Universidade Federal do Sul da Bahia – UFSB
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia – IFBA
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais – PPGCTA

Thaise Alves dos Santos

AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DO LIXÃO DE PORTO SEGURO (BA) EM COMPARTIMENTOS NATURAIS ABIÓTICOS

Orientador: Prof. Dr. Nadson Ressyé Simões da Silva
Coorientador: Prof. Dr. Mário Marques da Silva Júnior

PORTO SEGURO – BA
JULHO – 2021

Thaise Alves dos Santos

AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DO LIXÃO DE PORTO SEGURO (BA) EM COMPARTIMENTOS NATURAIS ABIÓTICOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB) e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais para obtenção do Título de Mestre em Ciências e Tecnologias Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Nadson Ressyé Simões da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Mário Marques da Silva Júnior

PORTO SEGURO – BA

JULHO – 2021

Thaise Alves dos Santos

AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DO LIXÃO DE PORTO SEGURO (BA) EM COMPARTIMENTOS NATURAIS ABIÓTICOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB) e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais para obtenção do Título de Mestre em Ciências e Tecnologias Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Nadson Ressyé Simões da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Mário Marques da Silva Júnior

Este trabalho foi submetido a avaliação e julgado aprovado em: 30/julho/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Allison Gonçalves Silva

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia

Prof. Dr. Marcos de Almeida Bezerra

Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Danilo Junqueira Leão

Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

PORTO SEGURO – BA

JULHO – 2021

Dados internacionais de catalogação na publicação (CIP)
Universidade Federal do Sul da Bahia – Sistema de Bibliotecas

S237a Santos, Thaise Alves dos, 1993 -
Avaliação do impacto ambiental do lixão de Porto Seguro (BA) em compartimentos naturais abióticos. / Thaise Alves dos Santos. – Porto Seguro, 2021.
91 f.

Orientador: Nadson Ressyé Simões da Silva
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Sul da Bahia. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais. Campus Sosígenes Costa.

1. Resíduos Sólidos Municipais. 2. Lixo. 3. Cienciometria. 4. Solo. 5. Água. I. Silva, Nadson Ressyé Simões da. II. Título.

CDD – 363.728

Elaborado por Lucas Sousa Carvalho - CRB-5/ 1883

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de concluir mais esse ciclo.

À minha família, em especial ao meu filho, Nicolas, e ao meu tio José Nilton.

Às amigas e aos amigos que me incentivaram e ajudaram durante todo o percurso: Indiara Marinho, Thalita Maciel, Marcella Furst, Priscila Ferreira, Fabiano Silva, Israel Oliveira, Bárbara Zanatta, Dalliane Soares, Luan Ramos.

Ao meu orientador, Nadson Ressyé, e ao meu coorientador, Mário Marques.

Ao professor Allison Gonçalves.

Ao Projeto Desenvolvimento Socioambiental para a Agricultura Familiar (DSAF) da UFSB, especialmente às professoras Florisvalda Santos e Gabriela Narezi.

Ao Laboratório de Ecologia Marinha (LECOMAR) da UFSB, especialmente à professora Fabiana Félix.

Aos professores Silvio Sasaki, Jaílson Novais, Marcus Bandeira, Marcos Bezerra e Danilo Junqueira.

A Leonardo Dias e Marcionila Adães.

A Raquel Viana e a Samuel Dias.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL 7
ABSTRACT 8
LISTA DE TABELAS 9
LISTA DE FIGURAS 11
INTRODUÇÃO GERAL 13
REFERÊNCIAS 16
CAPÍTULO 1 19
RESUMO 19
ABSTRACT 20
1. INTRODUÇÃO 21
2. MATERIAL E MÉTODOS 24
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 26
4. CONCLUSÃO 34
5. REFERÊNCIAS 35
6. MATERIAL SUPLEMENTAR 41
CAPÍTULO 2 46
RESUMO 46
ABSTRACT 47
1. INTRODUÇÃO 48
2. MATERIAL E MÉTODOS 52
2.1. Área de estudo 52
2.2. Amostragem 53
2.3. Análises 56
2.3.1. Água 56
2.3.2. Sedimento e Solo 57
2.3.2.1. Digestão ácida em bloco digestor 57
2.3.3. Análise de metais em água, sedimento e solo 58
2.3.3.1. Curvas de calibração 58
2.3.3.2. Instrumentação 58
2.4. Tratamento dos dados 59
2.4.1. Água 59
2.4.1.1. Índice de Poluição por Metal (MI) e Índice de Poluição (PI) 59

2.4.2. Solo e sedimentos 60
2.4.2.1. Índice de Geoacumulação 60
2.4.2.2. Avaliação de risco não carcinogênico por Ingestão Diária Crônica (CDI) 61
2.4.3. Análises estatísticas 62
2.4.3.1. Testes t de Student e Teste de Wilcoxon 62
2.4.3.2. Análise de Componentes Principais (PCA) 62
2.4.3.3. Correlação de Pearson 62
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 63
3.1. Performance analítica do MIP OES 63
3.2. Avaliação das concentrações de metais potencialmente tóxicos e de outros parâmetros de qualidade em amostras de água, sedimento e solo 65
3.3. Correlação de Pearson 74
3.4. Análise de Componentes Principais 76
3.5. Índice de Poluição (PI) e Índice de Poluição por Metal (MI) 78
3.6. Índice de Geoacumulação 80
3.7. Avaliação de risco de Ingestão Diária Crônica (CDI) 82
3.8. Estudo comparativo com outras áreas do mundo 88
4. CONCLUSÃO 90
5. REFERÊNCIAS 92
CONCLUSÃO GERAL 103

Avaliação do impacto ambiental do lixão de Porto Seguro (BA) em compartimentos naturais abióticos

RESUMO GERAL

O problema do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é mundial, pois poucos países possuem tratamento efetivo para o lixo e este pode causar diversos danos ambientais ao ser direcionado para aterros e lixões. Entre os perigos dessa conduta se encontra a contaminação dos recursos naturais por metais potencialmente tóxicos (MPT). Apesar da Política Nacional de Resíduos Sólidos brasileira ter definido que os lixões brasileiros devem ser extintos a curto prazo, muitos munícipios ainda utilizam esse tipo logradouro como destino final para seus RSU, como é o caso de Porto Seguro (BA). Desse modo, esse estudo se dividiu em duas partes: na primeira foi feita uma análise cienciométrica para avaliar a produção de trabalhos científicos que investigaram a contaminação de água, solo e/ou sedimento por MPT resultantes da decomposição de RSU em lixões e aterros, visando identificar se os estudos eram diagnósticos ou mitigatórios; além disso também se observou a evolução da produção científica brasileira sobre o tema após a implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos. A recuperação das produções foi realizada na *Web of Science*, obtendo-se 701 artigos, dos quais 178 foram selecionados. Verificou-se que houve uma tendência ao aumento do número de publicações principalmente a partir de 2008. A maioria dos artigos foi de caráter diagnóstico. Observou-se que a maior parte dos estudos investigou a presença de metais no solo e que os metais mais pesquisados foram chumbo, zinco, cobre, cromo, cádmio e níquel. A maioria dos trabalhos foi desenvolvida na Nigéria. O Brasil publicou apenas sete estudos. Não foi possível perceber alterações significativas na produção brasileira sobre o tema antes e após a criação da PNRS. Na segunda seção foi realizado um estudo diagnóstico na área próxima ao lixão de Porto Seguro (BA) para verificar a hipótese de que a presença do depósito de lixo irregular contribui para o aumento das concentrações de MPT na água e no sedimento do rio Buranhém e no solo da área adjacente ao lixão, para isso foram avaliadas as concentrações de Cr, Ni, Cu, Zn, Cd e Pb em água, solo e sedimento, além de outros parâmetros de qualidade das três matrizes, sendo eles: temperatura, pH, oxigênio dissolvido, salinidade, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, alcalinidade total, nitrito, nitrato, nitrogênio total, amônia, fósforo total, sólidos totais, demanda bioquímica de oxigênio e coliformes termotolerantes para água, pH, umidade, cinzas, matéria orgânica e carbono orgânico total para sedimento e solo. A determinação dos metais nas matrizes foi feita por Espectrofotometria de Emissão Atômica com Plasma de Microondas; as amostras de sedimento e solo foram digeridas antes da leitura dos metais (USEPA, método 3050-B). As concentrações dos metais variaram da seguinte forma: água (mg L^{-1}): Cr: 0,005-0,079, Cu: 0,003-0,005; sedimento (mg kg^{-1}): Cd: 0,10-0,17, Cr: 0,49-1,69, Cu: 0,79-1,23, Pb: 2,07-4,11, Zn: 3,55-9,75; solo (mg kg^{-1}): Cr: 5,50-32,16, Cu: 1,50-16,44, Ni: 0,87-7,75, Pb: 3,93-24,44, Zn: 2,57-62,65. A concentração de Cr na água do ponto 6 (0,079 mg L^{-1}) excedeu o limite indicado pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (0,05 mg L^{-1}). Os sedimentos analisados possuíam, em maioria, pH alcalino, e os solos pHs ácidos. O sedimento apresentou menores teores de matéria orgânica em comparação com o solo (5,20-17,99% e 10,64-49,07%, respectivamente). A correlação de Pearson mostrou mais interações fortes para o solo. O Índice de poluição mostrou pontos do rio afetados por Cu. O Índice de Poluição por Metal (MI) mostrou que o ponto 6 está no limiar de risco de poluição por metais. O Igeo do solo indicou caráter fortemente a extremamente poluído por Zn nos pontos 3 e 4. A CDI apontou que o maior risco não carcinogênico para a saúde humana vem da presença de Cd no ponto 7 de sedimento e no ponto 4 de solo.

Palavras-chave: Resíduos sólidos municipais. Lixo. Cienciometria. Solo. Água. Sedimento.

Environmental impact assessment of the Porto Seguro (BA) landfill in natural abiotic compartments

ABSTRACT

The problem of managing urban solid waste (MSW) is global, as few countries have effective treatment for waste and this can cause several environmental damages when directed to landfills and dumps. Among the dangers of this conduct is the contamination of natural resources by potentially toxic metals (MPT). Although the Brazilian National Solid Waste Policy has defined that Brazilian dumps must be closed in the short term, many municipalities still use this type of land as a final destination for their MSW, as is the case in Porto Seguro (BA). Thus, this study was divided into two parts: in the first, a scientometric analysis was carried out to evaluate the production of scientific papers that investigated the contamination of water, soil and/or sediment by MPT resulting from the decomposition of MSW in dumps and landfills, aiming at identify whether the studies were diagnostic or mitigating; in addition, the evolution of Brazilian scientific production on the subject was also observed after the implementation of the National Solid Waste Policy. The retrieval of productions was performed on the Web of Science, resulting in 701 articles, of which 178 were selected. It was found that there was a trend towards an increase in the number of publications, especially from 2008 onwards. Most articles were of a diagnostic nature. It was observed that most studies investigated the presence of metals in the soil and that the most researched metals were lead, zinc, copper, chromium, cadmium and nickel. Most of the work was carried out in Nigeria. Brazil published only seven studies. It was not possible to notice significant changes in Brazilian production on the subject before and after the creation of the PNRS. In the second section, a diagnostic study was carried out in the area close to the Porto Seguro (BA) landfill to verify the hypothesis that the presence of the irregular garbage dump contributes to the increase in MPT concentrations in the water and sediment of the Buranhém River and in the soil from the area adjacent to the dump, for this, the concentrations of Cr, Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in water, soil and sediment were evaluated, as well as other quality parameters of the three matrices, namely: temperature, pH, oxygen dissolved, salinity, electrical conductivity, total dissolved solids, total alkalinity, nitrite, nitrate, total nitrogen, ammonia, total phosphorus, total solids, biochemical oxygen demand and thermotolerant coliforms for water, pH, moisture, ash, organic matter and organic carbon total for sediment and soil. The determination of metals in the matrices was made by Microwave Plasma Atomic Emission Spectrophotometry; sediment and soil samples were digested before metal reading (USEPA method 3050-B). Metal concentrations varied as follows: water (mg L^{-1}): Cr: 0,005-0,079, Cu: 0,003-0,005; sediment (mg kg^{-1}): Cd: 0,10-0,17, Cr: 0,49-1,69, Cu: 0,79-1,23, Pb: 2,07-4,11, Zn: 3,55-9,75; soil (mg kg^{-1}): Cr: 5,50-32,16, Cu: 1,50-16,44, Ni: 0,87-7,75, Pb: 3,93-24,44, Zn: 2,57-62,65. The Cr concentration in water at point 6 (0,079 mg L^{-1}) exceeded the limit indicated by the National Environmental Council (0,05 mg L^{-1}). The analyzed sediments had, for the most part, alkaline pH, and the soils had acidic pH. The sediment had lower organic matter contents compared to the soil (5,20-17,9%) and 10,64-49,07%, respectively. Pearson's correlation showed more strong interactions for the soil. The Pollution Index showed points in the river affected by Cu. The Metal Pollution Index (MI) showed that point 6 is at the threshold of metal pollution risk. The soil igeo indicated strongly to extremely polluted by Zn at points 3 and 4. The CDI pointed out that the greatest non-carcinogenic risk to human health comes from the presence of Cd at point 7 of sediment and point 4 of soil.

***Keywords*:** Municipal solid waste. Trash. Scientometrics. Ground. Water. Sediment.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 – Termos utilizados na pesquisa bibliográfica na plataforma Web of Science 24
Tabela 2 – Quantitativo de publicações que abordam a contaminação de diferentes matrizes por metais potencialmente tóxicos de aterros e lixões por periódicos (2000-2019).....41

CAPÍTULO 2

Tabela 1 – Coordenadas geográficas dos pontos de coleta de solo e distância aproximada entre os pontos e o lixão e entre os pontos e o rio Buranhém 54
Tabela 2 – Coordenadas geográficas dos pontos de coleta de água e sedimento e distância aproximada entre os pontos e o lixão 55
Tabela 3 – Metodologias utilizadas nas análises de água superficial.....57
Tabela 4 – Metodologias utilizadas nas análises de sedimento e solo superficial 57
Tabela 5 – Parâmetros instrumentais e do método no MP-AES Agilent 4210 59
Tabela 6 – Descrição e valores dos fatores citados nas equações de avaliação de risco para crianças e adultos (Equações 4 a 10).....61
Tabela 7 – Figuras de mérito do procedimento analítico de quantificação de metais potencialmente tóxicos em amostras de água, sedimento e solo.....63
Tabela 8 – Curvas de adição de padrão para os metais Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn e seus respectivos níveis de efeito de matriz (%) para água, sedimento e solo 64
Tabela 9 – Determinação de Cd, Cr, Cu e Pb em material de referência certificado (média ± desvio padrão; n = 3).....64
Tabela 10 – Recuperações de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn adicionados a amostras de água, sedimento e solo (média ± desvio padrão; n = 3).....65
Tabela 11 – Estatística descritiva das concentrações de metais potencialmente tóxicos e de algumas propriedades físico-químicas de amostras de água superficial do Rio Buranhém em Porto Seguro (BA) e valores máximos legais para parâmetros de qualidade da água (n = 9) .66
Tabela 12 – Avaliação da influência da localização dos pontos de coleta em algumas propriedades físico-químicas de amostras de água do Rio Buranhém em Porto Seguro (BA) (valor médio ± desvio padrão; pontos à montante do lixão: n = 5; pontos à jusante do lixão: n = 4; NC = 95%).....67
Tabela 13 – Concentrações de metais potencialmente tóxicos nas amostras de água superficial do Rio Buranhém em Porto Seguro (BA) (média ± desvio padrão; n = 3) 68

Tabela 14 – Estatística descritiva das concentrações de metais potencialmente tóxicos e de algumas propriedades físico-químicas de amostras de sedimento do Rio Buranhém em Porto Seguro (BA) e valores máximos legais para parâmetros de qualidade de sedimentos (n = 9). 70
Tabela 15 – Avaliação da influência da localização dos pontos de coleta de sedimento nos resultados (valor médio ± desvio padrão; pontos à montante do lixão: n = 5; pontos à jusante do lixão: n = 4) 71
Tabela 16 – Estatística descritiva das concentrações de metais potencialmente tóxicos e de algumas propriedades físico-químicas de amostras de solo do lixão de Porto Seguro (BA) e área adjacente a ele e valores máximos legais para parâmetros de qualidade do solo (n = 7)..... 72
Tabela 17 – Avaliação da influência da localização dos pontos de coleta de solo nos resultados (valor médio ± desvio padrão; pontos fora do lixão: n = 3; pontos dentro do lixão: n = 4)..... 73
Tabela 18 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre as concentrações de metais pesados e outros parâmetros de qualidade em amostras de sedimento do rio Buranhém e de solo do lixão de Porto Seguro, Bahia e área adjacente..... 75
Tabela 19 – Cargas de fator de para os metais potencialmente tóxicos e demais parâmetros de qualidade do sedimento do rio Buranhém e do solo do lixão de Porto Seguro, Bahia e área adjacente 76
Tabela 20 – Índice de Poluição (PI) dos metais Cr, Cu e Zn medidos na água do Rio Buranhém de acordo com os níveis de referência para água doce classe II (CONAMA 357/2005) 78
Tabela 21 – Comparação de valores mínimos, máximos e médios das concentrações de metais obtidas na análise de solo desse estudo com os de trabalhos similares ao redor do mundo (mg kg^{-1})..... 88

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1 – Evolução temporal das publicações associando a contaminação de compartimentos naturais abióticos por metais potencialmente tóxicos de aterros e lixões (2000-2019) 26
Figura 2 – Matrizes estudadas nos artigos a respeito da contaminação de compartimentos naturais abióticos por metais potencialmente tóxicos de aterros e lixões (2000-2019) 27
Figura 3 – Comparação entre os percentuais de estudos que abordaram a contaminação de diferentes matrizes por metais potencialmente tóxicos de aterros e lixões de forma individual ou combinada (2000-2019).....28
Figura 4 – Percentual dos estudos encontrados que avaliaram a presença de cada um dos metais potencialmente tóxicos abordados na contaminação de compartimentos naturais próximos a aterros e lixões (2000-2019).....29
Figura 5 – Análise de conteúdo dos resumos dos artigos que abordam a contaminação de diferentes matrizes por metais potencialmente tóxicos de aterros e lixões (2000-2019) através de matriz de similaridade.....31
Figura 6 – Distribuição por continentes dos estudos sobre a contaminação de diferentes matrizes por metais potencialmente tóxicos de aterros e lixões (2000-2019) 32
Figura 7 – Distribuição dos estudos sobre a contaminação de diferentes matrizes por metais potencialmente tóxicos de aterros e lixões ao redor do globo (2000-2019).....33

CAPÍTULO 2

Figura 1 – Localização do município de Porto Seguro, Bahia, Brasil, do Rio Buranhém e do Lixão Municipal da cidade 53
Figura 2 – Localização dos pontos de coleta de solo na área do lixão de Porto Seguro, Bahia 54
Figura 3 – Localização dos pontos de coleta de água e sedimento no rio Buranhém, em Porto Seguro, Bahia 55
Figura 4 – Componentes principais dos parâmetros de qualidade do sedimento do rio Buranhém, Porto Seguro, Bahia 77
Figura 5 – Cargas dos componentes principais dos parâmetros de qualidade do solo do lixão de Porto Seguro, Bahia e área adjacente a esse depósito de lixo.....78
Figura 6 – Índice de Poluição por Metal (MI) da água do Rio Buranhém 79

Figura 7 – Índice de geoacumulação de metais potencialmente tóxicos no sedimento do Rio Buranhém 80
Figura 8 – Índice de geoacumulação de metais potencialmente tóxicos no solo do lixão de Porto Seguro e área adjacente 81
Figura 9 – Avaliação do risco de Ingestão Diária Crônica (CDI) de metais potencialmente tóxicos por vias de ingestão, absorção dermatológica e inalação para os sedimentos do rio Buranhém – Cd, Cr e Cu 83
Figura 10 - Avaliação do risco de Ingestão Diária Crônica (CDI) de metais potencialmente tóxicos por vias de ingestão, absorção dermatológica e inalação para os sedimentos do rio Buranhém – Ni, Pb e Zn 84
Figura 11 – Avaliação do risco de Ingestão Diária Crônica (CDI) de metais potencialmente tóxicos por vias de ingestão, absorção dermatológica e inalação para o solo do lixão de Porto Seguro e área adjacente – Cd, Cr e Cu 85
Figura 12 – Avaliação do risco de Ingestão Diária Crônica (CDI) de metais potencialmente tóxicos por vias de ingestão, absorção dermatológica e inalação para o solo do lixão de Porto Seguro e área adjacente – Ni, Pb e Zn 86

INTRODUÇÃO GERAL

A geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) e a contaminação de recursos naturais por metais potencialmente tóxicos a partir desses materiais têm aumentado e se tornado uma grande preocupação ao longo dos anos, principalmente em países onde os níveis de consumo são elevados. A Organização das Nações Unidas (ONU) estimou, em 2014, que, mantendo-se o ritmo de crescimento populacional e de consumo, a população mundial produzirá cerca de 4 bilhões de toneladas de lixo anualmente até 2050 (DIAS, 2012; SENADO FEDERAL, 2014; BOTKIN; KELLER, 2016).

O problema do gerenciamento dos RSU é mundial, não só pelo fato de que são relativamente poucos os países que possuem tratamento efetivo para o lixo, mas também em razão da degradação que esses resíduos podem causar aos recursos naturais a nível global. As principais preocupações com relação ao crescente volume de resíduos se devem tanto ao fato de que isso evidencia uma maior e contínua exploração do meio ambiente, para a geração de produtos e serviços para a população, quanto ao fato de que uma boa parcela do lixo não possui destinação e disposição final adequadas, sendo assim direcionada para unidades despreparadas como aterros controlados e lixões (UNEP; CALRECOVERY, INC, 2005; MOTA et al., 2009; ALBUQUERQUE; COLUNA, 2018).

Os aterros controlados são definidos como uma “forma inadequada de disposição final de resíduos e rejeitos, na qual o único cuidado realizado é o recobrimento da massa de resíduos e rejeitos com terra”, enquanto os lixões são definidos como uma “forma inadequada de disposição final de resíduos e rejeitos, que consiste na descarga do material no solo sem qualquer técnica ou medida de controle” (BRASIL, 2011).

Ambas as formas de disposição final citadas não garantem a mínima proteção ao meio ambiente e, consequentemente, à comunidade onde os depósitos de lixo estão inseridos, pois, uma vez que os resíduos sólidos são dispostos no solo, este pode ser contaminado com espécies químicas diversas presentes nos líquidos percolados resultantes da decomposição do lixo, entre elas, metais potencialmente tóxicos, compostos orgânicos e nutrientes. Além disso, o lixiviado pode ainda se infiltrar no solo e atingir mananciais superficiais e subterrâneos, ser absorvido ou adsorvido pela biota local e, em caso de substâncias que podem ser biomagnificadas, passar a integrar as teias alimentares dos ecossistemas (MOTA et al., 2009; BRASIL, 2011; ALBUQUERQUE; COLUNA, 2018; KUMARI et al, 2019; ONYEKWELU; OKECHUKWU, 2019; BORAH et al., 2020).

Os metais, presentes na composição de diversos tipos de materiais comumente utilizados pelas pessoas, podem apresentar alta toxicidade quando em concentrações acima das consideradas aceitáveis por órgãos reguladores, como entidades ambientais e de saúde. Esses possíveis contaminantes se destacam por poderem se apresentar na forma de espécies químicas altamente reativas, além de serem não metabolizáveis e bioacumulativos, podendo assim interferir de forma prejudicial em importantes processos bioquímicos e metabólicos de vegetais, animais e seres humanos, como relatado por Santos et al. (2018), Yuan et al. (2019) e Ebong et al. (2019).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi criada em 2010 com o objetivo de direcionar adequadamente o gerenciamento de resíduos sólidos. Entre as principais indicações previstas na PNRS está a extinção de lixões no país. No entanto, diversos municípios ainda não se adequaram à legislação e continuam a dispor seus resíduos e rejeitos em aterros controlados e lixões, entre eles o município de Porto Seguro, na Bahia (BRASIL, 2011; ABRELPE, 2019).

O lixão de Porto Seguro está situado numa Área de Preservação Permanente (APP) localizada na bacia do Rio Buranhém. Esse espaço de destinação foi projetado para ser um aterro sanitário, no entanto, um relatório produzido pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) em 2012 apontou diversas irregularidades no local e um grande potencial de risco para as pessoas e para o meio ambiente (LOPES, 2000; IBAMA, 2012).

Uma vez que há poucos estudos científicos sobre a área desse lixão, a avaliação ambiental é o primeiro passo para possibilitar a regularização da situação desse depósito lixo e a remediação dos possíveis danos causados aos ecossistemas próximos a ele. Após a produção de dados diagnósticos através da identificação dos contaminantes presentes na área, estudos de mitigação com foco em cada matriz específica e em cada contaminante específico devem ser realizados. Também é preciso redirecionar a disposição final dos resíduos para um aterro sanitário, que é o espaço mais adequado para tal função devido ao fato de que possui preparo prévio do solo e sistemas de captação e tratamento de gases e líquidos percolados (BRASIL, 2011).

A resolução do problema do lixo, de modo geral, depende de diversos fatores atuando de forma conjunta, entre eles se destacam: (i) a diminuição da geração de resíduos através da conscientização da população; (ii) o apoio e a viabilização da coleta seletiva e das cooperativas de catadores; (iii) a criação e a execução de planos de gerenciamento práticos, que evitem a chegada dos resíduos em unidades inadequadas; e (iv) a produção de conhecimento científico

de qualidade, que aborde tanto o diagnóstico quanto métodos de recuperação de áreas degradadas pela presença de depósitos de RSU. Esse último fator é de extrema importância, pois ele fundamenta o sucesso dos outros três, uma vez que o desenvolvimento tecnológico e a aplicação do conhecimento para solucionar questões práticas estão entre os principais objetivos da ciência (BRASIL, 2011).

Desse modo, esse estudo foi dividido em dois capítulos. No primeiro foi feita uma análise cienciométrica da literatura com base em artigos científicos que investigaram a contaminação de água, solo e/ou sedimento por metais potencialmente tóxicos resultantes da decomposição de resíduos sólidos municipais em lixões e aterros sanitários. A Cienciometria é um segmento da Sociologia da Ciência que estuda os aspectos quantitativos da ciência, ou seja, envolve estudos quantitativos das atividades científicas, inclusive das publicações (MACIAS-CHAPULA, 1998). Assim, na primeira seção desse trabalho buscou-se verificar, principalmente, se os estudos encontrados eram de caráter diagnóstico ou mitigatório e justificar a importância de ambos os tipos de estudos na resolução dos problemas relacionados à gestão de resíduos sólidos. Além disso, também se observou a evolução da produção científica sobre esse tema no Brasil antes e depois da implementação da PNRS. Esse estudo contribuiu para a avaliação das principais tendências associadas ao tema central do segundo capítulo desse trabalho.

No segundo capítulo foi realizado um estudo diagnóstico na área do lixão de Porto Seguro (BA) e seus arredores para verificar a hipótese de que a presença do depósito de lixo irregular contribui para o aumento das concentrações de metais potencialmente tóxicos na água e no sedimento do rio Buranhém e no solo do lixão e da área adjacente a ele. A verificação dessa hipótese é fundamental para averiguar se a presença do lixão contribui para a diminuição da qualidade ambiental dos ecossistemas da região, além dos resultados apontarem se existem riscos eminentes para a saúde dos compartimentos analisados e se há exposição das pessoas a espécies químicas potencialmente nocivas à saúde. Nesse estudo foram avaliadas as concentrações dos metais potencialmente tóxicos cromo, níquel, cobre, zinco, cádmio e chumbo (Cr, Ni, Cu, Zn, Cd e Pb, respectivamente) na água e no sedimento do rio Buranhém e no solo do lixão de Porto Seguro e da área que o circunda, além dos parâmetros temperatura, pH, oxigênio dissolvido, salinidade, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, demanda bioquímica de oxigênio, alcalinidade total, coliformes termotolerantes, sólidos totais, nitrito, nitrato, amônia, nitrogênio total e fósforo total para água e dos parâmetros pH, cinzas, matéria orgânica, umidade e carbono orgânico total para sedimento e solo. A principal contribuição

desse diagnóstico para as ciências ambientais é a produção de conhecimento científico para embasar futuros trabalhos de remediação na área do atual lixão de Porto Seguro.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, I. R. de; COLUNA, I. M. E. **Emissões do Setor de Resíduos**: 2018, documento de análise. SEEG, 2018.

BORAH, P.; GUJRE, N.; RENE, E. R.; RANGAN, L.; PAUL, R. K.; KARAK, T.; MITRA, S. Assessment of mobility and environmental risks associated with copper, manganese and zinc in soils of a dumping site around a Ramsar site. **Chemosphere**, v. 254, n. 126852, p. 1-13, 2020. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126852.

BOTKIN, D. B.; KELLER, E. A. **Ciência Ambiental:** Terra, um planeta vivo. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 716 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: MMA, 2011. 187 p.

DIAS, S. G. O desafio da gestão de resíduos sólidos urbanos. **Sociedade e Gestão**, v. 11, n. 1, p. 16-20, 2012. http://dx.doi.org/10.12660/gvexec.v11n1.2012.22776.

EBONG, G. A. DAN, E. U.; INAM, E.; OFFIONG, N. O. Total concentration, speciation, source identification and associated health implications of trace metals in Lemna dumpsite soil, Calabar, Nigeria. **Journal of King Saud University Science**, v. 31, p. 886-897, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.01.005.

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). **Relatório de fiscalização:** operação cidade limpa. Eunápolis: IBAMA, 2012.

KUMARI, P. GUPTA, N. C.; KAUR, A.; SINGH, K. Application of Principal Component Analysis and Correlation for Assessing Groundwater Contamination in and around Municipal Solid Waste Landfill of Ghazipur, Delhi. **Journal of the Geological Society of India**, v. 94, p. 595-604, 2019. http://dx.doi.org/10.1007/s12594-019-1366-7.

LOPES, H. B. V. **Projeto Porto Seguro-Santa Cruz Cabrália: hidrogeologia**. Salvador: CPRM: Prefeituras Municipais de Porto Seguro e Santa Cruz Cabrália, 2000.

MACIAS-CHAPULA, S. A. O papel da informetria e da cienciometria e sua perspectiva nacional e internacional. **Ciência da Informação**, Brasília, v. 27, n. 2, p. 134-140, maio/ago. 1998. https://doi.org/10.1590/S0100-19651998000200005.

MOTA, J. C.; ALMEIDA, M. M. de; ALENCAR, V. C. de; CURI, W. F. Características e impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos: uma visão conceitual. In: Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, I, 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2009. p. 1-15.

ONYEKWELU, I.; OKECHUKWU, A. Impact of organic contaminants from dumpsite leachates on natural water sources in the Enugu Metropolis, southeastern Nigeria. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 9, p. 1-20, 2019. https://doi.org/10.1007/s10661-019-7719-2.

SANTOS, T. A. dos; BONFIM, T. M.; SILVA, F. S.; SILVA, A. G.; BANDEIRA, M. L. S. de F.; JESUS, R. M. de; NASCIMENTO, L. D. Determinação de metais em um sistema estuarino: *Laguncularia racemosa* como um potencial indicador de contaminação. **RBCIAMB**, n. 49, p. 51-65, 2018. https://doi.org/10.5327/10.5327/Z2176-947820180352.

