

## ELECTRONIC WASTE: EFFECTS ON HUMAN HEALTH, ENVIRONMENTAL IMPACT AND ECONOMIC POTENTIAL.

M. F. RICHTER<sup>1</sup>, C. C. DE OLIVEIRA, J. MORBACH, D. L. TAVARES

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0868-9127><sup>1</sup>

[marc-richter@uergs.edu.br](mailto:marc-richter@uergs.edu.br)<sup>1</sup>

Submitted August 16, 2022 - Accepted November 25, 2022

DOI: 10.15628/holos.2022.13979

### ABSTRACT

With technological advances, electronic devices require specialised recycling methods due to the presence of toxic by-products. Millions of tons of waste electro-electronic equipment are disposed of annually, much of it illegally. This study focused on the proper disposal and recycling of WEEEs, and the effects of metals on the environment and human health. Qualitative research methods of exploratory nature were used, by means of a literature review. The incorrect disposal of these equipments generates impacts to the environment and

human health. Precious metals are increasingly scarce due to intense extraction, showing the importance of its recycling. The recycling of WEEEs is gaining significant attention due to the presence of precious, critical or strategic metals in these wastes. More efficient, safe and sustainable processes need to be developed for the recovery of these metals, in addition to the development of greater awareness of the importance of proper disposal of WEEE.

**KEYWORDS:** Waste electrical and electronic equipment, Recycling, Metals, Circular economy.

## RESÍDUOS ELETRÔNICOS: EFEITOS NA SAÚDE HUMANA, IMPACTO AMBIENTAL E POTENCIAL ECONÔMICO.

### RESUMO

Com o avanço tecnológico os dispositivos eletrônicos requerem métodos especializados de reciclagem pela presença de subprodutos tóxicos. Milhões de toneladas de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos são descartadas anualmente, boa parte de forma ilegal. Este estudo focou no descarte adequado e reciclagem de REEEs, e efeitos dos metais no meio ambiente e saúde humana. Foram utilizados métodos qualitativos de investigação de caráter exploratório, por meio de revisão bibliográfica da literatura. O descarte incorreto destes equipamentos gera impactos ao meio ambiente e à

saúde humana. Metais preciosos estão cada vez mais escassos devido a intensa extração, mostrando a importância da sua reciclagem. A reciclagem de REEEs está ganhando atenção significativa devido à presença de metais preciosos, críticos ou estratégicos nestes resíduos. Processos mais eficientes, seguros e sustentáveis precisam ser desenvolvidos para recuperação destes metais, além do desenvolvimento de uma maior consciência sobre a importância do descarte correto de REEEs

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, Reciclagem, Metais, Economia circular.



## 1 INTRODUÇÃO

O século XXI tem sido caracterizado como período de mudanças rápidas apoiadas na informação, comunicação e computação. A indústria 4.0, os processos aditivos de produção e a ‘big data’ estão todos apoiados em sistemas computacionais cada vez mais robustos. Ora, a vida útil destes equipamentos que já era relativamente curta, passou a ser menor ainda em função das novas necessidades. Com isso, uma grande quantidade de equipamentos computacionais é abandonada ou descartada, gerando o que se convencionou chamar de “lixo de informática”.

A sustentabilidade ambiental, hoje, passou a fazer parte de todas as etapas de produção das organizações. Desde o desenvolvimento, os produtos organizacionais, passando pelo seu processamento, seja ele tangível ou não, até sua comercialização e descarte precisam ser ambientalmente sustentáveis. Exemplo disto é o que ocorre hoje na Comunidade Europeia, no setor de veículos desenhados e fabricados já pensando na forma de separação das suas peças na fase de pós-uso, bem como a reciclagem e a reutilização das mesmas. Os fabricantes dos produtos de informática, em regra, ainda não se preocupam com o descarte e o desmanche que como consequência, se tem uma grande dificuldade de recolher, separar peças e reprocessar os resíduos dos equipamentos, problema este que precisa ser atacado desde o projeto até o descarte, e contar com todos os participantes da sociedade. Apenas com esta participação efetiva pode-se pensar em formatar um marco legal e uma gestão ambientalmente sustentáveis que sejam adequados para todos os envolvidos e numa sociedade que funcione eficientemente dentro de marcos de governabilidade, onde o Estado atue como indutor e regulador destes diferentes comportamentos (GIESE et al., 2021).

Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) são considerados o fluxo de resíduos de crescimento mais rápido no mundo desenvolvido, resultantes do avanço tecnológico que deixa para trás computadores velhos, laptops, televisores, gravador de vídeo (VCR), aparelhos de DVD, rádios, computadores, computadores portáteis, monitores de CRT, monitores de plasma, monitores de cristais líquidos, telefones celulares, teclados, mouse de computador, impressoras, e outros dispositivos eletrônicos que requerem métodos especializados de reciclagem por causa da presença de subprodutos tóxicos. Aproximadamente 50 milhões de toneladas de REEE são descartadas anualmente e entre 60 e 90% destes resíduos são jogados no lixo ou comercializados ilegalmente, somando aproximadamente 5% de todo o lixo produzido pela humanidade. O enorme volume de lixo eletrônico é problemático, mas mais preocupante é o rápido aumento deste complexo e global fluxo de resíduos. O lixo eletrônico é uma das fontes de resíduos de crescimento mais rápido, senão mesmo a mais rápida (ABDELBASIR, 2018). O relatório da ONU de 2012 projetava que até 2025, o lixo eletrônico global aumentará mais 33%, passando de 49,7 milhões para 65,4 milhões de toneladas por ano (AWASTHI, 2019).

O alto custo da reciclagem de forma responsável tornou o lixo eletrônico um empreendimento caro para os países industrializados, como resultado, o ônus da reciclagem foi transferido para o mundo em desenvolvimento, onde a proteção ambiental é menos rígida, e as tecnologias necessárias para extrair o material com segurança, não existem. Estima-se que mais de

50% dos REEE dos países industrializados são exportados para países em desenvolvimento. Ali, as substâncias são retiradas dos REEE com os meios mais simples (fogo, martelo e pinça, banho ácido, etc.) e com grande prejuízo para a saúde das pessoas envolvidas e também para o meio ambiente destes países. Sem controle por parte das autoridades destes países, além dos adultos, muitas vezes crianças também realizam este tipo de “reciclagem”. Nos países receptores, pilhas de lixo de alta tecnologia estão abertas ao público para serem recolhidas por famílias de baixa renda e seus filhos. O resultado é a contaminação ambiental e os efeitos negativos à saúde (BIMIR, 2020). A cidade de Guiyu na China, a capital mundial do lixo eletrônico, recebe a maioria do lixo tecnológico, mas há muitas outras cidades que se tornaram paraísos REEE, incluindo Wenqiao na China; Accra em Gana; Bangalore, Chennai, Delhi e Nova Delhi na Índia; Lagos na Nigéria; e Karachi no Paquistão (MOLETSANE e VENTER, 2018).

Em 2014, a Europa exportou quase 2 milhões de toneladas de sucata metálica, incluindo alumínio e cobre, assim como 1,3 milhões de toneladas de REEE. O problema é na realidade cada vez pior - os níveis de exportação têm aumentado de forma constante a cada ano. A Comissão Europeia registou um aumento na recuperação de estes materiais usados, a chamada "mineração urbana", como parte da sua estratégia de Economia Circular (EURACTIV, 2018). Os rápidos avanços nas tecnologias de informação e comunicação diminuem a vida útil dos equipamentos eletrônicos à medida que os indivíduos atualizam continuamente seus computadores e telefones celulares. Estima-se que aproximadamente 50 milhões de toneladas de lixo eletrônico são geradas anualmente no mundo todo, sendo os maiores volumes de REEE produzidos pelos EUA, Europa, China, Japão e Austrália (KUEHR et al., 2019). Estima-se também que este desperdício de resíduos tem um valor total equivalente a aproximadamente US\$ 55 bilhões. Com base em dados de 2017, o Brasil é o segundo país que mais gera lixo eletrônico nas Américas, com 1,5 milhão de toneladas por ano, só atrás dos EUA, com 6,3 milhões de toneladas/ano (Programa Sustentare, 2017).

