



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE QUÍMICA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM QUÍMICA BACHARELADO

AMANDA SILVA FARIAS

**Análise da contaminação do solo por metais
potencialmente tóxicos em locais de
reciclagem de resíduos eletrônicos.**

Brasília - DF

2023

AMANDA SILVA FARIAS

**Análise da contaminação do solo por metais
potencialmente tóxicos em locais de reciclagem de
resíduos eletrônicos.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade de Brasília – Instituto de Química como
requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em
Química.

Orientador: Prof. Dr. Marcello Moreira Santos

Brasília – DF

2023

AMANDA SILVA FARIAS

Análise da contaminação do solo por metais potencialmente tóxicos em locais de reciclagem de resíduos eletrônicos.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade de Brasília – Instituto de Química como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Química.

Aprovado emde.....de 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcello Moreira Santos
Universidade de Brasília
(Orientador)

Prof.^a. Dr.^a Kátia Mara Oliveira
Universidade de Brasília
(Membro 1)

Prof.^a. Dr.^a Sílvia Cláudia Loureiro Dias
Universidade de Brasília
(Membro 2)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todo o corpo docente do Instituto de Química que compartilhou seu conhecimento e contribuiu para o meu processo de formação ao longo do curso, mas principalmente ao Prof. Marcello Moreira Santos por ser meu orientador dedicando atenção e tempo para esse trabalho.

Agradeço aos meus pais Roberval de Lima Farias e Anísia Silva Barbosa pelo apoio, incentivo e compreensão, pois sem o suporte de vocês não teria sido possível superar as dificuldades e concluir mais uma etapa.

Aos meus irmãos Gabriela Silva Farias e Lucas Silva Farias que sempre estiveram ao meu lado e compartilhando os momentos difíceis, mas também os momentos alegres ao longo da graduação.

Gostaria de agradecer minhas tias Leide Silva Barbosa e Neide Silva Barbosa, que sempre me incentivaram e acreditaram em mim.

Agradeço às minhas amigas Isabela Carolina e Gardenia Artemisa que me incentivaram nos momentos mais difíceis e me ajudaram a seguir em frente, mas principalmente pelo apoio ao longo de todo o tempo em que me dediquei a este trabalho.

Agradeço a todos que de alguma forma acreditaram em mim e fizeram parte da minha formação.

RESUMO

A geração de resíduos eletroeletrônicos se apresenta como um dos principais problemas ambientais da atualidade. Com o surgimento da pandemia do COVID-19, o aumento no consumo desses equipamentos foi intensificado e o resultado foi um crescimento na geração dos resíduos, principalmente no descarte incorreto desses produtos. Como esses materiais possuem em sua composição elementos com alto valor agregado, o descarte incorreto e o tratamento inadequado desses resíduos, além de colocar em risco a saúde humana e acabar contaminando o meio ambiente também resulta em perda econômica. Por esse motivo, o monitoramento do impacto do descarte desses resíduos é muito importante. Com o intuito de verificar se ocorre a contaminação do solo por Pb, Cr e Ni nesses locais, esse trabalho teve como objetivo propor um método de análise desses metais de forma simples e barata quando comparado com métodos analíticos mais sofisticados. Dessa forma, as amostras de solo foram submetidas a um processo de digestão ácida adaptada do método 3050b da EPA (Agência de Proteção Ambiental), utilizando HCl 32%, HNO₃ 65% e H₂O₂ 30% para tornar os íons de interesse mais disponíveis para a realização dessa análise. Depois as soluções foram tratadas com NaOH 6M e NH₄OH 6M, para retirada de Fe presente em grande quantidade no solo e que acaba interferindo na análise. Como agentes precipitantes são utilizados KI 0,5M para Pb, NH₄OH 6M para o Cr e solução de Dimetilglioxima 1% para precipitação do Ni. A partir dos resultados obtidos foi possível verificar que para Pb e Ni o método foi suficiente para verificar a presença desses metais, desde esses metais não estejam em concentrações muito baixas. Entretanto, para a análise do Cr o método não é eficiente. De modo geral, a precipitação de metais é uma alternativa barata e simples para analisar a contaminação do solo por metais potencialmente tóxicos, porém ainda possui algumas limitações.

Palavras-Chave: Metais tóxicos, Digestão de Solo, Resíduos Eletroeletrônicos

ABSTRACT

The generation of electronic waste is one of the main current environmental problems. With the emergence of the COVID-19 pandemic, increase in the consumption of this gadgets was intensified and the result was a growth in the generation of the waste, especially the incorrect disposal of these products. As the materials have in their composition elements with high value, incorrect disposal and improper treatment of this waste, in addition to endangering human health and end up contaminating the environment it also results in economic loss. For this reason, monitoring the impact of the disposal of this waste is very important. In order to verify if soil contamination by Pb, Cr and Ni occurs in these locations, this work aimed to propose a method of analysis of these metals in a simple and inexpensive way when compared with more sophisticated analytical methods. Therefore, the soil samples were submitted to an acid digestion process adapted from the EPA 3050b method, using HCl 32%, HNO₃ 65% and H₂O₂ 30% to make the ions of interest more available for this analysis. Then the solutions are treated with NaOH 6M and NH₄OH 6M, to remove Fe present in large quantities in the soil and that ends up interfering in the analysis. As precipitating agents are used KI 0.5M for Pb, NH₄OH 6M for Cr and 1% Dimethylglyoxime solution for precipitation of Ni. From the results obtained it was possible to verify that for Pb and Ni the method was sufficient to verify the presence of these metals, if these metals are not in very low concentrations. However, for the analysis of Cr the method is not efficient. In general, metal precipitation is a cheap and simple alternative to analyze soil contamination by potentially toxic metals, however, it has some limitations because it is a little sensitive method.