SENADO FEDERAL. **Resíduos Sólidos**: lixões persistem. Em discussão, n. 22, p. 1-35, 2014. 62 p.

UNEP; CALRECOVERY, INC. **Solid Waste Management (Volume II: Regional Overviews and Information Sources)**. Califórnia (USA), Osaka (Japão): IETC, 2005. 334 p.

YUAN, Y.; SUN, T.; WANG, H.; LIU, Y. Bioaccumulation and health risk assessment of heavy metals to bivalve species in Daya Bay (South China Sea): Consumption advisory. **Marine Pollution Bulletin**, v. 150, n.110717, p. 2019. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110717.

Este artigo/capítulo está formatado segundo as nomas da Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB). Disponível no site: http://www.rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/about/submissions.

CAPÍTULO 1

Tendências da contaminação de ambientes naturais por metais potencialmente tóxicos de lixões e aterros sanitários: uma abordagem cienciométrica

RESUMO

A contaminação do ambiente por metais potencialmente tóxicos advindos de lixões e aterros representa um problema ambiental, pois esses elementos alteram a dinâmica dos ecossistemas, interferindo em processos bioquímicos e metabólicos, além de serem bioacumulativos e biomagnificáveis. Esse estudo apresenta uma análise cienciométrica de artigos que investigaram a contaminação de compartimentos naturais abióticos por metais potencialmente tóxicos advindos de resíduos sólidos em lixões e aterros, no período de 2000 a 2019. Os objetivos foram avaliar a evolução temporal da produção científica sobre o tema; identificar os compartimentos e metais mais estudados; verificar a localização dos ambientes estudados; e averiguar a evolução da produção sobre esse tema no Brasil após a implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A recuperação das produções foi feita através da Web of Science, buscando-se trabalhos que continham termos como “metal”, “municipal solid waste”, “contamination”, “water”, “soil”, “sediments”, “dump” e “landfill”. A busca resultou em 701 artigos, dos quais 178 foram selecionados. Verificou-se que houve uma tendência ao aumento do número de publicações principalmente a partir de 2008. A maior parte dos artigos foi de caráter diagnóstico. Observou-se que a maioria dos estudos investigou a presença desses metais no solo e que os metais mais pesquisados foram chumbo, zinco, cobre, cromo, cádmio e níquel. A maioria dos trabalhos encontrados foi desenvolvida na Nigéria, enquanto o Brasil publicou apenas sete estudos. Não foi possível perceber alterações significativas na produção brasileira sobre o tema antes e após a criação da PNRS.

Palavras-chave: Resíduos sólidos municipais. Lixo. Água. Sedimentos. Solo. PNRS.

Trends in the contamination of natural environments by potentially toxic metal of dumps and landfills: a scientometric approach

ABSTRACT

Environmental contamination by potentially toxic metals from dumps and landfills represents an environmental problem, as these elements change the dynamics of ecosystems, interfering in biochemical and metabolic processes, in addition to being bioaccumulative and biomagnifiable. This study presents a scientometric analysis of articles that investigated the contamination of abiotic natural compartments by potentially toxic metals from solid waste in dumps and landfills, from 2000 to 2019. The objectives were to evaluate the temporal evolution of scientific production on the subject; identify the most studied compartments and metals; verify the location of the studied environments; and investigate the evolution of production on this topic in Brazil after the implementation of the National Solid Waste Policy (PNRS). The recovery of the productions was done through the Web of Science, looking for works that contained terms such as "metal", "municipal solid waste", "contamination", "water", "soil", "sediments", "dump" and “landfill”. The search resulted in 701 articles, of which 178 were selected. It was found that there was a trend towards an increase in the number of publications, especially from 2008 onwards. Most of the articles were of a diagnostic nature. It was observed that most studies investigated the presence of these metals in soil and that the most researched metals were lead, zinc, copper, chromium, cadmium and nickel. Most of the works found were developed in Nigeria, while Brazil published only seven studies. It was not possible to notice significant changes in Brazilian production on the subject before and after the creation of the PNRS.

Keywords: Municipal solid waste. Trash. Water. Sediments. Soil. NSWP.

1. INTRODUÇÃO

O aumento populacional representa um dos maiores problemas ambientais da atualidade, pois eleva a demanda e o consumo de produtos, tendo como consequência a geração de resíduos sólidos (RS), que, geralmente, não possuem a destinação correta e a disposição final adequada, sendo despejados, na maior parte das vezes, em espaços totalmente despreparados, como lixões e aterros controlados (Brasil, 2011; Dias, 2012; Botkin e Keller, 2016). Além do problema ambiental, essa prática também promove sérios problemas socioeconômicos na maior parte do mundo, pois a deposição de resíduos em lixões e aterros controlados se mostra bastante onerosa com o passar do tempo, principalmente de uma perspectiva ambiental e sustentável (Fadini e Fadini, 2001; UNEP; Calrecovery, Inc, 2005; Silva, 2015).

Entre as consequências ambientais e socioeconômicas que a deposição inadequada desses materiais pode causar estão a inutilização de áreas de terreno, a contaminação de recursos naturais por metais potencialmente tóxicos (Denton et al., 2016; Mamedes, 2017; Iqbal et al., 2019; Borah et al., 2020) e compostos orgânicos voláteis (VOCs) e persistentes (POPs) (Majumdar e Srivastava, 2012; Huang et al., 2015; Roumak et al., 2018; Onyekwelu e Okechukwu, 2019), a elevação descontrolada das concentrações de nutrientes nos ecossistemas (Kumari et al, 2019) e a propagação de vetores (Ivovic et al., 2015; Azevedo et al., 2015; Cruvinel et al., 2020). Muitos contaminantes provenientes da decomposição dos resíduos sólidos podem atingir diretamente o solo e/ou ser lixiviados para mananciais superficiais ou subterrâneos, afetando assim a flora, a fauna e a população da região (Gouveia, 2012; Pandey et al., 2013; Gohain e Bordoloi, 2017; Akintan et al., 2019).

Entre as principais espécies químicas introduzidas nos ecossistemas através da deposição de lixo, estão os metais potencialmente tóxicos. Esses metais são naturalmente presentes no ambiente e nos organismos em baixas concentrações, porém costumam apresentar efeitos adversos quando se apresentam em concentrações maiores que os limites indicados por órgãos ambientais. Eles chegam aos depósitos de lixo através do descarte de diferentes tipos de materiais, entre eles, lâmpadas, inseticidas, pilhas, baterias, cerâmicas, plásticos, medicamentos, vidros coloridos, tintas, conservantes de vacinas, cosméticos, sabões, clareadores e agrotóxicos (Azevedo, 2003; Baran, 2005; Lima e Meurer, 2013; Vilhena, 2018).

A contaminação por metais potencialmente tóxicos provenientes de lixões e aterros é relatada por diversos autores devido às graves consequências que essas espécies químicas podem acarretar tanto para o meio ambiente, atingindo o solo e migrando para mananciais superficiais e subterrâneos, animais e plantas, quanto para as pessoas, uma vez que a contaminação dos ecossistemas facilita a entrada desses metais na teia alimentar e a exposição

a eles pode causar danos a diferentes tecidos do corpo humano e até mesmo levar à morte (Sharma e Pant, 2018; Boateng et al., 2019; Chen et al., 2019; Otabor, 2019; Ruchuwararak et al., 2019).

Boateng et al. (2019) avaliaram a contaminação de águas subterrâneas em um aterro de Gana e encontraram concentrações médias de ferro, chumbo, cádmio e cromo acima dos limites aceitos pela Organização Mundial de Saúde (OMS) para água potável; as concentrações encontradas pelos autores, em mg L^{-1}, variaram de 10,885 ± 0,069 a 25,612 ± 2,855 para Fe, de 1,516 ± 1,002 a 3,574 ± 2,228 para Pb, de 0,492 ± 0,157 a 1,083 ± 0,065 para Cd, e de 0,701 ± 0,498 a 1,918 ± 1,900 mg L^{-1} para Cr, sendo os limites máximo estabelecidos pela OMS de 0,300 para Fe, de 0,010 para Pb, de 0,003 para Cd e de 0,050 para Cr. Chen et al. (2019) estudaram a contaminação de águas subterrâneas por um aterro sanitário na China, encontrando como principal fonte de contaminação o vazamento de lixiviado do aterro. Ruchuwararak et al. (2019) analisaram as concentrações de metais em água, sedimentos e plantas comestíveis próximos a um aterro municipal; os autores indicaram que as concentrações de cromo nas espécies vegetais testadas (*Marsilea crenata* e *Ipomoea aquatica*) excederam o limite legal para plantas e, apesar de falarem que essas plantas possuem baixo potencial bioacumulador para chumbo e cromo, concluíram também que elas representam um risco à saúde de seus consumidores por estarem contaminadas com chumbo e cádmio. Otabor (2019) avaliou os níveis de metais potencialmente tóxicos nos solos de três lixões da Nigéria e observou que as concentrações de cobre apareceram como primeira ou segunda maiores em todos eles. Sharma e Pant (2018) discutiram a importância da bioacumulação de metais em vegetais para a descontaminação de solos afetados pela deposição de lixo; os autores indicaram a *Ageratum conyzoides*, uma espécie de erva daninha, como potencial agente na fitorremediação desses ambientes. Esses estudos reforçam a importância de se estudar o efeito de diferentes contaminantes metálicos nas mais diversas matrizes, de modo a criar um banco de dados robusto e de qualidade para subsidiar tanto pesquisas voltadas para a remediação dessa contaminação quanto ações efetivas para a gestão do lixo que contem esses elementos.

A importância da busca por soluções para o gerenciamento apropriado dos RS passou a ser percebida mais claramente a partir da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), realizada em 1992, no Rio de Janeiro (RIO-92, Brasil), onde começou a se firmar a percepção da relação intrínseca entre meio ambiente e desenvolvimento. Assim se consolidou a necessidade dos países se adequarem ao conceito de desenvolvimento sustentável e, para isso, um dos fatores mais importantes é o manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos, tanto que, após a Rio-92, foi incorporado à Agenda 21 – documento

norteador que visa auxiliar no planejamento da construção de sociedades sustentáveis – um capítulo dedicado especialmente ao manejo de resíduos sólidos (UNEP; Calrecovery, Inc, 2005).

Em todos os continentes, os locais de descarte de resíduos mais comuns são os lixões e os aterros sanitários (UNEP; Calrecovery, Inc, 2005). No Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), aprovada e regulamentada em 2010, que tem como objetivo reunir diretrizes e ações para gerir de forma adequada o lixo produzido no país, determinou prazo até 2014 para a extinção dos lixões, porém não houve uma grande mobilização por parte das autoridades responsáveis para a regularização desses espaços e esse prazo foi prorrogado para 2018 a 2024 (Brasil, 2010; Brasil, 2014). O número de cidades brasileiras que passou a depositar resíduos em lixões aumentou de 2015 para 2016 e de 2016 para 2017, diminuindo em 0,5% em 2018 (ABRELPE, 2016, 2017, 2018). Desse modo, apesar dos riscos e prejuízos causados por essas formas de disposição final, na maior parte dos países os RS ainda têm essa destinação, seja devido à falta de investimento em políticas de conscientização da população, em educação ambiental e em ações voltadas para a efetiva melhoria do problema, ou mesmo por mero descaso com a conservação ambiental.

Faz-se necessário destacar que é essencial não focar apenas no manejo de novos RS gerados, mas também pensar em formas de remediação para os danos causados pela grande quantidade de resíduos já existente nos depósitos de lixo, sejam eles ativos ou inativos (Araújo, 2015). Desse modo, o diagnóstico da situação dos espaços nos quais depósitos de lixo estão inseridos, e de recursos naturais situados em áreas adjacentes a eles, se faz necessário e relevante, pois permite que planos de ação e recuperação sejam traçados e postos em prática de forma mais assertiva (UNEP; Calrecovery, Inc, 2005).

Assim, esse estudo teve como objetivo produzir uma análise cienciométrica de artigos científicos que investigaram a contaminação de compartimentos naturais abióticos – água, solo e sedimento – por metais potencialmente tóxicos advindos de resíduos sólidos em lixões e aterros sanitários, buscando verificar se os estudos trazem uma proposta de mitigação e recuperação dos ambientes afetados ou se eles têm apenas caráter diagnóstico. Objetivou-se ainda observar a temporalidade da produção científica acerca do tema em questão, quais os compartimentos naturais e metais potencialmente tóxicos estudados e a localização dos ambientes examinados e se houve um aumento considerável da produção sobre esse tema no Brasil após a implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada nesse estudo foi a de pesquisa bibliográfica e a base de dados escolhida para efetuar tal pesquisa foi a *Web of Science*, do *Institute for Scientific Information* (ISI). Nessa plataforma realizou-se a recuperação de produções que apontam a contaminação de compartimentos naturais abióticos – água, solo e sedimento – por metais potencialmente tóxicos advindos de resíduos sólidos em lixões e aterros, no período de 2000 a 2019. O período escolhido abrange dez anos pré-criação da PNRS brasileira e dez anos pós sua implementação. Os dados para este estudo foram coletados em setembro de 2020.

A busca foi feita com os termos em inglês e no modo de pesquisa avançada da plataforma, incluindo todos os índices disponíveis na principal coleção da *Web of Science* (SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI) para pesquisa. A escolha dos termos baseou-se principalmente na observação de palavras comumente citadas em artigos dessa linha de pesquisa, incluindo as palavras-chave, durante o processo de revisão de literatura.

A busca foi realizada em seis etapas de modo a abranger o maior número de artigos que citassem os termos de interesse (Tabela 1):

Tabela 1 – Termos utilizados na pesquisa bibliográfica na plataforma Web of Science

Etapa	Termos buscados
1	TS=(metal* AND municipal solid waste AND contamination) AND TS=(water OR soil OR sediments) AND TS=(dump* OR landfill)
2	TS=(metal*) AND TS=(soil OR land OR ground OR water OR sediments) AND TS=(dump* OR landfill OR municipal solid waste) AND TI=(metal*) AND TI=(dump* OR landfill) AND AB=(dump* OR landfill) AND AB=(soil OR land OR ground OR water* OR sediments) AND AB=(metal*)
3	TS=(metal*) AND TS=(soil OR water OR sediments) AND TS=(dump* OR landfill OR municipal solid waste) AND TI=(metal*) AND TI=(dump* OR landfill)
4	TS=(metal*) AND TS=(soil OR water OR sediments) AND TS=(dump* OR landfill OR municipal solid waste) AND TI=(metal*) AND TI=(soil OR water OR sediments) NOT TS=(metals in leachate)
5	#1 OR #3 OR #4
6	#5 OR #6

Onde: “TS”, “TI” e “AB” são rótulos de campo que equivalem à busca dos termos nos tópicos, nos títulos e nos resumos das publicações, respectivamente; e AND, OR e NOT são operadores boleanos que equivalem a “E”, “OU” e “NÃO”, respectivamente.

A busca resultou em um total de 701 artigos. Esses estudos foram avaliados e 178 deles foram selecionados para a análise cienciométrica. Foram descartados os artigos que não abordam a contaminação de compartimentos naturais abióticos (solo, água e sedimentos) por metais provenientes da deposição de resíduos sólidos municipais como tema principal ou secundário, por exemplo, artigos que abordam contaminação por metais advindos de resíduos/efluentes industriais, de mineração e de produtos agrícolas, estudos voltados para a caracterização e/ou mitigação de contaminação de seres vivos e do lixiviado de depósitos de lixo, trabalhos que abordam testes de mitigação, mobilidade e cinética em escala laboratorial. Também foram descartados estudos que analisaram contaminação de compartimentos naturais abióticos em locais distantes de depósitos de resíduos sólidos municipais, trabalhos que analisam a influência da aplicação de compostos de resíduos sólidos como adubo para solos e estudos com foco na determinação de outras espécies químicas que não fossem metais.

Os trabalhos encontrados foram agrupados conforme o (s) compartimento (s) e os metais estudados neles, o país onde foram desenvolvidos, seu ano de publicação, seu foco de discussão (diagnóstico ou mitigatório) e os periódicos em que foram publicados.

A tendência temporal dos dados foi observada através de regressão linear simples, utilizando-se o número de trabalhos publicados em cada ano como a variável dependente e o ano de publicação como a variável independente. Os gráficos e a regressão simples desse estudo foram obtidos através de um software para edição de planilhas.

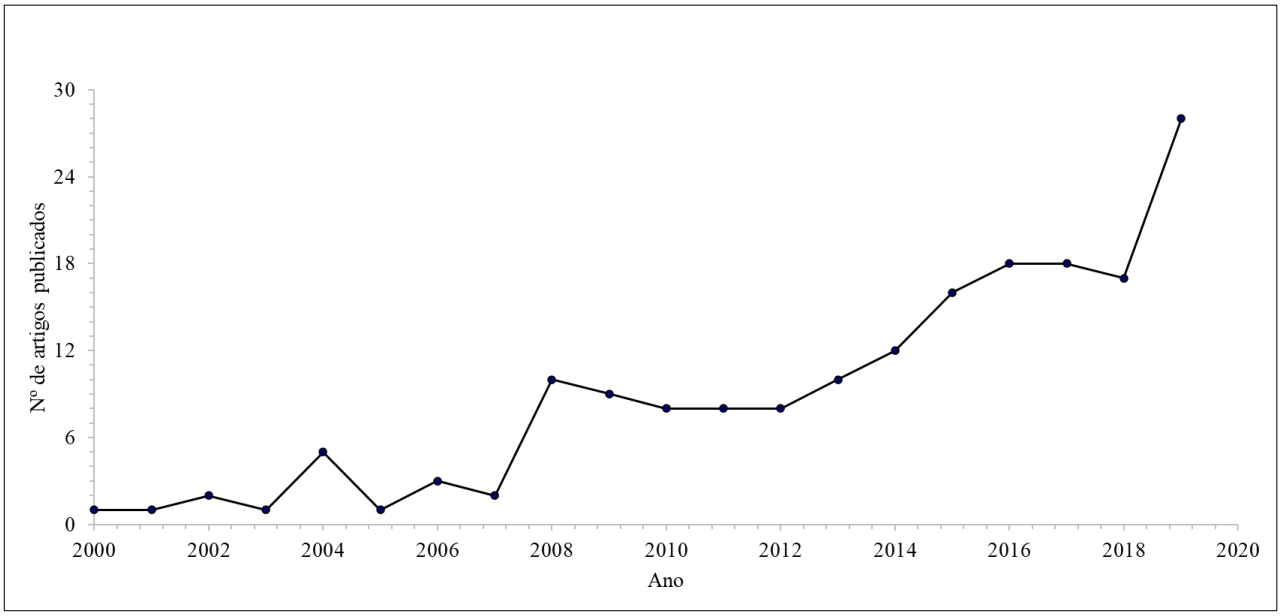
Também foi realizada uma análise de conteúdo (ou de similaridade) no software R® com o pacote Quanteda (Benoit et al., 2018), com o intuito de investigar similaridades entre os estudos encontrados. Essa análise foi realizada com os resumos em inglês dos 178 artigos do banco de dados final. A proposta foi observar quais os termos que mais aparecem nos resumos dos trabalhos e quais palavras aparecem mais associadas nesses estudos. Devido ao fato de que os resumos são utilizados na íntegra nessa avaliação, não é possível remover todos os termos genéricos e de baixo impacto do rol de palavras, assim alguns desses termos são excluídos automaticamente pelo aplicativo, enquanto outros não são, o que faz com que palavras comuns a qualquer área de pesquisa e unidades de medida possam aparecer no resultado.

O software QGIS® (versão 3.10.11) foi utilizado para realizar a plotagem dos dados de distribuição espacial dos estudos em mapa, de modo a possibilitar uma visualização mais prática desses resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No período compreendido de 2000 a 2019, 178 estudos investigaram a contaminação de água, solo e/ou sedimento por metais potencialmente tóxicos nas proximidades de lixões e aterros sanitários. O número de registros de publicações científicas sobre o assunto sofreu flutuações ao longo do tempo, mas é possível observar que de 2012 a 2016 ele aumentou, sofrendo uma queda em 2017 e 2018 e voltando a crescer com mais força em 2019 (Figura 1). O ano com maior número de publicações foi 2019 (N = 28). A média de trabalhos científicos publicados de 2000 a 2019 foi de 8,9 artigos, enquanto a média considerando os últimos cinco anos foi de 19,4 artigos (2015-2019).

Figura 1 – Evolução temporal das publicações associando a contaminação de compartimentos naturais abióticos por metais potencialmente tóxicos de aterros e lixões (2000-2019)



A maior parte dos estudos foi publicada em revistas da área de ciências ambientais voltadas para o estudo de água, solo, poluição/contaminação ambiental, gestão de resíduos, química, ecologia e geoquímica. O periódico com maior número de publicações foi o *Environmental Monitoring and Assessment* (N = 12). *Environmental Science and Pollution Research* e *Waste Management* empataram em segundo lugar com um total de sete trabalhos publicados, cada um (Apêndice 1).

O principal foco dos artigos publicados foi o diagnóstico das diferentes matrizes quanto à contaminação por metais potencialmente tóxicos (N = 170). Apenas 4,49% deles estudaram meios para a remediação desse tipo de contaminação. Apesar de estudos básicos e de caráter

diagnóstico serem fundamentais dos pontos de vista ambiental, científico e político, faz-se necessário produzir mais trabalhos de caráter mitigatório, uma vez que a extinção de lixões e a recuperação de áreas onde eles estão inseridos está entre os principais desafios da conservação ambiental e do desenvolvimento sustentável (UNEP; Calrecovery, Inc, 2005). A relevância dos trabalhos voltados para a remediação consiste principalmente (i) na identificação da melhor técnica a ser aplicada no local de estudo e para o contaminante em estudo e (ii) na diminuição dos níveis de contaminantes presentes na matriz, o que, por consequência, diminui a quantidade deles que se encontra biodisponível no ambiente (Tavares, 2013).

Os trabalhos que se concentraram em estudar métodos de mitigação da contaminação por metais potencialmente tóxicos (N = 8) foram desenvolvidos de 2016 a 2019, evidenciando uma preocupação mais atual com a recuperação de áreas degradadas pelo constante acúmulo de lixo e a necessidade de alternativas e políticas públicas voltadas para a destinação e a disposição final adequadas dos resíduos de lixões ativos e inativos (UNEP; Calrecovery, Inc, 2005).

A matriz mais estudada nos artigos, em geral, foi o solo de depósitos de lixo e de áreas circundantes a eles (N = 118). Dos 178 estudos, 105 estudaram apenas contaminação do solo, 37 somente da água e 13 somente do sedimento, os demais trabalhos estudaram as matrizes de forma combinada: água e sedimento N = 10; solo, água e sedimento N = 1; solo e água N = 11 e solo e sedimento N = 1 (Figuras 2 e 3). Entre os trabalhos voltados para técnicas de remediação sete (N = 7) estudaram a remoção de metais potencialmente tóxicos do solo e apenas um abordou a remoção de metais de água e sedimento.

Figura 2 – Matrizes estudadas nos artigos a respeito da contaminação de compartimentos naturais abióticos por metais potencialmente tóxicos de aterros e lixões (2000-2019)

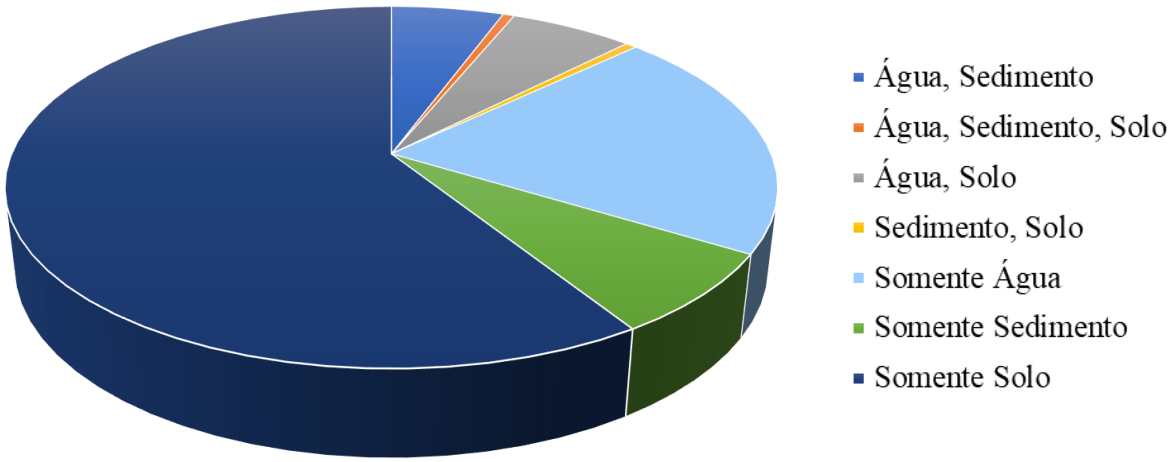
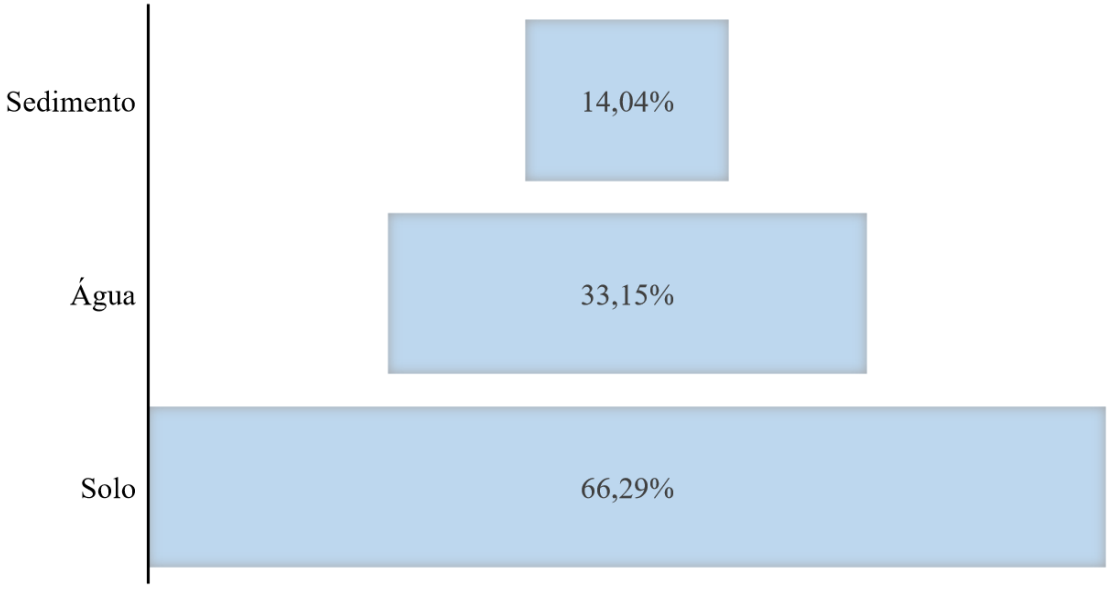


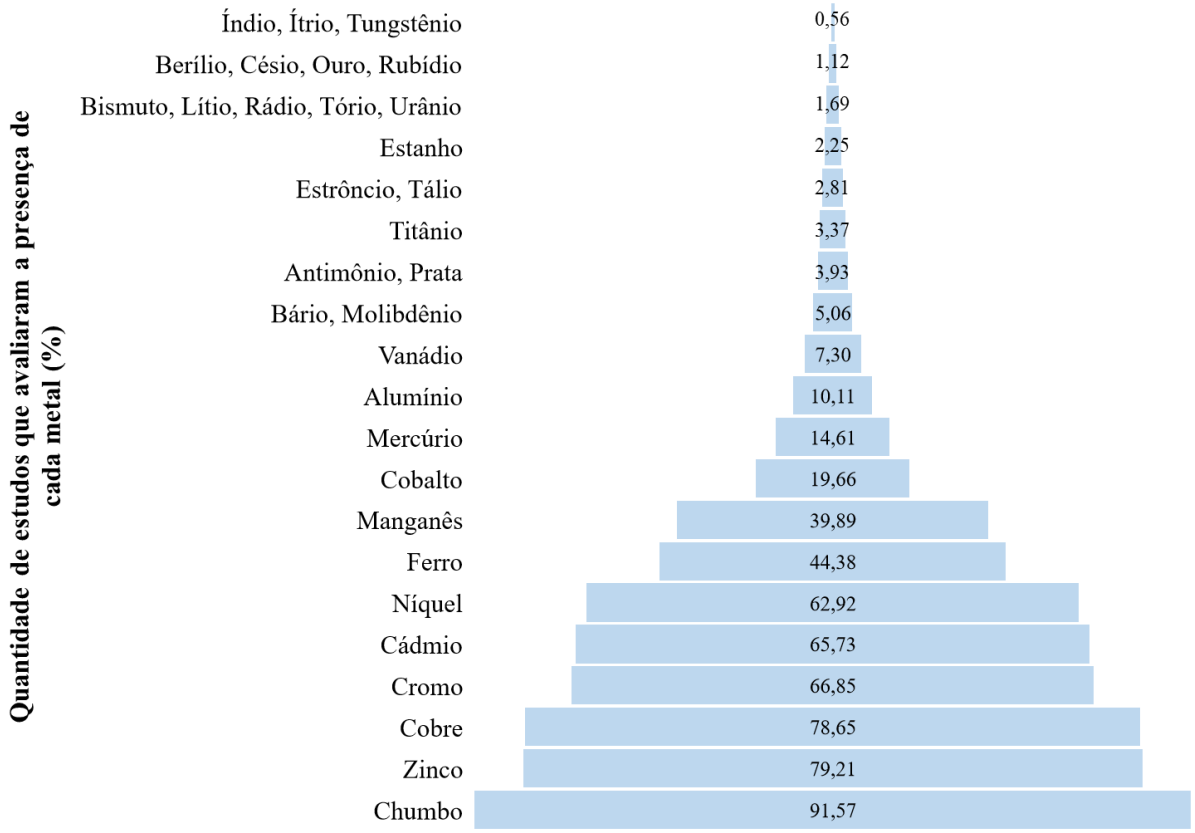
Figura 3 – Comparação entre os percentuais de estudos que abordaram a contaminação de diferentes matrizes por metais potencialmente tóxicos de aterros e lixões de forma individual ou combinada (2000-2019)



Essa maior preocupação com o solo ocorre devido ao seu contato direto com os resíduos sólidos, o que amplia a possibilidade de contaminação desse recurso natural e o arraste dos contaminantes que chegam a ele para outros compartimentos naturais, como mananciais superficiais e subterrâneos, sedimentos e organismos vivos. Os estudos utilizaram como agentes em potencial para a descontaminação das matrizes plantas (Ayesa et al., 2018; Salem et al., 2017; Salam et al., 2016), microrganismos (Hassan et al., 2019; Jayanthi et al., 2017; Stefanescu et al., 2017; Jayanthi et al., 2016) e materiais/produtos químicos combinados (Raja e Pal, 2019).

Os metais potencialmente tóxicos mais pesquisados nos estudos encontrados foram chumbo, zinco, cobre, cromo, cádmio, níquel, ferro, manganês, alumínio, cobalto e mercúrio, respectivamente, sendo que os seis primeiros metais citados apareceram em mais de 60% dos trabalhos; os outros metais foram investigados em menos de 10% das pesquisas (Figura 4).