Segundo o relatório “Global E-waste Monitor” de 2017, elaborado pela Universidade das Nações Unidas (UNU) e a Associação Internacional de Resíduos Sólidos, a produção de lixo eletrônico, no continente americano como um todo, é de 11,6 kg por habitante por ano. Mas somente 17% são coletados de forma correta (BALDÉ et al., 2017). O Brasil produz aproximadamente 10 milhões de computadores por ano, além de mais de 150 milhões de celulares e baterias, mas somente 2 a 3% são descartados corretamente (ALBUQUERQUE et al., 2020). Isso gera problemas para saúde e o meio ambiente, e prejudica, especialmente a saúde dos trabalhadores e catadores de resíduos sólidos que lidam com este tipo de resíduo (PJ-SC, 2020). Atualmente, quantidades crescentes de REEE estão sendo geradas devido à sua vida útil reduzida e à indisponibilidade de tecnologias de reciclagem adequadas. Por um lado, o resíduo eletrônico é composto por materiais valiosos que podem ser recuperados como matéria-prima secundária, por outro lado, este tipo de resíduo contém uma variedade de metais pesados como chumbo, arsênico, cádmio e mercúrio, além de compostos halogenados como bifenilos polibromados, PVC, dioxinas cloradas, bromadas e misturas halogenadas e outras substâncias altamente tóxicas e ambientalmente perigosas. As dioxinas são cancerígenas, prejudiciais à fruta, muito persistentes e



se acumulam em alimentos gordurosos como carne, leite, entre outros. Como exemplo, os resíduos de placas de circuito impresso (PCBs) tornaram-se uma preocupação global com relação às questões ambientais devido ao seu alto conteúdo de metais e materiais tóxicos, que são poluentes (ILANKOON et al., 2018).

O descarte adequado tornaria possível a reutilização de matérias-primas de alta qualidade, cuja extração é intensiva em energia e recursos. Especialmente os elementos "críticos", não abundantes na natureza, devem ser preservados e reutilizados na medida do possível. A forma mais ecológica de reciclagem de REEE é a reutilização de equipamentos, ou após o reparo, ou aproveitar componentes individuais para criar novos equipamentos. Se isto não for possível, a reciclagem dos metais ou plásticos contidos no material é uma boa opção. Dependendo da complexidade e conteúdo poluente (componentes eletrônicos), o dispositivo ou conjunto deve ser desmontado manualmente antes do processamento mecânico poder ser realizado. Os aspectos econômicos também são importantes além das considerações ambientais: o aumento dos preços dos metais torna a reciclagem de REEE comercialmente atraente, sendo que apenas cerca da metade dos REEE na União Europeia (UE) é destinada à reciclagem (IBANESCU et al., 2021).

A implementação da responsabilidade ampliada dos produtores de equipamentos eletrônicos, nos países em desenvolvimento, torna-se cada vez mais necessária, à luz do atual alto nível de movimento transfronteiriço de resíduos eletrônico para os países em desenvolvimento e da falta de instalações básicas ou de última geração de reciclagem e eliminação de resíduos. Mudança de atitude por parte dos governos, uma legislação apropriada que trate especificamente do resíduo eletrônico (PATIL e RAMAKRISHNA, 2020), controle do despejo de lixo eletrônico, implementação da responsabilidade ampliada do produtor e transferência de tecnologia sobre a reciclagem sólida do lixo eletrônico são as questões-chave para o gerenciamento eficaz do lixo eletrônico nos países em desenvolvimento (SRIVASTAVA e PATHAK, 2020).

Com base no cenário apresentado tem-se como objetivo deste artigo: Analisar publicações correntes na área de REEE, com foco nas alternativas apresentadas para o descarte adequado e para a reciclagem deste tipo de resíduo, além de relatar os efeitos dos metais no meio ambiente e na saúde humana.

## 2 METODOLOGIA

O presente estudo valeu-se de métodos qualitativos de investigação de caráter exploratório, desenvolvido por meio de revisão bibliográfica da literatura atualizada sobre os metais presentes em resíduos eletrônicos de maior incidência de descarte e potencial econômico, seus efeitos na saúde humana e impacto ambiental, que possibilitará uma maior compreensão sobre o assunto. Foi desenvolvida uma pesquisa prévia em estudos referentes a resíduos eletrônicos onde foi avaliado quais os equipamentos de maior volume de descarte e os metais presentes nestes equipamentos que continham algum potencial de reciclagem. Após este



levantamento inicial, foi realizado um cruzamento entre: “incidência de descarte” X “impactos ambientais” e “saúde” X “potencial econômico” sendo definido 13 metais para este estudo. A partir disso iniciou-se o aprofundamento do estudo bibliográfico, mediante uma análise de documentos e referenciais teóricos que, como um método investigativo, buscam evidenciar elementos de uma problemática com base em uma documentação, observando o contexto em que os documentos foram produzidos e as conexões estabelecidas entre autores.

Foram utilizados artigos científicos nas seguintes bases de dados: SciELO, Google acadêmico (Google Scholar), Scopus, além do Portal de Periódicos CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). Como critério de busca dos artigos, as seguintes palavras chaves foram empregadas: “Resíduos Sólidos”, “Resíduos eletroeletrônicos”, “Economia Circular”, “Descartes de Resíduos”, “Reciclagem de Resíduos Eletroeletrônicos”, “Efeitos na Saúde Humana”, “Saúde Humana” e “Impactos ambientais” na língua portuguesa e inglesa. Foram empregados os seguintes critérios de inclusão: Período de publicação de no máximo 5 anos, entre 2017 e 2021; artigos em língua inglesa e portuguesa; disponibilidade de leitura integral; e adequação ao tema de estudo. Para a construção das Tabelas 1 e 2 do presente estudo foram utilizados 33 artigos que se apresentaram dentro dos critérios de inclusão, artigos todos em textos completos e que se encontravam dentro da temática central deste estudo.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Revolução Industrial foi fundamental no processo de urbanização, impactando também na área rural, ao substituir o trabalho humano pelo maquinário. Criaram-se as condições para que a crescente e intensa ação humana afetasse profundamente o Planeta. Neste processo de conversão de energia e produção de bens, os humanos derrubaram florestas, drenaram pântanos e edificaram metrópoles repletas de arranha-céus. Ao moldar cada vez mais o mundo para atender o Homo sapiens, habitats foram destruídos e espécies foram extintas. No início da primeira Revolução Industrial a população mundial abrigava cerca de 700 milhões de humanos; até 2050 terá aproximadamente 10 bilhões de pessoas (HARARI, 2018).

Os metais pesados sempre foram de extrema importância para o ser humano, ao mesmo tempo que mostram seus efeitos deletérios para a saúde humana e o meio ambiente. Um aumento constante desde a antiguidade tem sido bem documentado nos sedimentos dos mares e lagos. O maior aumento quantitativo ocorreu desde o início da revolução industrial (NRIAGU, 1996; HARIRI E ABU-ZIED, 2018). Os avanços tecnológicos do século XX e XXI na chamada terceira etapa da Revolução Industrial apresentaram inovações no setor de informática, como o computador e o celular que contribuem com o desenvolvimento humano, mas que demandam recolhimento, separação, e reprocessamento adequados dos resíduos desses equipamentos.

Na indústria, vários metais pesados são usados para fabricar circuitos eletrônicos, baterias de automóveis, acumuladores e certas baterias. Por serem elementos químicos, eles não se decompõem na natureza, tampouco podem ser eliminados em estações de incineração e tratamento de esgoto: como partículas de poeira, elas são liberadas no ar e podem poluir a água e



o solo quando as escórias do incinerador e as lamas de esgoto são despejadas. O acúmulo de metais no fígado, rins ou cérebro causa várias doenças, principalmente em crianças: doenças neurológicas, desenvolvimento intelectual prejudicado, doenças renais, câncer. Por isso é tão importante não jogar pilhas e resíduos eletrônico - mesmo pequenos brinquedos - no lixo doméstico, mas descartá-los separadamente (FRANCO, 2021).

Um estudo relatado por Gu et al., 2017 avaliou o impacto de metais pesados no solo em uma área de processamento de REEE na China. Os resultados revelaram que o solo em uma área de processamento de equipamentos eletrônicos residuais estava poluído por cádmio, cobre, chumbo, zinco e cromo, aumentando com o tempo. A partir da análise do método do índice de risco ecológico potencial, o arsênico e o cádmio apresentavam maior risco ecológico do que outros metais pesados. Para evitar o transporte transfronteiriço de resíduos perigosos, muitos países assinaram a Convenção da Basileia (OLIVEIRA, 2017). Entre outras coisas, os países signatários se comprometeram a reciclar o lixo eletrônico no país de origem.

Uma grande preocupação em relação aos REEE é a contaminação ambiental e a infiltração na cadeia alimentar. Muitos metais ocorrem normalmente na natureza e são essenciais à vida, mas podem se tornar tóxicos através do acúmulo em organismos: arsênico, cádmio, cromo, cobre, níquel, chumbo e mercúrio são os metais pesados mais comuns que podem poluir o meio ambiente. O mercúrio, o chumbo e o cádmio são de grande preocupação devido à sua capacidade de percorrer longas distâncias na atmosfera, além disso, metais pesados podem se dissolver e serão liberados no lençol freático a partir dos aterros sanitários. Já os metais pesados chumbo, mercúrio e cádmio, mas abrangendo também outros metais como o cromo tem uma extensa gama de potenciais efeitos nocivos para os seres humanos e o meio ambiente. Os riscos à saúde humana e os efeitos dos mais importantes metais no meio ambiente são apresentados na tabela 1.