Keywords: Toxic Metals, Soil Digestion, Electrical and Electronic Waste

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Justificativa	3
3. Objetivos	4
3.1. Objetivo geral	4
3.2. Objetivo específico	4
4. Revisão bibliográfica	5
4.1. O que é lixo eletrônico?	5
4.2. Composição do lixo eletrônico	6
4.3. Impactos e riscos causados pelo lixo eletrônico	8
4.3.1. Impacto ambiental	8
4.3.2. Impactos para a saúde	9
5. Metodologia	12
5.1 Reagentes e Soluções	12
5.2 Equipamentos	12
5.3 Procedimentos Experimentais	12
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
7. Considerações finais	19
8. Referências	20

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRONIMOS

ABDI	Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno ou acrilonitrilo butadieno estireno
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
EEE	Equipamentos elétricos e eletrônicos
EPOXY	Epóxi
NBR	Norma Brasileira
PA	Acetato de Polivinilo
PBT	Polibutileno tereftalato
PC	Policarbonato
PCB	Bifenila policloradas
PE	Poliétileno
PET	Politereftalato de etileno
PMMA	Polimetilmetacrilato
POM	Polióxido de Metileno ou Poliacetal
PP	Polipropileno
PPO	Poli (óxido de p-fenileno)
PS	Poliestireno
PUR	Poliuretano
PVC	Policloreto de vinila
SAN	Estireno acrilonitrila
WEEE ou REEE	Resíduo de equipamentos elétricos e eletrônicos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico global de resíduos eletroeletrônicos gerador por ano e projeções futuras (HOCH,2016).....	2
Figura 2. Estrutura molecular dos PCBs (PENTEADO,2001)	8
Figura 3. Área de descarte irregular de resíduos	13
Figura 4. Amostra com (a) KI, (b) NH ₄ OH e (c) Dimetilglioxima 1%	15
Figura 5. Precipitação de PbI ₂	16
Figura 6. Após ajuste do pH com NH ₄ OH (a) KI, (b) NH ₄ OH e (c) Dimetilglioxima 1% ...	16
Figura 7. Após ajuste do pH com NaOH (a) KI, (b) NH ₄ OH e (c) Dimetilglioxima 1%	17
Figura 8. Após ajuste do pH com NaOH e adição de NH ₄ OH e solução de dimetilglioxima 1%	17
Figura 9. (a) Filtração do Fe(OH) ₃ formado e (b) Precipitado de Fe(OH) ₃	18
Figura 10. (a) Amostra com NaOH e (b) Amostra com NH ₄ OH.....	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Plásticos encontrados em equipamentos eletroeletrônicos. Adaptado de TOWNSED (2011).....	7
Tabela 2. Efeitos causados por elementos tóxicos encontrados nos REEE. Adaptado de GERBASE (2012), OLIVEIRA (2010) e ABDI (2012).....	10

1. Introdução

Com o surgimento da pandemia do COVID-19 foi possível observar um aumento no consumo de equipamentos eletrônicos. Segundo o site Estado de Minas (2022), um levantamento feito pela empresa Neotrust, mostra que o setor com maior faturamento em 2021 foi no segmento de celulares, eletrodomésticos e eletroeletrônicos, de forma que esse comportamento esteve associado a necessidade de adaptação a qual muitas pessoas foram submetidas e passaram a ficar mais tempo dentro de casa durante o período da pandemia (2020 – 2021) (ABCMM, 2020). Um exemplo disso é que as aulas passaram a ser ministradas no formato on-line, assim como os trabalhos foram migrados para o modelo home office.

Com o aumento no consumo desses equipamentos houve também um crescimento na geração de resíduos oriundos desses dispositivos que são descartados (lixo eletrônico), o que acaba gerando um fluxo de resíduos que apresentam materiais que podem ser tanto valiosos quanto tóxicos (FORTI et al,2020).

Para Oliveira (2010), “o lixo eletroeletrônico (e-waste ou waste of electrical and electronic equipment – WEEE) é mais um desafio que se soma a outros inúmeros problemas ambientais hoje enfrentados pela humanidade”. Ele afirma ainda que o crescimento desse lixo é resultado do fato de que à medida que a tecnologia avança a qualidade de vida dos consumidores se torna melhor e conseqüentemente faz com que a utilização dessas tecnologias se intensifique.

É importante observar que com o desenvolvimento constante de novos produtos junto com o ciclo de vida reduzido desses equipamentos, a fim de manter a cadeia produtiva em movimento, os modelos anteriores acabam se tornando desatualizados e contribuindo para a quantidade cada vez maior de resíduos, o que dificulta a coleta e reciclagem desses resíduos (FAVERA, 2008).

Uma alternativa encontrada por muitos países é doar o seu lixo eletrônico para países pobres, a fim de diminuir o acúmulo desses resíduos internamente mesmo que estes produtos tenham pouco tempo de vida (FERREIRA, 2010). Entretanto, apesar de parecer uma medida eficaz e de certa forma uma ajuda para esses países essas ações apenas resultam no adiamento do problema.

Como esse tipo de resíduo possui componentes produzidos com metais pesados, essas medidas que são adotadas acabam tendo como consequência impactos ambientais como por exemplo, a contaminação de lençóis freáticos por metais tóxicos como mercúrio e chumbo (HOCH,2016).

Segundo o relatório Resíduos Eletrônicos no Brasil - 2021, o descarte incorreto desses resíduos representa um grande desperdício, pois quando são reciclados podem ser convertidos em matéria-prima para outras indústrias. Além disso, quando o tratamento é feito de forma inadequada coloca em risco a saúde de muitas pessoas, principalmente crianças e mulheres (OMS,2021).

O relatório The Global E-waste Monitor 2020 (FORTI et al,2020) mostra que no ano de 2019 foram gerados 53,6 Mt de lixo eletrônico no mundo (Figura 1), de modo que o Brasil foi considerado o maior produtor desse tipo de resíduo na América Latina, para a OMS (2022) apenas 17,4% dos resíduos gerados em 2019 receberam o tratamento adequado. De acordo com outra pesquisa feita pela Organização das Nações Unidas (2022), somente 2,7% do lixo eletrônico produzido na América Latina é tratado da forma correta. Entre os dados que foram coletados pela pesquisa está a composição do lixo gerado, onde é possível observar a presença de diversos metais como mercúrio, cádmio e chumbo, além de gerar gases que contribuem para o efeito estufa.



Figura 1. Gráfico global de resíduos eletroeletrônicos gerador por ano e projeções futuras (HOCH,2016).