Figura 4 – Percentual dos estudos encontrados que avaliaram a presença de cada um dos metais potencialmente tóxicos abordados na contaminação de compartimentos naturais próximos a aterros e lixões (2000-2019)



Todos esses metais podem chegar aos depósitos de lixo através do descarte de materiais diversos e sua entrada nos diferentes compartimentos naturais acarreta danos variados, a depender de sua concentração e de sua biodisponibilidade, ou seja, de quanto da espécie química está presente no ambiente e quanto dela é passível de ser ingerido, inalado ou assimilado pela biota (Guilherme et al., 2005; Marx e Kamber, 2014).

Os principais fatores que tornam a entrada desses elementos no ambiente prejudicial são a sua alta reatividade e a sua capacidade de se bioacumular e biomagnificar. Essas características levam a uma grande possibilidade de interação dos metais potencialmente tóxicos com diferentes matrizes, inclusive com tecidos vivos, e à não metabolização desses metais, por isso eles podem ser biomagnificados e chegar até os seres humanos (Guilherme et al., 2005; Medeiros, 2005; Marx e Kamber, 2014).

Os prejuízos acarretados por altas concentrações de metais à flora, à fauna e às pessoas ocorrem devido à alteração de importantes processos bioquímicos e metabólicos. Santos et al. (2018) relataram uma possível contribuição de maiores concentrações de metais na clorose de

folhas de *Laguncularia racemosa* (mangue branco). Yuan et al. (2019) estudaram o bioacúmulo de metais potencialmente tóxicos em espécies de bivalves da Baía de Daya (Mar da China Meridional) e encontraram taxas de cromo e cádmio acima do indicado na legislação; os autores concluíram que há um risco associado ao consumo desses animais, principalmente para crianças, e determinaram as taxas máximas de consumo desses mariscos permitidas.

Kumari et al. (2019) avaliaram a contaminação da água subterrânea de uma área de aterro de resíduos sólidos municipais em Ghazipur, Delhi (Índia) e sugeriram que a percolação de lixiviado do depósito de lixo vem contribuindo para a contaminação de um aquífero subterrâneo, podendo representar riscos para a comunidade local, que a utiliza para consumo doméstico. Ruchuwararak et al. (2019) pesquisaram o acúmulo de metais em água, sedimentos e plantas comestíveis coletados nas proximidades de um aterro municipal de resíduos sólidos e encontraram contaminação por chumbo e cromo nas espécies vegetais.

Ebong et al. (2019) encontraram, no solo de um lixão no município de Calabar (Nigéria), concentrações médias de chumbo, cádmio, cobre, ferro e níquel acima dos valores padrão para metais em solos nigerianos. Os valores também foram maiores que as concentrações encontradas no solo de controle. Os autores identificaram o chumbo como a espécie com maior potencial de risco no solo avaliado e as crianças como a classe mais altamente vulnerável aos possíveis efeitos tóxicos dos metais.

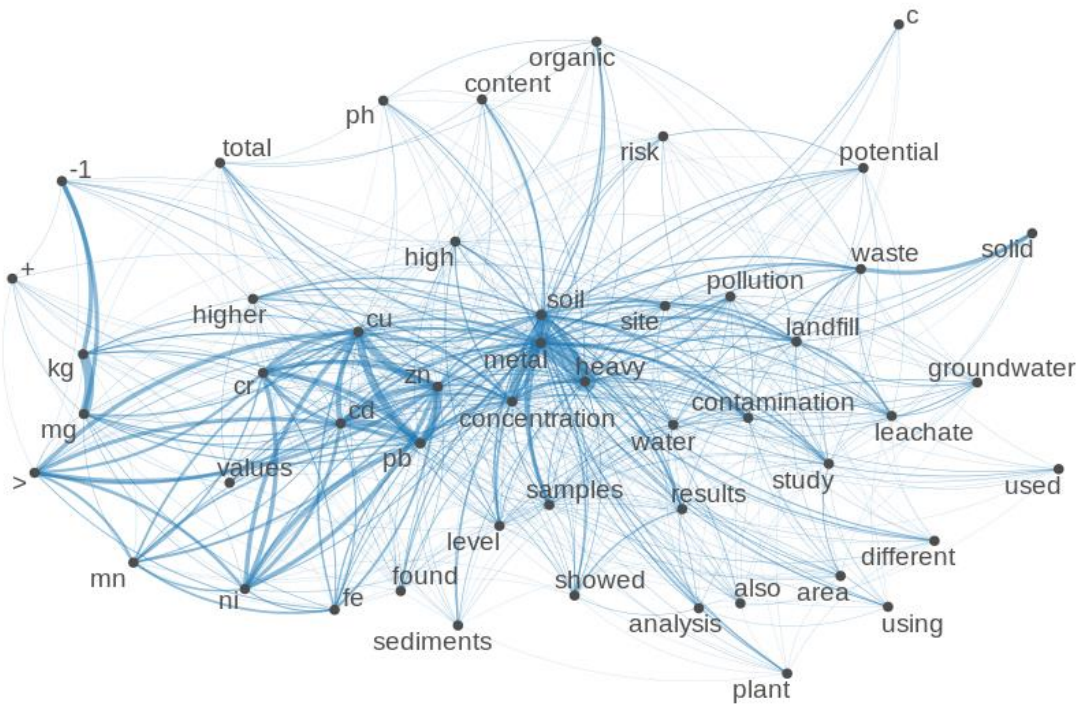
Esses estudos possibilitam a criação e a adoção de medidas que protejam a comunidade dos efeitos tóxicos dos metais, uma vez que ao tomar consciência sobre uma área afetada por esses contaminantes, pode-se optar por afastar as pessoas dela até que medidas efetivas de segurança e de remediação e recuperação sejam adotadas. Além disso, esse tipo de trabalho também é muito importante para o planejamento e a execução de medidas de mitigação nas áreas estudadas e pode ser utilizado como instrumento norteador para o diagnóstico de locais que possuem características semelhantes a eles.

Apesar de metais como alumínio, mercúrio e lítio possuírem aplicações em itens de uso comum, tanto na indústria quanto em itens do dia a dia das pessoas, e apresentarem potencial tóxico relativamente alto, pode-se observar que eles ficaram entre os menos estudados nos artigos encontrados. Esse fato não foi justificado pelos autores, pois eles não citam o método escolhido para a seleção dos metais a serem avaliados nos compartimentos analisados. No entanto, no caso do mercúrio, levando-se em conta que as principais fontes desse metal para intoxicação humana são mariscos e peixes, faz sentido que ele não seja muito pesquisado em compartimentos naturais próximos a lixões e aterros. Compostos de mercúrio também podem ser utilizados como “conservantes de vacinas, em cosméticos, sabões, clareadores e na forma

de agrotóxicos", mas alguns países já proíbem essas aplicações devido à alta toxicidade desse metal (Azevedo, 2003).

Através da análise de similaridade (Figura 5) pode-se observar os termos que mais coincidem nos resumos dos artigos científicos do banco de dados final (N = 178). Como já mencionado, a análise foi realizada com todos os termos de todos os resumos desses trabalhos e o peso dos termos foi atribuído pelo próprio software, uma vez que as palavras em maior destaque são aquelas que aparecem mais vezes nos textos. Devido ao fato de que não é possível remover todos os termos genéricos e de baixo impacto do resultado, palavras como "analysis", "also", "using", "values", "samples", além de algumas preposições e unidades de medida acabam aparecendo.

Figura 5 – Análise de conteúdo dos resumos dos artigos que abordam a contaminação de diferentes matrizes por metais potencialmente tóxicos de aterros e lixões (2000-2019) através de matriz de similaridade

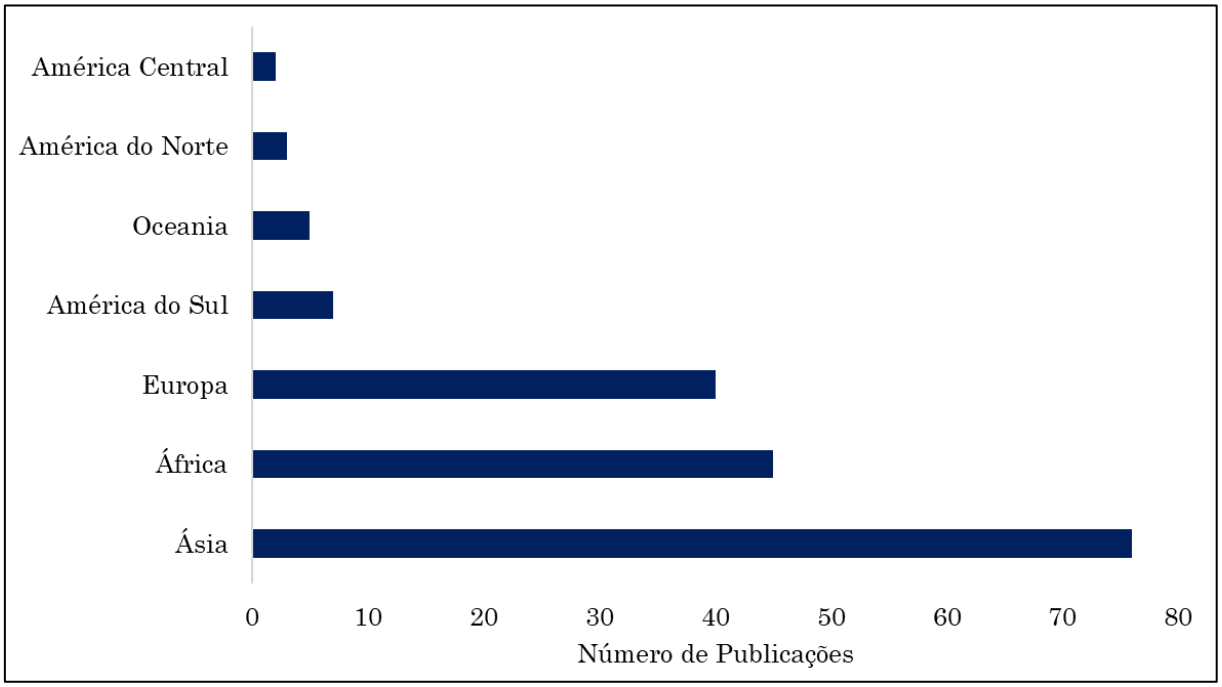


Os termos que aparecem onde há maior densidade de interligações (linhas azuis) são os que mais se repetem nos resumos avaliados. Quanto mais esses termos aparecem associados num mesmo resumo, maior a proximidade entre eles na análise de conteúdo, ou seja, a linha que os liga é menor e mais espessa. Destaca-se aqui o aparecimento dos metais chumbo ("Pb"), zinco ("Zn"), cobre ("Cu"), cromo ("Cr"), cádmio ("Cd"), níquel ("Ni"), manganês ("Mn") e ferro ("Fe"), conectados entre si, e dos termos "metal", "heavy", "soil" e "concentration", que

reafirmam os dados encontrados na análise cienciométrica dos documentos. Outros termos importantes que também aparecem são “water”, “sediments”, “risk”, “waste”, “solid”, “plant”, “lanfill”, “pollution”, “contamination”.

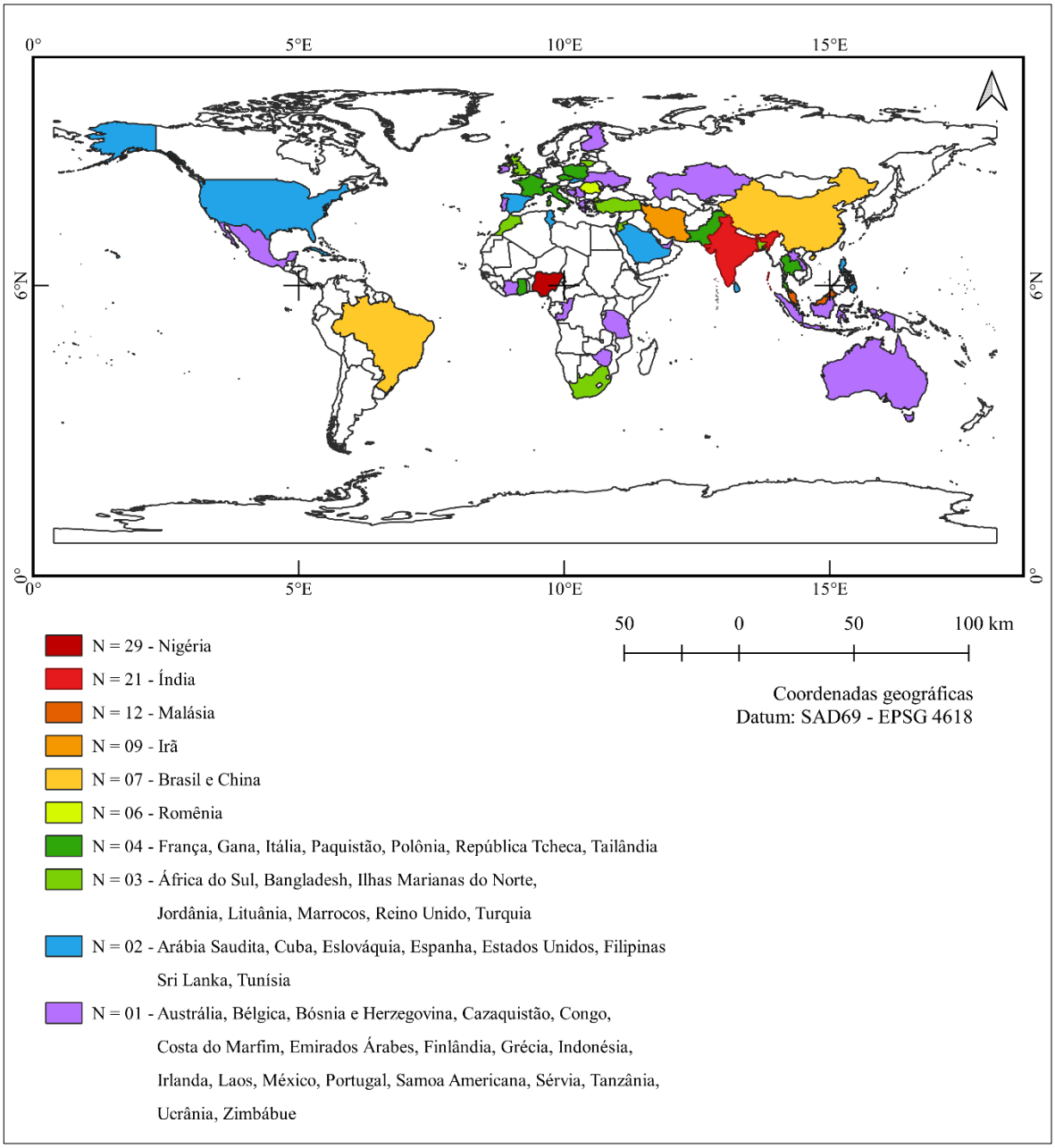
Com relação à localização, o continente asiático conta com a maior parte dos estudos encontrados (N = 76), seguido pelo africano (N = 45) e o europeu (N = 40). O país com o maior número de pesquisas sobre o tema foi a Nigéria (N = 29), com destaque também para a Índia, com um total de vinte e uma publicações (Figuras 6 e 7). A América do Sul aparece no mapa representada apenas pelo Brasil, com uma produção de sete (N = 7) artigos no período estudado (2000-2019).

Figura 6 – Distribuição por continentes dos estudos sobre a contaminação de diferentes matrizes por metais potencialmente tóxicos de aterros e lixões (2000-2019)



De acordo com estimativa da ONU, o continente asiático é o mais populoso da Terra, contando, atualmente, com cerca de 60% da população mundial, além de ser a localização de um dos países mais industriais e consumistas do mundo, a China. Esses fatores justificam problemas relacionados à geração de RS e a necessidade de aumentar a produção científica sobre as consequências do descarte desses materiais em unidades inapropriadas, como lixões e aterros (Assadourian et al., 2004; Brito et al., 2009).

Figura 7 – Distribuição dos estudos sobre a contaminação de diferentes matrizes por metais potencialmente tóxicos de aterros e lixões ao redor do globo (2000-2019)



O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) apontou, em relatório de 2005, que a Nigéria adotou campanhas de educação pública em prol do saneamento desde 1980, apresentando resultados favoráveis que variaram desde grandes reduções do despejo indiscriminado de RS até sua coleta e a limpeza das ruas do país. No entanto, Ike et al. (2018) relataram diversos problemas no gerenciamento dos RS nigerianos, entre eles o grande volume de lixo (0,65-0,95 kg/pessoa/dia ~ 42 milhões de toneladas anualmente), falta de recursos financeiros e o monopólio das agências dos governos estaduais. A Índia também possui sérios

problemas de saneamento básico, o que se deve, entre outras coisas, à sua enorme população (UNEP; Calrecovery, Inc, 2005).

Todos os trabalhos brasileiros encontrados são de caráter diagnóstico. Não foi possível notar uma grande variação no número de publicações no país ao se comparar os períodos antes e depois da criação da PNRS, apenas se observou que cinco trabalhos foram publicados até 2010 e dois depois de 2010. A baixa quantidade de publicações brasileiras sobre esse tema sugere três possibilidades principais: (i) existe um número maior de artigos produzidos, porém eles fazem parte do acervo de outras bases de dados indexadas; (ii) há um número maior de publicações, porém elas estão disponíveis apenas em bases de dados não indexadas; e (iii) realmente não há tantas publicações científicas sobre o tema no Brasil.

Entre os objetivos da ciência estão o desenvolvimento tecnológico e a aplicação do conhecimento para solucionar questões práticas, por isso, entre as três possibilidades citadas, as duas últimas são preocupantes, uma vez que a produção científica de qualidade é a melhor forma de encontrar meios para resolver problemas que ameaçam a biodiversidade e a saúde humana, como é o caso da contaminação de recursos naturais por metais potencialmente tóxicos.

Desse modo, é de fundamental importância que os cientistas ambientais produzam mais trabalhos científicos e se preocupem com a qualidade e com a popularização de suas produções. Não é interessante produzir ciência inconsistente e, muito menos, para ficar engavetada, sem cumprir seu papel nas esferas social, ambiental e tecnológica. O Brasil, um país que ainda sofre com a deposição inadequada de resíduos e com a consequente contaminação do meio ambiente, precisa dar mais atenção a isso.

4. CONCLUSÃO

Este estudo possibilitou verificar que houve aumento do número de publicações relacionadas à contaminação de água, sedimento e solo por metais em áreas de depósitos de lixo principalmente a partir de 2008, sendo que 2019 foi o ano com maior quantidade de artigos publicados sobre o tema no período avaliado (N = 28).

A maior parte dos artigos encontrados foi de caráter diagnóstico, 95,51%. Oito estudos foram mitigatórios, sendo sete deles voltados para a remediação de solos afetados por metais. A maioria dos estudos investigou a presença de metais no solo. Os metais mais pesquisados foram chumbo (91,57%), zinco (79,21%), cobre (78,65%), cromo (66,85%), cádmio (65,73%) e níquel (62,92%).

A Ásia foi o continente com maior número de publicações (N = 76). A Nigéria foi o país com mais estudos publicados (N = 29), seguida pela Índia (N = 21). O Brasil publicou sete estudos. Não foi possível perceber alterações significativas na produção brasileira sobre o tema antes e após a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

A grande diferença entre o número de artigos de caráter diagnóstico e o número de artigos de caráter mitigatório indica a necessidade da produção de mais estudos voltados para a remediação de ecossistemas contaminados por metais potencialmente tóxicos provenientes de lixões e aterros, através de técnicas como a fitorremediação, a biorremediação e a quelação.

Destaca-se ainda a necessidade de um olhar especial para solos contaminados por metais, uma vez que a presença de espécies nocivas nesse compartimento pode levar à degradação de outros recursos naturais e à biomagnificação de contaminantes metálicos.

5. REFERÊNCIAS

Akintan, O. B.; Olusola, J. A.; Azeez, A. M., 2019. Heavy metals loads in soil, farmlands and plant crop at open dumpsite. Global Journal of Environmental Science and Management, v. 5, (4), 449 - 460. https://doi.org/10.22034/gjesm.2019.04.05.

Araújo, T. B. de., 2015. Avaliação de impactos ambientais em um lixão inativo no município de Itaporanga – PB. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande.

Assadourian, E.; Flavin, C.; French, H.; Gardner, G.; Halweil, B.; Mastny, L.; Nierenberg, D.; Postel, S.; Renner, M.; Sarin, R.; Sawin, J.; Starke, L.; Vickers, A., 2004. State of the world. The Worldwatch Institute, Washington, 273 pp.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, 2017. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016. ABRELPE, São Paulo, 64 pp.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, 2018. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017. ABRELPE, São Paulo, 74 pp.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, 2019. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019. ABRELPE, São Paulo, 68 pp.

Ayesa, S. A.; Chukwuka, K. S.; Odeyemi, O. O., 2018. Tolerance of Tithonia diversifolia and Chromolaena odorata in heavy metal simulated-polluted soils and three selected dumpsites. Toxicology Reports, v. 5, 1134 - 1139. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2018.11.007.

Azevedo, F. A., 2003. Toxicologia do mercúrio. RiMa/InterTox, São Paulo, 272 pp.

Azevedo, P. B.; Leite, J. C. A.; Oliveira, W. S. N. de; Silva, F. M. da; Ferreira, P. M. de L., 2015. Diagnóstico da degradação ambiental na área do lixão de Pombal – PB. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 10, (1), 20 - 34. https://doi.org/10.18378/rvads.v10i1.3294.

Baran, E. J., 2005. Suplementação de Elementos Traço. Química Nova na Escola, (6), 7 - 12.

Benoit, K.; Watanabe, K.; Wang, H.; Nulty, P.; Obeng, A.; Müller, S. Matsuo, A., 2018. Quanteda: An R package for the quantitative analysis of textual data. Journal of Open Source Software, v. 3, (774), 1 - 4. https://doi.org/10.21105/joss.00774.

Boateng, T. K.; Opoku, F.; Akoto, O., 2019. Heavy metal contamination assessment of groundwater quality: a case study of Oti landfill site, Kumasi. Applied Water Science, v. 9, (33), 1 - 15. https://doi.org/10.1007/s13201-019-0915-y.

Borah, P.; Gujre, N.; Rene, E. R.; Rangan, L.; Paul, R. K.; Karak, T.; Mitra, S., 2020. Assessment of mobility and environmental risks associated with copper, manganese and zinc in soils of a dumping site around a Ramsar site. Chemosphere, v. 254, (126852), 1 - 13. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126852.

Botkin, D. B.; Keller, E. A., 2016. Ciência Ambiental: Terra, um planeta vivo. LTC, Rio de Janeiro, 716 pp.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente – MMA, 2010. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Diário Oficial da União, Brasília.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente – MMA, 2011. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. MMA, Brasília, 187 pp.

Brasil. Senado Federal do Brasil., 2014. Resíduos Sólidos: lixões persistem. Em discussão, v. 5, (22), 1 - 35.

Brito, F.; Carvalho, J. A. M. de; Turra, C. M.; Queiroz, B. L., 2009. As tendências da população mundial: rumo ao crescimento zero. UFJF, 1 - 18.

Chen, G.; Sun, Y.; Xu, Z.; Shan, X.; Chen, Z., 2019. Assessment of Shallow Groundwater Contamination Resulting from a Municipal Solid Waste Landfill-A Case Study in Lianyungang, China. Water, v. 11, (2496), 1 - 18. http://dx.doi.org/10.3390/w11122496.

Cruvinel, V. R. N.; Zolnikov, T. R.; Obara, M. T.; Vianna, E. N., 2020. Vector-borne diseases in waste pickers in Brasilia, Brazil. Waste Management, v. 105, (2020) 223 - 232. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.001.

Denton, G. R. W.; Emborski, C. A.; Hachero, A. A. B.; Masga, R. S.; Starmer, J. A., 2016. Impact of WWII dumpsites on Saipan (CNMI): heavy metal status of soils and sediments. Environmental Science and Pollution Research, v. 23, 11339 - 11348. http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-6603-7.

Dias, S. G., 2012. O desafio da gestão de resíduos sólidos urbanos. Sociedade e Gestão, v. 11, (1), 16 - 20.

Ebong, G. A.; Dan, E. U.; Inam, E.; Offiong, N. O., 2019. Total concentration, speciation, source identification and associated health implications of trace metals in Lemna dumpsite soil, Calabar, Nigeria. Journal of King Saud University Science, v. 31, 886 - 897. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.01.005

Fadini, P. S.; Fadini, A. A. B., 2001. Lixo: desafios e compromissos. Química Nova na Escola, edição especial, 9 - 18.

Gohain, S. B.; Bordoloi, S., 2017. Higher concentration of heavy metals in surface water and fish near a municipal solid waste dump in Guwahati, Assam, India. Current Science, v. 113, (9), 1659 - 1661.

Gouveia. N., 2012. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. Ciência & Saúde Coletiva, v. 17, (6), 1503 - 1510. https://doi.org/10.1590/S1413-81232012000600014.

Guilherme, L. R. G.; Marques, J. J.; Pierangeli, M. A. P.; Zuliani, D. Q., 2005. Elementos traço em solos e sistemas aquáticos. Tópicos em Ciência do Solo, 345 - 390. http://dx.doi.org/10.13140/2.1.4821.1524.

Hassan, A.; Pariatamby, A.; Ahmed, A.; Auta, H. S.; Hamid, F. S., 2019. Enhanced Bioremediation of Heavy Metal Contaminated Landfill Soil Using Filamentous Fungi Consortia: a Demonstration of Bioaugmentation Potential. Water Air and Soil Pollution, v. 230, (215), 1-20. https://doi.org/10.1007/s11270-019-4227-5.

Huang, Y.; YongXia, L.; Yang, J.; Xu, M.; Sun, B.; Gao, F.; Wang, N., 2015. Harmful Chemicals in Soil and Risk Assessment of an Abandoned Open Dumpsite in Eastern China. Journal of Chemistry, v. 2015, (2), 1 - 10. http://dx.doi.org/10.1155/2015/297686.

Ike, C. C.; Ezeibe, C. C.; Anijiofor, S. C.; Daud, N. N. N., 2018. Solid waste management in Nigeria: problems, prospects, and policies. Journal of Solid Waste Technology and Management, v. 44, (2), 163 - 172. http://dx.doi.org/10.5276/JSWTM.2018.163.

Iqbal, A.; Tabinda, A. B.; Yasar, A., 2019. Environmental risk assessment of a young landfill site and its vicinity for possible human exposure. Human and Ecological Risk Assessment, v. 27, (1), 1 - 16. https://doi.org/10.1080/10807039.2019.1706152.

Ivovic, V.; Kalan, K.; Zupan, S.; Buzan, E., 2015. Illegal waste sites as a potential micro foci of mediterranean leishmaniasis: first records of phlebotomine sand flies (diptera: psychodidae) from slovenia. Acta Veterinaria-Beograd, v. 65, (35), 348 - 357. http://dx.doi.org/10.1515/acve-2015-0029.

Jayanthi, B.; Emenike, C. U.; Auta, S. H.; Agamuthu, P.; Fauziah, S. H., 2017. Characterization of induced metal responses of bacteria isolates from active non-sanitary landfill in Malaysia. International Biodeterioration & Biodegradation, v. 119, 467 - 475. https://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2016.10.053.

Jayanthi, B.; Emenike, C.; Periathamby, A.; Simarani, K., 2016. Selected microbial diversity of contaminated landfill soil of Peninsular Malaysia and the behavior towards heavy metal exposure. Catena, v. 147, 25 - 31. http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.033.

Kumari, P.; Gupta, N. C.; Kaur, A.; Singh, K., 2019. Application of Principal Component Analysis and Correlation for Assessing Groundwater Contamination in and around Municipal Solid Waste Landfill of Ghazipur, Delhi. Journal of the Geological Society of India, v. 94, (6), 595 - 604. http://dx.doi.org/10.1007/s12594-019-1366-7.

Lima, C. V. S. de; Meurer, E. J., 2013. Elementos Traço no Solo, nas Águas e nas Plantas de uma Lavoura de Arroz Irrigado do Rio Grande do Sul. Revista de Estudos Ambientais, v. 15, (1), 20 - 30. http://dx.doi.org/10.7867/1983-1501.2013v15n1p20-30.

Majumdar, D.; Srivastava, A., 2012. Volatile organic compound emissions from municipal solid waste disposal sites: A case study of Mumbai, India. Journal of the Air & Waste Management Association, v. 62, (4), 398 - 407. https://doi.org/10.1080/10473289.2012.655405.

Mamedes, I. M., 2017. Influência da disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos sobre o solo: estudo de caso do Lixão de Várzea Grande-MT. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 5, (2), 327 - 336. http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v5e22016327-336.

Marx, S. K.; Kamber, B. S., 2010. Trace-element systematics of sediments in the Murray–Darling Basin, Australia: Sediment provenance and palaeoclimate implications of fine scale chemical heterogeneity". Applied Geochemistry, v. 25, (8), 1221 - 1237. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.05.007.

Medeiros, S. B. de., 2005. Química Ambiental. COPYSIM, Recife, 122 pp.

Onyekwelu, I.; Okechukwu, A., 2019. Impact of organic contaminants from dumpsite leachates on natural water sources in the Enugu Metropolis, southeastern Nigeria. Environmental Monitoring and Assessment, v. 191, (9), 1 - 20. https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10661-019-7719-2.

Otabor, K. E., 2019. Chemical speciation and mobility study of some heavy metals in soils around municipal solid waste dumpsites in Benin City metropolis, Nigeria. SN Applied Sciences, v. 1, (12), 1 - 14. https://doi.org/10.1007/s42452-019-1700-0.

Pandey, R. K.; Tiwari, R. P.; Kirloskar, S. G., 2013. Impact of Municipal Solid Waste on Subsurface Water Quality near the Landfill Site. International Journal of Engineering Research & Technology, v. 2, (9), 3767 - 3772.

Raja, R.; Pal, S., 2019. Remediation of heavy metal contaminated soils by solidification/stabilization with fly ash, quick lime and blast furnace slag. Journal of the Indian Chemical Society, v. 96, (4), 481 - 486.

Roumak, V. S.; Levenkova, E. S.; Umnova, N. V.; Popov, V. S.; Turbabina, K. A.; Shelepchikov, A. A., 2018. The content of dioxins and furans in soils, bottom sedimentsof water bodies, and tissues of small mammals near the landfill sitewith municipal solid wastes (Moscow, Russia). Environmental Science and Pollution Research, v. 25, 29379 - 29386. https://doi.org/10.1007/s11356-018-2933-y.

Ruchuwararak, P.; Intamat, S.; Tengjaroenkul, B.; Neeratanaphan, L., 2019. Bioaccumulation of heavy metals in local edible plants near a municipal landfill and the related human health risk assessment. Human and Ecological Risk Assessment, v. 25, (1), 1 - 13. http://dx.doi.org/10.1080/10807039.2018.1473755.

Salam, M. M. A.; Kaipiainen, E.; Mohsin, M.; Villa, A., 2016. Effects of contaminated soil on the growth performance of young Salix (*Salix schwerinii E. L. Wolf*) and the potential for phytoremediation of heavy metals. Journal of Environmental Management, v. 183, (3), 467 - 477. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.082.