O uso crescente de equipamentos elétricos e eletrônicos leva a uma enorme geração de REEE. É o fluxo de resíduos que mais cresce no mundo. Quase todos os equipamentos elétricos e eletrônicos contêm placas de circuito impresso como uma parte essencial. O manuseio inadequado desses REEE pode trazer sérios riscos para a saúde humana e o meio ambiente. Por outro lado, o manuseio adequado desses resíduos requer uma estratégia de gestão adequada para conscientização, coleta, reciclagem e reutilização. Atualmente, a reciclagem efetiva deste tipo de resíduo tem sido considerada como um desafio principal para qualquer sociedade (ABDELBASIR et al., 2018). O exame às informações disponibilizadas na tabela 1 permitem afirmar que todos os metais causam impacto ao ambiente e danos à saúde humana. Constata-se também que após a sua liberação os metais contaminam os corpos de água naturais, sedimentos e solos. Como os metais são persistentes no meio ambiente, eles se acumulam em biota ou lixiviam para as águas subterrâneas. A contaminação da biota e das águas subterrâneas com metais pesados potencialmente tóxicos tem implicações importantes para a saúde humana. É importante avaliar o grau de poluição por metais em todos os ambientes.

**Quadro 1: Efeitos Nocivos de metais dos REEE ao Ambiente e a Saúde Humana.**

| Metal         | Efeitos ambientais   | Efeitos para saúde humana  |
|---------------|--|--|
| Alumínio (Al) | Concentrações de Al estão mais altas em lagos acidificados onde o número de peixes e anfíbios está diminuindo devido às reações dos íons de alumínio com proteínas nas guelras dos peixes e nos embriões dos sapos. Via cadeia alimentar prejudicam também aves, com cascas dos ovos mais frágeis e filhotes com baixo peso ao nascer. Demais animais que respiram alumínio através do ar geram problemas pulmonares, e perda de peso. | A inalação de alumínio e pó de óxido de Al tem sido relatada como uma causa de fibrose pulmonar e danos pulmonares. Pode também estar implicado na doença de Alzheimer. Também pode gerar intoxicação crônica e anemia por deficiência de ferro. Alguns autores sugerem existir relação da contaminação crônica do alumínio como um dos fatores ambientais da ocorrência de mal de Alzheimer.                |
| Chumbo (Pb)   | Liberado no meio ambiente entra no ar, no solo e na água. Pode permanecer no ambiente como pó indefinidamente. Pb acumula nos corpos de organismos aquáticos e nos organismos do solo.   | O metal pode gerar retardo mental em crianças, atraso no desenvolvimento, encefalopatia infantil fatal, além de danos crônicos ao sistema nervoso, bem como fígado e rins.   |
| Cobalto (Co)  | Sua alta concentração na água leva ao acúmulo excessivo nos órgãos internos dos animais aquáticos. O Co também se acumula nas penas das aves como resultado da excreção intersticial de seus órgãos internos. O resultado da presença do Co no solo é seu acúmulo nas plantas, inclusive em seus frutos.   | Apesar de ser um metal essencial para a vida, a literatura aponta efeitos carcinogênicos, disfunções no metabolismo da tireoide, dermatite e irritação ao trato respiratório quando há exposição direta à seres vivos, além de diversos problemas ambientais quando liberada de forma incorreta ao meio ambiente.  |
| Cobre (Cu)    | Não é cancerígeno, mutagênico ou tóxico para a reprodução dos seres vivos, e, em condições normais de uso, não causa nenhum dano ambiental em termos de ser bioacumulativo ou tóxico. Em concentrações altas causa intoxicações e afeta o fígado; pode gerar cirrose hepática.   | A exposição prolongada ao Cu causa irritação do nariz, boca e olhos, dor de cabeça, dor de estômago, tonturas, vômitos e diarreia, além de causar danos ao fígado e aos rins e até mesmo a morte. Foi relatada ligação entre a exposição prolongada a altas concentrações de Cu e uma diminuição da inteligência com adolescentes jovens, além de anemia, lesões hepáticas e renais e irritação do estômago. |



|               |   |   |
|---------------|---|---|
| Cromo (Cr)    | Contaminação das águas subterrâneas, devido ao descarte inadequado de equipamentos causa efeitos negativos à saúde dos animais aquáticos, aumentando as taxas de mortalidade em peixes. Altas concentrações de Cr em águas superficiais podem danificar as guelras dos peixes gerando problemas respiratórios, defeitos de nascença, infertilidade e tumores.   | Cr é conhecido por causar vários efeitos à saúde via aérea: irritações no nariz e hemorragias nasais. Outros problemas de saúde são: erupções cutâneas, úlceras, problemas respiratórios, sistema imunológico enfraquecido; danos aos rins e fígado, mutações, câncer de pulmão e morte.  |
| Estanho (Sn)  | Componentes orgânicos do Sb são persistentes no ambiente, Microorganismos têm grande dificuldade de quebrar compostos orgânicos de Sb que se acumularam nos solos de água por muitos anos, causando danos aos ecossistemas aquáticos; muito tóxicas para fungos, algas e fitoplâncton.  | Normalmente acrescentado de Sn, estudos desenvolvidos indicam como maior indicador de impacto em quatro categorias (câncer ocupacional, doenças ocupacionais crônicas não cancerosas, saúde pública e doenças crônicas não cancerosas no público).  |
| Ferro (Fe)    | Devido a descarte inapropriado, causa impactos ambientais de grande monta aos recursos naturais: água, solo e ar. Por ser um micronutriente essencial à nutrição das plantas participando de processos fundamentais como a fotossíntese, respiração e assimilação de nitrogênio, o ferro vem sendo utilizado como alternativa para melhorar a atividade ou/e função sintática e conseqüentemente o aspecto nutricional e a aparência. | Fe pode causar conjuntivite, coroidite e retinite se entrar em contato e permanecer nos tecidos. A inalação crônica de concentrações excessivas de vapores ou pós de óxido de Fe pode resultar no em uma pneumoconiose benigna (siderose). A inalação de concentrações excessivas de óxido de ferro pode aumentar o risco de desenvolvimento de câncer de pulmão em trabalhadores expostos a carcinógenos pulmonares. |
| Germânio (Ge) | Quando este resíduo entra em contato com o solo, pode infectar o lençol freático.   | O Ge pode quebrar o tecido renal. Em alguns casos, pode até causar insuficiência renal crônica e morte. Devido a esses riscos, a maioria dos médicos recomenda evitá-lo. O germânio pode danificar fígado e nervos.   |



|             |   |  |
|-------------|---|--|
| Índio (In)  | A toxicidade do In varia dependendo do material e da forma que é administrado, bem como, sua concentração e tempo de exposição. O In na forma metálica ou em compostos são considerados tóxicos quando ingeridos ou inalados na forma de pequenas partículas e/ou vapores.  | A exposição crônica pode ocasionar a perda dos dentes, dores nas articulações, desordens do sistema nervoso e gastrointestinal, problemas cardíacos e debilidade geral. Embora haja suspeitas de que o In possa causar malefícios aos seres humanos. Trabalhadores da indústria de semicondutores e em soldas não apresentam efeitos colaterais notáveis.  |
| Níquel (Ni) | Para animais pode ser perigoso quando as quantidades máximas toleráveis são excedidas. Isto pode causar vários tipos de câncer em diferentes locais dentro do organismo destes animais, principalmente dos que vivem perto das refinarias. Não se sabe que o níquel se acumula em plantas ou animais.   | Absorção de quantidades altas levam a uma maior incidência de desenvolvimento de câncer de pulmão, câncer de nariz, câncer de laringe e câncer de próstata, doença e tonturas após exposição ao gás níquel, embolia pulmonar, insuficiência respiratória, asma e bronquite crônica; reações alérgicas como erupções cutâneas e distúrbios cardíacos.   |
| Ouro (Au)   | Em relação a sua ecotoxicidade, o ouro não é classificado como tóxico para o ambiente aquático. Em função da ausência de dados, espera-se que o produto apresente persistência e não seja rapidamente degradado. Apresenta baixo potencial bioacumulativo em organismos aquáticos. Espera-se baixa mobilidade no solo devido à insolubilidade em água do produto. | Toxicidade para órgãos-alvo específicos. O contato direto com o produto pode causar leve irritação respiratória com tosse e espirros, por efeitos mecânicos. A ingestão em grandes quantidades pode produzir irritação gástrica, náusea e diarreia. Toxicidade para órgãos-alvo específicos – exposição repetida: Provoca danos aos pulmões por exposição repetida ou prolongada se inalado, com silicose. |
| Prata (Ag)  | Podem matar células do fígado e cérebro de ratos, capazes de contaminar corpos de água e solo. Prejudicam a germinação das sementes, o crescimento de plantas, podem penetrar nos cultivos agrícolas, ficando bioacumuladas na cadeia alimentar   | 10g na forma de Nitrato de Prata são letais ao homem. Doses não citotóxicas da prata aceleram os genes de reparação de danos do DNA e a indução de micronúcleos, ele também pode ao ser ingerido extremamente fatal, causando sérios problemas ao fígado e outros órgãos do corpo.   |
| Zinco (Zn)  | O aumento de quantidades de Zn na água potável pode causar problemas de saúde. Acumulação de em alguns tipos de peixes, quando vivem em cursos d'água contaminados; pode haver bioamplificação na cadeia alimentar.   | Danos ao sistema nervoso; dermatite; cólicas estomacais, irritações de pele, vômitos, náuseas e anemia. Níveis muito altos de Zn podem danificar o pâncreas e perturbar o metabolismo de proteínas, além de causar arteriosclerose.  |

Fontes: Abd el-Hack et al. (2019); Ali e Khan (2019); Duran et al. (2018); Dubey et al. (2020); Husein e Mohammed (2019); Meena et al. (2020); Muszyńska e Labudda (2019); Piperno et al. (2020); Prasad e Yadav, (2021); Sandergaard (2013); Showkat et al. (2019); Soylok (2013); Sverdrup et al. (2015); Tabelin et al. (2021); Wu et al. (2019).



