

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO SOLO DA ÁREA DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO MUNICÍPIO DE TUCURUÍ-PA

EVALUATION OF SOIL IMPACTS IN THE FINAL DISPOSAL AREA OF URBAN SOLID WASTE IN THE MUNICIPALITY OF TUCURUÍ-PA

*Davi Raniere Odoricio ¹

Matheus Silva de Castro ¹

Jessyca Ingles Nepomuceno dos Santos ²

Anderson de Santana Botelho ³

Paulo Sarmento ³

Cristine Bastos do Amarante ³

Recibido el 30 de junio de 2023. Aceptado el 6 de mayo de 2024

Abstract

The inadequate final disposal of waste causes public health problems such as the proliferation of disease vectors, generation of foul odors, and pollution of underground and surface waters. The municipality of Tucuruí-PA uses an open dump as its final disposal method, and even after the implementation of the National Waste Policy and the New Legal Framework for Sanitation, there haven't been effective actions to change this final disposal scenario. In light of this, this research consisted of an evaluation of the environmental impacts of the area, as well as an investigation of the soil quality at the site. In the field, some aspects stood out, such as open-air waste, presence of waste pickers, and hazardous waste, housing, accumulation of leachate, and waste burning were observed, which can have significant impacts on health and the environment. The granulometric analyses revealed a predominance of clayey soil, which contributes to the impermeability of the surface layer. The estimation of the average leachate flow was calculated using the water balance, combined with the swiss method, and proved to be significant when compared to a large landfill.

Keywords: contamination, soil, dumping ground, leached.

¹ Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Pará, Campus Tucuruí, Brasil.

² Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Pará, Campus Tucuruí, Brasil.

³ Campus de Pesquisa do Museu Paraense Emílio Goeldi, Coordenação de Ciências da Terra e Ecologia, Belém- Pará, Brasil.

* Autor correspondente: Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Pará, Campus Tucuruí. Avenida Brasília, sem número, Vila Permanente, Tucuruí-PA. Código postal: 68455-766. Brasil. Email: eng.davidodoricio@hotmail.com

Resumo

A disposição final inadequada de resíduos causa problemas de saúde pública como proliferação de vetores de doenças, geração de maus odores e poluição das águas subterrâneas e superficiais. O município de Tucuruí, Pará (PA) utiliza como forma de disposição final um vazadouro a céu aberto, e mesmo após a implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos e do Novo Marco Legal do Saneamento, não se têm ações efetivas para que esse cenário de disposição final possa mudar. Diante disso, essa pesquisa consistiu em uma avaliação dos impactos ambientais da área, além de uma investigação da qualidade do solo do local. Em campo, destacaram-se alguns aspectos como presença de catadores, de resíduos perigosos, de moradias, de acúmulo de chorume e de resíduos a céu aberto e de queima de resíduos, o que pode trazer impactos significativos à saúde e ao meio. As análises granulométricas evidenciaram predominância de solo argiloso, o que pode contribuir na impermeabilização da camada superficial. A estimativa da vazão média de percolado foi calculada com o balanço hídrico, somado ao método suíço, e se mostrou significativo quando comparado a um aterro de grande porte.

Palavras-chave: contaminação, solo, lixão, lixiviado.

Introdução

A disposição irregular de resíduos no solo acarreta problemas à saúde pública, como proliferação de vetores de doenças (moscas, mosquitos, baratas, ratos, etc.), geração de maus odores e, principalmente, poluição do solo e das águas subterrâneas e superficiais pela infiltração do lixiviado (líquido de cor preta, mau cheiroso e de elevado potencial poluidor) produzido pela decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos. Acrescenta-se a esta situação o total descontrole dos tipos de resíduos recebidos nestes locais, verificando-se até mesmo a disposição de dejetos originados de serviços de saúde e de indústrias. Comumente, ainda, associam-se aos lixões a criação de animais e a presença de pessoas (catadores), os quais, algumas vezes, residem no próprio local (Vilhena, 2018).