Salem, Z. B.; Laffray, X.; Al-Ashoor, A.; Ayadi, H.; Aleya, L., 2017. Metals and metalloid bioconcentrations in the tissues of Typha latifolia grown in the four interconnected ponds of a domestic landfill site. Journal of Environmental Sciences, v. 54, 56 - 68. https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.10.039.

Santos, T. A. dos; Bonfim, T. M.; Silva, F. S.; Silva, A. G.; Bandeira, M. L. S. de F.; Jesus, R. M. de; Nascimento, L. D., 2018. Determinação de metais em um sistema estuarino: *Laguncularia racemosa* como um potencial indicador de contaminação. RBCIAMB, (49), 51 - 65. https://doi.org/10.5327/10.5327/Z2176-947820180352.

Sharma, V.; Pant, D., 2018. Biocompatible metal decontamination from soil using *Ageratum conyzoides*. Environmental Science and Pollution Research, v. 25, (531) 22294 - 22307. https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-018-2343-1.

Silva, E. de., 2015. Educação Ambiental: Lixo urbano de problema a possibilidades. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Paraná, Paranaguá.

Stefanescu, R.; Butnariu, A. E.; Zamfirache, M. M.; Surleva, A. R., 2017. Yeast-based microbiological decontamination of heavy metal contaminated soils of Tarnita. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, v. 12, (1), 153 - 159.

Tavares, S. R. de L., 2013. Técnicas de Remediação. In: Tavares, S. R. de L. Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados: conceitos básicos e fundamentos. Clube de Autores, Joinville, pp. 61 - 90.

UNEP; CALRECOVERY, INC., 2005. Solid Waste Management (Volume II: Regional Overviews and Information Sources). IETC, Califórnia (USA), Osaka (Japão), 334 pp.

Vilhena, A. (Coord.), 2018. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. CEMPRE, São Paulo, 316 pp.

Yuan, Y.; Sun, T.; Wang, H.; Liu, Y., 2019. Bioaccumulation and health risk assessment of heavy metals to bivalve species in Daya Bay (South China Sea): Consumption advisory. Marine Pollution Bulletin, v. 150, (2), 110717. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110717.

6. MATERIAL SUPLEMENTAR

APÊNDICE A – Periódicos onde os estudos foram publicados

Na Tabela 2 estão listados os periódicos e a quantidade de artigos publicada em cada um deles.

Tabela 2 – Quantitativo de publicações que abordam a contaminação de diferentes matrizes por metais potencialmente tóxicos de aterros e lixões por periódicos (2000-2019)

Periódicos	Número de artigos publicados
Environmental Monitoring And Assessment	12
Environmental Science And Pollution Research	7
Waste Management	7
Environmental Earth Sciences	6
Bulletin Of Environmental Contamination And Toxicology	5
Journal Of Environmental Management	4
Water Air And Soil Pollution	4
Applied Ecology And Environmental Research	3
Carpathian Journal Of Earth And Environmental Sciences	3
Chemosphere	3
Environmental Geochemistry And Health	3
Human And Ecological Risk Assessment	3
International Journal Of Environmental Research	3
International Journal Of Environmental Science And Technology	3
Journal Of Health And Pollution	3
Marine Pollution Bulletin	3
Science Of The Total Environment	3
Applied Geochemistry	2
Chemical Speciation And Bioavailability	2
Chemistry And Ecology	2
Current Science	2
Ecological Engineering	2
Environmental Engineering And Management Journal	2
Environmental Pollution	2

Environmental Processes-An International Journal	2
Fresenius Environmental Bulletin	2
International Journal Of Geomate	2
Journal Of Environmental Monitoring	2
Journal Of Geochemical Exploration	2
Polish Journal Of Environmental Studies	2
Soil & Sediment Contamination	2
Water	2
ACTA Amazonica	1
ACTA Montanistica Slovaca	1
African Journal Of Biotechnology	1
Air Soil And Water Research	1
Applied Water Science	1
Arabian Journal For Science And Engineering	1
Arabian Journal Of Geosciences	1
Archives Of Environmental & Occupational Health	1
Asian Journal Of Chemistry	1
Australian Journal Of Soil Research	1
Bioresource Technology	1
Bioscience Biotechnology Research Communications	1
Bulletin Of The Chemical Society Of Ethiopia	1
Catena	1
Cerne	1
Chemie Der Erde-Geochemistry	1
Chemistry Central Journal	1
Data In Brief	1
Ecotoxicology And Environmental Safety	1
E-Journal Of Chemistry	1
Environmental Geology	1
Environmental Progress & Sustainable Energy	1
Environmental Technology	1
Global Challenges	1
Global Journal Of Environmental Science And Management-Gjesm	1
Global Nest Journal	1
International Biodeterioration & Biodegradation	1

International Journal Of Environment And Pollution	1
International Journal Of Environmental Research And Public Health	1
International Journal Of Pure And Applied Zoology	1
Iranian Journal Of Environmental Health Science & Engineering	1
Journal De Physique Iv	1
Journal Of Chemistry	1
Journal Of Elementology	1
Journal Of Engineering Science And Technology	1
Journal Of Environmental Biology	1
Journal Of Environmental Engineering And Landscape Management	1
Journal Of Environmental Health Science And Engineering	1
Journal Of Environmental Radioactivity	1
Journal Of Environmental Science And Management	1
Journal Of Environmental Sciences	1
Journal Of Fundamental And Applied Sciences	1
Journal Of Hazardous Materials	1
Journal Of King Saud University Science	1
Journal Of Radiation Research And Applied Sciences	1
Journal Of The Air & Waste Management Association	1
Journal Of The Chemical Society Of Pakistan	1
Journal Of The Geological Society Of India	1
Journal Of The Indian Chemical Society	1
Management Of Environmental Quality	1
Metalurgia International	1
Moroccan Journal Of Chemistry	1
Mutation Research-Genetic Toxicology And Environmental Mutagenesis	1
Natural Hazards	1
News Of The National Academy Of Sciences Of The Republic Of Kazakhstan-Series Of Geology And Technical Sciences	1
Open Chemistry	1
Oriental Journal Of Chemistry	1
Pertanika Journal Of Science And Technology	1
Plant Soil And Environment	1
Quaternary International	1
Quimica Nova	1

Revista Virtual De Quimica	1
Sains Malaysiana	1
Scientific Research And Essays	1
Sn Applied Sciences	1
Soil Biology & Biochemistry	1
South African Journal Of Botany	1
Studia Universitatis Babes-Bolyai Chemia	1
Thescientificworldjournal	1
Toxicology Reports	1
Visnyk Of Taras Shevchenko National University Of Kyiv-Geology	1
Waste Management & Research	1
Water Science And Technology	1

Este artigo/capítulo está formatado segundo as nomas do PPGCTA.

Disponível no site: https://ufsb.edu.br/cfcam/pt-br/pos-graduacao/ppgcta.

CAPÍTULO 2

Avaliação da contaminação de compartimentos naturais abióticos adjacentes ao lixão de Porto Seguro, Bahia

RESUMO

A gestão inadequada de resíduos sólidos urbanos (RSU) representa um grave problema ambiental e socioeconômico a nível global, pois ocasiona a introdução de espécies químicas iminentemente perigosas, como os metais potencialmente tóxicos (MPT), nos diferentes compartimentos naturais. Dessa forma, esse estudo objetivou verificar a qualidade da água, do sedimento e do solo em alguns pontos próximos ao lixão de Porto Seguro (BA), de modo a verificar se pode estar havendo contaminação desses compartimentos naturais pelos metais Cr, Ni, Cu, Zn, Cd e Pb, advindos da decomposição dos RSU. Parâmetros físico-químicos de qualidade da água foram determinados *in situ* com sonda multiparâmetro, foram eles: temperatura, pH, oxigênio dissolvido, salinidade, condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos; foram realizadas ainda análises de nitrito, nitrato, nitrogênio total, amônia, fósforo total, sólidos totais, demanda bioquímica de oxigênio e coliformes termotolerantes. Para sedimento e solo foram feitas análises de pH, umidade, cinzas, matéria orgânica e carbono orgânico total. A determinação dos metais nas três matrizes foi feita em um Espectrômetro de Emissão Atômica com Plasma de Microondas (MIP OES); as amostras de sedimento e solo passaram por digetão ácida (USEPA, método 3050-B). Para o tratamento dos dados utilizou-se estatística descritiva, teste t de *Student* e teste de *Wilcoxon*, além da Análise de Componentes Principais e correlação de Pearson. Determinou-se também o Índice de Poluição por Metal e o Índice de Poluição da água do rio Buranhém e o Índice de Geoacumulação (Igeo) de metais no sedimento e no solo. Por último realizou-se uma avaliação de risco não carcinogênico para a saúde humana para os metais encontrados no sedimento e no solo. No geral as matrizes estudadas apresentaram valores dentro dos limites estabelecidos pelos órgãos reguladores. As concentrações dos metais variaram da seguinte forma nas amostras: água (mg L^{-1}) → Cr: 0,005-0,079, Cu: 0,003-0,005; sedimento (mg kg^{-1}) → Cd: 0,10-0,17, Cr: 0,49-1,69, Cu: 0,79-1,23, Pb: 2,07-4,11, Zn: 3,55-9,75; solo (mg kg^{-1}) → Cr: 5,50-32,16, Cu: 1,50-16,44, Ni: 0,87-7,75, Pb: 3,93-24,44, Zn: 2,57-62,65. A concentração de cromo na água do ponto 6 (0,079 mg L^{-1}) excedeu o limite indicado pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (0,05 mg L^{-1}). Os sedimentos analisados possuíam, em maioria, pH alcalino, enquanto os solos tenderam a apresentar pHs ácidos. O sedimento apresentou menores teores de matéria orgânica em comparação com o solo (5,20-17,99% e 10,64-49,07%, respectivamente). A correlação de Pearson mostrou mais interações fortes para o solo. O Índice de poluição mostra pontos do rio afetados por Cu. O Índice de Poluição por Metal (MI) mostrou que o ponto de análise 6, um dos mais próximos do lixão, está no limiar de risco de poluição por metais. O Igeo do solo indicou caráter fortemente a extremamente poluído por Zn nos pontos 3 e 4. A CDI apontou que o maior risco não carcinogênico para a saúde humana vem da presença de Cd no ponto 7 de sedimento e no ponto 4 de solo.

Palavras-chave: Metais. Resíduos sólidos municipais. Água. Sedimentos. Solo. Rio Buranhém. Índice de metal. Índice de qualidade da água. Índice de geoacumulação. Índice de poluição.

Contamination assessment of abiotic natural compartments adjacent to the dump in Porto Seguro, Bahia

ABSTRACT

The inadequate management of urban solid waste (MSW) represents a serious environmental and socioeconomic problem at a global level, as it causes the introduction of imminently dangerous chemical species, such as potentially toxic metals (MPT), in the different natural compartments. Thus, this study aimed to verify the quality of water, sediment and soil in some points close to the Porto Seguro (BA) dump, in order to verify if there may be contamination of these natural compartments by the metals Cr, Ni, Cu, Zn, Cd and Pb, arising from the decomposition of MSW. Physical-chemical parameters of water quality were determined in situ with a multiparameter probe, they were: temperature, pH, dissolved oxygen, salinity, electrical conductivity and total dissolved solids; analyzes of nitrite, nitrate, total nitrogen, ammonia, total phosphorus, total solids, biochemical oxygen demand and thermotolerant coliforms were also performed. For sediment and soil, pH, moisture, ash, organic matter and total organic carbon were analyzed. The determination of metals in the three matrices was carried out in a Microwave Plasma Atomic Emission Spectrometer (MIP OES); sediment and soil samples underwent acid digestion (USEPA method 3050-B). Descriptive statistics, Student's t test and Wilcoxon test were used for data treatment, in addition to Principal Component Analysis and Pearson's correlation. The Metal Pollution Index and the Water Pollution Index of the Buranhém River and the Geoaccumulation Index (Igeo) of metals in sediment and soil were also determined. Finally, a non-carcinogenic risk assessment for human health for metals found in sediment and soil was carried out. In general, the studied matrices presented values within the limits established by Organs regulatory bodies. Metal concentrations varied as follows in the samples: water (mg L^{-1}) → Cr: 0.005-0.079, Cu: 0.003-0.005; sediment (mg kg^{-1}) → Cd: 0.10-0.17, Cr: 0.49-1.69, Cu: 0.79-1.23, Pb: 2.07-4.11, Zn: 3 .55-9.75; soil (mg kg^{-1}) → Cr: 5.50-32.16, Cu: 1.50-16.44, Ni: 0.87-7.75, Pb: 3.93-24.44, Zn: 2 .57-62.65. The chromium concentration in water at point 6 (0.079 mg L^{-1}) exceeded the limit indicated by the National Environmental Council (0.05 mg L^{-1}). The analyzed sediments had, for the most part, alkaline pH, while the soils tended to present acidic pHs. The sediment had lower organic matter contents compared to the soil (5.20-17.9%) and 10.64-49.07%, respectively. Pearson's correlation showed more strong interactions for the soil. The Pollution Index shows points in the river affected by Cu. The Metal Pollution Index (MI) showed that analysis point 6, one of the closest to the dump, is at the threshold of metal pollution risk. The soil igeo indicated strongly to extremely polluted by Zn at points 3 and 4. The CDI pointed out that the greatest non-carcinogenic risk to human health comes from the presence of Cd at point 7 of sediment and point 4 of soil.

***Keywords*:** Metals. Municipal solid waste. Water. Sediments. Soil. Buranhém River. Metal pollution index. Water quality index. Geoaccumulation index. Pollution index.

1. INTRODUÇÃO

A gestão inadequada de resíduos sólidos urbanos (RSU) representa um grave problema ambiental e socioeconômico a nível global, pois ocasiona a introdução de espécies químicas potencialmente perigosas nos diferentes compartimentos naturais. Sem destinação correta e disposição final adequada, os RSU são direcionados para lixões ou aterros controlados, onde a decomposição e a queima dos resíduos liberam gases que poluem a atmosfera, além de originar líquidos percolados e contaminantes orgânicos e inorgânicos que podem se infiltrar no solo e atingir mananciais subterrâneos ou ser lixiviados para cursos d'água superficiais (UNEP; CALRECOVERY, INC, 2005; MOTA et al., 2009; ALBUQUERQUE; COLUNA, 2018).

O Brasil está entre os dez países que mais produzem lixo no mundo (SENADO FEDERAL, 2014). A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) apontou, em 2017, que muitos municípios brasileiros ainda descartam seus resíduos sólidos em lixões e aterros irregulares. Além disso, o número de cidades brasileiras que passou a depositar resíduos em lixões aumentou em 2017 com relação a 2016. No mesmo ano um houve aumento na quantidade de RSU gerada no país, com um incremento de 0,48% na quantidade de lixo gerada por pessoa ao dia. O volume de lixo coletado ao ano no Brasil também cresceu um pouco em 2017, equivalendo a mais de 91% dos RSU gerados, sendo a região Nordeste a menos favorecida pela coleta (79,06% dos resíduos) (ABRELPE, 2017).

Apesar de grande parte dos RSU brasileiros serem coletados, a destinação dada a eles nem sempre contribui para a preservação dos recursos naturais. Dos RSU coletados em 2017 59,1% foram dispostos em aterros sanitários, 22,9% em aterros controlados e 18,0% em lixões. Atualmente, os aterros sanitários são os espaços mais indicados para a disposição final de RSU no país, pois possuem preparo prévio do solo e captação e tratamento de gases e líquidos percolados advindos da decomposição do lixo. A falta de manutenção nos aterros sanitários pode levar à "sucatização" desses espaços e à consequente degradação da área onde ele se situa, gerando assim riscos à segurança e à saúde públicas (PORTELLA; RIBEIRO, 2014; ABRELPE, 2017).

No município de Porto Seguro, cidade turística localizada na Costa do Descobrimento, no Brasil, o local para onde são destinados os RSU está situado numa Área de Preservação Permanente (APP), próxima a residências e ao rio Buranhém e sobre um terreno que abriga importantes mananciais subterrâneos (LOPES, 2000). Esse espaço de destinação foi projetado para ser um aterro sanitário, no entanto, devido a diversas irregularidades, entre elas a ineficiência na coleta de líquidos percolados e a ausência de tratamento deles, Porto Seguro não

conta com um aterro sanitário, mas sim com um lixão, que apresenta riscos em potencial para as pessoas e para o meio ambiente (IBAMA, 2012).

A bacia do rio Buranhém nasce em Minas Gerais e possui área de 2.504,83 km², se estendendo por Minas e pela Bahia. O Buranhém fornece água às principais cidades que permeia e, ao longo do tempo, tem sofrido diversos impactos negativos devido ao uso indiscriminado da água, à ocupação do solo às suas margens, ao lixiviamento de substâncias nocivas advindas do lançamento de esgoto, da decomposição de resíduos sólidos e de produtos utilizados na produção agrícola e pecuária (AZEVEDO; GOMES; MORAES, 2016).

Entre as espécies químicas que podem estar contidas nos RSU ou ser originadas a partir deles, estão os metais potencialmente tóxicos, substâncias que podem levar à degradação do solo e da água, além de representarem sérios riscos para a biota e os seres humanos (LIMA; MEURER, 2013; BARON, 2005). Esses metais costumam apresentar alta toxicidade quando em concentrações acima das recomendadas pelos órgãos reguladores e chegam ao lixão através do descarte de diferentes tipos de materiais – como lâmpadas, inseticidas, pilhas, baterias, cerâmicas, plásticos, medicamentos, vidros coloridos, tintas – e com a decomposição dos resíduos podem se tornar disponíveis e ser arrastados para os compartimentos naturais (VILHENA, 2018).

A toxicidade dos metais está relacionada principalmente com os seguintes fatores: a alta reatividade de algumas espécies que os contêm; o fato de que muitos desses elementos não são metabolizáveis, podendo assim ser bioacumulados e biomagnificados, a depender de sua biodisponibilidade no meio ambiente; em razão de muitos deles não possuírem função biológica conhecida na fauna, na flora e nos seres humanos ou apresentarem efeitos prejudiciais devido à sua afinidade com diferentes tecidos vivos; e por conta dos seus efeitos poderem variar de imediato a longo prazo e ser agravados por contaminação progressiva e continuada (GUILHERME et al., 2005).

Os metais cromo, níquel, cobre e cádmio apresentam toxicidade média-alta em plantas, chumbo apresenta toxicidade média e zinco toxicidade baixa-média. Em mamíferos cádmio, chumbo e cromo VI (Cr^{6+}) têm toxicidade alta (e são bastante acumulativos), níquel, cobre e cromo III (Cr^{3+}) possuem toxicidade média e zinco possui toxicidade baixa-média (GILHERME et al., 2005). Em seres humanos, o excesso de chumbo pode causar distúrbios principalmente em órgãos da região abdominal, podendo afetar também o sistema nervoso (ATSDR, 2007) e o excesso de cádmio provoca danos ao fígado e aos rins, por exemplo (ATSDR, 2012a). O cádmio pode acarretar disfunção fisiológica em algumas espécies de peixes e impossibilitar sua sobrevivência (LIMA JÚNIOR et al., 2002). Em vegetais a presença

excessiva de níquel pode ser fitotóxica e causar clorose, possivelmente através da inibição do processo de fotossíntese (PENDIAS; PENDIAS, 2001). O cromo também é capaz de diminuir os níveis de pigmentos fotossintetizantes em plantas (ATSDR, 2012b).

Estima-se que mais de 40% dos resíduos sólidos mundiais ainda são depositados em lixões (ISWA-ABRELPE, 2015). A deposição ambientalmente inadequada de resíduos vem sendo alvo de diversos estudos, devido às suas consequências para os diferentes compartimentos naturais.

Entre os compartimentos abióticos prejudicados pela deposição irregular de lixo, o solo é aquele que tem o primeiro contato direto com os resíduos sólidos e com os produtos provenientes de sua decomposição, por isso existe uma grande preocupação com sua qualidade. A presença de metais potencialmente tóxicos no solo de aterros e lixões ou áreas próximas a eles constantemente é verificada através da análise direta desse compartimento ou até mesmo da vegetação presente nele e, mesmo quando não se encontra contaminação num primeiro diagnóstico, são recomendados estudos continuados para monitorar a evolução da qualidade dos compartimentos naturais presentes na área dos depósitos de lixo (OSIBOTE; RABIU, 2016; ADEBIYI; OLOUKOI, 2018; AFOLAYAN, 2018; AFOLAGBOYE et al., 2020; AGBESHIE, 2020). Um fator de importante influência nesse tipo de estudo é o tempo de utilização dos espaços para a deposição do lixo, pois quanto mais antigo o depósito, maiores as chances de haver contaminação por espécies metálicas nele (SINGH; VERMA; KUMAR, 2018).

A avaliação da contaminação das áreas onde depósitos de lixo estão inseridos é ainda de fundamental importância para aspectos sociais, econômicos e de saúde pública, pois indicam se as áreas são adequadas para atividades agrícolas e se apresentam riscos ecológicos e à saúde (AGBESHIE, 2020; GUJRE et al., 2021).

Uma vez no solo, os contaminantes podem ser arrastados para mananciais superficiais e subterrâneos, tornando assim a água imprópria para o consumo. Muitas pesquisas apontam a contaminação de lençóis freáticos por substâncias advindas de aterros e lixões a céu aberto e o risco que isso representa à natureza e às pessoas (ALAM et al., 2017; ELUMALAI; BRINDHA; LAKSHMANAN, 2017; KAVIYA et al., 2017; MURTAZA et al., 2017; RANA; GANGULY; GUPTA, 2018; CHOUDHURY et al., 2021).

A contaminação de cursos d'água superficiais próximos aos lixões também tem sido alvo de estudos, pois constitui uma ameaça em potencial para a biota dos ecossistemas aquáticos e para os indivíduos que usam essa água para fins diversos (ENITAN et al., 2018; YASIN; USMAN, 2017; MILHOME et al., 2018).

A presença de metais potencialmente tóxicos em corpos d'água superficiais propicia também o acúmulo desses elementos nos sedimentos de rios, lagos, lagoas, etc. (NASCIMENTO, 2015; EDOKPAYI et al., 2016; GAO et al., 2018; SOLIMAN; YOUNIS; ELKADY, 2019; SUN et al., 2019). Zhang et al. (2018) avaliaram a contaminação por metais potencialmente tóxicos em sedimentos de um rio e verificaram maior concentração desses elementos à jusante de possíveis fontes de contaminação, indicando um potencial risco ecológico mais alto nessa região.

Além dos riscos à saúde e ao meio ambiente, há também uma importante abordagem a problemas socioeconômicos que estão correlacionados à problemática dos lixões, como o grande número de pessoas que depende da coleta de resíduos para subsistência e as controversas existentes no que diz respeito à criação de cooperativas de catadores de lixo (COSTA et al., 2015; ARAÚJO; RIBEIRO, 2016).

Depósitos de lixo desativados também são um problema, pois o montante de resíduos alocado nos espaços ao longo dos anos precisa ter uma destinação e as áreas em questão precisam ser recuperadas através de políticas de mitigação que beneficiem o meio ambiente e a população. Yin et al. (2015) fizeram o mapeamento de uma área em Cingapura que abrigava um lixão e observaram que mesmo após 25 anos de desativado ainda havia chorume e gases compactados junto aos resíduos sólidos no subsolo do local.

Diante dos riscos apresentados, e uma vez que os resíduos sólidos de Porto Seguro são despejados indiscriminadamente num local sem preparo prévio do solo e próximo a um importante curso d'água, o objetivo desse estudo foi verificar a qualidade da água, do sedimento e do solo em alguns pontos próximos a esse depósito de lixo, de modo a verificar se pode estar havendo contaminação por metais potencialmente tóxicos advindos da decomposição dos resíduos.

Os objetivos específicos foram: (i) quantificar as concentrações dos metais traço Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, e Pb em água superficial e sedimentos do rio Buranhém e no solo do lixão e da área adjacente a ele; (ii) calcular o Índice de Geoacumulação (I_{geo}) de metais para o sedimento e o solo; (iii) calcular o Índice de poluição por metal (MI) e o Índice de poluição (PI) para a água do rio Buranhém; (iv) avaliar o risco de Ingestão Diária Crônica (CDI) de metais, por exposição ao sedimento e ao solo, para a saúde humana.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

Porto Seguro é uma cidade litorânea localizada no Sul da Bahia, no Brasil (Figura 1). A cidade possui área territorial de 2.285,734 km² e população de aproximadamente 150.658 habitantes, de acordo com estimativa feita pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para 2020. O município possui clima tropical, quente e úmido, com temperaturas mensais superiores a 18 °C e constitui um importante polo turístico, recebendo anualmente cerca de um milhão de visitantes, sendo que em algumas épocas do ano a população local aumenta em quase 100%. O elevado número de turistas somado ao quantitativo de habitantes permanentes acarreta no aumento significativo do consumo de recursos naturais e leva à geração de um volume muito maior de resíduos sólidos (ARAÚJO, 2004; BOMFIM; SILVA JÚNIOR, 2009).

A Prefeitura Municipal de Porto Seguro é responsável pela coleta dos resíduos sólidos da cidade, o que inclui, segundo a NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), "resíduos nos estados sólido e semissólido, resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição [...]" (ABNT, 2004).

Esse trabalho foi desenvolvido na área do lixão do município de Porto Seguro e em suas adjacências. Esse depósito de lixo está localizado numa Área de Preservação Permanente (APP) às margens da BR 367, a cerca de 17 km do centro da cidade (coordenadas geográficas: 478120.00 m E, 8187291.00 m S) e a cerca de 1,2 km da margem mais próxima do rio Buranhém (Figura 1) (IBAMA, 2012).

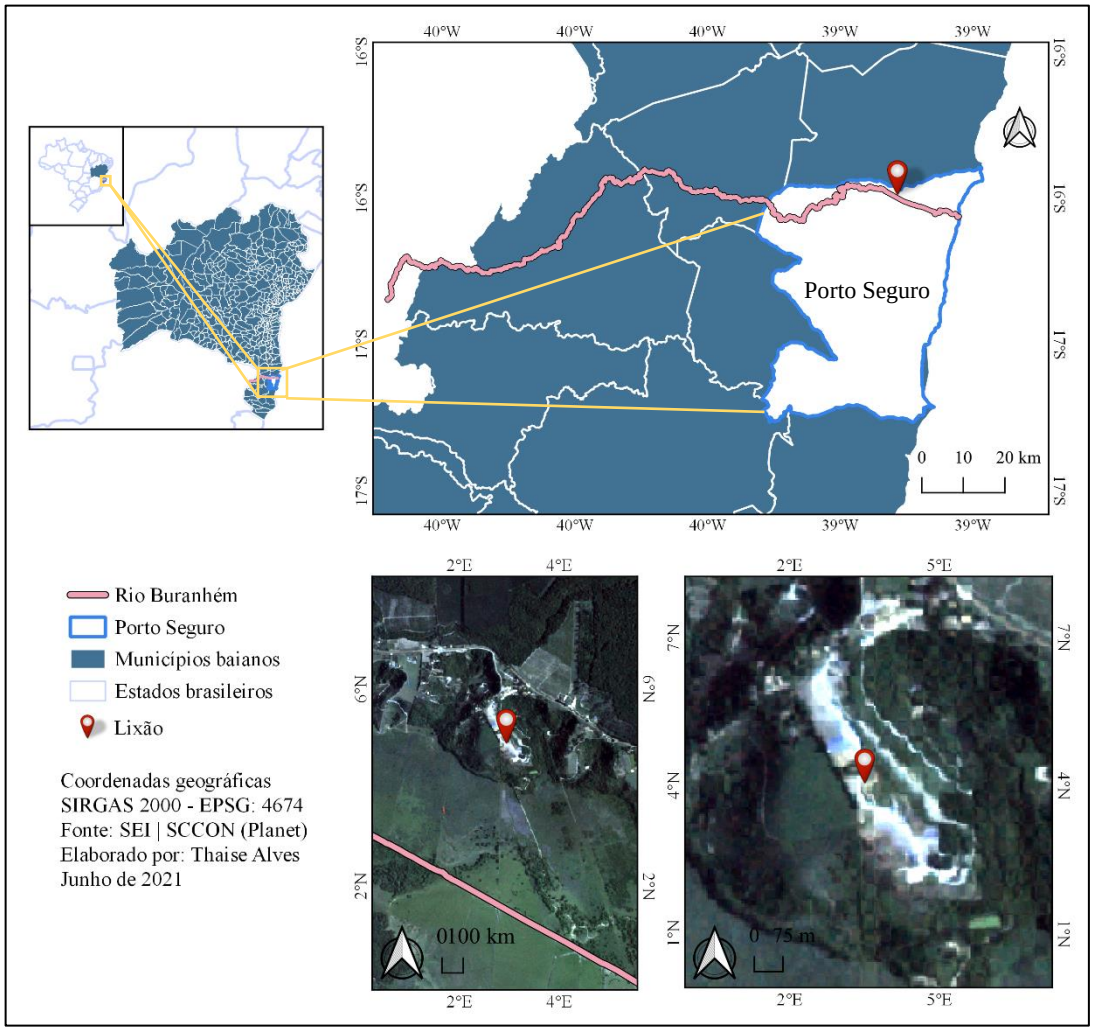


Figura 1 – Localização do município de Porto Seguro, Bahia, Brasil, do Rio Buranhém e do Lixão Municipal da cidade

2.2. Amostragem

Foram definidos sete pontos de coleta para a verificação da possível influência do depósito de lixo na qualidade do solo superficial, sendo três deles na área adjacente e externa ao lixão e os outros quatro dentro do lixão. Foi coletada ainda uma amostra de solo num fragmento de mata atlântica, a cerca de 8 km de distância do lixão, para se ter um valor de controle dos parâmetros em local distante do depósito de lixo (background) (Figura 2). As coordenadas geográficas dos locais de coleta do solo estão listadas na Tabela 1.

