; (4) ampliar a participação de especialistas em eficiência de materiais, como recicladores e operadores de reutilização, desde as fases iniciais até as etapas finais, incluindo-os em reuniões de Ecodesign, nos quais normalmente são excluídos; (5) incentivar à criação de normas relevantes para eficiência dos materiais.

(continuação)

Autores	Citações normalizadas	Focos*	Objetivos	Principais resultados
(Mancini; Benini; Sala, 2018)	0,97	1 e 2	Objetivo de integrar as considerações de MPC na ACV, para incluir aspectos socioeconômicos e estratégicos relacionados ao uso dos recursos. Dessa forma, a criticidade foi abordada levando em conta uma perspectiva mais abrangente e um conceito multidimensional, considerando aspectos ambientais e de exaustão. Além da interpretação dominante, baseada em fatores econômicos e geopolíticos.	• A ACV se apresenta bem posicionada para inclusão das considerações socioeconômicas e geopolíticas relacionadas ao uso de recursos materiais, essencialmente como um indicador socioeconômico; • é apresentado, através das perspectivas socioeconômicas e geopolíticas, como diferentes opções para a caracterização da segurança dos recursos podem ser aplicadas; • é sugerido diferenciar ACV tradicional da ACV social, não pela natureza dos impactos (sociais, ambientais, econômicos), mas pelo tipo de intervenções que geram esses impactos; • A ACV tradicional é considerada a metodologia mais apropriada, para intervenções ambientais e trocas de substâncias biofísicas (como emissões e extrações de recursos).
(Lee & Cha, 2021)	0,9	1, 3 e 4	Explora a relevância das MPCs na Coreia do Sul, pois busca energias renováveis e descarbonização, digitalização e automação. Ademais, é analisado a transição para uma economia circular sustentável e segurança de recursos, frente a escassez de recursos e dependência de minerais importados e ETR.	• A gestão das MPC é importante para o crescimento econômico contínuo da República da Coreia do Sul; • É essencial garantir fornecimento estável e sustentável de MPCs; • A recuperação de MPCs de resíduos, como eletrônicos e baterias, fortalece a segurança de recursos em países dependentes da importação de minerais e ETR • Variar fornecedores e cadeias de abastecimento de MPCs, fora da China e do Japão para reduzir os riscos de fornecimento; • Medidas políticas devem incluir reservas de curto prazo e desenvolver recursos nacionais e estrangeiros a longo prazo.
(Santillán-Saldivar et al., 2022)	0,87	1 e 2	O método <i>GeoPolEndpoint</i> , projetado como uma extensão aprimorada do <i>Geopolrisk</i> , projetado para quantificação dos impactos dos usos de matérias-primas, como melhorias para o atual conjunto de métodos de impacto disponíveis na ACV. No qual foram avaliados os impactos de quatro metais relevantes (Al, Co, Cu e Ni) no ciclo de vida das <i>LIB</i> (2015 a 2017) na perspectiva da União Europeia.	• Dentre os metais avaliados, o Cu e Ni contribuem significativamente para os impactos ambientais; • Cobalto apresenta um indicador de alto risco de fornecimento geopolítico e uma maior contribuição no <i>GeoPolEndpoint</i>, apesar de sua contribuição relativamente baixa para a pegada ambiental das <i>LIBs</i>. • os métodos <i>GeoPolRisk</i> e <i>GeoPolEndpoint</i> permitem a integração de uma perspectiva de risco de fornecimento em estudos de ACV.

(continuação)