Ressalta-se que essa preocupação com as áreas degradadas por disposição de resíduos surgiu nos Estados Unidos, na década de 1980, porém tendo como foco principal as áreas contaminadas por resíduos perigosos (Ramos *et al.*, 2017).

Com a finalidade de contribuir para a resolução de problemas relacionados à disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU), no Brasil, foi publicada em 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que tem como ordem de prioridade a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem o tratamento dos resíduos sólidos e finalmente a disposição final dos rejeitos, sendo que a Lei 12.305 de agosto de 2010 define como disposição final ambientalmente adequada a distribuição ordenada de rejeitos em aterros sanitários (Brasil, 2010). Sendo assim, a partir da promulgação da Lei 12.305 que institui a PNRS, a única forma de disposição final considerada adequada é o aterro sanitário.

No início das mudanças, em 2010, para que todos os municípios se adequassem à Lei foram fixados prazos que levaram em consideração as peculiaridades de cada localidade. Inicialmente, o prazo foi de 4 (quatro) anos a partir da data de publicação da Lei, ou seja, todas as localidades deveriam ter aterros sanitários até 2014 (Brasil, 2010).

A Medida Provisória nº 685, de 21 de julho de 2015 alterou os prazos finais para implantação de aterros sanitários para até 31 de julho de 2021, utilizando como justificativa o fato de os prazos não serem suficientes para a alteração estrutural que se pretendia empreender, haja vista ser cultura de longa data a utilização dos lixões (Brasil, 2015).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2022), no Brasil, a maior parte dos resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados seguiu para disposição em aterros sanitários, com 46,4 milhões de toneladas enviadas para esses locais, superando a marca dos 60% dos resíduos coletados que tiveram disposição adequada no país. Por outro lado, áreas de disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, ainda estão em operação e receberam quase 40% do total de resíduos coletados (Abrelpe, 2022).

Trazendo a problemática para a região Norte, observa-se que a situação é ainda pior, uma vez que, de acordo com os dados disponibilizados pelo Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil da ABRELPE, das 6.173.684 toneladas de RSU gerados no ano de 2022, 3.240.105 toneladas têm disposição inadequada, sendo direcionadas a lixões a céu aberto ou a aterros controlados, representando quase 64% do total dos resíduos gerados na Região.

De acordo com a PNRS, em sua última atualização, os prazos para os municípios se regularizarem perante a disposição final foi: até 2 de agosto de 2021, para capitais e Municípios integrantes de Região Metropolitana; até 2 de agosto de 2022 para Municípios com a população superior a 100.000 (cem mil); até 2 de agosto de 2023, para Municípios com população entre 50.000 (cinquenta mil) e 100.000 (cem mil) e até 2 de agosto de 2024, para Municípios com população inferior a 50.000 (cinquenta mil) (Brasil, 2020).

O lixão localizado no Município de Tucuruí apresenta características distintivas, tais como uma vasta extensão de resíduos, a presença ativa de catadores, e condições ambientais adversas, ocasionando impactos diretos à saúde pública e ao meio ambiente. Tendo em vista que o referido lixão, segundo imagens de satélite, tem sido operado há pelo menos 7 anos e continua em operação, sendo o único destino dos resíduos sólidos urbanos municipais de Tucuruí. Este trabalho tem por objetivo avaliar os impactos no solo referentes ao descarte inadequado de resíduos na área de disposição final de RSU em Tucuruí-PA, dessa forma, foram estudados os atributos físicos e químicos do solo da área, para análise da qualidade do mesmo.

Impactos da disposição irregular de resíduos no solo

Uma realidade ainda muito comum nos países em desenvolvimento é a utilização de lixões como forma de disposição final de resíduos sólidos urbanos, implicando em consequências como a contaminação dos recursos naturais e problemas de saúde pública (Ramos *et al.*, 2017). Estes locais trazem inúmeros riscos ao envolvimento da área, pois são fontes de proliferação de vetores de doenças e atraem pessoas em condição de vulnerabilidade social, as quais passam a coletar os resíduos, como forma de sobrevivência (Ramos *et al.*, 2017).