Dessa forma, esse trabalho busca caracterizar metais presentes em produtos eletrônicos com o intuito de investigar os possíveis problemas ambientais causados pelo descarte em locais inadequados e identificar os riscos à saúde que esses metais são capazes de provocar em pessoas que trabalham diretamente com esses resíduos.

2. Justificativa

Os estudos sobre os impactos que são gerados pelo acúmulo de REEE no ambiente é de extrema importância. Tendo em vista que, no Brasil, o monitoramento desse tipo de resíduo ainda é muito recente. É importante destacar que, esses equipamentos por possuírem componentes fabricados com elementos tóxicos, quando entram em contato com o ambiente sofrem alterações que geram mudanças no meio. Além disso, alguns metais ao entrarem em contato com o sistema biológico podem se acumular e causar graves danos à saúde.

Neste sentido, é possível observar a necessidade de explorar os impactos que esses dispositivos oferecem, quando são descartados de maneira incorreta. Possibilitando avaliar como ocorre a contaminação e os riscos que os componentes tóxicos presentes nesse tipo de resíduo podem desencadear.

3. Objetivos

3.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é analisar o solo de áreas onde é feito a coleta e reciclagem de equipamentos eletrônicos, com o intuito de identificar a presença de metais potencialmente tóxicos e verificar sua toxicidade para o meio ambiente.

3.2. Objetivos específicos

- * Analisar amostras de solos coletadas em locais responsáveis pela manipulação de resíduos eletrônicos;

- * Verificar a presença de elementos potencialmente tóxicos nas amostras por meio de reações de precipitação para analito;

- * Desenvolver um método simples e rápido para identificação de Pb, Cr e Ni;

- * Identificar os problemas ambientais gerados pelo descarte incorreto de equipamentos eletrônicos;

4. Revisão bibliográfica

4.1. O que é lixo eletrônico?

Os equipamentos eletroeletrônicos (EEE) incluem uma variedade de produtos, que podem ser domésticos ou comerciais, que contenham componentes ou circuitos elétricos que são alimentados por uma fonte ou por uma bateria. Os resíduos desses equipamentos se tornam lixo eletrônico uma vez que estes são descartados por seu proprietário sem a intenção de reutilização (Step Initiative 2014).

Para a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2012) o mais aconselhável seria que esses produtos só passassem a ser considerados resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) quando se encontram esgotadas todas as possibilidades de reparo, atualização ou reuso.

Ainda de acordo com a agência supracitada, o lixo eletrônico ou resíduo de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) pode ser dividido em quatro categorias amplas:

» Linha Branca: refrigeradores e congeladores, fogões, lavadoras de roupa e louça, secadoras, condicionadores de ar;

» Linha Marrom: monitores e televisores de tubo, plasma, LCD e LED, aparelhos de DVD e VHS, equipamentos de áudio, filmadoras;

» Linha Azul: batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, espremedores de frutas, aspiradores de pó, cafeteiras;

» Linha Verde: computadores desktop e laptops, acessórios de informática, tablets e telefones celulares.

Para a ABNT (2004) o processo de classificação dos resíduos é realizado de acordo com a norma NBR 10004 e “envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido”.

De acordo com essa classificação os resíduos podem ser:

- a) resíduos classe I – Perigosos;
- b) resíduos classe II – Não perigosos;
 - Resíduos classe II A – Não inertes.

– Resíduos classe II B – Inertes.

De acordo com essa norma os REEE podem ser classificados como resíduos perigosos, visto que a periculosidade de um resíduo é definida como:

“Característica apresentada por um resíduo que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, pode apresentar: a) risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices; b) riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.”
(ABNT, 2004)

Com o objetivo de diminuir os impactos causados pelo descarte incorreto dos REEE foi promulgada a lei 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que para a ABNT (2012) tem como finalidade “priorizar e compartilhar com todas as partes relacionadas ao ciclo de vida de um produto, a responsabilidade pela gestão integrada e pelo gerenciamento ambientalmente adequados dos resíduos sólidos”.

Para a Green Eletron (2019), gestora de logística reversa de eletrônicos com sede em São Paulo, essas medidas acabam incentivando a Economia Circular e garantindo a segurança econômica, por meio da geração de empregos e criação de novas empresas.

Dessa forma, com a adoção de medidas eficientes para o gerenciamento de resíduos, a expectativa é transformar os impactos negativos em benefícios para o desenvolvimento sustentável integrando a área econômica, ambiental e social (SANTOS,2014).

4.2. Composição do lixo eletrônico

Segundo o relatório The Global E-waste monitor 2020, é possível identificar a presença de até 69 elementos químicos diferentes nesses resíduos, que podem incluir metais preciosos (como ouro, prata e platina), matéria primas críticas (como cobalto, paládio e bismuto) e metais não críticos (como ferro e alumínio), que podem ser recuperados por meio de reciclagem reduzindo os impactos causados. Além dos metais é possível verificar também a presença de diversos outros materiais, principalmente, plástico, vidro e madeira (GERBASE, 2012).

A maior parte dos materiais presentes em resíduos eletrônicos que foram analisados no ano de 2019 é representada por ferro, alumínio e cobre, que podem ser reciclados e reutilizados para entrar novamente no processo de fabricação, diminuindo a necessidade de extrair mais materiais (FORTI, 2020).

Para Townsed (2011) um desafio para a reciclagem dos plásticos presentes nos REEE são os diferentes polímeros utilizados, isso se deve ao fato desses plásticos serem em sua maioria uma mistura de vários polímeros. Onde os principais polímeros plásticos encontrados são acrilonitrila butadieno estireno ou acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), polipropileno ou polipropeno (PP) e poliestireno (PS). A Tabela 1 abaixo mostra alguns tipos de plásticos que podem ser encontrados nos REEE.