Diz-se que a água é o "sangue vital da biosfera", e um solvente universal, dissolvendo diferentes produtos químicos orgânicos e inorgânicos e poluentes ambientais. Os ecossistemas aquáticos, tanto de água doce quanto marinhos, são vulneráveis à poluição, a contaminação dos recursos hídricos por metais pesados é uma questão ambiental crítica que afeta negativamente plantas, animais e a saúde humana. Os metais pesados são extremamente tóxicos para os organismos aquáticos, mesmo em concentrações muito baixas, estes elementos podem causar alterações histopatológicas significativas nos tecidos de organismos aquáticos, como os peixes.

A contaminação de sedimentos com metais pesados é uma questão ambientalmente importante com consequências para os organismos aquáticos e para a saúde humana. Os sedimentos atuam como o principal reservatório de metais no ambiente aquático, servindo tanto como fonte de metais pesados, liberando-os na coluna de água. A deposição contínua de metais pesados em sedimentos também pode levar à contaminação das águas subterrâneas. Como os metais pesados são persistentes no ambiente, eles se acumulam em organismos vivos e são transferidos de um nível trófico para outro nas cadeias alimentares. A extensão do acúmulo de metais na biota depende de sua taxa de acúmulo e de sua taxa de eliminação do corpo.

Os metais podem entrar no corpo de um organismo diretamente do ambiente abiótico, ou seja, água, sedimentos e solo, ou podem entrar no corpo de um organismo a partir de seus alimentos. A concentração de um metal pode aumentar ou diminuir ao longo de sucessivos níveis tróficos em uma cadeia alimentar, a retenção de metais pesados no corpo de um organismo depende de muitos fatores como a especiação do metal em questão e os mecanismos fisiológicos desenvolvidos pelo organismo para a regulação, homeostasia e desintoxicação do metal pesado (KAUR et al., 2021). Os seres humanos são expostos a metais tóxicos no meio ambiente por diferentes vias, incluindo ingestão, inalação e absorção dérmica, sendo pessoas nos países em desenvolvimento mais expostas a metais tóxicos. Geralmente, as pessoas não têm consciência e conhecimento sobre a exposição a metais e suas consequências para a saúde humana, especialmente nos países em desenvolvimento. As pessoas podem ser expostas a metais no local de trabalho (exposição ocupacional) e no meio ambiente (exposição não ocupacional ou ambiental).

A bioacumulação e a biomagnificação de metais pesados nas cadeias alimentares humanas se constituem em uma realidade. Pessoas podem ser expostas a metais tóxicos através de diferentes itens alimentares, tais como peixe, cereais e vegetais. A contaminação por metais em corpos de água doce, como rios, lagos e riachos, leva à bioacumulação desses elementos em peixes de água doce, enquanto tal contaminação em terras agrícolas leva à bioacumulação desses elementos em cultivos agrícolas. A contaminação das cadeias alimentares humanas com metais tóxicos representa uma ameaça para a saúde humana (ALI e KHAN, 2018). Uma face do lixo eletrônico mostra que ele contém uma variedade de metais que possuem uma alta carga poluente. Por outro lado, é composto por materiais valiosos que podem ser recuperados como matéria-prima secundária. A reciclagem adequada tornaria possível a reutilização de matérias-primas, cuja extração é intensiva em energia e recursos. A tabela 2 detalha as maiores fontes, o potencial econômico e como reciclar de forma segura os metais.

**Quadro 2: Maiores fontes, potencial econômico e como reciclar metais de forma segura.**

| <b>Metal</b>  | <b>Maiores fontes</b>  | <b>Potencial econômico</b>  | <b>Como reciclar?</b>  |
|---------------|--|---|--|
| Alumínio (Al) | Presente em diferentes equipamentos eletrônicos, tais como computadores, televisores e celulares, é extraído a partir da sucata do lixo eletrônico.  | A indústria do Al faz uma contribuição substancial à economia global. 45 milhões de toneladas de produtos de Al são produzidos anualmente, sendo 14 milhões de toneladas de Al reciclado.   | O processo envolve a refundição do metal, que é muito menos dispendioso que a criação de novo Al através da eletrólise do $Al_2O_3$ . A reciclagem de resíduos de Al requer apenas 5% da energia utilizada para produção de Al novo de minério bruto. Reciclabilidade de 80%.  |
| Chumbo (Pb)   | Monitores de computador, celulares, televisores, baterias, soldas e circuitos integrados.  | No início dos anos 2000, 88% do consumo aparente de Pb nos EUA estava em baterias de chumbo-ácido. Hoje, os outros usos significativos de chumbo são em munições, óxidos em vidro e cerâmica, metais fundidos e chumbo em folha.          | Reciclagem das baterias de chumbo-ácido iniciam com a separação das peças de Pb e de polipropileno. O líquido é drenado para recuperar o Pb. Tanto o Pb quanto as carcaças de plástico são então recicladas para a produção de baterias novas ou usados em outros produtos industriais. Reciclabilidade de 5%.                       |
| Cobalto (Co)  | Estrutura dos computadores. Metal importante para celulares, notebooks e automóveis elétricos  | Tendo posição econômica fortíssima, a produção mundial do Co gira em torno de 17000 t/ano. A expansão do mercado de veículos elétricos no mundo aumentará exponencialmente a demanda por cobalto na próxima década.                       | A eletro-obtenção é um importante método de se recuperar o Co e consiste em converter íons metálicos de Co dissolvidos em uma solução em depósitos sólidos cristalinos. Ocorre através da aplicação de uma diferença de potencial em uma célula eletroquímica. Reciclabilidade de 85%.   |
| Cobre (Cu)    | Presente em diferentes produtos, como computadores, celulares, smartphones, tablets, entre outros dispositivos móveis. Também presente em televisores e refrigeradores, por ser um excelente condutor elétrica | Importância econômica em equipamentos elétricos como fiação e motores, pois conduz muito bem o calor e a eletricidade. Ele também tem usos na construção (telhados e encanamentos), e em máquinas industriais (como trocadores de calor). | Resíduos contendo Cu, tais como REEE, cabos elétricos, torneiras antigas, tubos de canalização de Cu e sucata da produção e fabricação de liga de cobre/cobre é coletada, desmontada e classificada. Em seguida, é feita a fusão e fundição do cobre, e posteriormente a fabricação de novos produtos de Cu. Reciclabilidade de 90%. |



|               |   |  |  |
|---------------|---|--|--|
| Cromo (Cr)    | Ligas com aço inoxidável, em cromagem e em cerâmica metálica, para dar ao aço um revestimento espelhado prateado polido; usado na metalurgia para conferir resistência à corrosão e um acabamento brilhante.  | É um dos metais industriais mais importantes, economicamente e indispensáveis, por causa de sua dureza e resistência à corrosão. Produção de aço inoxidável e ligas não ferrosas.  | Embora a maioria dos processos de reciclagem sugeridos até hoje não sejam economicamente viáveis, os custos continuamente crescentes da matéria prima e do descarte de resíduos contendo Cr acabarão fazendo da reciclagem uma necessidade. Reciclabilidade de 70%.  |
| Estanho (Sb)  | As ligas de Sb são amplamente empregadas como solda para unir tubos ou circuitos elétricos integrados. A liga de nióbio- estanho é usada para ímãs desupercondução, o óxido de Sb é usado em sensores de gás. | Sb é usado para produzir diversas ligas metálicas utilizadas para recobrir outros metais e protegê-los da corrosão, possui como principais minérios: Hematita e Cassiterita  | Sb pode ser infinitamente reciclado com a mesma alta qualidade devido a suas propriedades intrínsecas. Os subprodutos da fabricação de solda são uma importante fonte de Sb reciclado. Por ano 40.000 t são recuperadas de sucatas, resíduos de solda, sendo o Sb oxidado (95% do total). Reciclabilidade de 75%.  |
| Ferro (Fe)    | Estruturas e encaixes; placas de circuito impresso; aparelhos eletrônicos tais como celulares.  | A contribuição na balança comercial devido às exportações de minério de Fe é grande (335 milhões de toneladas em 2019), mostrando a sua grande responsabilidade econômica  | As peças metálicas cortadas ou produtos imperfeitos são recicladas por refusão, reformulação e redesenho inteiramente dentro da aciaria. O processo é muito mais barato do que a produção de metal novo a partir do minério básico. Reciclabilidade de 80%.  |
| Germânio (Ge) | Semicondutores. Um dos semicondutores mais utilizados no mercado. Também está presente em diversos dispositivos eletrônicos, pois é usado para construir transistores.  | Além de suas aplicações em dispositivos eletrônicos, o germânio é usado como componente de ligas e em fosforescentes para lâmpadas fluorescentes. Como o germânio é transparente à radiação infravermelha, é empregado em equipamentos utilizados para detectar e medir tal radiação, como janelas e lentes. | O método de regeneração de Ge e silício a partir de lentes de Ge usadas e células fotovoltaicas gera o metal com um rendimento total de germânio acima de 97%. A preparação de germânio de magnésio, silicato de magnésio e suas misturas em um reator semiaberto otimizado produz via hidrólise os produtos Ge e hidretos de silício. Reciclabilidade de 60%. |