Tratando-se do Brasil, o descarte de resíduos sólidos é um dos agentes de maior influência na geração de impactos ambientais negativos, tais como as contaminações do solo, do ar e das águas subterrâneas e superficiais, o que coloca em risco principalmente a saúde pública (Costa *et al.*, 2016). Para os recursos hídricos, os efeitos do lançamento de rejeitos na natureza são incalculáveis e recaem principalmente em sua escassez, na contaminação da água, e no aumento das doenças associadas à poluição ambiental (Oliveira; Jucá, 2004).

A disposição de resíduos no solo é, como descrito anteriormente, um exemplo de atividade geradora de lixiviado, sendo eles gerados pela infiltração de água das chuvas que percolam através da massa de resíduos, carreando os produtos da decomposição biológica e os elementos minerais em dissolução (Sá *et al.*, 2012).

Nesse sentido, um dos poluentes que merece atenção são os metais pesados, que representam elementos quimicamente reativos os quais podem ocasionar processos de bioacumulação e toxicidade ao organismo, uma vez que este se torna incapaz de eliminar tais substâncias. Esses compostos interferem na manutenção da homeostasia celular e podem gerar efeitos acumulativos prejudiciais ao homem se expostos de forma acentuada, como é o caso do alumínio, cobre, zinco e mercúrio, que podem causar lesões no sistema nervoso central (Cruz *et al.*, 2021).

A contaminação ambiental por metais pesados tornou-se crítica em nível global, pois a deposição de metais pesados no solo tem causado grande preocupação quanto aos seus impactos ao meio ambiente e à saúde humana. Essa contaminação ocorre quando o teor de um elemento químico encontrado naturalmente é excedido após uma atividade antrópica (Nascimento *et al.*, 2020).

A poluição por metais pesados é um grande problema ambiental devido à sua toxicidade e bioacumulação, podendo causar doenças e síndromes como disfunções renais, hipertensão, danos hepáticos, pulmonares, câncer e modificações adversas no DNA (Cechinel *et al.*, 2016).

Materiais e métodos

O local de estudo, o município de Tucuruí, localizado no sudeste do Pará, ainda dispõe os RSU coletados em um vazadouro a céu aberto. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2022), a população do município é de 91.306 habitantes, tendo, portanto, o município, até 2 de agosto de 2024 para adequar a disposição final dos resíduos, conforme determina a PNRS (Brasil, 2010), através do encerramento e da recuperação do atual local de disposição de resíduos.

O procedimento metodológico do trabalho envolveu a realização das seguintes etapas (Figura 1): Levantamento documental do Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduo Sólidos (PMGIRS) de Tucuruí de 2014, inspeções de campo, coletas de solo, análises físico-químicas do solo, estimativa da vazão de lixiviado e cálculo do *Pollution Index*, que se trata de um índice de qualidade do solo (Malkoc et al., 2010). Somando-se a isso, foram realizadas estimativas dos volumes de lixiviado gerados na área do lixão, sendo utilizados o método do balanço hídrico e o método suíço.