Abreviação	Polímero Plástico
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno ou acrilonitrilo butadieno estireno
Epoxy	Epóxi
PA	Acetato de Polivinilo
PBT	Polibutileno tereftalato
PC	Policarbonato
PE	Poliétileno
PET	Politereftalato de etileno
PMMA	Polimetilmetacrilato
POM	Polióxido de Metileno ou Poliacetal
PP	Polipropileno
PPO	Poli (óxido de p-fenileno)
PS	Poliestireno
PUR	Poliuretano
PVC	Policloreto de vinila
SAN	Estireno acrilonitrila

Tabela 1. Plásticos encontrados em equipamentos eletroeletrônicos. Adaptado de TOWNSED (2011)

Alguns equipamentos possuem em sua composição componentes que são revestidos com produtos específicos formando uma camada de proteção com o intuito de evitar a corrosão do equipamento. Outro exemplo desses produtos é quanto ao uso de retardantes de chama

bromados, utilizado em invólucros de plástico e circuito impresso, que não somente retarda, mas quando possível dissipa a propagação das chamas no equipamento (ABDI, 2012).

Esses componentes podem apresentar ainda em sua composição poluentes orgânicos que podem ser tóxicos, como é o caso dos PCBs (bifenila policloradas) (Figura 2). Segundo a CETESB (2012), Companhia Ambiental do Estado de São Paulo responsável pelo controle, fiscalização e monitoramento da água, ar e solo do estado de São Paulo, “a exposição de animais a altos níveis de PCBs por curto prazo produziu efeitos hepáticos, hematológicos e endócrinos, danos renais e eventualmente a morte. Estudos epidemiológicos da exposição crônica às PCBs encontraram alterações hepáticas, imunológicas, oculares, dérmicas e na tireóide, efeitos neurocomportamentais, redução do peso ao nascer, toxicidade reprodutiva e aumento na incidência de tumores”.

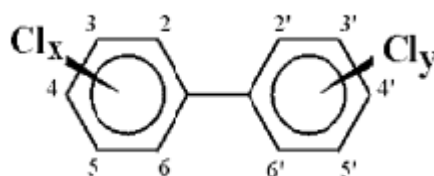


Figura 2. Estrutura molecular dos PCBs (PENTEADO,2001)

4.3. Impactos e riscos causados pelo lixo eletrônico

Com os avanços contínuos da tecnologia e o crescimento no consumo de equipamentos eletrônicos, é possível notar o acúmulo de toneladas de lixo eletrônico sendo descartadas em locais impróprios. Segundo a ONU (2018), parte dos resíduos urbanos vão parar em lixões ou são descartados no meio ambiente que tem como efeito a contaminação do solo, da água e do ar. De forma que se caracteriza como um risco tanto para o meio ambiente, quanto para a saúde humana.

4.3.1. Impacto ambiental

Oliveira (2010) acredita que o aumento da produção de EEE gera riscos como o consumo excessivo de recursos naturais que são utilizados na fabricação desses equipamentos. Além disso, outro fator que gera risco é o descarte inadequado desses equipamentos.

Isso acontece por que devido a presença de metais pesados na composição de alguns componentes eletrônicos como pilhas, baterias e cabos, esses resíduos acabam tendo certa dificuldade em se decompor no meio ambiente (SOUZA, 2022).

Hoch (2016) diz que a contaminação dos lençóis freáticos pode ocorrer quando metais como mercúrio, chumbo e berílio, são queimados liberando toxinas que são perigosas e quando enterrados incorretamente. Para Gerbase (2012), “quando o lixo é depositado em aterros não controlados há a possibilidade de ocorrer a lixiviação destes metais para o solo e para as águas subterrâneas e superficiais.”

Em consequência dos impactos causados por esses resíduos, atualmente o lixo eletrônico é visto como um dos principais problemas para o meio ambiente e para a saúde no mundo.

4.3.2. Impactos para a saúde

Segundo a ABDI (2012), a contaminação em pessoas pode ocorrer de duas maneiras: um indivíduo armazenando em casa equipamentos antigos ou por contato direto durante o trabalho em cooperativas que realizam a reciclagem desses equipamentos.

De acordo com a OMS (2022) em seu relatório “As crianças e as lixeiras digitais: a exposição ao lixo eletrônico e a saúde infantil” a contaminação em catadores de resíduos pode acontecer pela exposição dessas pessoas por:

- Ingestão de alimentos, água, terra e poeiras
- Inalação de gases e partículas de aerossóis
- Exposição dérmica.

Enquanto a exposição de criança e feto pode acontecer pela ingestão de leite materno e pela exposição transplacentária. A Tabela 2 mostra os efeitos da exposição de uma pessoa à metais pesados presentes no lixo eletrônico.

Substância Tóxica	Efeito toxicológico	Componente onde é encontrado
--------------------------	----------------------------	-------------------------------------

Chumbo	Causa danos ao sistema sanguíneo, ao sistema nervoso, ao sistema renal e ao fígado, podendo levar à morte.	Baterias, computadores celulares, televisores
Mercúrio	É altamente tóxico ao homem, apresenta efeito acumulativo e pode provocar lesões cerebrais, além de efeitos de envenenamento no sistema nervoso central e teratogênicos (deformação fetal).	Baterias, computadores, sensores, termostatos
Berílio	Carcinogênico (câncer no pulmão).	Computadores, celulares
Cádmio	Acumula-se nos rins, fígado, pulmões, pâncreas, testículos e coração; em intoxicação crônica pode gerar descalcificação óssea, lesão renal, enfisema pulmonar, além de efeitos teratogênicos (deformação fetal) e carcinogênicos (câncer).	Baterias, celulares, monitores de tubo, computadores
Arsênio	Causa danos aos sistemas respiratório, cardiovascular e nervoso, além de efeitos carcinogênicos.	Celular, transmissores, placas de circuito
Bromo	Causam desordens hormonais, nervosas e reprodutivas.	Retardantes de chama em circuitos impressos, fios e cabos

Tabela 2. Efeitos causados por elementos tóxicos encontrados nos REEE. Adaptado de GERBASE (2012), OLIVEIRA (2010) e ABDI (2012)

A combustão de resíduos eletrônicos pode liberar diretamente no meio ambiente substâncias que são perigosas como é o caso da incineração do PVC, que libera substâncias como dioxinas e furanos que alteram as funções hormonais dos seres humanos (GERBASE, 2012). Isso acontece, pois muitos lugares que trabalham no processo de reciclagem utilizam técnicas de processamento ultrapassadas, incluindo a queima a céu aberto de fios plásticos para a extração de cobre e banho em ácido de chips de computadores para a extração de ouro e paládio (OMS, 2021).