|                |  |  |  |
|----------------|--|--|--|
| Índio<br>(In)  | Transmissores e retificadores. Telas de computadores, televisores e celulares tem uma fina camada de vidro revestido com 90% In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e 10% de óxido de estanho, que funciona como um semicondutor.  | O processo usando lixiviação com fluido supercrítico, na presença de co-solventes, proporcionou menos tempo de extração, além de maior percentual de extração do metal.  | Displays de LCD contém aproximadamente 1400g/t de In; já as reservas naturais contém cerca de 20g/t, o que justifica sua reciclagem. Muito raro na crosta terrestre; reserva mundial deve esgotar em 2025; a taxa de reciclagem a partir de LCDs é de 1%. Reciclabilidade de 60%.  |
| Níquel<br>(Ni) | Aplicações, que respondem por cerca de 60% do consumo mundial de Ni, é a fabricação de aços inoxidáveis, contendo de 8% a 10% de Ni. São revestimentos superficiais finos, aplicados por eletrodeposição. Usado em trocadores de calor onde a resistência à corrosão é necessária  | A sua importância é baseada no fato de ser um condutor de eletricidade confiável, usado para fios em eletrônicos, baterias e eletrodos. Condutor de calor que resiste à corrosão. Através de sua capacidade de suportar alto calor, ele minimiza a corrosão, podendo ser usado por décadas sem substituição.   | As baterias de Ni-Cd são recicláveis. Existem dois processos: via 1) rota pirometalúrgica e 2) rota hidrometalúrgica. A reciclagem de baterias de Ni-Cd nem sempre se apresentou economicamente favorável devido à constante flutuação do preço do Cd, assim ainda se estudam alternativas para a reciclagem visando melhorar os processos existentes ou criar novos. Reciclabilidade de 80%.  |
| Ouro<br>(Au)   | Conexões e condutores. Presente na proteção de contatos elétricos pela boa condutividade e resistência à corrosão. Usada em equipamentos eletrônicos e chips o que possibilita a fabricação de fios extremamente delicados. A indústria eletrônica usa para proteger seus componentes de cobre e melhorar sua soldabilidade. | O uso industrial mais importante do Au, além de joias (50%), está na fabricação de produtos eletrônicos (37%). É o condutor altamente eficiente que pode transportar essas minúsculas correntes e permanecer livre de corrosão. Um desafio com o uso do Au em quantidades muito pequenas em dispositivos muito pequenos é a perda do metal da sociedade. | Au pode ser reciclado várias vezes sem perder sua qualidade, o que é uma solução sustentável. A reciclagem de resíduos industriais e eletrônicos é menos simples porque o Au está embutido em uma carcaça de metal ou plástico. Uma vez descascadas as peças, pode ser realizada a decapagem química com um composto que reage com o Au; pode-se também derreter os componentes metálicos, resfriá-los e moê-los.<br>Reciclabilidade de 99%. |

|                   |  |  |   |
|-------------------|--|--|---|
| <p>Prata (Ag)</p> | <p>Usados em equipamentos médicos; ótimo condutor de energia, e para “limpar” utensílios médicos. É encontrada em dispositivos eletrônicos, em interruptores convencionais para controlar as luzes, placas de circuito impresso, telefones celulares e computadores.</p>                   | <p>Muito atrelado à produção de outros metais, uma vez que 62% da prata extraída é subproduto do processamento do Cu, Zn e Pb; apenas 25% é proveniente de extração primária. Uma desaceleração econômica que resulta em uma demanda menor por outros metais, afeta a extração da Ag, reduzindo sua oferta no mercado.</p> | <p>A rota hidrometalúrgica para recuperação da Ag envolve o processo de lixiviação (a dissolução dos constituintes solúveis de uma matéria) em meio ácido sulfúrico em meio oxidante. Após o processo, Ag é isolada dos demais metais. Por fim, se faz a síntese de nanopartículas de prata com citrato de sódio como agente estabilizante. Reciclabilidade de 98%.</p> |
| <p>Zinco (Zn)</p> | <p>Presente em ligas metálicas como latão, prata, níquel e solda de alumínio, e em nano-lasers e em baterias recarregáveis de alta eficiência e novos tipos de cabo de fibra óptica. As propriedades piezoelétricas do ZnO são de interesse para sensores e geradores de eletricidade.</p> | <p>A maioria do Zn é utilizada para galvanizar outros metais, como o ferro, para evitar a ferrugem. O óxido de zinco é usado na fabricação de muitos produtos como tintas, borracha, cosméticos, produtos farmacêuticos, plásticos, tintas de impressão, sabões, baterias, têxteis e equipamentos elétricos.</p>           | <p>O Zn presente em produtos modernos pode ser reciclado. O Zn é um metal infinitamente reciclável, sem se deteriorar, não perdendo suas características físicas e químicas, reduzindo o uso de energia, diminuindo as emissões e minimizando o descarte de resíduos. Reciclabilidade de 60%.</p>   |

Fontes: Abdelbasir et al. (2018); Beckers e Rinklebe(2017); Briffa et al. (2020); Brum (2015); Capuccio et al. (2021); Ciez e Whitacre (2019); Dutta et al., (2018); Henckens et al. (2016); MCC (2020); Meili (2012); Meshram et al., (2019); Rai et al. (2021). Silvestri et al. (2020); Smil (2016); Spatocco (2015); Sturala et al. (2018, 2019); Sverdrup et al. (2015); Tabelin et al. (2021); Zhang et al. (2016); Zubi et al. (2018).



Os metais são bem adaptados às metas de desenvolvimento sustentável. Eles não são biodegradáveis e têm uma vida útil praticamente ilimitada e um potencial de reciclagem ilimitado. Portanto, os metais podem ser considerados como materiais renováveis. Entretanto, os recursos minerais, fonte dos metais primários, são "não renováveis", pois seu fornecimento é finito, mas isto não significa necessariamente escassez, pois processos cada vez mais eficientes de reciclagem estão fornecendo matéria prima reciclada, aumentando assim o uso de "metais em uso". Metais preciosos reciclados têm impacto mínimo sobre o meio ambiente porque não são minerados. Eles também ajudam a promover a sustentabilidade porque podem ser reutilizados repetidamente.

Existe cada vez mais uma forte tendência para a reciclagem e a circularidade, mas para isso são necessárias mudanças fundamentais para apoiar esta transição, incluindo uma infraestrutura apropriada, uma regulamentação e legislação adequada, e uma economia de custos competitiva a base de novos processos de reciclagem, criando novos recursos a partir dos antigos. Entender e alavancar esta mudança em modelos de negócios, é fundamental. Por exemplo, será certamente mais lucrativo e ao mesmo tempo sustentável reposicionar um negócio como "fornecedores de metais" ou "fornecedores de materiais reciclados" derivados da reciclagem ou reutilização, em comparação com uma empresa de "matéria-prima" ou "metais puros" obtidos através do processo da mineração. Afinal, a economia circular é aquela que é restaurativa por concepção, com o objetivo de manter os produtos, componentes e materiais sempre em sua maior utilidade e valor.

A reciclagem recupera o metal de produtos que atingiram seu fim de vida útil ou fim de uso. Há quatro pré-requisitos para que a reciclagem seja sustentável e eficiente (QUEIRUGA e QUEIRUGA-DIOS, 2015): 1) Infraestrutura adequada de coleta e pré-processamento; 2) REEE em quantidade suficiente disponível para o processo (os volumes dependem da vida útil do metal atualmente em uso); 3) Custos de produção competitivos, uma vez que a reciclagem compete com a produção de metais primários; e 4) Possibilidade de reciclagem (incluindo *upcycling*) ou reutilização em diferentes aplicações (os materiais reciclados nem sempre ser reutilizados em aplicações de alta qualidade devido a ligas ou impurezas).