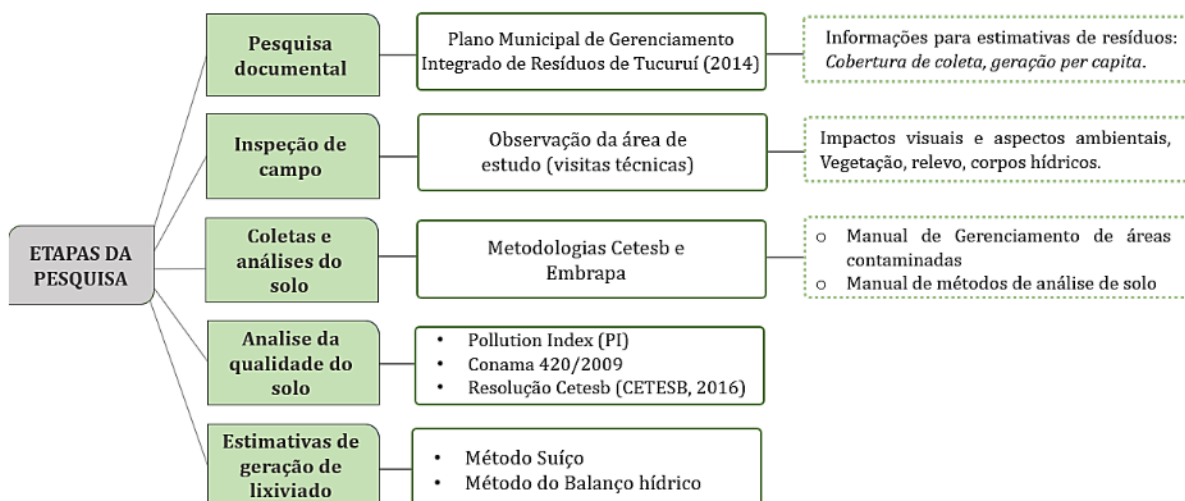


Figura 1. Fluxograma das etapas do estudo.

Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Tucuruí, situada no sudeste do estado do Pará, coordenadas 03°45'58" Sul e 49°40'21" Oeste (Figura 2), sendo despejadas, atualmente, cerca de 45 toneladas de resíduos por dia de acordo com estimativas.

O comportamento sazonal pluviométrico foi obtido através da análise da variação mensal, tendo os resultados demonstrado dois períodos bem definidos, característicos da região Amazônica, de modo geral, sendo um período chuvoso de dezembro a maio e um período menos chuvoso de junho a novembro. Em relação a precipitação, de 1980 a 2015, constataram-se significativas variações do regime de chuvas interanuais, com precipitação média anual de 2.431,6 mm, conforme Lopes *et al.* 2020.