Portanto, a combinação de processos de reciclagem primitivos e a ausência de medidas de segurança e de proteção individual, são os principais responsáveis pela contaminação do meio ambiente e pelos riscos para a saúde dos trabalhadores e de todos aqueles que vivem junto das chamadas lixeiras digitais (OMS, 2022).

5. Metodologia

Este trabalho investiga a presença de elementos que podem apresentar alguma toxicidade para o meio ambiente e para a saúde humana (como Pb, Cd, Hg, As, entre outros) em locais responsáveis pelo tratamento de resíduos eletroeletrônicos, tendo em vista que, a acumulação desses metais pode gerar danos irreversíveis para a saúde, quando manipulados de forma inadequada.

Dessa forma, as análises realizadas nesse estudo serão de cunho qualitativo, a fim de avaliar e identificar se Pb, Cr e Ni estão presentes na composição do solo desses locais. Para isso o método de digestão ácida (3050b – USEPA) foi adaptado.

5.1 Reagentes e Soluções

Ácido Clorídrico 32% (Merck), Peróxido de Hidrogênio 30% (Vetec), Ácido Nítrico 65%, Solução de Dimetilglioxima 1% (Vetec), Hidróxido de Sódio 98% (Dinâmica), Hidróxido de Amônio 28 -30% (Dinâmica), Iodeto de Potássio 99% (NEON), Cloreto de Níquel 97% (Vetec), Acetato de Chumbo (Reagen), Cloreto de Cromo III 97% (Vetec). Todas as soluções foram preparadas com água destilada a temperatura ambiente nas seguintes concentrações diluídas e concentradas para os metais: Pb 0,0065 mol/L e 0,0113mol/L, Cr 0,0079 mol/L e 0,0160 mol/L e Ni 0,0089 mol/L e 0,0185mol/L. Os reagentes foram utilizados nas seguintes concentrações: KI 0,5M, NaOH 6M, NH₄OH 6M e HCl 1M.

5.2 Equipamentos

Chapa de agitação magnética com controle de temperatura.

5.3 Procedimentos Experimentais

Coleta da amostra

Para a realização desse trabalho foram coletadas duas amostras de solo retiradas de uma profundidade de aproximadamente 15cm. A primeira amostra foi coletada numa área próxima ao Centro Olímpico da Universidade de Brasília, onde a circulação de pessoas quase não ocorre. Já a segunda amostra foi retirada de um local onde ocorre o descarte irregular de resíduos sólidos (incluindo resíduos elétricos e eletrônicos), essa área está localizada no Setor

M Qnm 16 Conjunto B – Ceilândia, próximo a um posto de gasolina e de um posto de saúde (Figura 3).



Figura 3. Área de descarte irregular de resíduos localizada no Setor M Qnm 16 Conjunto B – Ceilândia,

Em três Erlenmeyers foram pesadas aproximadamente 1g da amostra recolhida no Centro Olímpico da UnB. Cada Erlenmeyer foi enumerado e foi adicionado ao erlenmeyer de número dois 3 mL de uma solução previamente preparada contendo Pb, Cr e Ni nas seguintes concentrações 0,0065 mol/L, 0,0079 mol/L e 0,0089 mol/L respectivamente. E ao terceiro Erlenmeyer foi colocada 1 mL de uma solução de Pb 0,0113mol/L, 1 mL de uma solução de Cr 0,0160 mol/L e 1 mL de uma solução de Ni 0,0185mol/L que também foram preparadas previamente.

Preparação da amostra coletada em local de descarte irregular para análise

A amostra coletada em local irregular foi pesada e colocada em dois Erlenmeyers, aproximadamente 1g em cada.

Digestão das amostras

Foi adicionado 15 mL de HCl 32% em cada amostra e colocadas tampadas (com vidro relógio) em uma chapa de aquecimento à temperatura de aproximadamente 250°C durante 1 hora. Em seguida, foi sendo adicionado de 5 em 5 mL o HNO₃ 65% até que não fosse observado a formação de um gás marrom, em intervalos de 1:30h. Depois o vidro relógio foi retirado para que a solução fosse reduzida para aproximadamente 10 mL. Em intervalos de 30 minutos foi colocado de 2 em 2 mL de H₂O₂ 30% até um volume total de 10 mL de H₂O₂ e novamente a

solução foi reduzida durante 2 horas. Em seguida, a solução foi diluída com água destilada em um balão volumétrico de 100 mL e filtrada a vácuo.

Método analítico

- **Amostra Centro Olímpico:**

Antes do ajuste do pH e retirada do ferro, as soluções foram testadas com os agentes precipitantes para verificar o comportamento de cada um.

Para o ajuste do pH foram utilizados NaOH 6M e NH₄OH 6M, para analisar em qual a precipitação dos metais ocorre de maneira mais eficiente. A medida do pH das soluções foi realizada com papel indicador universal.

Em três béqueres foram colocados 30 mL de cada solução e foi adicionado NH₄OH 6M até chegar em pH 9,5-10 para a total precipitação do ferro presente na amostra e filtrado para retirada do precipitado formado. Foi transferido 1 mL de cada solução para três tubos de ensaio. Após a retirada do ferro, o pH dos tubos com os números 1 e 2 foi novamente ajustado para pH entre 5-6 para Pb e pH 8 para Cr, respectivamente, pela adição de algumas gotas de HCl 1M. Posteriormente, foram adicionados os agentes para a precipitação dos metais. O mesmo procedimento foi realizado utilizando NaOH 6M.

- **Amostra Local de descarte irregular:**

Em um béquer foi colocado 30 mL de solução e foi adicionado NH₄OH 6M até chegar em pH 9,5-10 para a total precipitação do ferro presente na amostra. Foi transferido 1 mL da solução para três tubos de ensaio. Após a retirada do ferro o pH dos tubos 1 e 2 foi novamente ajustado pela adição de algumas gotas de HCl 1M.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

- **Amostra Centro Olímpico**

Antes do ajuste do pH, a adição dos agentes precipitantes forneceu os seguintes resultados: para o KI as soluções adquiriram uma coloração amarelo-alaranjada, para o NH_4OH a solução ficou bastante turva e por fim para a Dimetilglioxima 1% nada foi observado, como mostra a Figura 4.