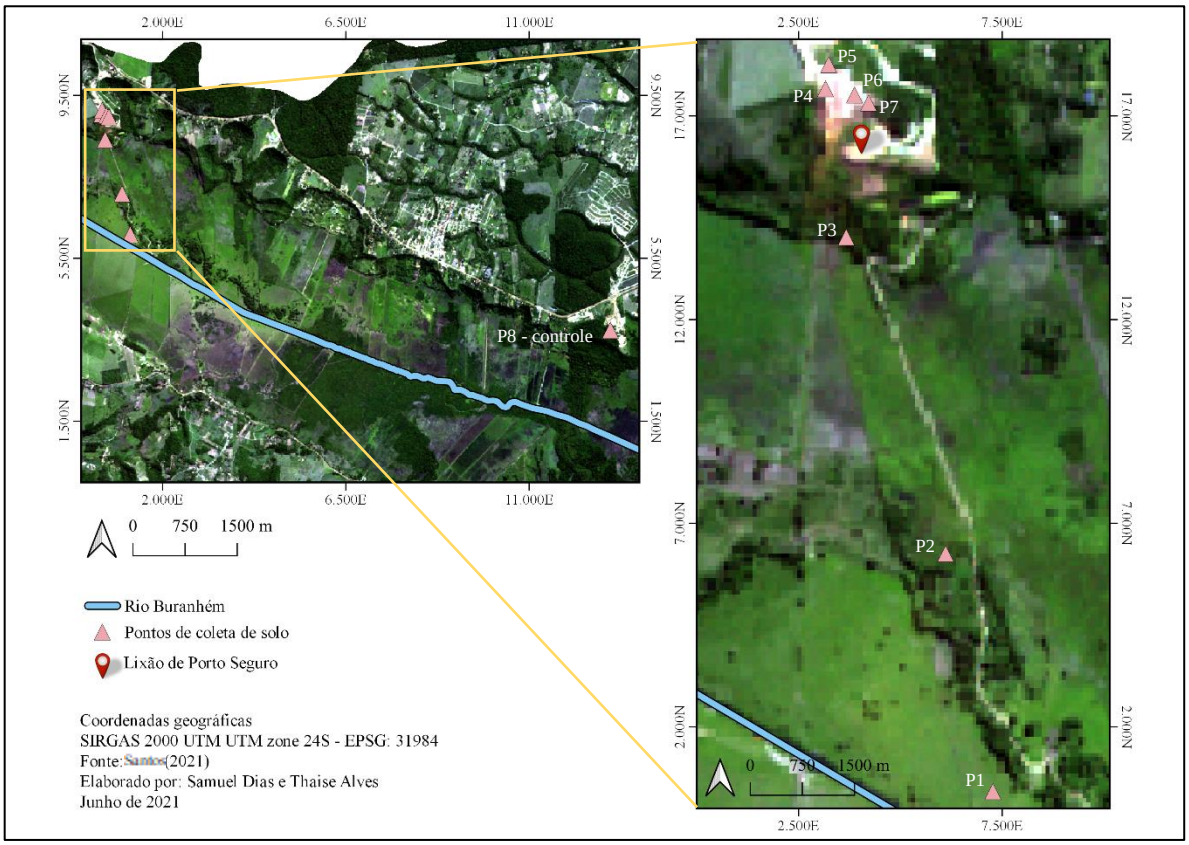


Figura 2 – Localização dos pontos de coleta de solo na área do lixão de Porto Seguro, Bahia

Tabela 1 – Coordenadas geográficas dos pontos de coleta de solo e distância aproximada entre os pontos e o lixão e entre os pontos e o rio Buranhém

Ponto de coleta	Distância aproximada do Ponto 1 (km)	Distância aproximada do lixão (km)	Distância aproximada do rio Buranhém (km)	Coordenadas geográficas	
				Latitude	Longitude
So1	-	1,83	0,16	-16.411583°	-39.201639°
So2	0,58	1,23	0,73	-16.406306°	-39.202722°
So3	1,41	0,44	1,54	-16.399278°	-39.205000°
So4	1,77	-	1,92	-16.395985°	-39.205472°
So5	1,83	-	1,96	-16.395450°	-39.205400°
So6	1,74	-	1,88	-16.396122°	-39.204807°
So7	1,72	-	1,85	-16.396300°	-39.204483°
So8 Background	7,02	7,91	7,06	-16.424083°	-39.136983°

Além disso, foram coletadas ainda nove amostras de água superficial e nove amostras de sedimento para verificação da qualidade desses compartimentos em cinco locais à montante e quatro à jusante do lixão (Figura 3). As coordenadas geográficas dos locais de coleta de água e sedimento estão listadas na Tabela 2.

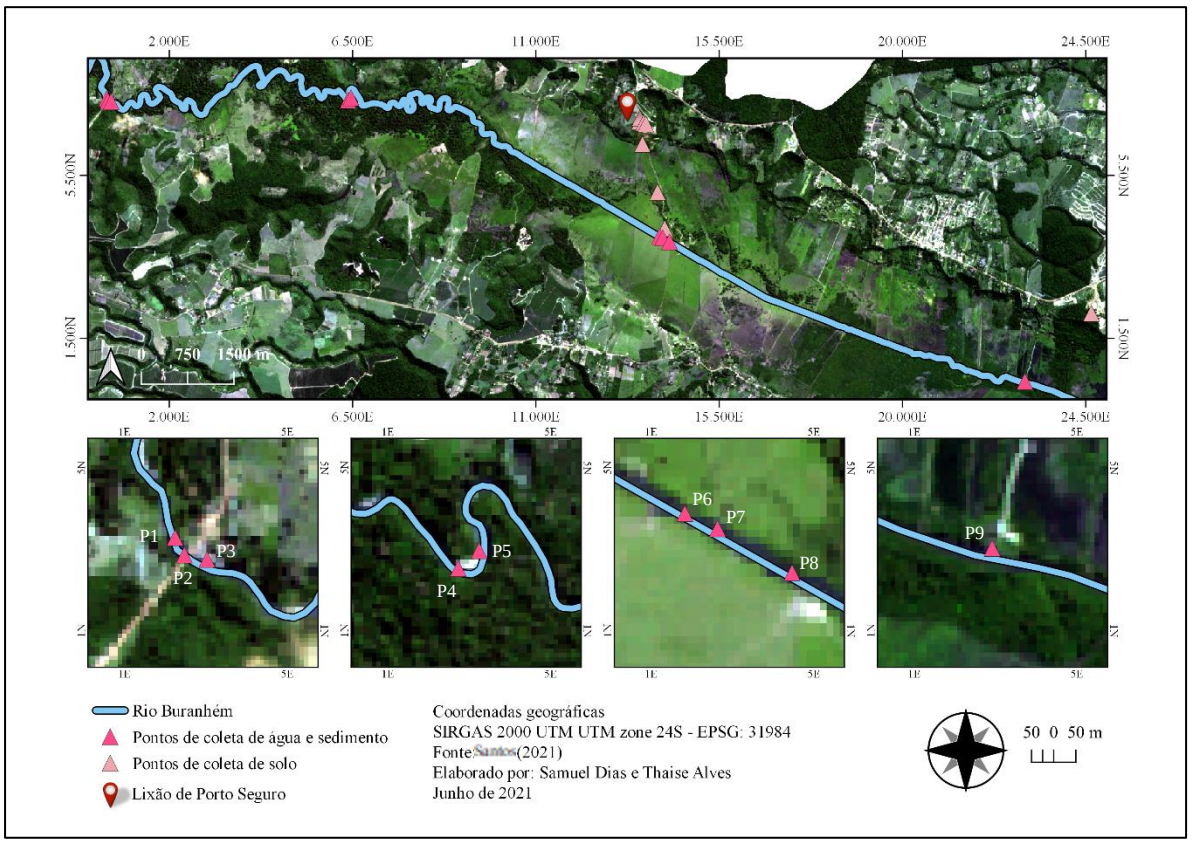


Figura 3 – Localização dos pontos de coleta de água e sedimento no rio Buranhém, em Porto Seguro, Bahia

Tabela 2 – Coordenadas geográficas dos pontos de coleta de água e sedimento e distância aproximada entre os pontos e o lixão

Ponto de coleta	Distância aproximada do Ponto 1 (km)	Distância aproximada do lixão (km)	Coordenadas geográficas		Horário de coleta (h)
			Latitude	Longitude	
1	-	8,69	-16.392501°	-39.286204°	09:10
2	0,04	8,66	-16.392854°	-39.286008°	09:30
3	0,08	8,61	-16.392945°	-39.285530°	09:45
4	3,91	4,81	-16.392783°	-39.249625°	10:20
5	3,95	4,76	-16.392422°	-39.249184°	10:45
6	9,22	1,95	-16.412767°	-39.202427°	11:30
7	9,28	1,98	-16.412975°	-39.201968°	12:00
8	9,40	2,03	-16.413573°	-39.200920°	12:30
9	15,55	7,50	-16.434057°	-39.147071°	12:45

A coleta das amostras foi realizada em abril de 2021 (precipitação mensal média: 115 mm > precipitação dos meses anteriores em 2021) (SEIA, 2021). Os recipientes e ferramentas utilizados na coleta de todas as amostras foram previamente preparados conforme as instruções do Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras, de acordo com cada tipo de matriz e análise a ser realizada (CETESB, 2011).

As amostras de água foram coletadas a 20 cm de profundidade e preservadas conforme as indicações do Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras. As amostras de sedimentos foram coletadas manualmente (maré baixa); para tal coleta foi removida a camada superficial do sedimento (0-2 cm) e as amostras foram coletadas a até 20 cm de profundidade (CETESB, 2011).

O solo superficial foi coletado em profundidade de 0-20 cm, pelo método de amostras pontuais múltiplas, tendo sido coletadas uma amostra principal e quatro subamostras num raio de aproximadamente três a cinco metros de distância do ponto central; as subamostras foram misturadas à amostra central para compor uma amostra única (FILIZOLA; SOUZA; GOMES, 2006).

Todas as amostras foram resfriadas em caixa térmica com gelo até a chegada no laboratório, onde foram refrigeradas a aproximadamente 4 °C até pré-tratamento e/ou realização das análises (CETESB, 2011).

2.3. Análises

2.3.1. Água

Para as amostras de água superficial, foram verificados, *in situ*, com o auxílio de uma sonda multiparamétrica (HANNA HI98194), os seguintes parâmetros físico-químicos: temperatura, potencial hidrogeniônico (pH), oxigênio dissolvido (OD), salinidade, condutividade elétrica (CE) e sólidos totais dissolvidos (STD). Em laboratório as amostras foram analisadas de modo a verificar a presença de metais potencialmente tóxicos, os teores de nitrogênio amoniacal ($N–NH_3$), nitrito ($N–NO_2$), nitrato ($N–NO_3$), nitrogênio total (N_{TOTAL}) e fósforo total (P_{TOTAL}), além de alcalinidade total, sólidos totais (ST), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e coliformes termotolerantes. As medidas foram realizadas em triplicata.

As metodologias utilizadas nas análises da água constam na Tabela 3.

Tabela 3 – Metodologias utilizadas nas análises de água superficial

Parâmetro analisado	Metodologia
Nitrogênio amoniacal	APHA (1999c)
Nitrito	APHA (1999b)
Nitrato	Mackereth, Heron e Talling (1978)
Nitrogênio total	Mackereth, Heron e Talling (1978)
Fósforo total	Valderrama (1981)
Sólidos totais	SABESP (1999a)
Alcalinidade total	Golterman, Clymo, Ohnstand (1978) e Mackereth, Heron e Talling (1978)
Demanda bioquímica de oxigênio	APHA (1999d; 1999a); SABESP (1999b)
Coliformes termotolerantes	Brasil (2013)

2.3.2. Sedimento e Solo

Para as amostras de sedimento e de solo foram determinados os seguintes parâmetros: pH, teor de umidade, teor de cinzas (TCZ), teor de matéria orgânica (TMO), teor de carbono orgânico total (COT). As análises foram realizadas em triplicata. As metodologias utilizadas constam na Tabela 4.

Tabela 4 – Metodologias utilizadas nas análises de sedimento e solo superficial

Parâmetro analisado	Metodologia
pH	Ali et al. (2019)
Teor de umidade	ASTM (2000)
Teor de cinzas	ASTM (2000)
Teor de matéria orgânica	ASTM (2000)
Teor de carbono orgânico total	Schumacher (2002)
Metais (digestão)	USEPA (1996a)

2.3.2.1. Digestão ácida em bloco digestor

Para a análise da presença de metais, as amostras de solo e de sedimentos passaram por digestão ácida na presença de ácido nítrico, ácido clorídrico (HCl) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), conforme metodologia 3050-B da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos adaptada, como descrito abaixo (USEPA, 1996a).

Pesou-se 1 g das amostras, previamente secas, em tubos de vidro apropriados para digestão ácida em bloco digestor. Adicionaram-se 10 mL de HNO_3 concentrado às amostras e aqueceu-se no bloco por 10 minutos a 95 ± 5 °C. Em seguida as amostras foram resfriadas, adicionaram-se mais 5 mL de HNO_3. Os tubos foram levados ao bloco digestor para

aquecimento a 95 ± 5 °C por 2 horas. Logo após, as amostras foram resfriadas novamente, adicionaram-se 2 mL de água destilada e 3 mL de H_2O_2 30% e novamente levou-se ao aquecimento a 95 ± 5 °C em bloco digestor por mais 2 horas. Por último, as amostras foram mais uma vez resfriadas, receberam 5 mL de HCl e 10 mL de água destilada e foram aquecidas por 5 minutos a 95 ± 5 °C (USEPA, 1996a). As amostras foram filtradas em sistema de filtração simples, com papel filtro quantitativo, e armazenadas em tubos Falcon. Esse processo de extração foi realizado em triplicata para cada amostra e executado do mesmo modo para o teste branco, para o Material de Referência Certificado (CRM) e para os testes de adiçãoe recuperação.

De modo a minimizar o efeito de matriz, principalmente em amostras com alto teor de carbono, evitar o bloqueio dos componentes do equipamento pelo alto teor de sais e não ultrapassar o limite de quantificação do Espectrômetro de Emissão Atômica com Plasma de Microondas (MP AES), utilizado na determinação dos metais nas amostras, fez-se uma diluição dos produtos da digestão do sedimento e do solo antes de sua leitura; o fator de diluição utilizado foi quatro (GONÇALVES et al., 2016; CARVALHO et al., 2020).

2.3.3. Análise de metais em água, sedimento e solo

2.3.3.1. Curvas de calibração

As soluções padrão de referência utilizadas para obtenção das curvas de calibração do MP-AES foram preparadas a partir de diluições de soluções estoque de concentração 1000 μgmL^{-1} para cádmio, cromo, cobre, níquel, chumbo e zinco. As concentrações das soluções de calibração padrão variaram de 0,025-0,75 μgmL^{-1} para Cd, Cr, Cu e Pb, de 0,125-3,75 μgmL^{-1} para Ni e 0,125-1,5 μgmL^{-1} para Zn.

2.3.3.2. Instrumentação

A determinação multielementar de metais nas amostras de solo, sedimento e água foi realizada por Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma por Micro-Ondas (MIP OES) no MP-AES modelo 4210 (Agilent Technologies, Melbourne, Austrália), com monocromador tipo Czerny-Turner, equipado com nebulizador OneNeb, câmara de nebulização e tocha de quartzo. O gás nitrogênio (N_2) utilizado no plasma foi produzido a partir do ar atmosférico através de um gerador de N_2 (modelo 4107 Agilent). O equipamento foi configurado com o sistema de injeção manual de amostras. Os demais parâmetros instrumentais e as configurações para cada analito estão listados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros instrumentais e do método no MP-AES Agilent 4210

Parâmetro	**Especificação**					
Analitos	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Comprimento de onda (nm)	228,802	425,433	324,754	341,476	405,781	481,053
Posição de observação do plasma	-10	-10	20	-10	-10	0
Nebulizador	OneNeb Series 2					
Taxa de fluxo do gás de nebulização ($Lmin^{-1}$)	0,65	0,85	0,85	0,95	1,00	0,60
Velocidade da bomba (rpm)	15					
Tubulação da bomba da amostra	Orange/Green Solvaflex					
Tubulação da bomba de descarte	Blue/blue Solvaflex					
Tempo de leitura (s)	3					
Nº de réplicas	3					
Retardo na captação da amostra (s)	15					
Tempo de lavagem (s)	15					
Tempo de estabilização (s)	15					
Tempo de captação (s)	15					
Número de pixels	3					
Correção de background	Auto					
Câmara de nebulização	Passagem dupla de vidro ciclônica					
Tocha de plasma	Tocha Easyfit					
Fonte de gás	Nitrogênio					

A otimização das condições das análises foi realizada de modo automático pelo software MP Expert (versão 1.5.1.0, Agilent Technologies, Melbourne, Australia), sendo que o programa seleciona as melhores condições de vazão para a nebulização e o posicionamento mais adequado para o espelho da pré-ótica do equipamento, de modo a obter o maior sinal possível para cada analito.

2.4. Tratamento dos dados

2.4.1. Água

2.4.1.1. Índice de Poluição por Metal (MI) e Índice de Poluição (PI)

A contaminação da água por metais foi avaliada através do Índice de Poluição (PI) e do Índice de Poluição por Metal (MI). O PI se baseia em cálculos individuais para cada metal de interesse e varia de acordo com as seguintes categorias: PI < 1 – classe 1, sem efeitos; PI = 1-2 – classe 2, ligeiramente afetado; PI = 2-3 – classe 3, moderadamente afetado; PI = 3-5 – classe 4, fortemente afetado; PI > 5 – classe 5, seriamente afetado. Esse índice foi calculado através da Equação 1 (CAEIRO et al., 2005; GOHER et al., 2014).

$$PI = (\sqrt{[(Ci/Si)^2_{máx} + (Ci/Si)^2_{mín}]})/2 \quad \text{Equação 1}$$

Onde: Ci = concentração de cada elemento e Si = nível de metal de acordo aos critérios nacionais de qualidade da água.

O MI se baseia em uma avaliação da tendência que se observa a partir do *status* das concentrações atuais dos metais na matriz, sendo que quanto mais a concentração do metal ultrapassa a concentração máxima permitida na legislação, pior é a qualidade da água analisada. Tamasi e Cini (2004) fornecem a Equação 2 para o cálculo do MI.

$$MI = \sum_{i=1}^{n} \frac{Ci}{(MAC)_i} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: Ci = concentração de cada elemento e MAC = concentração máxima permitida para cada elemento.

2.4.2. Solo e sedimentos

2.4.2.1. Índice de Geoacumulação

A poluição por metais no solo superficial e nos sedimentos foi avaliada através do índice de geoacumulação (Igeo), calculado por meio da Equação 3, proposta por Müller (1969) e utilizada em diversos trabalhos para avaliar quantitativamente o nível de poluição por metais tóxicos (CESAR et al., 2011; ARAÚJO; SOUZA, 2012; ALI et al., 2019).

$$Igeo = \log_2 [C_i/(1{,}5 \times C_{background})] \quad \text{Equação 3}$$

Onde: C_i = média das triplicatas das concentrações de metais no solo num determinado ponto de coleta da área de estudo e $C_{Background}$ = média das triplicatas das concentrações de metais no solo do local de controle.

Müller (1969) classifica os níveis de poluição por metais em $I_{geo} \leq 0$: solo não poluído; $1 \geq I_{geo} \geq 0$: solo não poluído a solo moderadamente poluído; $1 \geq I_{geo} \geq 2$: solo moderadamente poluído; $2 \geq I_{geo} \geq 3$: solo moderadamente a fortemente poluído; $3 \geq I_{geo} \geq 4$: solo fortemente poluído; $4 \geq I_{geo} \geq 5$: solo fortemente a extremamente poluído; $I_{geo} \geq 5$: solo extremamente poluído.

2.4.2.2. Avaliação de risco não carcinogênico por Ingestão Diária Crônica (CDI)

Para avaliar os possíveis riscos à saúde de crianças e de adultos com relação à exposição aos metais tóxicos encontrados no solo e no sedimento da área de estudo foram utilizadas equações indicadas por Ali et al. (2019) com base em métodos propostos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Na Tabela 5 constam a descrição e os valores dos fatores citados nas equações de avaliação de risco para crianças e adultos (USEPA, 1996b; USEPA, 2002; USEPA, 2007).

Tabela 6 – Descrição e valores dos fatores citados nas equações de avaliação de risco para crianças e adultos (Equações 4 a 10)

Fator	Descrição	Valor para crianças	Valor para adultos	Unidade
IngR	Taxa de ingestão	200	100	mg/dia
ExFr	Frequência de exposição	350	350	dia
ED	Duração da exposição	6	24	ano
BW	Massa corporal	15	70	kg
AT	Tempo médio	2190	8760	dia
CF	Taxa de inalação	1,00E-06	1,00E-06	kg/mg
SA	Área de superfície da pele em contato com a superfície do solo	2800	5700	cm^2/evento
AF	Fator de aderência à pele para solo superficial	0,02	0,07	mg/cm
DAF	Fator de conversão	0,001	0,001	sem unidade
InhH	Fator de emissão de partículas	7,6	20	mg/cm^2
PEF	Fator de absorção dérmica	1,36E9	1,36E9	m^3/kg

As Equações 4, 5 e 6 fornecem os valores de risco não carcinogênico por Ingestão Diária Crônica (CDI) através da exposição por ingestão, absorção dermatológica e inalação.

$$CDI_{absorção\ por\ ingestão} = [(C_i \times IngR \times ExFr \times ED)/(BW \times AT)] \times CF \quad \text{Equação 4}$$

$$CDI_{absorção\ dermatológica} = [(C_i \times SA \times AF \times DAF \times ExFr \times ED)/(BW \times AT)] \times CF \quad \text{Equação 5}$$

$$CDI_{absorção\ por\ inalação} = (C_i \times InhH \times ExFr \times ED)/(PEF \times BW \times AT) \quad \text{Equação 6}$$

Onde C_i é a concentração encontrada para cada metal nas amostras ($\mu g g^{-1}$).

2.4.3. Análises estatísticas

2.4.3.1. Testes t de Student e Teste de Wilcoxon

O teste t de *Student* e o teste de *Wilcoxon* foram utilizados para comparar as médias dos parâmetros entre os pontos à montante (pontos 1, 2, 3, 4 e 5) e à jusante (pontos 6, 7, 8 e 9) do lixão para as amostras de sedimento, e entre os pontos nas áreas interna (pontos 1, 2, 3 e 4) e externa (pontos 5, 6 e 7) ao depósito de lixo para solo.

Inicialmente foi realizado o teste de *Shapiro-Wilk* para verificar se os dados correspondiam a uma distribuição normal. A verificação da presença de variações significativas entre as médias experimentais de cada parâmetro foi realizada através do teste t de Student (t), para dados que seguiam uma distribuição normal, e do teste de Wilcoxon (w), para dados que não seguiam uma distribuição normal.

Os testes foram realizados no software R®. Utilizou-se intervalo de confiança de 95%.

2.4.3.2. Análise de Componentes Principais (PCA)

Foi realizada PCA para converter os dados experimentais em conjuntos de variáveis de mesma dimensão, de modo a verificar a interrelação entre os dados obtidos para os diferentes parâmetros analisados (HONGYU et al., 2015). A PCA foi feita para as amostras de solo e de sedimento, individualmente, e contou onze variáveis (pH, cinzas, matéria orgânica, umidade, COT, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn). As análises foram realizadas no software R Studio ®.

Antes da realização da análise no R® os dados foram tratados através da Equação 7 para atribuir pesos semelhantes aos diferentes parâmetros, procedimento denominado autoescalamento:

$$z = (\text{escore bruto} - \text{média}_{\text{escores de todos os pontos}})/\text{desvio padrão}_{\text{escores de todos os pontos}} \qquad \text{Equação 7}$$

2.4.3.3. Correlação de Pearson

Fez-se também, para sedimento e solo, matrizes de correlação de Pearson, para verificar o grau de relação linear entre os diferentes parâmetros avaliados. As análises contaram com onze parâmetros (pH, cinzas, matéria orgânica, umidade, COT, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn) e foram realizadas no software R®.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Performance analítica do MIP OES

As figuras de mérito do procedimento analítico (Tabela 7) foram obtidas em condições otimizadas. Os limites de detecção (LDs) e de quantificação (LQs) foram estimados a partir do desvio padrão de dez soluções analíticas em branco (dez para solo e sedimento e dez para água, uma vez que o tratamento das amostras foi diferente), conforme recomendação do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) (INMETRO, 2016). As curvas analíticas apresentaram bons coeficientes de correlação linear ($R^2 > 0,9992$).

Tabela 7 – Figuras de mérito do procedimento analítico de quantificação de metais potencialmente tóxicos em amostras de água, sedimento e solo

Parâmetro	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Faixa de linearidade (c, µg mL^{-1})	0,025-0,75	0,025-0,75	0,025-0,75	0,125-3,75	0,025-0,75	0,125-1,5
Equação da curva	y = 38712x + 89,8	y = 43927x + 71,29	y = 204247x - 616,55	y = 25668x + 132,14	y = 5845x + 24,677	y = 847,82x + 6,0654
Coeficiente angular ± SD (a, µg mL^{-1})	38712	43927	204247	25668	5845	847,82
Coeficiente linear (b)	89,80	71,29	- 616,55	132,14	24,677	6,0654
Coeficiente de correlação (R^2)	0,9999	0,9999	0,9992	0,9999	0,9998	0,9999
LD (c, µg L^{-1}) – SE e SO*	0,58	0,08	0,01	0,08	0,64	5,33
LQ (c, µg L^{-1}) – SE e SO*	1,76	0,23	0,02	0,24	1,93	16,14
LD (c, µg L^{-1}) – AG**	0,50	0,07	0,01	0,10	2,27	11,22
LQ (c, µg L^{-1}) – AG**	1,53	0,21	0,03	0,30	6,89	33,99

* SE e SO: sedimento e solo; ** AG: água.

A faixa de linearidade das curvas de adição de padrão foi a mesma das curvas de calibração externa. O efeito de matriz (EM) foi calculado através da equação 8 (ARAÚJO; ALEXANDRE; DOMINGOS, 2019). As curvas de efeito de matriz mostraram valores de coeficientes angulares estatisticamente coerentes com os das curvas de calibração externa (Tabela 8), conforme o intervalo recomendado por Santos et al. (2013) para ausência de efeito de matriz (-10% < EM < 10%).

$$EM = (bm-bs)x100/bs \qquad \text{Equação 8}$$

Onde: bm = coeficiente angular da curva na matriz e bs = coeficiente angular da curva no solvente.

Tabela 8 – Curvas de adição de padrão para os metais Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn e seus respectivos níveis de efeito de matriz (%) para água, sedimento e solo

Matriz	Água			Sedimento			Solo		
Parâmetro	**Equação da curva**	**R^2**	**EM**	**Equação da curva**	**R^2**	**EM**	**Equação da curva**	**R^2**	**EM**
Cd	y = 36142x + 79,123	0,9997	-6,64	y = 38112x - 16,118	0,9994	-1,55	y = 34897x + 136,55	0,9994	-9,85
Cr	y = 40691x + 11	0,9999	-7,37	y = 45987x + 166,11	0,9995	4,69	y = 47810x + 166,72	0,9992	8,84
Cu	y = 193421x + 290	0,9997	-5,30	y = 202918x + 380,65	0,9997	-0,65	y = 192337x + 678,47	0,999	-5,83
Ni	y = 28207x + 445,96	0,9997	9,89	y = 27954x - 1,2291	0,9998	8,91	y = 28197x + 642,03	0,9992	9,85
Pb	y = 5642,5x + 18,619	0,9999	-3,46	y = 5690,8x + 14,303	0,9992	-2,64	y = 5854,3x + 24,21	0,9996	0,16
Zn	y = 843,14x - 9,2676	0,9987	-0,55	y = 780,88x + 8,3511	0,9971	-7,90	y = 812,98x - 16,533	0,9982	-4,11

R^2: coeficiente de correlação; EM: efeito de matriz.

Material de referência certificado (CRM) de solo (RM-Agro E2002a) foi utilizado para avaliar a exatidão do método. Os resultados obtidos na análise desse material no MP AES estão compilados na Tabela 9. Boa recuperação foi obtida para Cd (78,10%) e Pb (104,80%). Recuperações inferiores foram obtidas para Cr (95,40%) e Cu (59,50%). Ni e Zn não foram quantificados no CRM.

Tabela 9 – Determinação de Cd, Cr, Cu e Pb em material de referência certificado (média ± desvio padrão; n = 3)

Elemento	Valor certificado (mg kg^{-1})	Valor determinado (mg kg^{-1})	Recuperação (%)	RSD (%)
Cd	89,84 ± 2,89	73,39 ± 1,78	78,10	2,43
Cr	161,91 ± 4,18	114,52 ± 1,51	95,40	1,32
Cu	10,59 ± 0,34	5,24 ± 0,09	59,50	1,65
Pb	172,41 ± 4,02	182,12 ± 8,49	104,80	4,66

Os resultados dos testes de adição e recuperação para os metais foram bons, com recuperações que variaram de 90,64-114,67% para água, de 88,84 -112,02% para sedimento e de 88,90-112,22% para solo (Tabela 10).

Tabela 10 – Recuperações de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn adicionados a amostras de água, sedimento e solo (média ± desvio padrão; n = 3)

Água				
Metal	**Adicionado (concentração na solução amostral) (mg L^{-1})**	**Determinação do valor sem adição (mg L^{-1})**	**Determinação do valor com adição (mg L^{-1})**	**Recuperação (%)**
Cd	0,75	<LQ	0,69 ± 0,044	92,00
Cr	0,75	<LQ	0,69 ± 0,042	92,00
Cu	0,75	0,03 ± 0,002	0,71 ± 0,042	90,64
Ni	3,75	<LQ	4,30 ± 0,422	114,67
Pb	0,75	<LQ	0,72 ± 0,026	96,00
Zn	1,50	<LQ	1,41 ± 0,049	94,00
Sedimento				
Metal	**Adicionado (concentração na solução amostral) (mg kg^{-1})**	**Determinação do valor sem adição (mg kg^{-1})**	**Determinação do valor com adição (mg kg^{-1})**	**Recuperação (%)**
Cd	113,64	0,12 ± 0,19	111,97 ± 0,92	98,42
Cr	113,64	0,1692 ± 0,05	118,70 ± 1,66	104,31
Cu	113,64	1,11 ± 0,01	113,51 ± 1,38	98,91
Ni	568,18	0,01 ± 0,02	636,50 ± 2,4	112,02
Pb	113,64	3,55 ± 0,07	109,53 ± 3,55	93,26
Zn	227,27	3,79 ± 1,15	205,68 ± 1,74	88,84
Solo				
Metal	**Adicionado (concentração na solução amostral) (mg kg^{-1})**	**Determinação do valor sem adição (mg kg^{-1})**	**Determinação do valor com adição (mg kg^{-1})**	**Recuperação (%)**
Cd	113,64	<LQ	101,02 ± 0,38	88,90
Cr	113,64	5,31 ± 0,09	119,87 ± 2,83	100,81
Cu	113,64	1,67 ± 0,08	107,05 ± 1,75	92,74
Ni	568,18	<LQ	637,63 ± 2,68	112,22
Pb	113,64	3,66 ± 0,13	113,19 ± 1,49	96,39
Zn	227,27	3,30 ± 0,27	217,29 ± 3,76	94,16

3.2. Avaliação das concentrações de metais potencialmente tóxicos e de outros parâmetros de qualidade em amostras de água, sedimento e solo

Os resultados da estatística descritiva dos parâmetros de qualidade da água, assim como os valores de referência para tais parâmetros, estão relacionados na Tabela 11. A estatística descritiva foi calculada em função apenas dos resultados acima do LQ.