A aplicação do princípio da conservação do meio ambiente e do clima se traduz em um aumento da reciclagem e da reutilização, garantindo ao mesmo tempo uma produção eficiente em termos energéticos e ambientalmente correta. O uso de energia e as emissões diminuem e novos modelos de propriedade estendem a vida útil dos produtos ou reduzem a demanda; métodos de produção redesenhados permitem uma maior reutilização dos componentes. Melhorar a coleta e reutilização de sucata, bem como reduzir a quantidade de sucata na produção de metais também seria um passo significativo em direção à circularidade. Finalmente, a redução dos recursos que são necessários para um determinado produto apoiará ainda mais este esforço.

Desta forma, uma economia baseada cada vez mais em processos de reciclagem de REEE de forma correta, apoia os seguintes Objetivos do Desenvolvimento da ONU: ODS 3 (Saúde e Bem-estar), pois diminui problemas de contaminação do ambiente, além de diminuir problema de saúde em seres humanos e animais; ODS 6 (Água potável e Saneamento), pois menos contaminantes chegarão até os aquíferos de água doce e salgado; ODS 8 (Trabalho decente e Crescimento econômico), pois a economia circular pode ser um grande propulsor da economia e do PIB nacional

e em nível mundial, gerando mais trabalho e empregos de qualidade; ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) gerando benefícios para o crescimento da economia; ODS 11 (Cidades de Comunidade sustentáveis) pois menos contaminação gera ambientes mais sustentáveis com uma maior qualidade de vida; o ODS 12 (Consumo e Produção responsáveis) pois o uso de metais pesados reciclados em novos processos produtivos, além de envolver o ciclo fechado de produtos e bens, envolvendo também a inovação, gera negócios com uma maior responsabilidade socioambiental; e, finalmente, ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima) pois a obtenção de metais (matéria prima reciclada) via reciclagem geralmente necessita menos energia do que a extração desses metais a partir do solo, rochas ou sedimentos.

O princípio básico da reciclagem é que o valor do material recuperado tem de pagar por todas as atividades de recolhimento, desmontagem, triagem e outras atividades de reciclagem. A economia de tal reciclagem baseia-se na estimativa do verdadeiro valor dos reciclados a partir da melhor recuperação de metais refinados, ligas e compostos. A reciclagem é assim impulsionada pelo valor do metal recuperado. Em qualquer caso, todas as plantas metalúrgicas tentam sempre recuperar todos os elementos valiosos. Se houver um elemento econômico de incentivo por parte do poder público, a recuperação de metais irá acontecer cada vez mais, levando uma economia linear para um modelo de economia circular, beneficiando economicamente os atores, pois muitos processos de recuperação gastam menos energia, e beneficiam o meio ambiente e a saúde da população.

Segundo relatório da Fundação Ellen McArthur (2012), a implementação de reciclagem de metais projeta uma oportunidade de economia anual de custos líquidos de material de até 380 bilhões de dólares num cenário de transição e de até 630 bilhões de dólares num cenário avançado, olhando apenas para um conjunto de setores transformadores da União Europeia. Processos físicos e químicos determinam principalmente o potencial e os limites da reciclagem de metais, afetando assim a economia da reciclagem. A economia simples de tal reciclagem baseia-se na estimativa do verdadeiro valor dos metais, a partir da recuperação máxima em sucatas contendo metais refinados, ligas e compostos. A reciclagem é assim impulsionada pelo valor do metal recuperado. Adicione-se a isto, que a economia está a serviço do bem comum; tem como objetivo tornar o mundo melhor e para tal deve se voltar a promover o interesse geral (TIROLE, 2020).

Dito em outras palavras, admite-se o uso privado dos bens existentes na natureza para o bem-estar da pessoa, mas não o uso predatório, que restrinja a utilização destes bens pela coletividade. Se os metais pesados reciclados tiverem valor econômico suficiente, serão cada vez mais reciclados quando existir a infraestrutura tecnológica adequada para a sua recuperação, mas nem todos os tipos de metais têm um valor elevado. A política local e global deve promover a utilização das melhores técnicas disponíveis, certificadas no sistema global de reciclagem, para assegurar que a eficiência dos recursos seja conduzida ao máximo.



#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo proposto para a pesquisa foi alcançado mediante a análise das publicações correntes na área de REEE, com foco nas alternativas apresentadas para o descarte adequado e para a reciclagem deste tipo de resíduo, além de relatar os efeitos dos metais pesados no meio ambiente e na saúde humana.

Desta análise foi possível identificar que a falta de eliminação correta e sustentável de equipamentos eletrônicos está sendo visto, cada vez mais, com muita preocupação, devido ao impacto perigoso ao meio ambiente e à saúde humana, especialmente, devido a presença de metais pesados perigosos e altamente tóxicos. O tratamento de diversos tipos de compostos heterogêneas eletrônicos implica uma abordagem científica e organizada, e um tratamento especial para evitar a exposição às pessoas. A percepção da ameaça resultante da acumulação acelerada de REEE nas últimas décadas, devido aos padrões de consumo emergentes em todos os setores da sociedade, influenciada pelas vantagens associadas que vão desde a acessibilidade econômica até ao conforto na utilidade quotidiana em relação aos mais diversos tipos de equipamentos eletrônicos tem sido considerada positivo em relação a uma maior conscientização referente ao assunto em questão. É imperativo que a sociedade em geral desenvolva metodologias científicas e seguras, tanto como fator preocupante do perigo potencial iminente de danos para o ambiente como também para recuperar economicamente os metais valiosos (economia circular).

A reciclagem, recuperação e reutilização de REEE obsoletos, aproveitados em novos ciclos de produção é um desafio global, tendo em conta o potencial inerente de adição de valor de metais como ouro, prata, cobre, paládio, entre outros, o que contribuiu imensamente para que o conceito de reciclagem fosse uma oportunidade de negócio muito lucrativa, tanto nos países desenvolvidos como nos países em desenvolvimento. Além disso, o enorme volume destes resíduos gerados, devido ao atual padrão de vida em boa parte do planeta, constitui um importante estímulo em todo o mundo para o processamento destes resíduos com o objetivo de recuperar os metais pesados de forma eficaz, gerando valor e estimulando a economia circular.

#### 5 REFERÊNCIAS

- ABD EL-HACK, M. E.; ABDELNOUR, S. A.; ABD EL-MONEIM, A. E. M. E. (2019). Putative impacts of phytogenic additives to ameliorate lead toxicity in animal feed. **Environmental Science Pollution Research**, v. 26, p. 23209–23218, DOI: 10.1007/s11356-019-05805-8
- ABDELBASIR, S.M., HASSAN, S. S. M., KAMEL, A.H. (2018). Status of electronic waste recycling techniques: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 16533–16547. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2136-6>
- ALBUQUERQUE, C. A. de; PEREIRA MELLO, C. H.; GOMES, J. H. de F.; SANTOS, V. C. dos; ZZARAara, J. V. (2020). E-waste in the world today: An overview of problems and a proposal for improvement in Brazil. **Environmental Quality Movement**. v. 29, n. 3, p. 63-72 DOI:



<https://doi.org/10.1002/tqem.21682>.

- ALI, H.; KHAN, E. (2018). Trophic transfer, bioaccumulation, and biomagnification of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in food chains/webs – concepts and implications for wildlife and human health. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v.25, n. 6, p. 1353-1376. DOI: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1469398>.
- ALI, H.; KHAN, E.; A.; ILAHI, I. (2019). Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. **Journal of Chemistry**, v. 2019,p. 1-14, DOI: 10.1155/2019/6730305
- AWASTHI, A.K.; LI, J.; KOH, L. (2019). Circular economy and electronic waste. **Nature Electronics**, v. 2, p. 86–89. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0225-2>
- BALDÉ, C. P., FORTI, V., GRAY, V., KUEHR, R., STEGMANN, P. (2017). **The Global E-waste**. Monitor 2017 (UNU, ITU, ISWA). Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Documents/GEM%202017/Global-E-waste%20Monitor%202017%20.pdf>. Acesso em 07junho 2021.
- BECKERS, F.; RINKLEBE, J. (2017). Cycling of mercury in the environment: Sources, fate, and human health implications: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 47,n. 9, p. 693-794, DOI: 10.1080/10643389.1326277
- BIMIR, M.N. (2020). Revisiting e-waste management practices in selected African countries. **Journal of the Air & Waste Management Association**, 70:7, 659-669. DOI: 10.1080/10962247.2020.1769769
- BRIFFA, J.; SINAGRA, E.; BLUNDELL, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. **Heliyon**, v. 6, n. 9, p. e04691. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04691.
- BRUM, A. A. (2015). Utilização de CO2 supercrítico e ácidos orgânicos na lixiviação de índio presente em telas de LCD de telefones celulares. **O Manancial**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 1-1. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7995>. Acesso em: 17 nov. 2021.
- CAPUCCIO, M.; COSTA E SILVA, R. da; ALVES, T. N.; CARVALHO, C. A. de; FERNEDA, E.; Guarda, G. F. (2021). Logística reversa para lixo eletrônico. **Revista Gestão do Conhecimento e Tecnologia da Informação**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 1-16, março 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.31501/rgcti.v3i1.12943>.
- CIEZ, R.E., WHITACRE, J.F. (2019). Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. **Nat Sustain** 2, 148–156. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0222-5>
- DUBEY, R.; GUPTA, D. K.; SHARMA, G.K. (2020). Chemical Stress on Plants. In: Rakshit A., Singh H., Singh A., Singh U., Fraceto L. (eds) **New Frontiers in Stress Management for Durable Agriculture**. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-15-1322-0\_7