Autores	Citações normalizadas	Focos*	Objetivos	Principais resultados
(Mancini, Benini, et al., 2015a)	0,83	1 e 4	Analisa as metodologias de avaliação de recursos naturais no contexto europeu, com objetivo de identificar seus pontos fortes e fracos no apoio às políticas de gestão sustentável. Além disso, são examinadas as tendências na extração de matérias-primas na Europa e nas importações durante o período de 2000 à 2010.	• Destaca-se a necessidade de sistemas contábeis e metodologias adequadas para mensurar as extrações, fundamentais no monitoramento das políticas de eficiência de recursos; • a avaliação de recursos apoia políticas como competitividade e segurança de recursos, visando não apenas a desmaterialização, mas também a otimização de materiais estratégicos; • a extração doméstica de recursos na Europa foi estável entre 2000 e 2010, com exceção dos transportadores de energia, nos quais a extração diminuiu enquanto as importações aumentaram; • melhorias são necessárias na coleta de dados e métodos de avaliação de impacto para abordar tanto os aspectos ambientais quanto socioeconômicos das extrações de matérias-primas.
(Liu et al., 2021)	0,72	1 e 4	Concentra-se na dependência global das MPCs (Ni, Co e Li), elas são as matérias-primas mais críticas presentes nas <i>LIBs</i>	• O comércio de MPCs é altamente concentrado, a dependência dos países (ou regiões) é heterogênea; • os países desenvolvidos e economias emergentes tendem a importar em grandes quantidades; • é proposto uma nova metodologia contábil para identificar agentes comerciais que apresentam alto risco.
(Gibaga et al., 2022)	0,71	1	Avaliação do potencial de ETR em diferentes depósitos minerais nas Filipinas, considerando risco de fornecimento e importância econômica.	• Depósitos minerais de praia em <i>Erawan</i> e <i>Ombo</i>, além das bauxitas da Ilha de <i>Samar</i>, e do depósito de argila de adsorção iônica em <i>El Nildo</i>, apresentam elevadas concentrações de ETRs; • As bauxitas da ilha de <i>Samar</i> são semelhantes às bauxitas cársicas em outros países, em termos de ETRs, escândio e ítrio, sugerindo ser uma fonte promissora de ETRs nas Filipinas; • o depósito de argila de adsorção iônica em <i>El Nildo</i> pode ser alternativa viável de ETRs, similar aos ETRs do sul da China; • apesar dos depósitos minerais na praia em <i>Erawan</i> e <i>Ombo</i> apresentarem potencial para ETR, as tecnologias disponíveis ainda são economicamente inviáveis para sua extração; • técnicas como lixiviação usando líquidos iônicos e solventes eutéticos profundos, do inglês <i>deep eutectic solvents (DES)</i>, podem ser utilizadas para extrair ETRs de bauxitas; • Desenvolvimentos futuros na metalurgia extrativa de ETR pode transformá-los, atualmente antieconômicos nas Filipinas.

(continuação)

Autores	Citações normalizadas	Focos*	Objetivos	Principais resultados
(Müller, 2023)	0,62	1 e 2	Examina as dinâmicas geopolíticas atuais associadas à reestruturação das cadeias de abastecimento, além das oportunidades que surgem para as economias africanas.	• As convulsões geopolíticas recentes, a pandemia de COVID-19 e a invasão da Ucrânia pela Rússia, podem afetar profundamente as cadeias de fornecimento de minerais a médio e longo prazo. Elas levaram os atores políticos das grandes economias a enxergar de forma diferente a estrutura dessas cadeias, principalmente a necessidade de diversificação do fornecimento; • as incertezas geopolíticas são uma oportunidade para os atores africanos, desestabilizando as cadeias de fornecimento de minerais e permitindo a maior integração das economias africanas ricas em recursos; • para aumentar a criação de valor local, é necessário formular políticas industriais ambiciosas e realistas. Essas políticas têm ressurgido em certos países, muitos estados africanos já possuem políticas de conteúdo local que adotam um papel mais proativo.
(Cimprich et al., 2019)	0,6	1	Analisa a integração da avaliação da criticidade de matérias-primas como complemento à ACV usando três métodos específicos: <i>GeoPolRisk</i> , <i>Economic Scarcity Potential (ESP)</i> e <i>Integrated Method to Assess Resource Efficiency (ESSENZ)</i> . Os métodos foram testados em um veículo elétrico fabricado na Europa.	• Apesar das limitações, os métodos <i>GeoPolRisk</i>, <i>ESP</i> e <i>ESSENZ</i> podem ser úteis para avaliações preliminares de risco de abastecimento de “fora pra dentro” ao nível de produto, complementando a ACV ambiental de “dentro para fora”; • O método <i>ESSENZ</i> é mais abrangente e atual que o precedente <i>ESP</i>, ambos podem ser aplicados por empresas multinacionais; • O <i>GeoPolRisk</i> é adequado para a avaliação de risco de abastecimento em nível nacional, concentrando-se nos riscos consequentes da instabilidade política dos parceiros comerciais, nos quais os fluxos de inventário são importados.
(Giosuè et al., 2021)	0,54	3 e 4	• Explorar os aspectos legislativos vigentes da UE relacionados às <i>LIBs</i>; • apresentar a perspectiva da visão do produtor e a possibilidade de garantir uma reciclagem adequada das <i>LIBs</i>.	• Indica a necessidade de regulamentação específica e identificação das <i>LIBs</i>, além da importância e viabilidade da reutilização e reciclagem delas no contexto de uma economia circular; • apresenta os benefícios de uma economia circular do berço ao berço, em exemplos industriais, porém esses benefícios estão distantes da realidade atual na Europa.