Tabela 11 – Estatística descritiva das concentrações de metais potencialmente tóxicos e de algumas propriedades físico-químicas de amostras de água superficial do Rio Buranhém em Porto Seguro (BA) e valores máximos legais para parâmetros de qualidade da água (n = 9)

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão	Desvio padrão relativo (%)	CONAMA 357/2005 Água doce, classe II	FUNASA, 2013
Cd (mg L^{-1})	⁂	⁂	⁂	⁂	⁂	⁂	Até 0,001 mg L^{-1} de Cd	-
Cr (mg L^{-1})	0,005	0,079	0,026	0,018	0,027	107,85	Até 0,05 mg L^{-1} de Cr	-
Cu (mg L^{-1})	0,003	0,005	0,004	0,004	0,0005	12,31	Até 0,009 mg L^{-1} de Cu	-
Ni (mg L^{-1})	⁂	⁂	⁂	⁂	⁂	⁂	Até 0,025 mg L^{-1} de Ni	-
Pb (mg L^{-1})	⁂	⁂	⁂	⁂	⁂	⁂	Até 0,01 mg L^{-1} de Pb	-
Zn (mg L^{-1})	⁂	⁂	⁂	⁂	⁂	⁂	Até 0,18 mg L^{-1} de Zn	-
Temperatura (°C)	26,65	29,22	27,84	28,00	0,83	2,99	-	-
pH	5,14	7,27	6,78	6,97	0,63	9,33	6,00-9,00	-
OD (mg L^{-1})	4,21	8,11	6,55	6,80	1,05	15,96	≥ 5,00 mg L^{-1}	-
Salinidade (mg L^{-1})	0,04	0,05	0,04	0,04	0,00	8,11	Até 0,1 mg L^{-1}	-
Condutividade (µS cm^{-1})	88,00	111,00	90,89	88,00	7,56	8,31	-	-
STD (mg L^{-1})	44,00	52,00	45,44	44,00	2,79	6,14	Até 500 mg L^{-1}	-
DBO (mg L^{-1} de O_2)	0,33	3,22	1,33	1,18	0,94	70,40	Até 5 mg L^{-1}	-
Alcalinidade total (mg L^{-1} de $CaCO_3$)	105,93	123,94	114,90	115,93	5,66	4,92	-	30-500 mg L^{-1} de $CaCO_3$
Sólidos totais (mg L^{-1})	28,37	60,85	42,54	40,34	12,26	28,81	-	-
Nitrito (mg L^{-1})	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	6,96	Até 1 mg L^{-1} de N	-
Nitrato (mg L^{-1})	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	119,38	Até 10 mg L^{-1} de N	-
Amônia (mg L^{-1})	0,02	0,14	0,07	0,03	0,06	82,33	3,7 mg L^{-1} de N, para pH ≤ 7,5; 2,0 mg L^{-1} de N, para 7,5 < pH ≤ 8,0; 1,0 mg L^{-1} de N, para 8,0 < pH ≤ 8,5; 0,5 mg L^{-1} de N, para pH > 8,5	-
N total (mg L^{-1})	0,13	0,50	0,37	0,40	0,10	27,98	-	-
P total (mg L^{-1})	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	37,50	Até 0,1 mg L^{-1} de P	-

* Valores para peso seco; -: valores não estabelecidos pela legislação; ⁂ metal identificado em n ≤ 1 ponto de coleta.

Na Tabela 12 estão compilados os dados da avaliação da influência da localização dos pontos de coleta para os parâmetros avaliados, exceto metais.

Tabela 12 – Avaliação da influência da localização dos pontos de coleta em algumas propriedades físico-químicas de amostras de água do Rio Buranhém em Porto Seguro (BA) (valor médio ± desvio padrão; pontos à montante do lixão: n = 5; pontos à jusante do lixão: n = 4; NC = 95%)

Parâmetros	Pontos à montante do lixão (valor médio ± desvio padrão)	Pontos à jusante do lixão (valor médio ± desvio padrão)	Teste	p-valor
Temperatura (°C)	27,27 ± 0,53	28,54 ± 0,52	t = -3,59	0,01
pH	5,55 ± 0,80	7,06 ± 0,14	w = 4,50	0,22
OD (mg L^{-1})	6,76 ± 0,79	6,29 ± 0,39	t = 0,60	0,57
Salinidade (‰)	0,04 ± 0,00	0,04 ± 0,005	w = 7,50	0,37
Condutividade (µS cm^{-1})	88,00 ± 0,00	94,5 ± 11,00	w = 0,00	0,01
STD (mg L^{-1})	44,00 ± 0,00	47,25 ± 3,59	w = 2,50	0,04
DBO (mg L^{-1} de O_2)	0,96 ± 0,80	1,80 ± 0,98	t = -1,39	0,22
Alcalinidade total (mg L^{-1} de $CaCO_3$)	113,33 ± 7,32	116,85 ± 2,15	t = -1,02	0,35
Sólidos totais (mg L^{-1})	46,00 ± 13,59	38,22 ± 10,46	t = 0,97	0,36
Nitrito (mg L^{-1})	0,01 ± 0,0009	0,01 ± 0,0008	t = -1,05	0,33
Nitrato (mg L^{-1})	0,0034 ± 0,0047	0,0033 ± 0,0038	w = 10,50	1,00
Amônia (mg L^{-1})	0,07 ± 0,06	0,65 ± 0,05	w = 8,50	0,81
N total (mg L^{-1})	0,34 ± 0,13	0,41 ± 0,06	t = -1,00	0,35
P total (mg L^{-1})	0,0078 ± 0,0019	0,01 ± 0,002	t = -5,21	0,002

Os parâmetros de qualidade da água analisados apresentaram valores dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005 para água doce de classe II, exceto o pH do ponto de coleta 2 (5,14) e o OD do ponto 9 (4,21 mg L^{-1}). A análise de coliformes termotolerantes foi qualitativa e apontou a presença desses microrganismos na água de todos os pontos analisados, o que pode estar relacionado com a presença de moradias rurais e pequenas propriedades que criam animais na área, além da visitação por pessoas da região para atividades de lazer.

O pH das amostras de água variou de 5,14 a 7,27, com média de 6,78 ± 0,63, indicando caráter predominantemente ácido, característica que favorece a permanência dos metais na coluna d'água, uma vez que o aumento do pH leva à precipitação desses elementos, facilitando seu acúmulo nos sedimentos do rio (YABE; OLIVEIRA, 1998; PIVELI, 2020). Enitan et al. (2018) relataram valores de pH mais elevados em amostras de água do rio Ndawuse, na Nigéria localizadas à jusante de um depósito de lixo municipal. Goher et al. (2014) encontraram valores médios de pH mais altos que os desse estudo (8,12 ± 0,18). Os teores médios de nitrito e de alcalinidade total obtidos foram semelhantes aos de medidos por Goher et al. (2014), os autores

encontraram valores de DBO que variaram de 0,30-7,18 mg L^{-1} e valores médios de STD e ST superiores aos desse trabalho.

Os valores de alcalinidade total das amostras (105,93-123,94 mg L^{-1} de $CaCO_3$) apontaram para dureza moderada (60-150 mg L^{-1} de $CaCO_3$). Dos metais avaliados nesse estudo apenas Zn poderia estar relacionado ao grau de dureza, no entanto esse metal foi encontrado apenas no ponto 9 e em concentração dentro dos limites legais (VEIGA, 2005).

Apenas temperatura, condutividade, STD e P total apresentaram diferenças significativas nas médias à montante e à jusante do lixão (p-valor < 0,05). A variação na temperatura pode ser explicada pelos horários de coleta das amostras. Para condutividade e STD a variação ocorreu principalmente devido à diferença entre os resultados do ponto 9 e dos outros oito pontos de amostragem (P9 - condutividade: 111 µS cm^{-1}, ST: 52 mg L^{-1}).

Na Tabela 13 são apresentados os resultados das concentrações de metais potencialmente tóxicos nas amostras de água superficial do rio Buranhém.

Tabela 13 – Concentrações de metais potencialmente tóxicos nas amostras de água superficial do Rio Buranhém em Porto Seguro (BA) (média ± desvio padrão; n = 3)

Pontos	Cd (mg L^{-1})	Cr (mg L^{-1})	Cu (mg L^{-1})	Ni (mg L^{-1})	Pb (mg L^{-1})	Zn (mg L^{-1})
1	< LQ	< LQ	0,003 ± 0,000	< LQ	< LQ	< LQ
2	< LQ	< LQ	0,004 ± 0,001	< LQ	< LQ	< LQ
3	< LQ	0,026 ± 0,000	0,004 ± 0,000	< LQ	< LQ	< LQ
4	< LQ	0,027 ± 0,001	0,004 ± 0,000	< LQ	< LQ	< LQ
5	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
6	< LQ	0,079 ± 0,001	0,004 ± 0,000	< LQ	< LQ	< LQ
7	< LQ	0,010 ± 0,000	0,004 ± 0,000	< LQ	< LQ	< LQ
8	< LQ	0,006 ± 0,000	0,004 ± 0,000	< LQ	< LQ	< LQ
9	< LQ	0,007 ± 0,000	0,005 ± 0,000	< LQ	< LQ	0,089 ± 0,006
CONAMA 357/2005 (mg L^{-1})	Até 0,001	Até 0,05	Até 0,009	Até 0,025	Até 0,01	Até 0,18

Os teores de metais abaixo do LQ podem estar relacionados ao fato de que as análises foram realizadas com as amostras brutas, apenas conservadas com ácido nítrico. É possível que um procedimento de pré concentração favorecesse a observação da presença desses metais. O teor de Cr no ponto de coleta 6 foi superior ao limite estabelecido pela legislação (0,079 mg L^{-1}. Enitan et al. (2018) observaram valores 0,078 ± 0,001 mg L^{-1} a 0,140 ± 0,001 mg L^{-1} para Cr. Os valores observados para Cu e Zn estavam dentro do limite proposto pelo CONAMA. Concentrações de Cu superiores às desse estudo foram encontradas em rios urbanos fora de áreas de depósitos de lixo (SILVA et al., 2018) e em rios próximos a lixões (Enitan et al., 2018).

A estatística descritiva para os parâmetros avaliados para sedimentos está compilada na Tabela 14, assim como os valores limite para metais em sedimentos (EPA, 1977) e materiais dragados (CONAMA, 2012), respectivamente. Na Tabela 15 estão relacionados os dados da avaliação da influência da localização dos pontos de coleta para os parâmetros avaliados.

Tabela 14 – Estatística descritiva das concentrações de metais potencialmente tóxicos e de algumas propriedades físico-químicas de amostras de sedimento do Rio Buranhém em Porto Seguro (BA) e valores máximos legais para parâmetros de qualidade de sedimentos (n = 9)

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão	Desvio padrão relativo (%)	EPA, 1977*			CONAMA 454/2012*	
							Não poluído	Moderadamente poluído	Fortemente poluído	Nível I	Nível II
Cd (mg kg^{-1})	0,10	0,17	0,14	0,15	0,03	19,95	-	-	0,6 mg kg^{-1} de Cd	> 6 mg kg^{-1} de Cd	3,5 mg kg^{-1} de Cd
Cr (mg kg^{-1})	0,49	1,69	1,03	0,86	0,45	44,07	< 25 mg kg^{-1} de Cr	25-75 mg kg^{-1} de Cr	> 75 mg kg^{-1} de Cr	37,3 mg kg^{-1} de Cr	90 mg kg^{-1} de Cr
Cu (mg kg^{-1})	0,79	1,23	0,94	0,95	0,15	15,43	< 25 mg kg^{-1} de Cu	25-50 mg kg^{-1} de Cu	> 50 mg kg^{-1} de Cu	35,7 mg kg^{-1} de Cu	197 mg kg^{-1} de Cu
Ni (mg kg^{-1})	⁂	⁂	⁂	⁂	⁂	⁂	< 20 mg kg^{-1} de Ni	20-50 mg kg^{-1} de Ni	> 50 mg kg^{-1} de Ni	18 mg kg^{-1} de Ni	35,9 mg kg^{-1} de Ni
Pb (mg kg^{-1})	2,07	4,11	3,21	3,25	0,70	21,84	< 90 mg kg^{-1} de Pb	90-200 mg kg^{-1} de Pb	> 200 mg kg^{-1} de Pb	35 mg kg^{-1} de Pb	91,3 mg kg^{-1} de Pb
Zn (mg kg^{-1})	3,55	9,75	5,37	4,39	2,17	40,38	< 90 mg kg^{-1} de Zn	90-200 mg kg^{-1} de Zn	> 200 mg kg^{-1} de Zn	123 mg kg^{-1} de Zn	315 mg kg^{-1} de Zn
pH	6,28	7,41	7,11	7,20	0,35	4,87	-	-	-	-	-
Cinzas (%)	82,01	94,80	88,96	89,50	3,98	4,47	-	-	-	-	-
Matéria orgânica (%)	5,20	17,99	11,04	10,50	3,98	36,03	-	-	-	-	-
Umidade (%)	3,54	19,73	10,77	10,82	5,63	52,29	-	-	-	-	-
COT (g kg^{-1})	41,33	126,29	77,30	66,96	32,12	41,55	-	-	-	-	-

* Valores para peso seco; -: valores não estabelecidos pela legislação; ⁂ metal identificado em n ≤ 1 ponto de coleta.

Tabela 15 – Avaliação da influência da localização dos pontos de coleta de sedimento nos resultados (valor médio ± desvio padrão; pontos à montante do lixão: n = 5; pontos à jusante do lixão: n = 4)

Parâmetros	Pontos à montante do lixão (valor médio ± desvio padrão)	Pontos à jusante do lixão (valor médio ± desvio padrão)	Teste	p-valor
Cd (mg kg^{-1})	⁂	⁂	-	-
Cr (mg kg^{-1})	1,08 ± 0,47	0,96 ± 0,49	t = 0,37	0,72
Cu (mg kg^{-1})	1,01 ± 0,14	0,86 ± 0,11	t = 1,86	0,10
Ni (mg kg^{-1})	⁂	⁂	-	-
Pb (mg kg^{-1})	⁂	⁂	-	-
Zn (mg kg^{-1})	6,48 ± 2,41	3,97 ± 0,39	w = 19,00	0,03
pH	7,29 ± 0,13	6,89 ± 0,42	w = 18,00	0,06
Cinzas (%)	91,73 ± 2,07	85,49 ± 2,76	t = 3,76	0,01
Matéria orgânica (%)	8,27 ± 2,07	14,51 ± 2,76	t = -3,76	0,01
Umidade (%)	8,91 ± 4,26	13,11 ± 6,88	t = -1,07	0,34
COT (g kg^{-1})	94,76 ± 33,74	55,48 ± 9,51	t = 2,48	0,06

-: não calculado; ⁂ metal identificado em n ≤ 8 pontos de coleta.

Na tabela 16 constam os valores da estatística descritiva para as análises de solo e os valores estabelecidos pela CONAMA 420/2009 para prevenção e investigação de metais nessa matriz.

Tabela 16 – Estatística descritiva das concentrações de metais potencialmente tóxicos e de algumas propriedades físico-químicas de amostras de solo do lixão de Porto Seguro (BA) e área adjacente a ele e valores máximos legais para parâmetros de qualidade do solo (n = 7)

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio padrão	Desvio padrão relativo (%)	CONAMA 420/2009*		
							Prevenção	Investigação	
								Agrícola	Residencial
Cd (mg kg^{-1})	⁂	⁂	⁂	⁂	⁂	⁂	Até 1,3 mg kg^{-1} de Cd	Até 3 mg kg^{-1} de Cd	Até 8 mg kg^{-1} de Cd
Cr (mg kg^{-1})	5,50	32,16	11,95	8,30	9,28	77,70	Até 75 mg kg^{-1} de Cr	Até 150 mg kg^{-1} de Cr	Até 300 mg kg^{-1} de Cr
Cu (mg kg^{-1})	1,50	16,44	7,63	7,02	5,64	73,91	Até 60 mg kg^{-1} de Cu	Até 200 mg kg^{-1} de Cu	Até 400 mg kg^{-1} de Cu
Ni (mg kg^{-1})	0,87	7,75	3,32	2,33	3,15	94,91	Até 30 mg kg^{-1} de Ni	Até 70 mg kg^{-1} de Ni	Até 100 mg kg^{-1} de Ni
Pb (mg kg^{-1})	3,93	24,44	9,98	8,73	6,76	67,81	Até 72 mg kg^{-1} de Pb	Até 180 mg kg^{-1} de Pb	Até 300 mg kg^{-1} de Pb
Zn (mg kg^{-1})	2,57	62,65	24,21	18,33	20,23	83,56	Até 300 mg kg^{-1} de Zn	Até 450 mg kg^{-1} de Zn	Até 1000 mg kg^{-1} de Zn
pH	4,51	7,83	6,11	6,54	1,33	21,82	-	-	-
Cinzas (%)	50,93	89,36	81,05	84,48	12,47	15,39	-	-	-
Matéria orgânica (%)	10,64	49,07	18,95	15,52	12,47	65,83	-	-	-
Umidade (%)	8,25	42,43	14,45	10,78	11,49	79,49	-	-	-
COT (g kg^{-1})	9,81	349,92	120,00	99,27	113,92	94,93	-	-	-

* Valores para peso seco; -: valores não estabelecidos pela legislação; ⁂ metal identificado em n ≤ 1 ponto de coleta.

Tabela 17 – Avaliação da influência da localização dos pontos de coleta de solo nos resultados (valor médio ± desvio padrão; pontos fora do lixão: n = 3; pontos dentro do lixão: n = 4)

Parâmetros	Pontos fora do lixão	Pontos dentro do lixão	Teste	p-valor
Cd (mg kg^{-1})	⁂	⁂	-	-
Cr (mg kg^{-1})	17,79 ± 12,79	7,57 ± 1,87	w = 10,00	0,23
Cu (mg kg^{-1})	7,79 ± 7,53	7,51 ± 5,08	t = 0,05	0,96
Ni (mg kg^{-1})	⁂	⁂	-	-
Pb (mg kg^{-1})	13,33 ± 9,73	7,46 ± 2,94	w = 8,00	0,63
Zn (mg kg^{-1})	24,02 ± 13,54	24,35 ± 26,38	t = -0,02	0,98
pH	5,25 ± 1,33	6,69 ± 0,36	t = -2,06	0,12
Cinzas (%)	76,63 ± 17,41	84,21 ± 1,41	w = 4,00	0,63
Matéria orgânica (%)	23,37 ± 17,41	15,79 ± 1,41	w = 8,00	0,63
Umidade (%)	19,69 ± 15,27	9,33 ± 1,41	w = 10,00	0,23
COT (g kg^{-1})	117,33 ± 155,88	107,59 ± 87,07	t = 0,11	0,92

-: não calculado; ⁂ metal identificado em n ≤ 6 pontos de coleta.

O pH do solo e do sedimento é um dos principais fatores associados ao comportamento de metais potencialmente tóxicos nessas matrizes e afeta diretamente a biodisponibilidade desses elementos (CAMPOS, 2010). A média para o pH dos sedimentos foi de 7,11 ± 0,35, o que indica que essa matriz tendeu a apresentar caráter alcalino. O sedimento só apresentou pH ácido nos pontos 7 (6,93) e 9 (6,28), ambos à jusante do lixão. A média do pH dos solos analisados foi 6,11 ± 1,33, o que indica uma tendência ao caráter ácido, o que contribui para maior mobilidade dos metais. O solo teve pH alcalino apenas no ponto 4 (7,24). Afolagboye (2020) também encontrou solos predominantemente ácidos (5,97-6,93) próximos a um depósito de resíduos sólidos municipais na Nigéria.

Os teores de matéria orgânica (MO) e cinzas são inversamente proporcionais (ASTM, 2000). A matéria orgânica é rica, entre outras coisas, em substâncias húmicas (80-90%) que contêm grupos orgânicos que dão a ela uma alta capacidade de complexar íons metálicos, desse modo esses compostos estão diretamente relacionados com a mobilização e o acúmulo de metais em sedimentos e solos (ROCHA et al., 1999; FERREIRA, 2001). Nascimento (2015) associou altos valores de matéria orgânica à concentrações mais altas de elementos potencialmente disponíveis. Os teores de matéria orgânica foram menores nas amostras de sedimento (5,20-17,99%) do que nas de solo (10,64-49,07%), com destaque para o ponto 1 de solo, que apresentou quase 50% de MO em sua composição, além dos maiores teores de umidade, COT e dos metais Cr, Cu, Ni e Pb (32,16, 16,44, 7,75 e 24,44 mg kg^{-1}, respectivamente). Os maiores teores de Cd e Zn para solo foram observados no ponto 4 (0,12 e

62,65 mg kg^{-1}, respectivamente), onde se obteve o segundo maior teor de MO (18,03%). Para sedimento, o ponto 9 apresentou o maior teor de MO (17,99%), de umidade (19,71%) e de Cr (1,69 mg kg^{-1}), assim como o menor pH (6,28). Para sedimento, a concentração de Ni foi maior que o LQ apenas no ponto 1 (0,18 mg kg^{-1}) e a de Pb foi inferior ao LQ apenas no ponto 9.

O teor de COT se refere a uma medida quantitativa da fração orgânica do solo (COELHO, 2011). O maior teor de COT foi observado no ponto 1, que é o mais próximo ao rio Buranhém e o mais distante do lixão. Nessa área há criação de animais como cabras, vacas e cavalos, o que provavelmente contribui para a maior fração de matéria orgânica e COT.

A concentração de cádmio no solo foi maior que o LQ apenas no ponto 4 (0,12 mg kg^{-1}) e a de níquel foi menor que o LQ nos pontos 5, 6 e 7. De acordo com os critérios da Resolução CONAMA 420/2009 os teores dos metais estão dentro dos limites aceitáveis, se enquadrando dentro da classe de prevenção. As amostras de sedimento podem ser consideradas não poluídas em consonância com a classificação indicada pela EPA (EPA, 1977) e também se enquadram nos limites indicados pela Resolução CONAMA 454/2012.

De acordo com os testes estatísticos realizados, não houve diferença significativa entre as médias dos resultados para solo em função das localizações dos pontos de coleta.

Para sedimentos houve diferença significativa para cinzas, matéria orgânica e zinco. Os teores de cinzas foram menores nos pontos à jusante do lixão, consequentemente os de matéria orgânica foram maiores. As concentrações de zinco tenderam a ser menores à jusante e as de cádmio maiores.

Para o solo, as concentrações de Cr e Pb nos pontos fora do lixão (17,79 ± 12,79 e 13,33 ± 9,73 mg kg^{-1}, respectivamente) foram consideravelmente maiores do que nos pontos dentro do depósito de lixo (7,57 ± 1,87 e 7,46 ± 2,94 mg kg^{-1}, respectivamente), enquanto Cu e Zn apresentaram médias próximas para dentro (7,79 ± 7,53 e 24,02 ± 13,54 mg kg^{-1}, respectivamente) e fora do lixão (7,51 ± 5,08 e 24,35 ± 26,38 mg kg^{-1}, respectivamente).

3.3. Correlação de Pearson

Foi calculada a correlação de Pearson entre as concentrações de metais potencialmente tóxicos e outros parâmetros de qualidade em amostras de sedimento do rio Buranhém e de solo do lixão de Porto Seguro, Bahia e área adjacente para verificar o grau de intensidade e a direção da relação linear entre pares das variáveis (Tabela 18).

Tabela 18 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre as concentrações de metais pesados e outros parâmetros de qualidade em amostras de sedimento do rio Buranhém e de solo do lixão de Porto Seguro, Bahia e área adjacente

Matriz	Parâmetro	pH	Cinzas	MO*	Umidade	COT	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb
Sedimento	**Cinzas**	**0,77**									
	MO*	**-0,77**	**-1,00**								
	Umidade	-0,66	-0,43	0,43							
	COT	0,51	0,58	-0,58	-0,33						
	Cd	-0,50	-0,57	0,57	0,37	-0,64					
	Cr	-0,46	-0,40	0,40	0,21	-0,01	-0,40				
	Cu	-0,04	0,12	-0,12	-0,03	0,31	-0,69	**0,84**			
	Ni	-0,05	0,00	0,00	-0,09	0,42	-0,65	**0,84**	**0,95**		
	Pb	**0,93**	0,62	-0,62	-0,67	0,26	-0,38	-0,35	0,04	0,01	
	Zn	0,50	0,44	-0,44	-0,31	0,71	**-0,88**	0,27	0,48	0,49	0,31
Solo	**Cinzas**	0,38									
	MO*	-0,38	**-1,00**								
	Umidade	-0,58	**-0,97**	**0,97**							
	COT	-0,25	**-0,81**	**0,81**	**0,79**						
	Cd	**0,80**	0,01	0,01	-0,18	-0,07					
	Cr	-0,57	**-0,95**	**0,95**	**0,98**	**0,78**	-0,11				
	Cu	0,09	**-0,74**	**0,74**	0,65	0,65	0,55	**0,71**			
	Ni	**-0,73**	**-0,87**	**0,87**	**0,95**	0,67	-0,27	**0,97**	0,58		
	Pb	-0,41	**-0,94**	**0,94**	**0,94**	**0,81**	0,09	**0,97**	**0,84**	**0,91**	
	Zn	0,17	-0,38	0,38	0,33	0,17	0,63	0,41	**0,84**	0,37	0,55

* MO: matéria orgânica.

Na Correlação de Pearson, valores de r negativos apontam para uma relação onde o valor de um parâmetro tende a aumentar à medida que o valor de outro diminui, enquanto que valores de r positivos indicam parâmetros que tendem a aumentar juntos. Quanto mais próximo de 0 e mais distante de -1 ou +1 for o valor de r, menor a correlação entre as variáveis estudadas (MINITAB, 2019).

Nos sedimentos verificou-se relação muito forte para matéria orgânica-cinzas, Cd-Zn, pH-Pb, Cr-Cu, Cr-Ni e Cu-Ni ($|r| > 0,8$); relação forte para pH-cinzas, pH-matéria orgânica, e COT-Zn ($0,7 < |r| < 0,8$) e relação moderada para pH-umidade, cinzas-Pb, matéria orgânica-Pb e umidade-Pb ($0,6 < |r| < 0,7$). Verificou-se ainda relação de muito forte nos solos para pH-Cd, Cinzas-MO/umidade/COT/Cr/Ni/Pb, MO-umidade/COT/Cr/Ni/Pb, umidade-Cr/Ni/Pb, COT-Pb, Cr-Ni/Pb, Cu-Pb/Zn, Ni-Pb; relação forte para pH-Ni, cinzas-Cu, MO-Cu, umidade-

COT, COT-Cr, Cr-Cu e relação moderada para umidade-Cu, COT-Cu, COT-Ni e Cd-Zn. Valores de r que indicam relação muito forte entre as variáveis podem significar origens semelhantes para esses contaminantes nos ecossistemas estudados (ALI et al., 2019).

3.4. Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais dos dados está ilustrada na Tabela 19 e nas Figuras 4 e 5. Foram extraídos dois componentes principais para sedimentos, com representação de 78,58% da variância total dos dados, e dois para solo que explicam 90,80% da variância total. O primeiro componente principal (CP) para sedimento abrangeu 47,09% da variância total dos dados, contando com forte contribuição dos parâmetros pH (0,846), cinzas (0,842), COT (0,748), Pb (0,730) e Zn (0,762). O segundo componente principal para sedimento abrangeu 31,49% da variância total e contou com influência mais alta de Cr (0,976), Cu (0,862) e Ni (0,881).

O primeiro componente principal para solo abrangeu 67,41% da variância total dos dados e teve maior representação dos parâmetros matéria orgânica (0,969), umidade (0,978), COT (0,822), Cr (0,990), Cu (0,782), Ni (0,940) e Pb (0,989). Já o segundo componente abrangeu 23,39% da variância total e teve maior influência de pH (0,796), Cd (0,975) e Zn (0,709). A representatividade de Cr, Cu, Ni e Pb no primeiro CP foi similar à encontrada por Ali et al. (2019) para esses metais em solo de um depósito de lixo (2019).

Tabela 19 – Cargas de fator de para os metais potencialmente tóxicos e demais parâmetros de qualidade do sedimento do rio Buranhém e do solo do lixão de Porto Seguro, Bahia e área adjacente

Parâmetro	**Sedimento**		**Solo**	
	Componente 1	**Componente 2**	**Componente 1**	**Componente 2**
pH	0,846	-0,443	-0,475	0,796
Cinzas	0,842	-0,330	-0,969	-0,012
Matéria orgânica	-0,842	0,330	0,969	0,012
Umidade	-0,629	0,249	0,978	-0,170
COT	0,748	0,147	0,822	-0,020
Cd	-0,827	-0,458	-0,034	0,975
Cr	-0,060	0,976	0,990	-0,102
Cu	0,390	0,862	0,782	0,608
Ni	0,372	0,881	0,940	-0,257
Pb	0,730	-0,390	0,989	0,101
Zn	0,762	0,365	0,476	0,709

No gráfico de componentes principais para sedimentos pode-se observar que os teores de pH, cinzas, COT, Zn e Pb foram maiores nos pontos à montante do lixão, enquanto os de umidade e matéria orgânica foram maiores no ponto 9, e Cd nos pontos 6, 7 e 8, todos quatro à jusante do depósito de lixo.

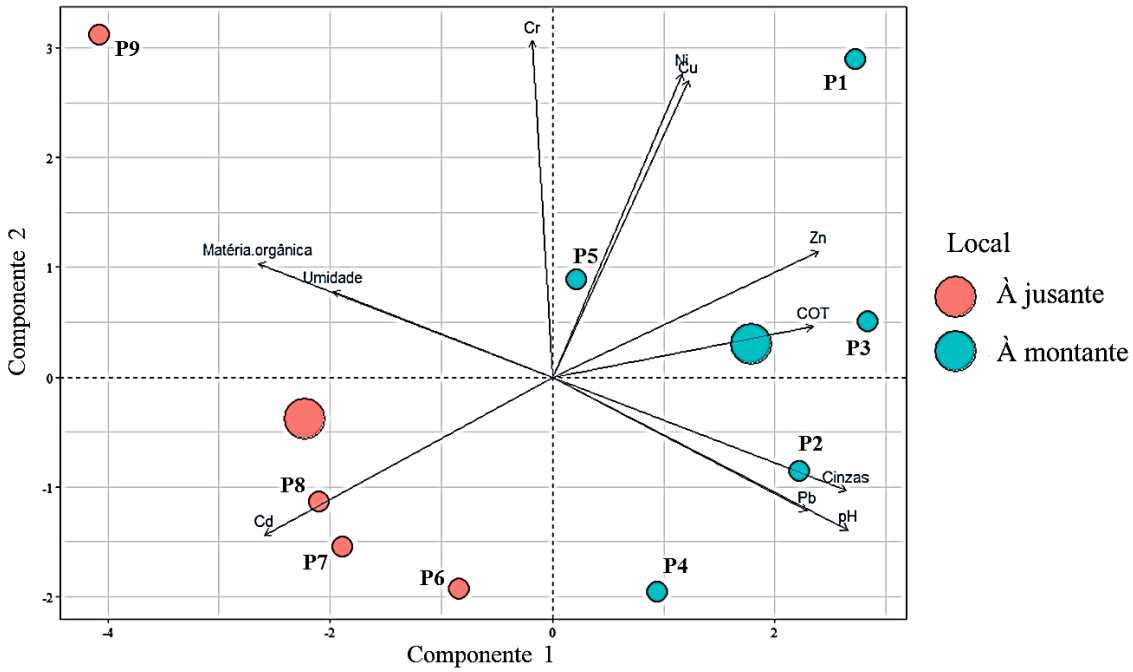


Figura 4 – Componentes principais dos parâmetros de qualidade do sedimento do rio Buranhém, Porto Seguro, Bahia

No gráfico de componentes principais para solos pode-se observar que os teores de Zn, Cu, Pb e matéria orgânica foram mais altos nos pontos 1 e 4 e mais baixos nos pontos 2, 3 e 5. Cr, umidade, Ni e COT também foram maiores no ponto 1. O pH das amostras de solo foi mais elevado nos pontos 4, 6 e 7, localizados no interior do lixão. O teor mais alto de Cd também foi encontrado no ponto 4.