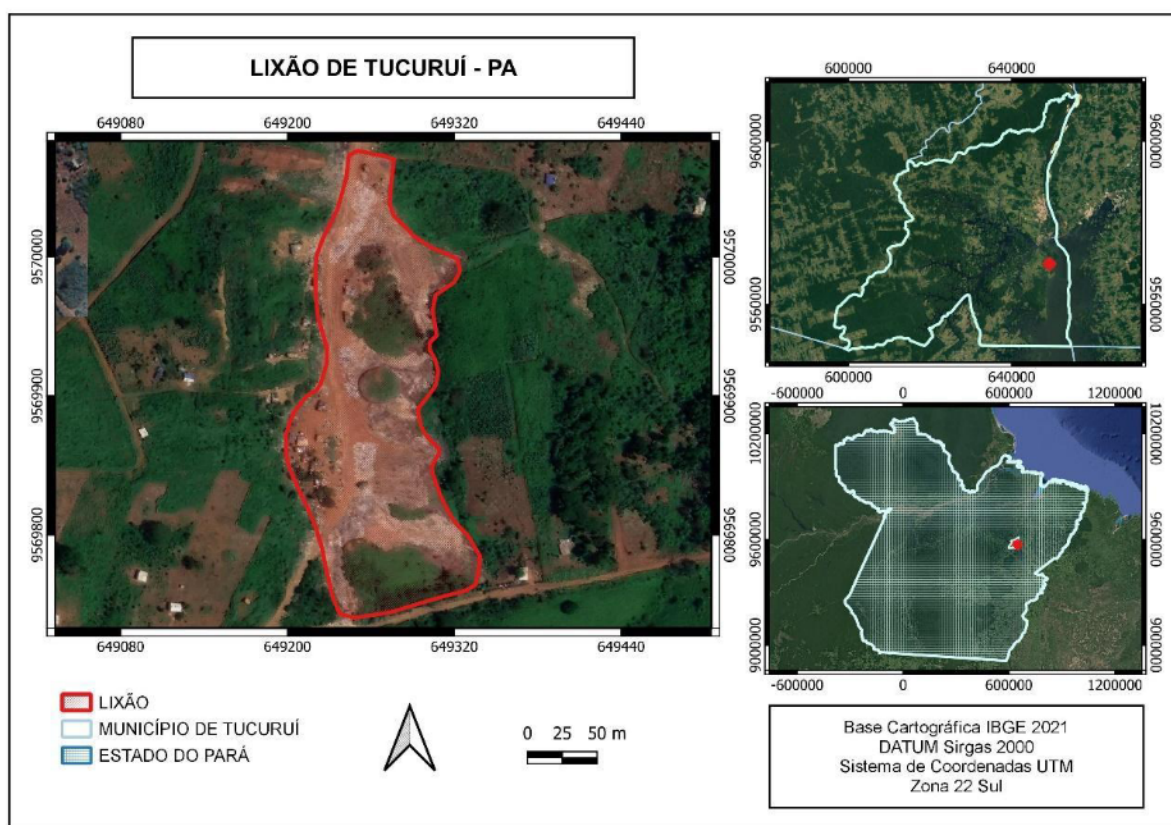


Figura 2. Mapa de localização do lixão de Tucuruí (PA).

De acordo com o IBGE (2022), a população do município de Tucuruí é de 91.306 habitantes, e possui um IDH 0,666 (2010), com densidade demográfica de 43.81 hab/km² (2022), área territorial 2.084,289 km² (2022) e PIB *per capita* de R\$ 39.674,02 (2020), possuindo como principais atividades econômicas indústrias de pequeno e médio porte, comércios, serviços e pecuária bovina (Semma, 2014).

Coletas e análises do solo

Para a caracterização de um solo, como não existe a possibilidade de que todo ele seja examinado, é necessário que amostras do mesmo sejam coletadas (Cetesb, 1999). Quanto ao tamanho da amostra para a caracterização química, de uma forma geral, considera-se que 500 g de amostra de solo fino (peneira 2 mm) são o suficiente para realizar esta caracterização (Cetesb, 1999).

A malha de pontos de amostragem pode ser orientada na direção do fluxo de dispersão dos poluentes, os quais, via de regra, seguem a topografia do local ou a direção predominante dos ventos (Cetesb, 1999). Sendo assim, seguindo a topografia da área de estudo, foram escolhidos cinco pontos: P1, P2, P3, P4 e P5 (Figura 3).