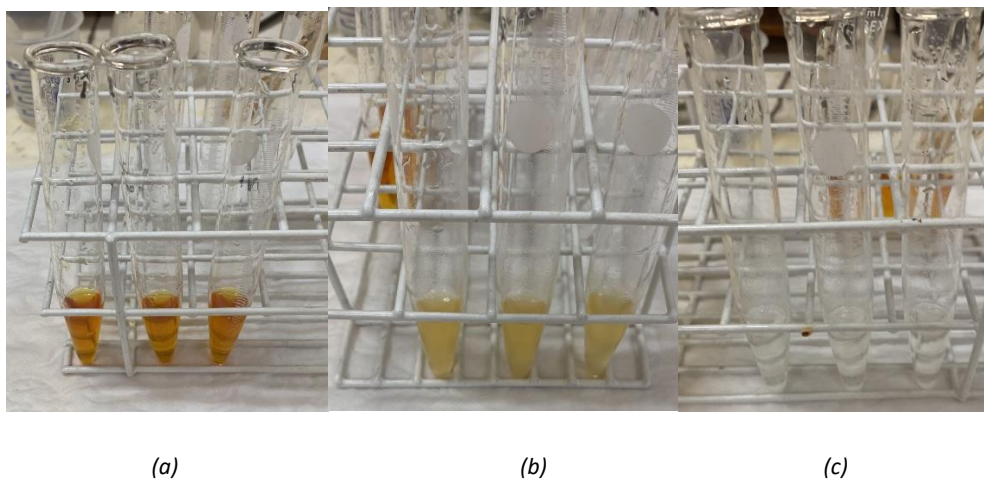


Figura 4. Amostra com (a) KI, (b) NH_4OH e (c) Dimetilglioxima 1%

Em (a) e (c) a solução encontra-se em pH muito ácido aproximadamente 2 e por esse motivo nenhum precipitado foi observado, entretanto quando a solução do tubo de ensaio 3 com KI foi descartada notou-se a presença de um corpo de fundo amarelo indicando que houve a precipitação de PbI_2 (Figura 5). Em (b), com a adição de NH_4OH , o pH começa a aumentar e é possível ver que a solução começa a ficar turva em todos os tubos o que indica o início da formação de precipitados que contenham ferro.



Figura 5. Precipitação de PbI_2

Após o ajuste do Ph para 9,5-10 tanto para o NaOH 6M quanto para o NH_4OH 6M foi observado que apenas em meio fortemente amoniacal ocorre a precipitação de Ni com dimetilglioxime 1% (Figuras 6c e 8) nos tubos de ensaio número 3. Para KI e NH_4OH 6M com adição de HCl 1 M (Figuras 6a, 6b, 7a e 7b), não foi possível observar a precipitação de chumbo e cromo. A ausência do Pb e Cr pode ser explicada pela precipitação desses metais na forma de hidróxidos ($Cr(OH)_3$ e $Pb(OH)_2$) e ocorrer ao mesmo tempo em que o $Fe(OH)_3$ é formado em maior quantidade (Figura 9) o que acaba interferindo na visualização dos precipitados.

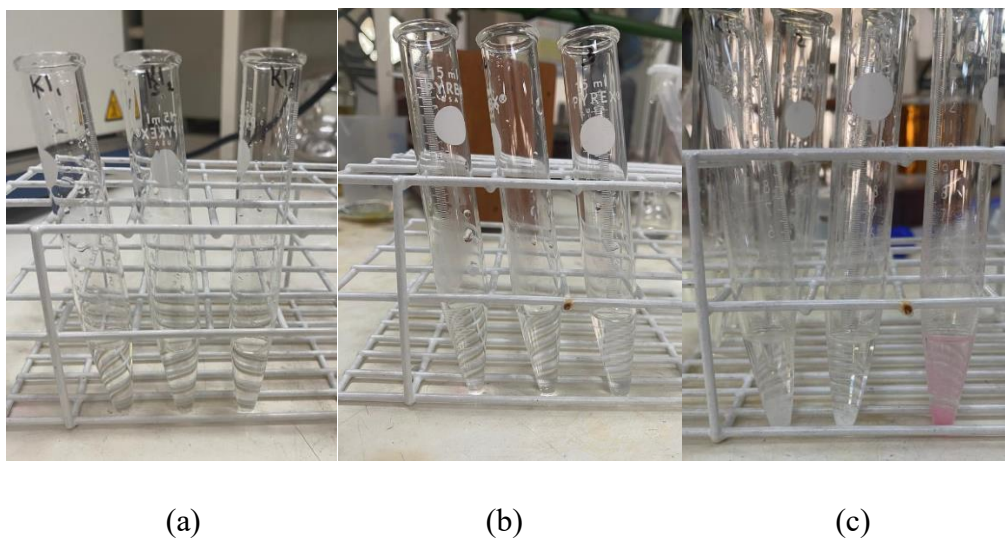


Figura 6. Fotografia das amostras após ajuste do pH com NH_4OH (a) KI, (b) NH_4OH e (c) Dimetilglioxima 1%



(a)

(b)

(c)

Figura 7. Fotografia das amostras após ajuste do pH com NaOH (a) KI, (b) NH₄OH e (c) Dimetilgloxima 1%



Figura 8. Após ajuste do pH com NaOH e adição de NH₄OH e solução de dimetilgloxima 1%