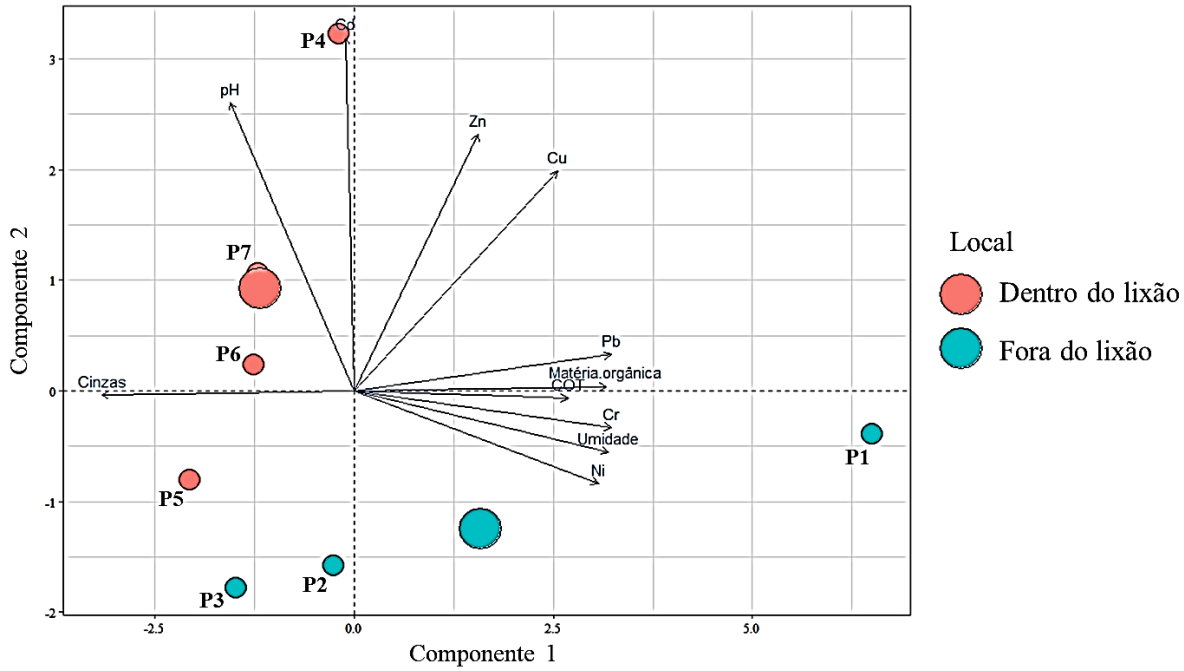


Figura 5 – Cargas dos componentes principais dos parâmetros de qualidade do solo do lixão de Porto Seguro, Bahia e área adjacente a esse depósito de lixo

3.5. Índice de Poluição (PI) e Índice de Poluição por Metal (MI)

O Índice de Poluição (PI) foi utilizado para estimar a poluição por metais da água do rio Buranhém (Tabela 20).

Tabela 20 – Índice de Poluição (PI) dos metais Cr, Cu e Zn medidos na água do Rio Buranhém de acordo com os níveis de referência para água doce classe II (CONAMA 357/2005)

Ponto	Cr	Classe e efeito	Cu	Classe e efeito	Zn	Classe e efeito
1	-	-	7,78	Classe 5, seriamente afetado	-	-
2	-	-	7,78	Classe 5, seriamente afetado	-	-
3	0,40	Classe 1, sem efeitos	12,65	Classe 5, seriamente afetado	-	-
4	0,43	Classe 1, sem efeitos	12,65	Classe 5, seriamente afetado	-	-
5	-	-	-	-	-	-
6	2,02	Classe 3, moderadamente afetado	12,10	Classe 5, seriamente afetado	-	-
7	0,13	Classe 1, sem efeitos	12,65	Classe 5, seriamente afetado	-	-
8	1,10	Classe 2, ligeiramente afetado	12,10	Classe 5, seriamente afetado	-	-
9	1,42	Classe 2, ligeiramente afetado	12,65	Classe 5, seriamente afetado	0,38	Classe 1, sem efeitos

-: não calculado, concentração dos metais abaixo do LQ.

Os metais presentes na água apresentaram diferentes graus de poluição para o rio. Os resultados mostram que a água está seriamente afetada pelo Cu nos pontos 1, 2, 3, 4, 6, 7 ,8 e

9, apesar das concentrações encontradas estarem dentro do limite máximo permitido pela legislação brasileira para água doce de classe II. Esses valores para Cu são superiores aos encontrados por Goher et al. (2014) para a água do Canal da Ismailia, no Egito. O ponto 6 está moderadamente afetado pela presença de Cr, enquanto os pontos 8 e 9 estão ligeiramente afetados por esse metal.

Apesar do cobre ser um micronutriente essencial para os humanos devido à sua atuação em importantes processos enzimáticos, por exemplo, teores elevados desse metal podem desencadear problemas no trato gastrointestinal e também no sistema nervoso (LEBRE et al., 2005). Portanto, fica um alerta sobre a necessidade de continuar o monitoramento do teor desse metal nos locais avaliados e de identificar as possíveis fontes de contaminação.

Outro índice utilizado para avaliar a poluição por metais na água do rio Buranhém foi o Índice de Poluição por Metal (MI), que aponta a tendência da poluição atual das amostras com relação a todos os metais presentes nela (Figura 6).

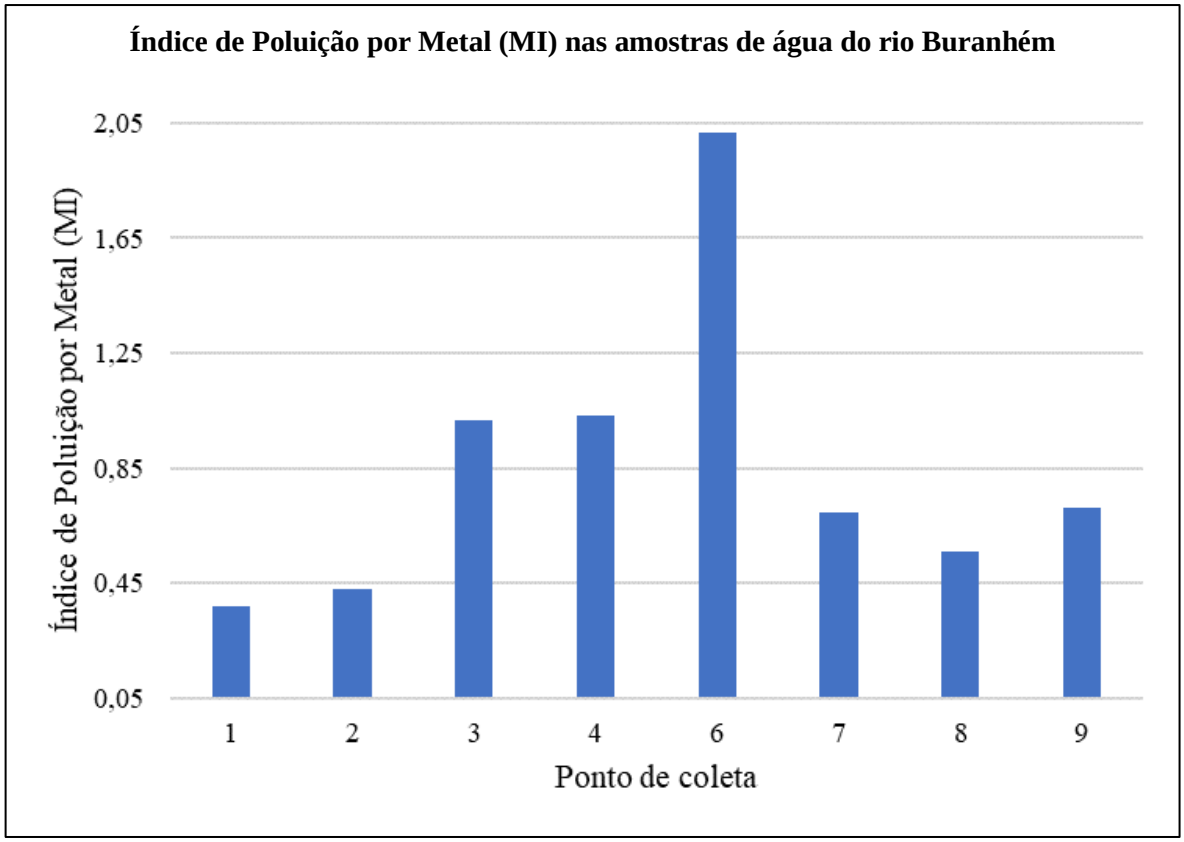


Figura 6 – Índice de Poluição por Metal (MI) da água do Rio Buranhém

Os valores de MI indicam que apenas o ponto 6 está no limiar de risco de poluição por metais (MI > 1) para água doce de classe II. Esse fato está associado à concentração do Cd

nesse ponto de coleta (0,079 mg L^{-1}), que foi o maior encontrado entre os pontos estudados e excedeu o limite máximo legal estabelecido pela CONAMA 357/2005.

O cádmio é um metal com alto potencial de toxicidade e é aplicado no processo produtivo de materiais como pilhas, baterias, cigarros, tintas e plásticos. A exposição de seres humanos a esse metal ocorre principalmente pelas vias de inalação e ingestão, e atinge, em especial, o sistema renal e o sistema nervoso, podendo ainda estar associado a variados tipos de câncer, como os de próstata e pulmões. Esses dados apontam a importância de se investigar com maior profundidade as possíveis fontes desse elemento na água do Buranhém, e, principalmente, se ele pode estar sendo lixiviado do terreno do lixão, uma vez que esse ponto de coleta é um dos mais próximos do depósito de lixo e que o terreno desse depósito possui maior altitude que o referido ponto (ROCHA, 2008/2009).

3.6. Índice de Geoacumulação

Os valores do Índice de Geoacumulação (Igeo) calculados para os metais potencialmente tóxicos presentes no sedimento e no solo de cada local de coleta estão plotados nas Figuras 7 e 8.

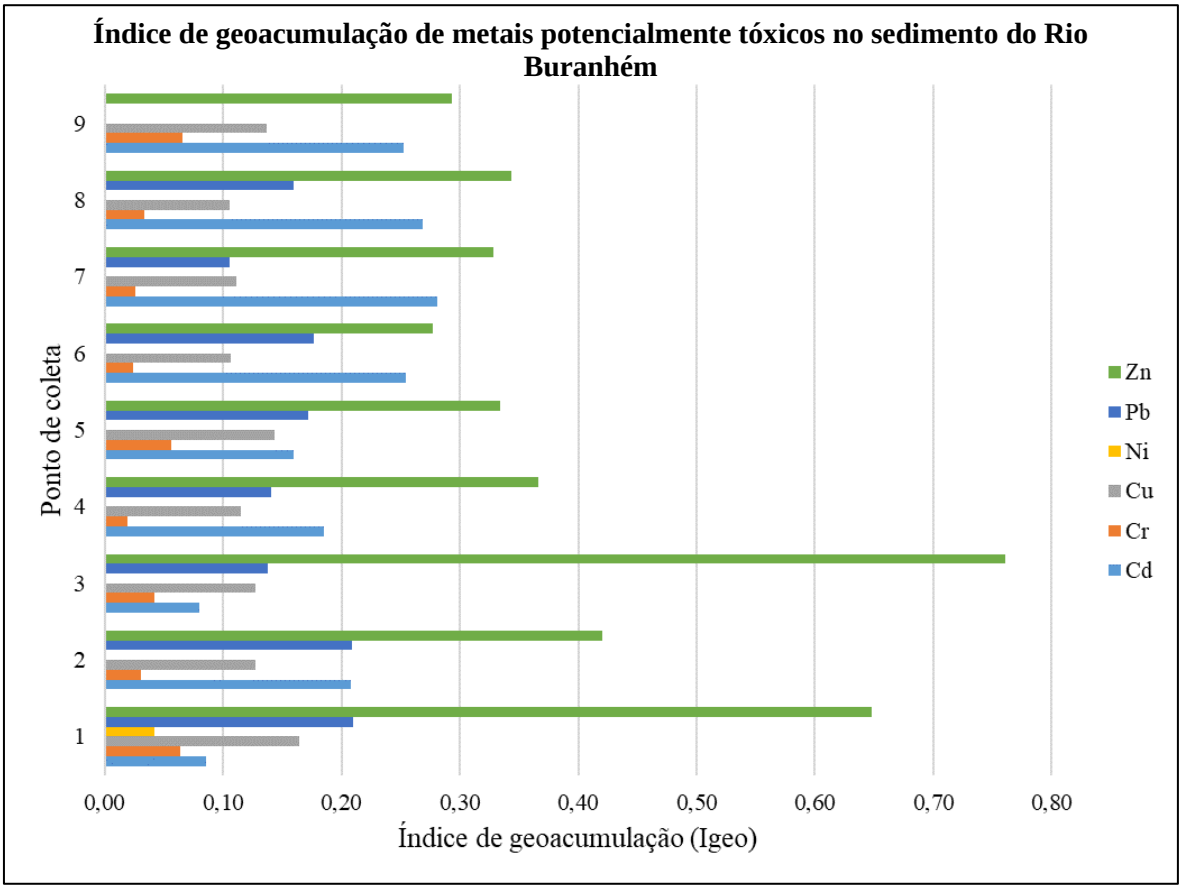


Figura 7 – Índice de geoacumulação de metais potencialmente tóxicos no sedimento do Rio Buranhém

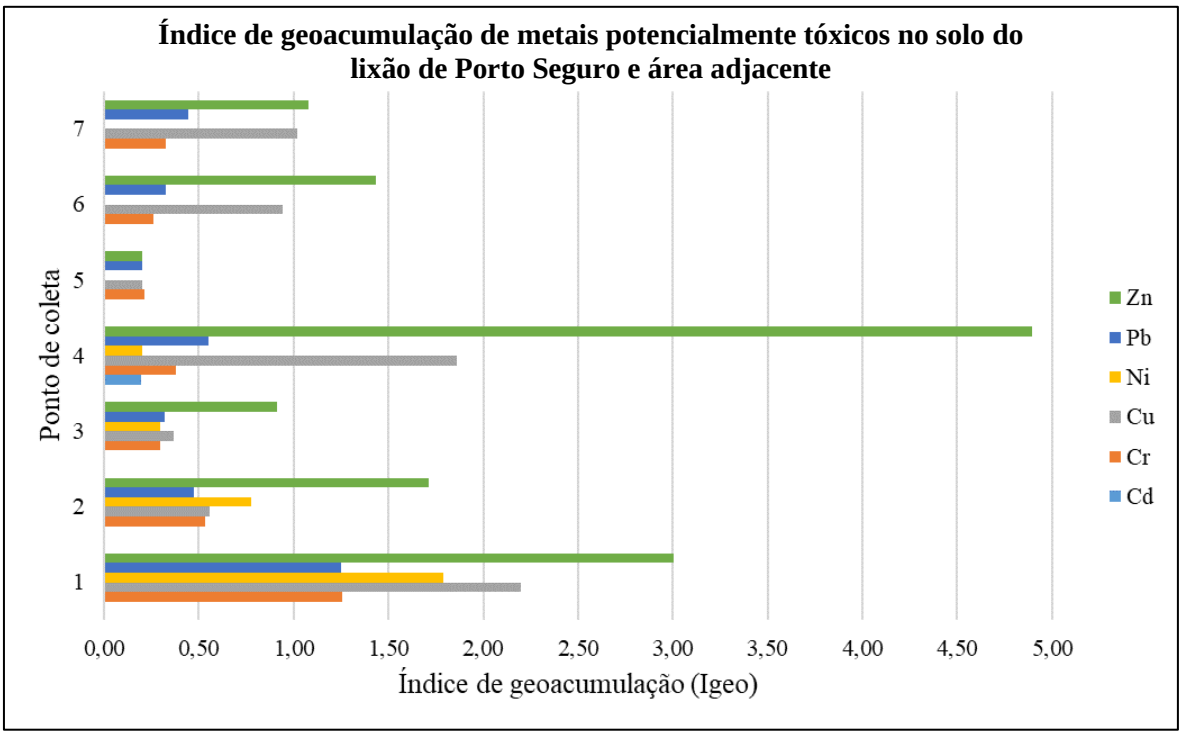


Figura 8 – Índice de geoacumulação de metais potencialmente tóxicos no solo do lixão de Porto Seguro e área adjacente

De acordo com a classificação proposta por Müller (1969), os sedimentos analisados se enquadram na classe de não poluídos a moderadamente poluídos em todos os pontos de coleta (Igeo 0,00-0,76). Já o solo apresentou caráter fortemente a extremamente poluído por Zn nos pontos 1 e 4, moderadamente a fortemente poluído por Cu no ponto 1, moderadamente poluído por Cr, Ni e Pb no ponto 1, Cu nos pontos 4 e 7 e Zn nos pontos 2, 6 e 7 e não poluído a moderadamente poluído nos demais pontos. Esses valores foram significativamente menores que os encontrados por Ali et al. (2019) para um lixão na Arábia Saudita, sendo eles: $8 \geq Igeo < 12$ para Zn, $5 < Igeo < 10$ para Cu, $6 < Igeo < 11$ para Cr, $4 < Igeo < 8$ para Ni e Pb e $8 < Igeo < 12$ para Zn. Adebiyi e Oloukoi (2018) também encontraram os maiores valores de Igeo para Cu e Zn, num lixão na Nigéria.

A maior concentração de Zn no solo foi encontrada no ponto 4, o que justifica o maior valor de Igeo, no entanto esse valor está bem abaixo do limite máximo para prevenção, que é de 300 mg kg^{-1}. Apesar disso se faz preciso observar com cuidado a evolução de teor do metal, pois apesar do Zn ser um micronutriente essencial, seu excesso é prejudicial tanto para plantas quanto para animais (CRUZ; SOARES, 2011).

3.7. Avaliação de risco de Ingestão Diária Crônica (CDI)

A avaliação de risco à saúde para adultos e crianças foi verificada através do índice de Ingestão Diária Crônica (CDI) para os metais potencialmente tóxicos presentes nas amostras de sedimento e de solo. Os resultados para sedimento são mostrados nas Figuras 9 e 10 e para solo nas Figuras 11 e 12.

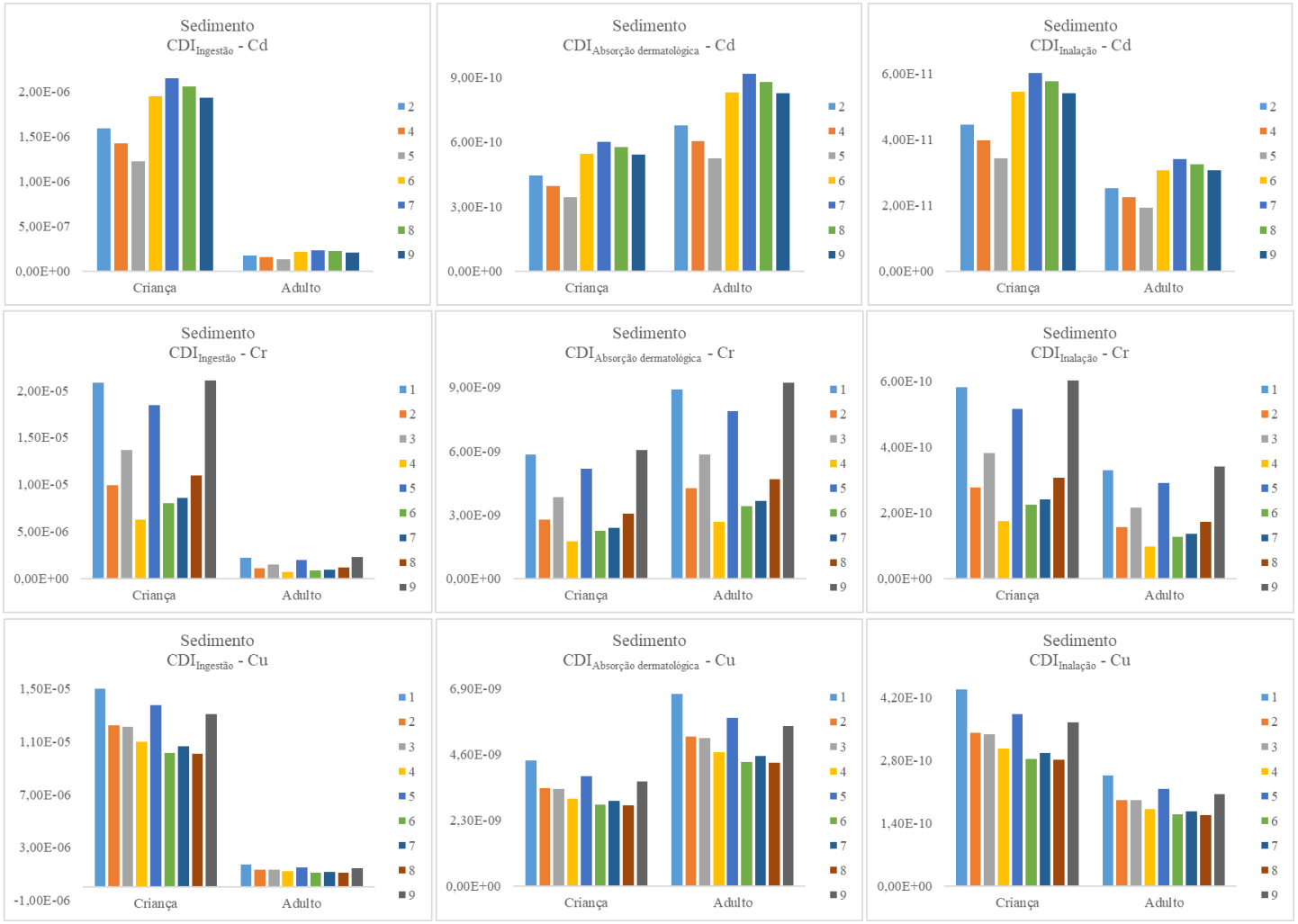


Figura 9 – Avaliação do risco de Ingestão Diária Crônica (CDI) de metais potencialmente tóxicos por vias de ingestão, absorção dermatológica e inalação para os sedimentos do rio Buranhém – Cd, Cr e Cu

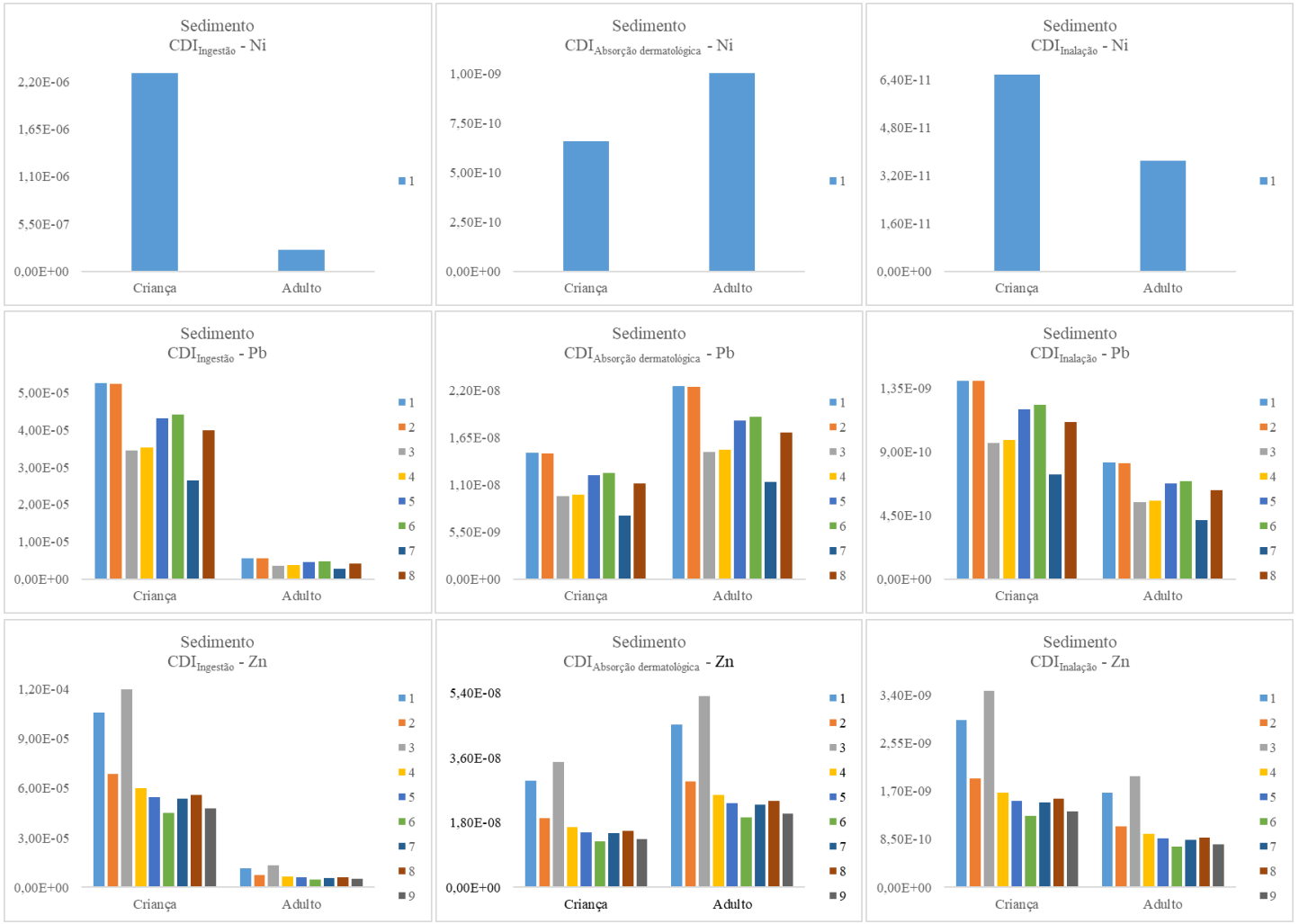


Figura 10 - Avaliação do risco de Ingestão Diária Crônica (CDI) de metais potencialmente tóxicos por vias de ingestão, absorção dermatológica e inalação para os sedimentos do rio Buranhém – Ni, Pb e Zn

,

Figura 11 – Avaliação do risco de Ingestão Diária Crônica (CDI) de metais potencialmente tóxicos por vias de ingestão, absorção dermatológica e inalação para o solo do lixão de Porto Seguro e área adjacente – Cd, Cr e Cu

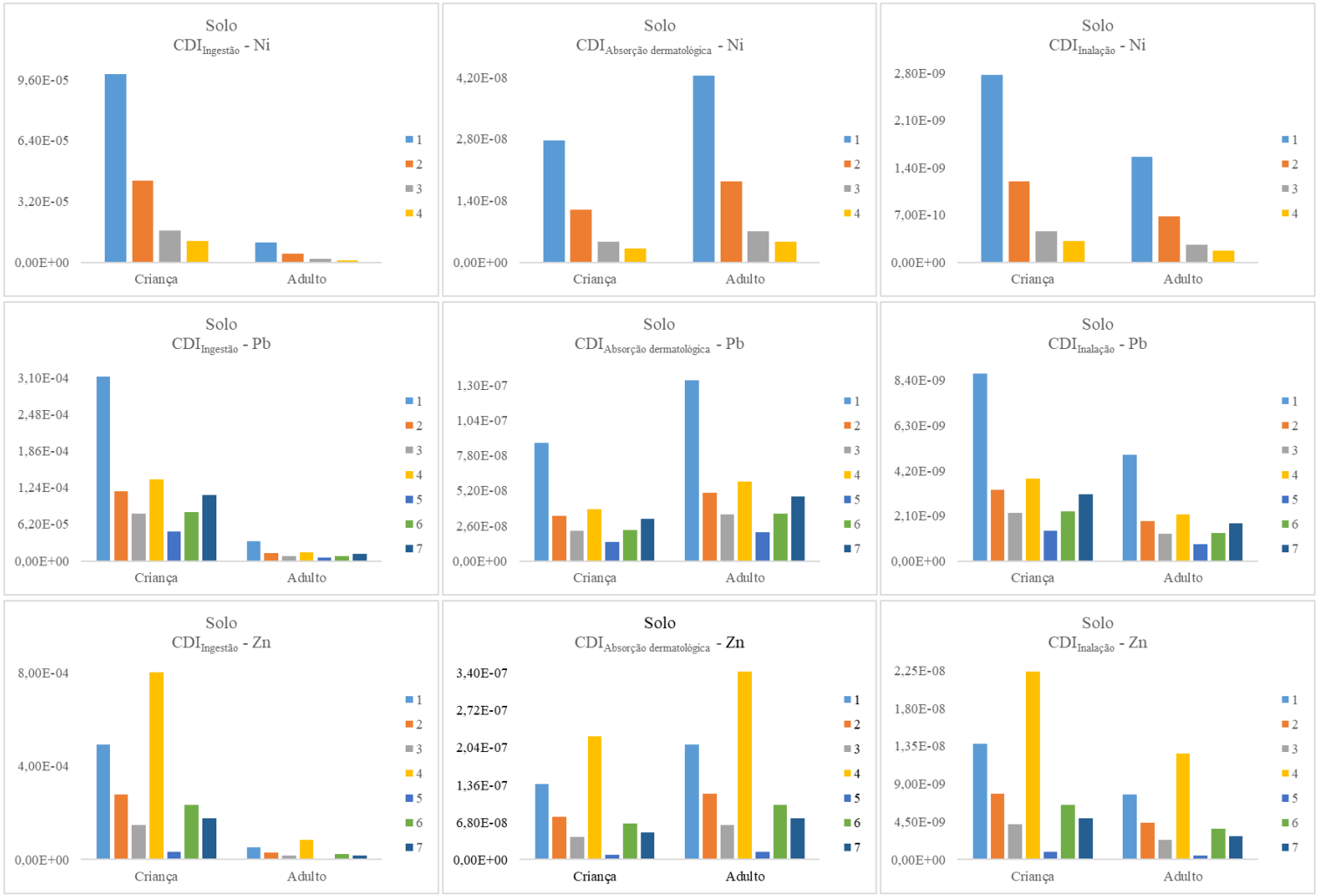


Figura 12 – Avaliação do risco de Ingestão Diária Crônica (CDI) de metais potencialmente tóxicos por vias de ingestão, absorção dermatológica e inalação para o solo do lixão de Porto Seguro e área adjacente – Ni, Pb e Zn

A exposição via ingestão é a de maior risco tanto no sedimento quanto no solo, seguida por absorção dérmica e inalação. Os riscos via ingestão e inalação são maiores para crianças do que para adultos, enquanto o risco por contato dérmico é maior para adultos devido à maior área de contato destes com as matrizes.

Para sedimento os pontos com maiores riscos para cada metal foram: Cd – ponto 7, Cr – ponto 9, Cu – ponto 1, Ni – ponto 1, Pb – ponto 1 e Zn – ponto 3. E para solo foram: Cd – ponto 4, Cr – ponto 1, Cu – ponto 1, Ni – ponto 1, Pb – ponto 1 e Zn – ponto 4.

As tendências observadas são congruentes com as observações de Ouabo et al. (2019), porém os autores trabalharam com amostras de solo coletadas em locais de reciclagem de resíduos eletrônicos e relataram maiores valores de CDI.

3.8. Estudo comparativo com outras áreas do mundo

Foi realizada uma análise comparativa entre as concentrações de metais potencialmente tóxicos presentes nos solos superficiais desse estudo com as de trabalhos similares ao redor do mundo (Tabela 21). Optou-se por realizar essa avaliação apenas para o solo, uma vez que essa matriz é mais diretamente afetada pelos produtos da decomposição de RSU e, consequentemente, mais estudada ao redor do mundo quando se trata de identificar sua possível contaminação por metais.