(continuação)

Autores	Citações normalizadas	Focos*	Objetivos	Principais resultados
(Ferro; Bonollo & Cruz, 2021)	0,41	3	Dois estudos de caso simplificados são ilustrados (carro e bicicleta) para mostrar a potencialidade da abordagem proposta no ecodesign de produtos. As estratégias de ecodesign se beneficiam da ACV do produto.	• É apresentado o resultado esquemático da aplicação do carro e bicicleta, obtido através da ACV. • a partir do produto analisado, uma das quatro fases (Produção, Fabricação, Uso, Descarte) de seu ciclo de vida domina o cenário; • o carro requer mais energia na etapa de uso (combustíveis fósseis), entretanto, a bicicleta depende de esforço humano. Já a produção da bicicleta é a que consome mais energia, assim, se grandes mudanças precisam ser alcançadas, é a fase com maior fração de energia consumida que deve ser o foco; • ligas metálicas que reduzem o impacto ambiental, podem enfrentar risco de fornecimento devido à presença de MPCs; • ademais é apresentada uma proposta para uma abordagem de design multiobjetivo que considere tanto a redução do impacto ambiental quanto a criticidade das matérias-primas.
(Zhang et al., 2023)	0,36	2	Sugerir melhorias na metodologia de avaliação de MPCs e discutir suas implicações para a Europa e a indústria de minerais, estendendo as implicações para Canadá e África do Sul. Além disso, abordar as implicações geopolíticas e a necessidade de metodologias aprimoradas para incentivar investimentos na indústria mineral.	• Para compromisso entre estabilidade e agilidade: há equilíbrio entre agilidade da metodologia e estabilidade dos resultados; • Metodologia muito ágil pode diminuir o valor estratégico, porém, a estabilidade excessiva favorece o planejamento a longo prazo, mas dificulta a adaptação a avanços tecnológicos disruptivos; • Canadá apresentou menos urgência em estabelecer quadros de MPC comparado com a União Europeia; • A África do Sul pode enfrentar uma realidade bifurcada entre necessidades internas e externas, aumentando a complexidade na busca pela suficiência de recursos; • aumento da atividade geopolítica: a busca pela autossuficiência de recursos pode intensificar a formação de blocos, clubes entre fornecedores e consumidores; • para a indústria mineral, o envolvimento em MPCs seria mais produtivo se a metodologia de MPC se tornasse mais transparente e os resultados mais previsíveis; • melhor transparência na cadeia de procura pode reduzir tensões geopolíticas, permitindo a distinção clara entre MPC para uso civil e uso militar.

(conclusão)

Autores	Citações normalizadas	Focos*	Objetivos	Principais resultados
(Masoudi et al., 2017)	0,25	1, 2 e 4	Conduzir uma análise do mineral fluorspar (fluorita), empregando nove métodos de avaliação de minerais críticos (que são utilizados em países desenvolvidos). Dessa forma, verificou-se a eficácia no desenvolvimento econômico e a importância geoeconômica do fluorspar para o Irã.	• Os métodos de avaliação <i>USGS</i> (agência científica dos Estados Unidos) <i>do inglês US Department of Defense</i>, União Europeia e Indústrias alemãs, retrataram o fluorspar como um mineral crítico e estratégico mundialmente; • o valor econômico significativo do fluorspar é ocasionado pela aplicação na produção de aço, alumínio, hidrofluorcarbonetos, teflon, produção de energia renovável e limpa • é indicado que o Irã é o sétimo maior produtor mundial do fluorspar, mas é um dos principais importadores de produtos intermediários desse mineral entre os países vizinhos.
(Jędrusiak; Bielowicz; Drobniak, 2023)	0,09	3	Discutir a relevância de matéria-prima que em grande parte permanece não utilizada em resíduos de incineração de lixo municipal, em economias altamente desenvolvidas como EUA e Europa.	• A análise do fluxo de massa estimou-se o conteúdo de elementos nos resíduos sólidos urbanos dos EUA e da Europa: a quantidade estimada de elementos nos resíduos da incineração nos EUA varia de 1,4 tonelada (Tálio) para 44.000 tonelada (Zinco), enquanto na Europa varia de 2,4 Mg (Tálio) para 78,000 toneladas (Zinco); • o conteúdo de ETR nos resíduos de incineração de lixo municipal na Europa foi estimado em 1.500 Mg/a, e supera a extração de minérios na Europa; • o conteúdo de cobalto nos resíduos dos EUA corresponde a 63% da quantidade extraída no país; • participação de outras matérias-primas nos resíduos varia de 2% a mais de 2.000% em relação à mineração nos EUA e na Europa; • devido à forma como as matérias-primas ocorrem nos resíduos sólidos urbanos, seu potencial de recuperação pode ser limitado; • apesar da implementação dos princípios da economia circular na gestão de resíduos, ainda há limitações técnicas na reciclagem; • Assim, a incineração de resíduos deve continuar a ser o principal método de processamento de resíduos residuais no futuro próximo (nos EUA e na Europa), por isso é crucial a possibilidade de recuperação de MPCs para o crescimento econômico.

Fonte: A autora (2025).

Nota: *1, Disponibilidade/fornecimento de MPC; 2, Avaliações Geopolíticas; 3, Economia Circular; 4, Ações de governança