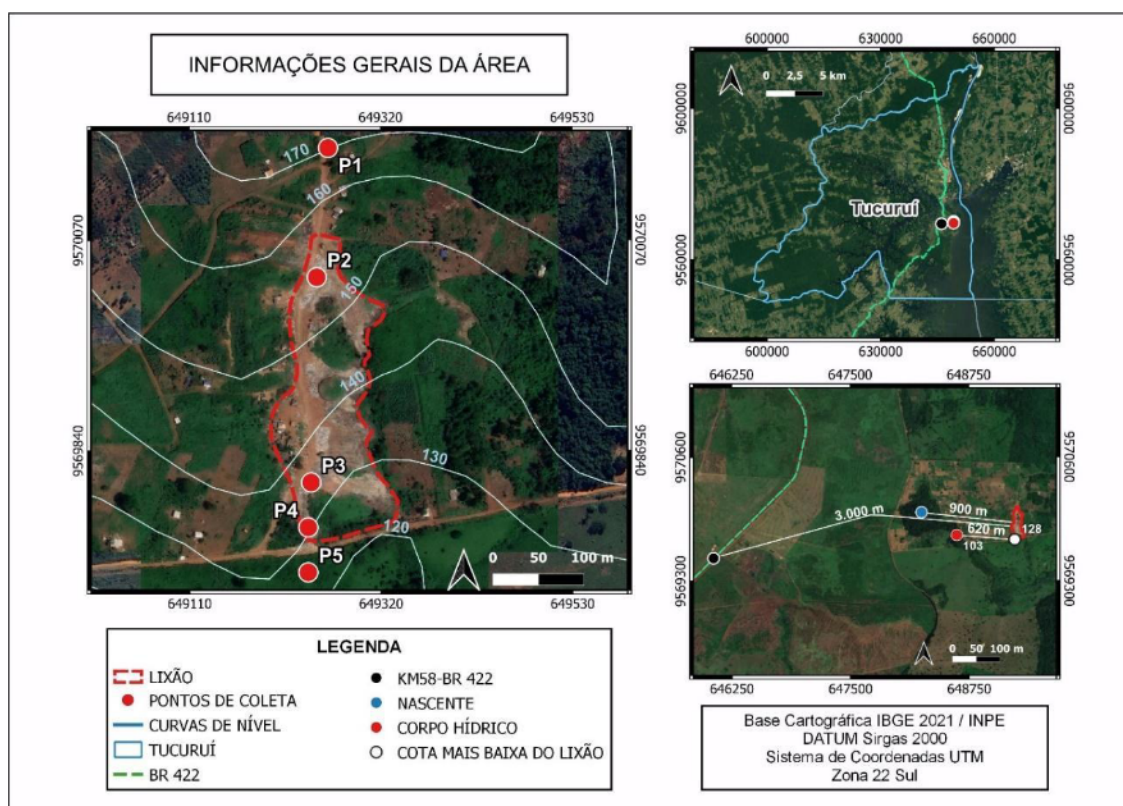


Figura 3. Informações gerais da área de estudo.

Dentro da área que compreende a disposição de resíduos no solo, foram escolhidos dois pontos P2 e P3 (cotas 157 e 144 metros), por terem sido identificados como as áreas que recebem diariamente os RSU. Ressalta-se que estes pontos foram referência para escolha dos demais pontos, os pontos P4 e P5 (cotas 125 e 129 metros) foram definidos com base no ponto P3, sendo estes localizados respectivamente a 50 e a 100 metros de distância do referido ponto P3. Por fim, o ponto P1 (cota 177 metros), foi escolhido como *background*. Segundo o *Naval Facilities Engineering Command – NFESC (2002)*, *background* ou área de referência é um ponto onde qualquer concentração química encontrada é de origem natural, ou seja, não influenciada por atividades antrópicas, neste caso, definiu-se como sendo o ponto a montante da área de disposição de resíduos, que também é o ponto de maior cota da área de estudo (o ponto P1). Na Tabela 1 são apresentadas as informações dos pontos de amostra, com as descrições, coordenadas geográficas e cotas.

Tabela 1. Pontos de amostragem do solo com as descrições e coordenadas geográficas.

Pontos	Descrição	Coordenadas	Cotas (m)
P1	Ponto de Controle: Área a montante do lixão	03°53'15.6"S; 49°39'20.4"O	177
P2	Ponto de maior intensidade de despejo de rejeitos	03°53'20.2"S; 49°39'20.8"O	157
P3	Ponto de maior intensidade de despejo de rejeitos	03°53'27.5"S; 49°39'21.0"O	144
P4	Ponto de menor intensidade de despejo de rejeitos	03°53'29.1"S; 49°39'21.1"O	129
P5	Área vegetada a jusante do lixão	03°53'30.7"S; 49°39'21.1"O	125

As coletas foram realizadas nos dias 27/10/2022, 05/12/2022 e 16/02/2023, compreendendo os períodos seco, transição entre seco e chuvoso, e período chuvoso, respectivamente. As amostras foram coletadas deformadas e indeformadas em quadrantes de aproximadamente 2 x 2 m. A amostra deformada foi coletada com a utilização de um Trado Holandês, seguindo os procedimentos de amostragem da USEPA (1989), segundo os quais a amostra é transferida para um balde de aço inoxidável, homogeneizada e logo após transferida para um frasco apropriado, visando preservar ao máximo a estrutura da amostra. Em cada ponto de coleta, foram utilizadas quatro amostras simples para compor uma amostra composta, todas coletadas na profundidade de 0 - 20 cm. A coleta de solo indeformado foi feita com a utilização de anéis de 51 mm de altura por 50 mm de diâmetro (Embrapa, 1999).

O solo foi retirado das profundidades de 0 – 5 cm e de 15 – 20 cm. Uma vez que existem dois pontos de maior despejo de resíduos, P2 e P3 tiveram amostras colhidas, também, nas profundidades de 20 – 40 cm (Tabela 2).

Tabela 2. Equipamento e profundidade na coleta das amostras.