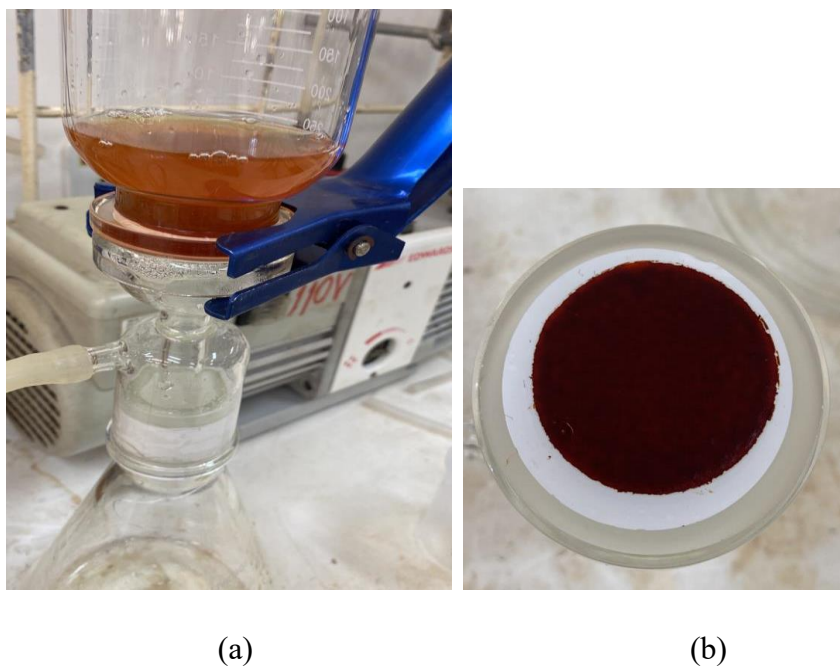


Figura 9. (a) Filtração do $Fe(OH)_3$ formado e (b) Precipitado de $Fe(OH)_3$

- **Amostra Local de descarte irregular**

Para a amostra coletada em local irregular após o ajuste do pH utilizando NaOH 6M e NH_4OH 6M, retirada do ferro e adição do HCl 1M (Figura 10), não foram observadas formação de precipitado nas soluções. O que pode indicar que não há a presença desses metais no solo ou que a concentração desses metais pode ser muito pequena.

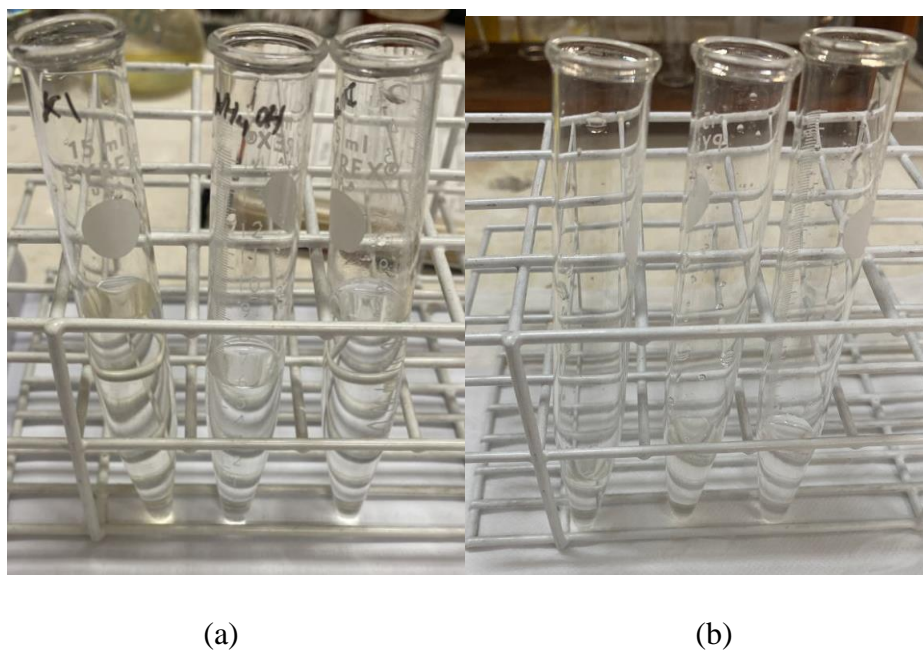


Figura 10. (a) Amostra com NaOH e (b) Amostra com NH_4OH

7. Considerações finais

Nos últimos anos, principalmente após a pandemia do COVID-19, o crescimento acelerado na geração de REEE tem sido uma preocupação constante para as autoridades em todo o mundo. No Brasil, apesar de recente, as legislações tentam frear os danos causados com a implementação de logística reversa para todas as empresas. O monitoramento do descarte e tratamento de resíduos eletroeletrônicos é uma etapa crucial no gerenciamento desses equipamentos, já que o risco associado ao descarte e tratamento incorreto acaba gerando danos que podem ser irreversíveis para a saúde e para o meio ambiente.

Nos experimentos realizados com as amostras podemos verificar que os testes iniciais com a amostra coletada no Centro Olímpico, a qual foram adicionadas as soluções contendo concentrações de Pb e Ni acima de 0,01 mol/L o método foi promissor. Entretanto, para o chumbo a formação do precipitado pode ser observada após o descarte da solução e antes do ajuste do pH para a retirada do Fe presente na amostra. Para o cromo o procedimento não se mostrou eficiente, por que tanto o Cr como o Fe formam hidróxidos gelatinosos e a grande quantidade de ferro dificulta a observação do $\text{Cr}(\text{OH})_3$. A presença de grandes quantidades de NH_4OH no meio após a retirada de Fe, é indispensável para que a precipitação do Ni com dimetilglioxima ocorra. Quando a solução é tratada com NaOH, há a necessidade de adicionar NH_4OH para que o Ni consiga ser precipitado.

Os testes realizados na amostra coletada no local de descarte irregular não mostraram a presença de nenhum dos metais analisados. Entretanto, não é possível afirmar que o solo está livre de contaminação, já que o método de análise proposto neste trabalho ainda possui algumas limitações para concentrações muito baixas dos metais analisados. Mas apesar de apresentar algumas limitações o método se mostrou válido como uma alternativa mais barata para a análise de Pb e Ni.

8. Referências

ABCOMM. Associação Brasileira de Comércio Eletrônico, 2020. Faturamento do e-commerce cresce 56,8% neste ano e chega a R\$ 41,92 bilhões. Disponível em: < <https://analiticaqmcresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf> >. Acesso em 04 de novembro de 2022.