- DURAN, N.; ROLIM, W. R.; DURAN, M.; FÁVARO, W. J.; SEABRA, A. B. (2018). Nanotoxicologia de nanopartículas de prata: toxicidade em animais e humanos. **Química Nova**, v. 15, p. 1-8. DOI:<http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170318>
- DUTTA, D.; PANDA, R.; KUMARI, A.; GOEL, S.; KUMAR JHA, M. (2018). Sustainable recycling process for metals recovery from used printed circuit boards (PCBs). **Sustainable Materials and Technologies**, v. 17, p. e00066. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00066>.
- EURACTIV. (2018). Metals in the circular economy. **Special report** | 12 - 16 NOV. 2018. Disponível em:<http://eurac.tv/9PNZ>. Acesso em: 15 mai 2021.
- FRANCO, A. dos S.; MOREIRA, C. da S.; NASCIMENTO, V. X.; MIRANDA, P. R. B. de; CABRAL, A. B. (2021). Danos causados à saúde humana pelos metais tóxicos presentes no lixo eletrônico. **Diversitas Journal**, v. 6, n. 2, p. 2025-2039. DOI: <https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v6i2-1626>
- GIESE, E. C.; FREITAS LINS, F. A.; XAVIER, L. H. (2021). Desafios da reciclagem de lixo eletrônico e as cooperativas de mineração urbana. **Brazilian Journal of Business**, v. 3, n. 5, p. 3647-3660. DOI:<https://doi.org/10.34140/bjbv3n5-010>
- HARARI, Y. N. (2018). Sapiens - **Uma breve história da Humanidade**. Porto Alegre, RS: L&PM.
- HARIRI, M. S. B.; ABU-ZIED, R. H. (2018). Factors influencing heavy metal concentrations in the bottom sediments of the Al-Kharrar Lagoon and Salman Bay, eastern Red Sea coast, Saudi Arabia. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, p. 495 <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3838-2>
- HENCKENS, M. L. C. M.; DRIESSEN, P. P. J.; WORRELL, E. (2016). How can we adapt to geological scarcity of antimony? Investigation of antimony's substitutability and of other measures to achieve a sustainable use. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 108, p. 54-62. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.01.012.
- HUSEEN, H. M.; MOHAMMED, A. J. (2019). Heavy Metals Causing Toxicity in Animals and Fishes. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1294, p. 062028. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1294/6/062028/meta>. Acesso em 23 ago 2021.
- IBANESCU, D.; CAILEAN, D.; TEODOSIU, C.; FIORE, S. (2018). Assessment of the waste electrical and electronic equipment management systems profile and sustainability in developed and developing European Union countries. **Waste Management**, v. 73, p. 39-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.022>
- Ilankoon, I. M. S. K.; Ghorbani, Y.; Chong, M. N.; Herath, G.; Moyo, T.; Petersen, J. (2018). E-waste in the international context – A review of trade flows, regulations, hazards, waste management strategies and technologies for value recovery. **Waste Management**, 82, p. 258-275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.018>



- KAUR, M. (2021). A review on heavy metal accumulation and toxicity in biotic and abiotic componentes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, v. 889, p. 012062. DOI:<https://doi.org/10.1088/1755-1315/889/1/012062>
- KUEHR, R. (2019). E-waste seen from a global perspective. Editor(s): Vannessa Goodship, Ab Stevels, Jaco Huisman, In: **Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials. Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook (Second Edition)**. Woodhead Publishing, 2019, p. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102158-3.00001-X>.
- MCC – Microelectronics and Computer Technology Corporation. (2020). **Electronics Industry Environmental Roadmap**. 2020. Austin, EUA: MCC. Disponível em: <https://www.tshaonline.org/handbook/entries/microelectronics-and-computer-technology-corporation-mcc> Acesso em: 09 dez. 2021.
- MEENA, V.; DOTANIYA, M. L.; SAHA, J. K.; DAS, H.; PATRA, A. K. (2020). Impact of Lead Contamination on Agroecosystem and Human Health. In: Gupta D., Chatterjee S., Walther C. (eds) **Lead in Plants and the Environment. Radionuclides and Heavy Metals in the Environment**. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-21638-2\_4
- MEILI, L. (2012). Recuperação de cobalto de baterias íon-lítio através de lixiviação ácida e eletro-obtenção. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [S.l.], v. 1, p. 868- 869. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/viewFile/4265/2817>. Acesso em: 18 nov. 2021.
- MESHARAM, P.; PANDEY, B.D.; ABHILASH, P. (2019). Perspective of availability and sustainable recycling prospects of metals in rechargeable batteries – **A resource overview**. *Resources Policy*, v. 60, p. 9-22. DOI: 10.1016/j.resourpol.2018.11.015.
- MOLETSANE, R. I.; VENTER, C. (2018). **Transboundary Movement of Electronic Waste, Issues and Challenges in African Countries**. *International Conference on Advances in Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD)*, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICABCD.2018.8465128.
- MUSZYNSKA, E.; LABUDDA, M. (2019) Dual Role of Metallic Trace Elements in Stress Biology – from Negative to Beneficial Impact on Plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, p. 3117. DOI: 10.3390/ijms20133117
- NRIAGU, J. O. (1996). **A History of Global Metal Pollution**. *Science*, Vol. 272 (5259), p. 223. DOI:10.1126/science.272.5259.223
- OLIVEIRA, J. D.; VANICE, S.; PIMENTEL, R. M. M.; SANTOS, S. M. (2017). Resíduos eletroeletrônicos: geração, impactos ambientais e gerenciamento. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 5, p. 1655-1667.
- OMS – Organização Mundial da Saúde (2021). Convenção de Minamata sobre o

Mercúrio: bibliografia anotada de recursos da OMS [Minamata convention on mercury: annotated bibliography of WHO information]. Genebra: Organização Mundial da Saúde; 2021.

PATIL, R.A., RAMAKRISHNA, S. A comprehensive analysis of e-waste legislation worldwide. **Environmental and Science Pollution Research**, v. 27, p. 14412–14431. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07992-1>

PIPERNO, A.; PELUCCHI, S.; MAFRIANI, R.(2020). Inherited iron overload disorders. **Translational Gastroenterology and Hepatology**, v. 5, n. 25, p. 1-23. DOI: 10.21037/tgh.2019.11.15

PJ-SC – Poder Judiciário de Santa Catarina (2020). **Descarte de resíduos eletroeletrônicos**. Disponível em: <https://www.tjsc.jus.br/web/gestao-socioambiental/descarte-de-residuos-eletroeletronicos>. Acesso em: 08 maio 2021.

PRASAD, S.; YADAV, K. K.; KUMAR, S.; GUPTA, N.; CABRAL-PINTO, M. M. S.; REZANIA, S.; RADWAN, N.; ALAM, J. (2021). Chromium contamination and effect on environmental health and its remediation: A sustainable approaches. **Journal of Environmental Management**, v. 285, p. 112174.

QUEIRUGA, D. e QUEIRUGA-DIOS, A. (2015): The Reuse of Waste Electrical and Electronic Equipment(WEEE). A Bibliometric Analysis. **International Journal of Waste Resources**, v. 5, n. 2, p. 1000177,2015. DOI: 10.4172/2252-5211.1000177

PROGRAMA SUSTENTARE (2017). **Brasil é o 2º maior gerador de e-lixo das Américas**. Disponível em:<https://sustentare.rs.gov.br/brasil-e-o-2-maior-gerador-de-e-lixo-das-americas>. Acesso em: 08 maio 2021

RAI, V.; LIU, D.; XIA, D.; JAYARAMAN, Y.; GABRIEL, J.-C.P. (2021). Electrochemical Approaches for the Recovery of Metals from Electronic Waste: A Critical Review. **Recycling**, v. 6, p. 53 DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling6030053>

SANDERGAARD, J. (2013). Dispersion and bioaccumulation of elements from an open-pit olivine mine in Southwest Greenland assessed using lichens, seaweeds, mussels and fish. – **Environmental Monitoring & Assessment**, v. 185, n. 5, p. 7025-7035. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3082-x>

SHOWKAT, A.; BHAT, S. A.; HASSAN, T.; MAJID, S. (2019). Heavy metal toxicity and their harmful effects on living organisms – a review. **International Journal of Medical Science And Diagnosis Research**, v. 3, n. 1, p. 106-122. Disponível em: <http://www.ijmsdr.com/index.php/ijmsdr/article/view/210>. Acesso em: 04 maio 2021.