Tabela 21 – Comparação de valores mínimos, máximos e médios das concentrações de metais obtidas na análise de solo desse estudo com os de trabalhos similares ao redor do mundo (mg kg^{-1})

Localização do depósito de lixo	Cd			Cr			Cu			Ni			Pb			Zn			Referência
	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	Mín	Máx	Méd	
Porto Seguro, Brasil	0,12	0,12	-	5,50	32,16	11,95	1,50	16,44	7,63	0,87	7,75	3,32	3,93	24,44	9,98	2,57	62,65	24,21	Neste estudo
Karachi, Paquistão	3,12	3,92	3,30	41,20	75,40	65,70	29,40	81,40	45,10	34,80	49,50	40,40	20,30	116,00	51,30	142,80	201,40	168,90	Jilani; Rashid, 2020.
Chiang Rak Noi, Tailândia	0,16	1,67	-	13,96	108,66	-	16,51	470,44	-	1,59	53,74	-	20,97	72,76	-	21,41	968,12	-	Thongyuan; Khantamoon; Aendo; Binot; Tulayakul, 2020.
Ado Ekiti, Nigeria	0,60	5,20	-	4,80	87,95	-	14,60	72,75	-	0,05	5,05	-	3,00	80,85	-	14,05	40,80	-	Akintan; Olusola; Azeez, 2019.
Rasht, Irã	0,10	0,27	0,16	13,37	28,44	19,07	9,91	33,54	20,22	-	-	-	18,21	29,87	24,95	22,69	56,64	28,83	Sheijany; Shariati; Mahabadi; Karimzadegan, 2020.
Montecalvo, Itália	0,16	0,20	0,18	79,90	93,50	85,64	22,5	27,4	24,9	47,00	59,20	54,66	11,10	15,00	13,18	73,8	95,8	84,14	Nannoni; Santolini; Protano, 2015.
Graçanica, Kosovo	1,51	3,83	2,53	-	-	-	2,19	4,10	3,37	1,69	2,85	2,05	1,07	3,69	2,36	2,11	2,89	2,39	Korça; Demaku, 2021.
Ismaília, Egito	-	-	-	22,40	43,50	29,18	11,70	40,00	22,37	14,50	24,70	17,03	18,00	45,00	27,52	46,00	142,00	87,42	Singh; Verma; Kumar, 2018.
Omuo-Ekiti, Nigéria	-	-	-	43,50	8450,00	1775,00	2,00	12,50	4,30	0,03	0,03	0,01	9,00	65,50	32,20	5,00	120,50	35,30	Afolagboye; Ojo; Talabi, 2020.
Iguatu, Brasil	nd	nd	nd	8,80	27,20	11,90	4,70	182,60	71,70	nd	nd	nd	5,00	392,50	67,30	4,60	402,20	136,70	Milhome; Holanda; Araújo Neto; Nascimento, 2018.

nd: não detectado; -: não verificado no estudo citado.

A concentração de Cd encontrada no atual trabalho foi semelhante à concentração mínima encontrada por Sheijany et al. (2020) em Rasht, Irã. As concentrações de Cr variaram nos estudos, de modo geral, de 4,80 mg kg^{-1} a 8450,00 mg kg^{-1}, englobando assim os valores encontrados no atual trabalho, que foram similares ao mínimo encontrado por Akintan, Olusola e Azeez (2019) em Ado Ekiti, Nigeria e ao máximo encontrado por Sheijany et al. (2020). A média para Cr foi semelhante à encontrada por Milhome et al. (2018) em Iguatu, Brasil. Para Cu, o valor máximo encontrado nesse estudo foi maior que o máximo encontrado em Graçanica, Kosovo (KORÇA; DEMAKU, 2021) e em Omuo-Ekiti, Nigéria (AFOLAGBOYE; OJO; TALABI, 2020). Para Ni o máximo do atual estudo foi mais alto que o máximo em Ado Ekiti, Nigeria (AKINTAN; OLUSOLA; AZEEZ, 2019), Graçanica, Kosovo (KORÇA; DEMAKU, 2021), Omuo-Ekiti, Nigéria (AFOLAGBOYE; OJO; TALABI, 2020) e Iguatu, Brasil (MILHOME et al., 2018).

A concentração máxima de Pb encontrada nesse estudo foi maior que as encontradas em Montecalvo, Itália (NANNONI; SANTOLINI; PROTANO, 2015) e Graçanica, Kosovo (KORÇA; DEMAKU, 2021). Para Zn o valor mínimo do atual estudo foi semelhante ao encontrado em Rasht, Irã (SHEIJANY et al., 2020) e o máximo semelhante ao encontrado em Graçanica, Kosovo (KORÇA; DEMAKU, 2021).

4. CONCLUSÃO

Os parâmetros analisados nas amostras de água e sedimento coletadas no rio Buranhém apresentaram, no geral, valores dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005 para água doce de classe 2 e pela EPA (1977), respectivamente. Para água, o pH do ponto de coleta 2 (5,14), o OD do ponto 9 (4,21 mg L^{-1}) e a concentração de Cr do ponto 6 (0,079 mg L^{-1}) estavam fora do padrão estabelecido. As amostras de água continham coliformes termotolerantes e a maior parte delas continha níveis de metais abaixo do LQ.

Os resultados para as amostras de solo extraídas da área adjacente ao lixão e dentro do lixão de Porto Seguro também estavam em consonância com os valores legais, segundo a Resolução CONAMA 420/2009.

Os sedimentos analisados possuíam, em maioria, pH alcalino, enquanto os solos tenderam a apresentar pHs ácidos. O sedimento apresentou menores teores de matéria orgânica em comparação com o solo (5,20-17,99% e 10,64-49,07%, respectivamente). O ponto 9 de sedimento apresentou o maior teor de MO (17,99%), de umidade (19,71%) e de Cr (1,69 mg kg^{-1}), assim como o menor pH (6,28). O ponto 1 de solo, apresentou quase 50% de MO, além dos maiores teores de umidade (42,43%), COT (349,92 g kg^{-1}) e dos metais Cr, Cu, Ni e Pb (32,16, 16,44, 7,75 e 24,44 mg kg-1, respectivamente). Os maiores teores de Cd e Zn para solo foram observados no ponto 4 (0,12 e 62,65 mg kg^{-1}, respectivamente), onde se obteve o segundo maior teor de MO (18,03%).

Os testes t de *Student* e de *Wilcoxon* indicaram diferença significativa entre os valores obtidos para temperatura, condutividade, STD e P total (p-valor < 0,05) ao comparar os resultados dos pontos à montante e à jusante do lixão. Para sedimentos os testes apontaram diferenças significativas entre as médias dos parâmetros cinzas, matéria orgânica e Zn, em função das localizações dos pontos de coleta. Para solo não houve diferenças estatisticamente relevantes.

A correlação de Pearson para sedimento apontou forte relação positiva entre Pb-pH, Cu-Ni, Cu-Cr e Ni-Cr. Para o solo foi encontrada forte correlação positiva entre Cd-pH, MO-COT, MO-umidade, MO-Cr, MO-Ni, MO-Cr, MO-Ni, MO-Pb, umidade-CR, umidade-NI, umidade-Pb, COT-Pb, Cr-Ni, Cr-Pb, Cu-Pb, Cu-Zn e Ni-Pb; e forte correlação negativa entre cinzas-umidade, cinzas-COT, cinzas-Cr, cinzas-Cu, cinzas-Ni, cinzas-Pb.

Os resultados do Índice de Poluição mostram que a água do rio Buranhém está seriamente afetada pelo Cu nos pontos 1, 2, 3, 4, 6, 7 ,8 e 9, apesar das concentrações encontradas para esse metal estarem dentro do limite máximo permitido pela legislação brasileira. O PI mostra ainda que o ponto 6 está moderadamente afetado por Cr, enquanto os pontos 8 e 9 estão ligeiramente afetados por esse metal. Através do Índice de Poluição por Metal (MI) da água foi possível verificar que o ponto de análise 6, um dos mais próximos do lixão, está no limiar de risco de poluição por metais.

Através do Igeo verificou-se que os sedimentos analisados se enquadram na classe de não poluídos a moderadamente poluídos em todos os pontos de coleta (Igeo 0,00-0,76). Já o solo apresentou caráter fortemente a extremamente poluído por Zn nos pontos 3 e 4

A avaliação de risco para a saúde com base no CDI apontou que o maior risco vem da presença de Cd no ponto 7 de sedimento e no ponto 4 de solo. Os riscos por ingestão e inalação são maiores para crianças e os riscos por absorção dérmica são mais fortes em adultos.

De modo geral, os compartimentos estudados apresentaram baixo nível de contaminação por metais, no entanto é importante frisar a necessidade de fazer um monitoramento contínuo da área, de modo a ter controle sobre as alterações que podem vir a ser causadas pela inserção de contaminantes.

5. REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 10.004 – Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. São Paulo: ABRELPE, 2017.

ADEBIYI, P. E.; OLOUKOI, G. The study of potential toxic metals in dumpsites using surface soils and *Talinum triangulae* (water leaves) as environmental pollution indicators. **Journal of Environmental Chemistry and Toxicology**, v. 2, n. 2, p. 41-7, 2018.

AFOLAGBOYE, L. O.; OJO, A. A.; TALABI, A. O. Evaluation of soil contamination status around a municipal waste dumpsite using contamination indices, soil-quality guidelines, and multivariate statistical Analysis. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 1864, p. 1-16, 2020. https://doi.org/10.1007/s42452-020-03678-y.

AFOLAYAN, A. O. Accumulation of Heavy Metals from Battery Waste in Topsoil, Surface Water, and Garden Grown Maize at Omilende Area, Olodo, Nigeria. **Global Challenges**, v. 2, n. 1700090, p.1-12, 2018. https://doi.org/10.1002/gch2.201700090.

AGBESHIE, A. A. et al. Municipal waste dumpsite: Impact on soil properties and heavy metal concentrations, Sunyani, Ghana. **Scientific African**, v. 8, n. e00390, p. 1-10, 2020. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00390.

AKINTAN, O. B.; OLUSOLA, J. A.; AZEEZ, A. M. Heavy metals loads in soil, farmlands and plant crop at open dumpsite. **Global Journal of Environmental Science and Management**, v. 5, n. 4, p. 449-460, 2019. https://doi.org/10.22034/gjesm.2019.04.05.

ALAM, A. et al. Ecological risk assessment of an open dumping site at Mehmood Booti Lahore, Pakistan. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 17889-17899, 2017. https://doi.org/10.1007/s11356-017-9215-y.

ALBUQUERQUE, I. R. de; COLUNA, I. M. E. **Emissões do Setor de Resíduos**: 2018, documento de análise. São Luís: IEMA, SEEG, 2018.

ALI, I. H. et al. Contamination and human health risk assessment of heavy metals in soil of a municipal solid waste dumpsite in Khamees-Mushait, Saudi Arabia. **Toxin Reviews**, p. 102-115, 2019. http://dx.doi.org/10.1080/15569543.2018.1564144.

APHA (American Public Health Association). **Standard Methods for the examination of water and wastewater:** 5210 – Biochemical Oxygen Demand (BOD). Washington: Washington: APHA, AWWA, WPCF, 1999a. http://dx.doi.org/10.2105/SMWW.2882.102.

APHA (American Public Health Association). **Standard Methods for the examination of water and wastewater:** 4500-NO_2^- – Nitrogen (Nitrite). Washington: APHA, AWWA, WPCF, 1999b. http://dx.doi.org/10.2105/SMWW.2882.088.

APHA (American Public Health Association). **Standard Methods for the examination of water and wastewater:** 4500-NH_3 – Nitrogen (Ammonia). Washington: APHA, AWWA, WPCF, 1999c. http://dx.doi.org/10.2105/SMWW.2882.087.

APHA (American Public Health Association). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** Washington: APHA, AWWA, WPCF, 1999d.

ARAÚJO, C. C. G. de; RIBEIRO, R. de L. **Avaliação de Impactos Ambientais no Lixão do Município de Santa Helena de Goiás, GO**. 2016. 17 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Faculdade de Engenharia Ambiental da UniRV, Rio Verde, 2016.

ARAÚJO, C. P. de. **Porto (in) Seguro:** a perda do paraíso – os reflexos do turismo na sua paisagem. 2004. 173 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas Ambientais Urbanas) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

ARAÚJO, D. M.; ALEXANDRE, J. B.; DOMINGOS, G. L. Análise do efeito matriz na determinação de fármacos em efluente doméstico. In: X Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. **Anais eletrônicos...** Fortaleza: UNIFOR, 2019.

ARAÚJO, J. A. de; SOUZA, R. F. de. Aporte antropogênico de metais pesados em sedimentos de corrente de áreas de lixão, urbanizadas e agrícola, em Parelhas-RN, região semiárida do Brasil. **Geografia**, v. 21, n. 3, p. 5-22, 2012.

ASTM (American Society for Testing and Materials). **ASTM D2974-00, Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils**. West Conshohocken (PA): ASTM International, 2000. http://dx.doi.org/10.1520/D2974-00.

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). **Toxicological Profile for Cadmium**. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 2012a.

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). **Toxicological Profile for Chromium**. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 2012b.

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). **Toxicological Profile for Lead**. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 2007.

AZEVEDO, D. G. de; GOMES, R. L.; MORAES, M. E. B. de. Bacia do rio Buranhém: análise integrada da paisagem. In: MORAES, M. E. B. de; LORANDI, R. (Orgs.). **Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas**. Ilhéus: Editus, 2016. 17 p.

BARON, E. J. Suplementação de Elementos Traço. **Química Nova na Escola**, n. 6, 2005.

BOMFIM, A. R.; SILVA JÚNIOR, J. F. G. da. Diagnóstico do Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos em Porto Seguro – BA. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 5, n. 8, p. 1-7, 2009.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde – FUNASA. **Manual Prático de Análise de Água da Fundação Nacional de Saúde**. Brasília: FUNASA, 2013. 150 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA. **Resolução CONAMA n° 454, de 1º de novembro de 2012**. Brasília: Diário Oficial da União, 2012.

CAEIRO, S. Assessing heavy metal contamination in Sado Estuary sediment: An index analysis approach. **Ecological Indicators**, n. 5, p. 151-169, 2005. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.02.001.

CAMPOS, M. C. C. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais. **Ambiência Guarapuava (PR)**, v. 6, n. 3, p. 547-565, 2010.

CARVALHO, L.S. B. et al. Microwave induced plasma optical emission spectrometry for multielement determination in instant soups. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 86, n.103376, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103376.

CESAR, R. et al. Distribuição de mercúrio, cobre, chumbo, zinco e níquel em sedimentos de corrente da bacia do rio Piabanha, Estado do Rio de Janeiro. **Geochimica Brasiliensis**, v. 25, n. 1, p. 35-45, 2011. http://dx.doi.org/10.21715/gb.v25i1.330.

CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). **Guia nacional de coleta e preservação de amostras:** água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011. 326 p.

CHOUDHURY, M. et al. Investigation of groundwater and soil quality near to a municipal waste disposal site in Silchar, Assam, India. **International Journal of Energy and Water Resources**, 2021. https://doi.org/10.1007/s42108-021-00117-5.

COELHO, E. P. M. **Avaliação da correlação entre os parâmetros, carbono orgânico total e elementos tóxicos, em solo de um posto de serviço e revenda de combustíveis**. 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e engenharia de petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

COSTA, A. G. et al. Impactos Socioambientais Advindos do Lixão Municipal de Assú/RN. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC, 2015, Fortaleza. **Anais eletrônicos...** Fortaleza: Centro de Eventos do Ceará, 2015. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjHtfibkffdAhWDIpAKHbCwA4EQFjAAegQICRAC&url=http%3A%2F%2Fwww.confea.org.br%2Fmedia%2FAgronomia_impactos_socioambientais_advindos_do_lixao_municipal_de.pdf&usg=AOvVaw257lv6zYOZFqQMYCWHcLxq>. Acesso em: 08 out. 2018.

CRUZ, J. B. F.; SOARES, H. F. Uma revisão sobre o zinco. **Ensaios e Ciência Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 15, n. 1, p. 207-222, 2011.

DIAS, S. G. O desafio da gestão de resíduos sólidos urbanos. **Sociedade e Gestão**, v. 11, n. 1, p. 16-20, 2012. http://dx.doi.org/10.12660/gvexec.v11n1.2012.22776.

EDOKPAYI, J. N. et al. Assessment of Trace Metals Contamination of Surface Water and Sediment: A Case Study of Mvudi River, South Africa. **Sustainability**, v, 8, n. 135, p. 1-13, 2016. http://dx.doi.org/10.3390/su8020135.

ELUMALAI, V.; BRINDHA, K.; LAKSHMANAN, E. Human Exposure Risk Assessment Due to Heavy Metals in Groundwater by Pollution Index and Multivariate Statistical Methods: a Case Study from South Africa. **Water**, v. 9, n. 234, p. 1-16, 2017. http://dx.doi.org/10.3390/w9040234.

ENITAN, I. T. et al. Human Health Risk Assessment of Trace Metals in Surface Water Due to Leachate from the Municipal Dumpsite by Pollution Index: A Case Study from Ndawuse River, Abuja, Nigeria. **Open Chemistry**, v. 16, p. 214-227, 2018. https://doi.org/10.1515/chem-2018-0008.

FERREIRA, R. J. S. **Determinação de metais traço em sedimentos de rios: caso da bacia do baixo Itajaí-Açu.** 2001. 121 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2001.

FILIZOLA, H. F.; SOUZA, M. D. de; GOMES, M. A. F. Amostragem de solos para análise de metais pesados. In: FILIZOLA, H. F. **Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental: solo, água e sedimentos**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.

GAO, L.; WANG, Z.; LI, S.; CHEN, J. Bioavailability and toxicity of trace metals (Cd, Cr, Cu, Ni, and Zn) in sediment cores from the Shima River, South China. **Chemosphere**, n. 192, p. 31-42, 2018. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.110.

GOHER, M. E. et al. Evaluation of surface water quality and heavy metal indices of Ismailia Canal, Nile River, Egypt. **Egyptian Journal of Aquatic Research**, n. 40, p. 225-233, 2014. https://doi.org/10.1016/j.ejar.2014.09.001.

GOLTERMAN, H. L.; CLYMO, R. S.; OHNSTAND, M. A. M. **Methods for physical and chemichal analysis of fresh water**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1978. 213 p.

GONCALVES, D. A. et al. Standard dilution analysis of beverages by microwave-induced plasma optical emission spectrometry. **Analytica Chimica Acta**, v. 909, n. 25, p. 24-29, 2016. https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.12.046.

GUILHERME, L. R. G. et al. Elementos traço em solos e sistemas aquáticos. **Tópicos em Ciência do Solo**, p. 345-390, 2005. http://dx.doi.org/10.13140/2.1.4821.1524.

GUJRE, N.; RANGAN, L.; MITRA, S. Occurrence, geochemical fraction, ecological and health risk assessment of cadmium, copper and nickel in soils contaminated with municipal solid wastes. **Chemosphere**, v. 271, n. 129573, p. 1-15, 2021. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129573.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, G. J. de. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **Engineering and Science**, v. 5, n. 1, p. 1-8, 2015. http://dx.doi.org/10.18607/ES33982014%25e1%25001.

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). **Relatório de fiscalização:** operação cidade limpa. Eunápolis: IBAMA, 2012.

INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia). **Orientação sobre validação de métodos analíticos - DOQ-CGCRE-008**. Brasília: INMETRO, 2016.

ISWA-ABRELPE (International Solid Waste Association). **Saúde Desperdiçada**: o caso dos lixões. São Paulo: ISWA-ABRELPE, 2015.

JILANI, S.; RASHID, R. Municipal solid waste dumping and its impact on soil quality in Karachi. **EQA - International Journal of Environmental Quality**, v. 35, p. 9-14, 2020. https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/9342.

KAVIYA, B. et al. Analysis of Ground Water Quality Near Solid Waste Dumping Site-Perungudi. **International Journal of Pure and Applied Mathematics**, v. 116, n. 13, p. 407-410, 2017.

KORÇA, B.; DEMAKU, S. Assessment of Contamination with Heavy Metals in Environment: Water, STERILE, Sludge and Soil around Kishnica Landfill, Kosovo. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 30, n. 1, p. 671-677, 2021. https://doi.org/10.15244/pjoes/122448.

LEBRE, R. et al. Intoxicação aguda por sulfato de cobre: caso clínico. **Medicina Interna**, p. 220-224, 2005.

LIMA JÚNIOR, R. G. S. et al. Evaluation of heavy metals in fish of the Sepetiba and Ilha Grande bays, Rio de Janeiro, Brazil. **Environmental Research**, n. 89, p. 171-179, 2002. https://doi.org/10.1006/enrs.2002.4341.

LIMA, C. V. S. de; MEURER, E. J. Elementos Traço no Solo, nas Águas e nas Plantas de uma Lavoura de Arroz Irrigado do Rio Grande do Sul. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 15, n. 1, p. 20-30, 2013. http://dx.doi.org/10.7867/1983-1501.2013v15n1p20-30.

LOPES, H. B. V. **Projeto Porto Seguro-Santa Cruz Cabrália: hidrogeologia**. Salvador: CPRM: Prefeituras Municipais de Porto Seguro e Santa Cruz Cabrália, 2000.

MACKERETH, F. J. H.; HERON, J.; TALLING, J. F. **Water chemistry:** some revised methods for limnologists. London: Freshwater Biological Association, 1978. 121 p. https://doi.org/10.1002/iroh.19790640404.

MAGALHÃES, C. F. **Diretrizes para o turismo sustentável em municípios.** São Paulo: Rocca, 2002.

MILHOME, M. A. L. et al. F. do. Diagnóstico da Contaminação do Solo por Metais Tóxicos Provenientes de Resíduos Sólidos Urbanos e a Influência da Matéria Orgânica. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 1, p. 59-72, 2018. http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20180007.

MINITAB. **Interpretar os principais resultados para Correlação**. Pensilvânia: MINITAB, 2019. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/correlation/interpret-the-results/key-results/>. Acesso em: 19 jul. 2021.

MOTA, J. C. et al. Características e impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos: uma visão conceitual. In: Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, I, 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS, 2009. p. 1-15.

MÜLLER, G. Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. **Geojournal**, v. 2, n. 3, p. 108-118, 1969.

MURTAZA, G. et al. Municipal solid waste and its relation with groundwater contamination in Multan, Pakistan. **International Journal of Applied Research**, v. 3, n. 4, p. 434-441, 2017.

NANNONI, F.; SANTOLINI, R.; PROTANO, G. Heavy element accumulation in Evernia prunastri lichen transplants around a municipal solid waste landfill in central Italy. **Waste Management**, v. 43, p. 353-362, 2015. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.013.

NASCIMENTO, L. D. **Avaliação espacial e temporal das concentrações de metais potencialmente disponíveis nos sedimentos de fundo do sistema estuarino do Rio Cachoeira, Ilhéus-BA**. 2015. 71 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) – Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2015.

OSIBOTE, A. O.; RABIU, A. M. Assessment of Heavy Metals Contamination at Cape Town Landfill Sites. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 7, n. 11, 2016. http://dx.doi.org/10.18178/ijesd.2016.7.11.890.

OUABO, R. E. et al. Ecological Risk and Human Health Implications of Heavy Metals Contamination of Surface Soil in E-Waste Recycling Sites in Douala, Cameroun. **Journal of Health & Pollution**, v. 9, n. 21, 2019. http://dx.doi.org/10.5696/2156-9614-9.21.190310.

PENDIAS, A. K.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. CRC Press: Boca Raton | Londres | Nova Iorque | Washington (DC), 2001.

PIVELI, R. P. **Características químicas das águas:** pH, acidez, alcalinidade e dureza. USP, 2020. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/leb/disciplinas/Fernando/leb360/Fasciculo%206%20-%20Alcalinidade%20e%20Acidez.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2021.

PORTELLA, M. O.; RIBEIRO, J. C. J. Aterros sanitários: aspectos gerais e destino final dos resíduos. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, v. 4, n. 1, p. 115-134, 2014.

RANA, R.; GANGULY, R.; GUPTA, A. K. Indexing method for assessment of pollution potential of leachate from non-engineered landfill sites and its effect on ground water quality. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 46, p. 1-23, 2018. https://doi.org/10.1007/s10661-017-6417-1.

ROCHA, A. F. da. **Cádmio, Chumbo, Mercúrio – A problemática destes metais pesados na Saúde Pública?** 2008/2009. 63 f. Monografia (Ciências da Nutrição). Faculdade de Ciências da Nutrição e Alimentação. Universidade do Porto, Porto. 2008/2009.

ROCHA, J. C. et al. Multi-method Study on Aquatic Humic Substances from the "Rio Negro"- Amazonas State/Brasil. Emphasis on Molecular-Size Classification of their Metal Contents. **Journal of Brazilien Chemistry Society**, v. 10, n. 3, p. 169-175, 1999. https://doi.org/10.1590/S0103-50531999000300002.

SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo). **Norma Técnica Interna SABESP – NTS 013 – Sólidos**. São Paulo: SABESP, 1999a.

SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo). **Norma Técnica Interna SABESP – NTS 003 – DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio**. São Paulo: SABESP, 1999b.

SANTOS, D. M. dos; et al. Matrix Effect on Butyltin Analysis of Sediments and Fish Tissues by GC-PFPD. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 24, n. 6, p. 998-1005, 2013. https://doi.org/10.5935/0103-5053.20130129.

SANTOS, S. D**. Identificação de áreas prioritárias para a recuperação da vegetação nativa, na bacia do rio Buranhém, com o auxílio da modelagem espacial multicriterial**. 2021. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Ambientais). Universidade Federal do Sul da Bahia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Porto Seguro, 2021.

SCHUMACHER, B. A. M**ethods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments**. Estados Unidos: USEPA, ERASC, 2002.

SEIA (Sistema Estadual de Informações Ambientais e de Recursos Hídricos). **Dados Pluviométricos**. Bahia: INEMA, 2021. Disponível em: http://monitoramento.seia.ba.gov.br/paginas/hidrometeorologico/pluviometrico/export.xhtml. Acesso em: 15 jun. 2021.

SENADO FEDERAL. Resíduos Sólidos: lixões persistem. **Em discussão**, n. 22, p. 1-35, 2014. 62 p.

SHEIJANY, M. S. P. et al. Evaluation of heavy metal contamination and ecological risk of soil adjacent to Saravan municipal solid waste disposal site, Rasht, Iran. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 757, p. 1-19, 2020. https://doi.org/10.1007/s10661-020-08716-1.

SILVA, G. R. da et al. Avaliação físico-química e quantificação de metais potencialmente tóxicos em águas superficiais do rio Jauru. **Revista Internacional de Ciências**, v. 08, n. 02, p. 268-280, 2018. http://dx.doi.org/10.12957/ric.2018.34864.

SINGH, M.; VERMA, M.; KUMAR, R. N. Effects of open dumping of MSWon metal contamination of soil, plants, and earthworms in Ranchi, Jharkhand, India. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 139, p. 1-12, 2018. https://doi.org/10.1007/s10661-018-6492-y

SOLIMAN, N. F.; YOUNIS, A. M.; ELKADY, E. M. An insight into fractionation, toxicity, mobility and source apportionment of metals in sediments from El Temsah Lake, Suez Canal. **Chemosphere**, n. 222, p. 165-174, 2019. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.009.

SUN, C. et al. Concentrations, speciation, and ecological risk of heavy metals in the sediment of the Songhua River in an urban area with petrochemical industries. **Chemosphere**, n. 219, p. 538-545, 2019. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.040.

TAMASI, G.; CINI, R. Heavy metals in drinking waters from Mount Amiata: Possible risks from arsenic for public health in the province of Siena. **Science of the Total Environment**, 327, p. 41-51, 2004. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.10.011.

THONGYUAN, S. et al. Ecological and health risk assessment, carcinogenic and non-carcinogenic effects of heavy metals contamination in the soil from municipal solid waste

landfill in Central, Thailand. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 27, p. 876-897, 2020. https://doi.org/10.1080/10807039.2020.1786666.

USEPA. **Human Health Risk Assessment**. Washington: USEPA, 2007. 237 p.

USEPA. **Method 3050-B**: acid digestion of sediments, sludges and soils. Washington: USEPA, 1996a. 12 p.

USEPA. **Soil Screening Guidance**: User's Guide. Washington: USEPA, 1996b. 49 p.

USEPA. **Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites**. Washington: USEPA, 2002. 187 p.

VALDERRAMA, J. C. The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorous in natural waters. **Marine chemistry**, v.10, n. 2, p.109-222, 1981. https://doi.org/10.1016/0304-4203(81)90027-X.

VEIGA, G. da. **Análises físico-químicas e microbiológicas de água de poços de diferentes cidades da região sul de Santa Catarina e efluentes líquidos industriais de algumas empresas da grande Florianópolis**. 2005. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas. Florianópolis, 2005.

VILHENA, A. (Coord.). **Lixo municipal:** manual de gerenciamento integrado. 4. ed. São Paulo: CEMPRE, 2018.

YABE, M. J. S.; OLIVEIRA, E. de. Metais pesados em águas superficiais como estratégia de caracterização de bacias hidrográficas. **Química Nova**, v. 21, n. 5, p. 551-556, 1998.

YASIN, H.; USMAN, M. Site investigation of open dumping site of Municipal Solid Waste in Faisalabad. **Earth Science Pakistan**, v. 1, n. 1, p. 23-25, 2017. http://dx.doi.org/10.26480/esp.01.2017.23.25.

YIN, K. et al. Mapping Refuse Profile in Singapore Old Dumping Ground through Electrical Resistivity, S-Wave Velocity and Geotechnical Monitoring. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**. n. 94, p. 275-281, 2015. http://dx.doi.org/10.1007/s00128-014-1427-y.

ZHANG, Z. et al. Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Zijiang River, China. **Science of the Total Environment**, n. 645, p. 235-243, 2018. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.026.

CONCLUSÃO GERAL

Os resultados da análise cienciométrica sobre estudos que avaliaram a contribuição de depósitos de lixo para o aumento das concentrações de metais em solo, água e/ou sedimento indicaram que a maior parte dos trabalhos realizados é de caráter diagnóstico. Estudos dessa natureza são muito relevantes, pois criam o embasamento científico necessário para que a tomada de decisão e a criação de planos de gerenciamento não sejam realizadas com base em especulações. No entanto, é importante reforçar a necessidade de dar continuidade a esses estudos e produzir trabalhos que indiquem meios de mitigação para a contaminação encontrada nesses ambientes (quando encontrada). Além disso, os dados também apontaram para a carência de produções científicas sobre o tema no Brasil.

O estudo diagnóstico realizado na área próxima ao lixão de Porto Seguro, na segunda seção do presente trabalho, constitui um passo importante para futuros trabalhos de recuperação da área em questão, além de ajudar no aumento do índice de produção brasileira sobre o tema. O diagnóstico apontou a atual concentração dos metais Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn nas matrizes estudadas, mas é importante reafirmar a necessidade de um monitoramento continuado da área, inclusive com a inserção de mais pontos de amostragem. Além disso, é preciso fazer o direcionamento dos RSU do município para um local melhor preparado e promover políticas de mitigação para o espaço onde o lixão funciona hoje. Esse estudo também foi relevante para a geração de índices de qualidade das matrizes estudadas, como o Igeo e o MI, o que permite uma visão mais global do atual estado de cada compartimento.