ABDI. Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2012. Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos - Análise de Viabilidade Técnica e Econômica. Disponível em: < http://www.resol.com.br/textos/dwnl_1362058667.pdf >. Acesso em 04 de janeiro de 2023.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 10004, 2004. Disponível em: < <https://analiticaqmcresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf> >. Acesso em 04 de janeiro de 2023.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010. Disponível em: < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm >. Acesso em 05 de janeiro de 2023.

CETESB. Ficha de Informação Toxicológica, julho de 2012. Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2020/07/PCBs-Bifenilas-policloradas.pdf> >. Acesso em 17 de janeiro de 2023.

DEUBZER, O.; HERRERAS, L.; HAJOSI, E.; HILBERT, I.; BUCHERT, M.; WUISAN, L.; ZONNEVELD, N. “Baseline and gap/obstacle analysis of standards and regulations – CEWASTE Voluntary Certification Scheme for Waste Treatment”, 2019. Disponível em: < https://cewaste.eu/wp-content/uploads/2020/03/CEWASTE_Deliverable-D1.1_191001_FINAL-Rev.200305.pdf >. Acesso em 10 de janeiro de 2023.

EM. Estado de Minas, 2022. Com pandemia, vendas pela internet crescem 27% e atingem R\$ 161 bi em 2021. Disponível em: < https://www.em.com.br/app/noticia/economia/2022/02/02/internas_economia,1342064/com-pandemia-vendas-pela-internet-crescem-27-e-atingem-r-161-bi-em-2021.shtml >. Acesso em 04 de novembro de 2022.

FAVERA, E.C.D. Lixo eletrônico e a sociedade. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008. Disponível em: <<http://www-usr.inf.ufsm.br/~favera/elc1020/t1/artigo-elc1020.pdf>>. Acesso em 08 de novembro de 2023.

FERREIRA, D. da C.; SILVA, J. B. da; GALDINO, J. C. da S. RECICLAGEM DE LIXO ELETRÔNICO. HOLOS, [S. l.], v. 5, p. 105–113, 2011. DOI: 10.15628/holos.2010.559. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/559>. Acesso em: 19 jan. 2023.

FORTI, V.; BALDÉ, C. P.; KUEHR, R.; BEL, G. The Global E-waste Monitor 2020. Disponível em: < <https://ewastemonitor.info/gem-2020/>>. Acessado em 08 de novembro de 2022.

GERBASE, A. E.; OLIVEIRA, C. R. Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química. **Química Nova**, v. 35, n. 7, 1486-1492, 2012.

GREEN ELETRON. Gestora para Resíduos de Equipamentos eletroeletrônicos Nacional. Os impactos do lixo eletrônico no planeta, 2019. Disponível em: < <https://greeneletron.org.br/blog/os-impactos-do-lixo-eletronico-no-planeta/> >. Acessado em 02 de dezembro de 2022.

GREEN ELETRON. Gestora para Resíduos de Equipamentos eletroeletrônicos Nacional. RESÍDUOS ELETRÔNICOS NO BRASIL - 2021. Disponível em: < <https://greeneletron.org.br/pesquisa> >. Acessado em 02 de dezembro de 2022.

NU. Nações Unidas Brasil. Lixo eletrônico representa 'crescente risco' ao meio ambiente e à saúde humana, diz relatório da ONU, 2018. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/78844-lixo-eletronico-representa-crescente-risco-ao-meio-ambiente-e-saude-humana-diz-relatorio-da> >. Acessado em 02 de dezembro de 2022.

OLIVEIRA, R. S.; GOMES, E. S.; AFONSO, J. C. Lixo Eletrônico: Uma abordagem para o Ensino Fundamental e Médio. **Química Nova**, vol. 32, n. 4, 2010.

OMS. Organização Mundial da Saúde. As crianças e as lixeiras digitais: a exposição ao lixo eletrônico e a saúde infantil, 2022. Disponível em: < <https://www.who.int/pt/publications/i/item/9789240023901> >. Acessado em 02 de dezembro de 2022.

OMS. Organização Mundial da Saúde. Iniciativa da OMS sobre o lixo eletrônico e a saúde infantil, 2021. Disponível em: < <https://www.who.int/pt/publications/i/item/WHO-HEP-ECH-CHE-21-01> >. Acessado em 20 de janeiro de 2023.

PENTEADO, J. C. P.; VAZ, J. M. O LEGADO DAS BIFENILAS POLICLORADAS (PCBs). **Química Nova**, Vol. 24, No. 3, 390-398, 2001.

SANTOS, C. A. F.; NASCIMENTO, L. F. M.; NEUTZLING, D. M. A Gestão dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) e as Consequências para a Sustentabilidade: As Práticas de Descarte dos Usuários Organizacionais. **Revista Capital Científico – Eletrônica (RCCe)**. Vol. 12 n.1 – janeiro/março 2014.

SOUZA, K. A. O.; SANTOS, A. L. O lixo eletrônico e seus riscos à saúde: uma abordagem voltada para a Educação Básica. **Revista Insignare Scientia**, vol. 5, n. 1, 2022.

Step Initiative. 2014. “One Global Definition of E-Waste”. United Nations University. Disponível em: < https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6120/step_one_global_definition_Amended.pdf >. Acessado em 03 de janeiro de 2023.

TOWNSED, T. G. Environmental Issues and Management Strategies for Waste Electronic and Electrical Equipment. **Journal of the Air & Waste Management Association** 61, pages 587-610, 2011.

Wagner, M.; Baldé, C.P.; Luda, V.; Nnorom, I. C.; Kuehr, R.; Iattoni, G. REGIONAL E-WASTE MONITOR, 2022. Disponível em: < <https://ewastemonitor.info/regional-e-waste-monitor-for-latin-america-2022/> >. Acessado em 08 de novembro de 2022.

United Nations Environment Programme, 2009. Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies: Recycling - From E-Waste to Resources. Disponível em: < <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/33112> >. Acessado em 10 de janeiro de 2023.

U.S. EPA. 1996. “Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils,” Revision 2. Washington, DC. Disponível em: < <https://www.epa.gov/esam/epa-method-3050b-acid-digestion-sediments-sludges-and-soils> >. Acessado em 05 de fevereiro de 2023.