SILVESTRI, L.; FORCINA, A.; ARCESE, G.; BELLA, G. (2020) Recycling technologies of nickel–metal hydride batteries: An LCA based analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, p. 123083. 2020DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.123083>.



- SMIL, V. (2016). **Still the iron age - Iron and steel in the modern world**. Elsevier, Bjutterworth-Heinemann.
- SOYLAK, M., CIHAN, Z., YILMAZ, E. (2013). Heavy metal contents of organically produced, harvested, and dried fruit samples from Kayseri, Turkey. – **Environmental Monitoring & Assessment**, v. 185,n. 3, p. 2577-2583. DOI: <https://doi.org/10.1007/M0661-012-2741-7>
- SPATOCCO, B. L.; OUCHI, T.; LAMBOTTE, G.; BURKE, P. J.; SADOWAY, D. R. (2015). Low-Temperature Molten Salt Electrolytes for Membrane-Free Sodium Metal Batteries. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 162, n. 14, p. A2729-A2736. DOI: 10.1149/2.0441514jes
- SRIVASTAVA, R. R.; PATHAK, P. (2020). Policy issues for efficient management of E-waste in developing countries. Editor(s): Majeti Narasimha Vara Prasad, Meththika Vithanage, Anwesa Borthakur, **Handbook of Electronic Waste Management**, Butterworth-Heinemann, p. 81-99. DOI:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817030-4.00002-4>.
- STURALA, J.; AMBROSI, A.; SOFER, Z.; PUMERA, M. (2018) Covalent Functionalization of Exfoliated Arsenic with Chlorocarbene. *Angewandte Chemie International Edition*, v. 30. DOI: 10.1002/anie.201809341
- STURALA, J.; SOFER, Z.; PUMERA, M. (2019). Coordination chemistry of 2D and layered gray arsenic: photochemical functionalization with chromium hexacarbonyl. **NPG Asia Materials**, v. 11, n. 42,p. 1-7.. DOI: 10.1038/s41427-019-0142-x
- SVERDRUP, U. H.; RAGNARSDOTTIR, K. V.; KOCA, D. (2015). Aluminium for the future: Modelling the global production, market supply, demand, price and long term development of the global reserves. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 103, p. 139-154. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.06.008.
- TABELIN, C. B.; PARK, I.; PHENGSAART, T.; JEON, S.; VILCORTE-TABELIN, M.; ALONZO, D.; YOO, K.; ITO, M.; HIROYOSHI, N. (2021). 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, p. 105610. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105610>.
- TIROLE, J. (2020). **Economia do bem comum**, tradução André Telles; revisão técnica Renato Gomes, Alípio Ferreira Cantisani. – 1 ed. Rio de Janeiro: Zahar.
- WU, W.; WU, P.; YANG, F.; SUN, D., L.; ZHANG, D. X.; ZHOU, Y. K. (2018). Assessment of heavy metal pollution and human health risks in urban soils around an electronics manufacturing facility, **Science of The Total Environment**, v. 630, p. 53-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.183>.
- ZHANG, W.; YANG, J.; WU, X.; HU, Y.; YU, W.; WANG, J.; DONG, J.; LI, M.; LIANG, S.; HU, J.; KUMAR, V. (2016). A critical review on secondary lead recycling technology and its prospect. **Renewable**



and Sustainable Energy Reviews, v. 61, p. 108-122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.046>.

ZUBI, G. DUFO-LÓPEZ, R.; CARVALHO, M.; PASAOGLU, G. (2018). The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 292-308.2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.002.

#### COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Richter, M. F., Oliveira, C. C., Morbach, J., Tavares, D. L. (2022). RESÍDUOS ELETRÔNICOS: EFEITOS NA SAÚDE HUMANA, IMPACTO AMBIENTAL E POTENCIAL ECONÔMICO. *Holos*, 5(38). Recuperado de <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/13979>

#### SOBRE OS AUTORES

##### M. F. RICHTER

Possui Graduação em Química (1990) e Doutorado em Bioquímica (1995) pela Albert-Ludwigs Universität Freiburg (Alemanha). Realizou Pós-Doutorado no Institut Pasteur na França (1995-1997), e depois como pesquisador visitante do CNPq no Centro de Biotecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (1997-1999). De 2000 a 2003 trabalhou junto ao Centro Integrado do Câncer (ULBRA) e a Fundação Sul-Americana para o Desenvolvimento de Drogas Anti-câncer. Atuou também como Orientador de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Genética e Toxicologia Aplicada (PPGGTA da ULBRA) (2006-2010). Atualmente, atua como professor adjunto na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul como professor adjunto (desde 2003). Exerceu a função de Presidente da Fundação de Ciência e Tecnologia (2016-2018). Desde março de 2018 está lecionando e atuando em projetos de pesquisa e de extensão nas áreas da Gestão Ambiental e Biotecnologia. Também é Membro do Conselho do Núcleo de Inovação Tecnológico - NITUergs. Em 2019 iniciou suas atividades como professor-orientador em 2 Mestrados profissionais: 1) Ambiente e Sustentabilidade (PPGAS-Uergs); e 2) Ciência e Tecnologia de Alimentos (PPGCTA-Uergs). É editor chefe do Blog REPENSE, que realiza divulgação e conscientização de assuntos ligadas a sustentabilidade. E-mail: [marc-richter@uergs.edu.br](mailto:marc-richter@uergs.edu.br). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0868-9127>

##### C. C. DE OLIVEIRA

Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, aprovado com voto de louvor. Possui mestrado em Direito, linha de pesquisa: Direito Ambiental e Biodireito pela Universidade de Caxias do Sul (2002), especialista em Direito e em Educação, graduação em Ciências Jurídicas e Sociais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1992); Professor Adjunto da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, 1º colocado no Concurso Público para docência. Líder do Grupo de Pesquisa UERGS/CNPq "Políticas, Gestão Pública e Desenvolvimento". Professor Permanente do Mestrado UERGS/Capes Ambiente e Sustentabilidade, na Linha de Pesquisa: Sociedade, Ambiente e Desenvolvimento. Tem experiência na área de Direito Público, Gestão e Políticas Públicas, Gestão de Recursos Hídricos e Saúde Coletiva, atuando principalmente nos seguintes temas: Direito Constitucional, Direito Administrativo, Direito ambiental, Gestão e Política ambiental, Gestão e Políticas Públicas, Direitos Sociais e Democracia. E-mail: [celmar-oliveira@uergs.edu.br](mailto:celmar-oliveira@uergs.edu.br). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6119-2187>



**J. MORBACH**

Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sustentabilidade da UERGS (2021), Pós-graduação Lato Sensu em Educação: Espaços e Possibilidades para a Educação Continuada IFSUL (2020 - em andamento), Pós-graduação em MBA em Marketing pela FGV (2002), Licencianda em Matemática (UFPEL em andamento), Licenciatura Plena - Curso Formação de professores para Educação Profissional pela UFSM (2018) e Graduada em Administração de Empresas pela Universidade Feevale (2000). Integrante do Grupo de Pesquisa Uergs/CNPq Políticas, Gestão Pública e Desenvolvimento. Possui experiências como consultora setorial e intervenção na área de estratégia, inovação, marketing, financeiro, qualidade, turismo, desenvolvimento de projetos, cooperativismo/associativismo, economia solidária, projetos sociais, Sincov e sustentabilidade. E-mail: [jaquemorbach@gmail.com](mailto:jaquemorbach@gmail.com). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0379-119X>

**D. L. TAVARES**

Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Sustentabilidade pela Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (2021), na modalidade Mestrado profissional; especialista em Docência para o Ensino Técnico (2015); graduada em Oceanografia pela Universidade Federal do Maranhão (2011). Integrante do Grupo de Pesquisa Uergs/CNPq Políticas, Gestão Pública e Desenvolvimento. Possuindo experiência em gerenciamento ambiental, Gestão de projetos educacionais, desenvolvimento de programas socioambientais e empreendedorismo social. E-mail: [daialtt@gmail.com](mailto:daialtt@gmail.com). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8440-9369>

**Editor(a) Responsável:** Leandro Silva Costa

**Pareceristas *Ad Hoc*:** Álefe Lopes Viana e Leandro Silva Costa



**Recebido 16 de agosto de 2022**

**Aceito: 25 de novembro de 2022**

**Publicado: 28 de dezembro de 2022**