Pontos	Trado (0-20cm)	Trado (20-40cm)	Anel Metálico (0-5cm)	Anel Metálico (15-20cm)
P1	x		x	x
P2	x	x	x	x
P3	x	x	x	x
P4	x		x	x
P5	x		x	x

Os procedimentos das análises das concentrações químicas e de metais pesados nas amostras de solo foram baseados no Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes da Embrapa (1999). A análise granulométrica foi feita por dispersão mecânica e estabilização da amostra por meio de agitador em uma solução dispersante adequada, seguida da separação das frações por peneiramento e sedimentação. Medição das frações separadas por meio de pesagem após secagem em estufa (EMBRAPA, 1999). A determinação dos resultados para Na, K, Cu, Fe, Zn e Mn foi realizada em espectrômetro de absorção atômica de chama (marca Thermo, modelo ICE3500). Para a análise, foram utilizados os seguintes reagentes: Ácido nítrico (concentrado), HNO₃, ácido clorídrico (concentrado), HCl e peróxido de hidrogênio (30%), H₂O₂.

Para os metais pesados foi utilizado o método USEPA 3050B, da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (Usepa, 1998). O método utilizado não solubiliza totalmente a fração sólida dos fosfatos e são mais indicados que extrações totais para estudos de poluição do solo, pois representam o máximo potencialmente biodisponível de um dado poluente.

Os valores utilizados como referência para a comparação com os resultados das análises de laboratório foram os valores orientadores para solos e água subterrâneas no estado de São Paulo 2016 (Cetesb, 2016) e da Resolução Conama nº 420/2009 (Conama, 2009) (Tabela 3).

Para o tratamento estatístico, utilizou-se o software Bioestat 5.0 e o teste não-paramétrico de Friedman para avaliar possíveis mudanças na composição química do solo (pH, C, MO, C/N, P, N, Cu, Fe e Zn) com relação à variação sazonal (períodos seco, intermediário e chuvoso).

Tabela 3. Valores orientadores.

Referência	Cu (mg/Kg)	Mn (mg/Kg)	Fe (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)	Ni (mg/Kg)	Cd (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)
CETESB (VRQ)	35	-	-	60	13	<0.5	17
CETESB (VP)	60	-	-	86	30	1.3	72
CONAMA (VP)	60	-	-	300	30	1.3	72

Fonte: Adaptado de Cetesb, 2016.

Cálculo do Pollution Index

Os níveis de poluição de metais pesados no solo foram calculados pelo *Pollution Index* (PI) (Benhaddya *et al.*, 2015).

O *Pollution Index* é uma forma de descrever a qualidade do ambiente e é definido pela relação da concentração de cada metal encontrado em uma amostra de solo pelo valor de *background* (P1) que, por sua vez, foi calculado pela seguinte equação de Malkoc, Yazici e Koparal (2010), disponível na Equação (1).

$$PI = \frac{Cn}{Bn}$$

Equação (1)

Cn= concentração mensurada do elemento no solo (mg/kg);

Bn=concentração de referência do elemento no solo (mg/kg), ou seja, valor de background.

Sendo assim, o PI é a pontuação de avaliação correspondente a cada amostra. De acordo com Malkoc, Yazici e Koparal (2010), os valores de PI de cada contaminante podem ser classificados como baixa contaminação ($PI \leq 1.0$), contaminação moderada ($1.0 > PI \leq 3.0$), alta contaminação ($PI > 3.0$). As concentrações de background de metais pesados do presente estudo são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de *background*.

Período	Cu	Mn	Fe	Zn	Ni	Cd	Pb
SECO	41.55	237.73	93,657.53	21.19	5.68	ND	ND
TRANSI.	38.56	195.58	78,886.73	18.49	4.59	ND	ND
CHUV.	30.81	158.56	59,351.67	15.30	ND	0.10	ND

ND: Não detectado.

Estimativa da geração de lixiviado

O método suíço foi selecionado por ser o sistema mais utilizado no projeto de aterros sanitários no Brasil. Além disso, é um modelo empírico, de simples compreensão e com baixa exigência de dados de entrada, três variáveis (precipitação média anual, área do aterro e coeficiente de compactação). Segundo Capelo Neto et al. (1999) é um método bem simples, mas deixa a desejar no que diz respeito à precisão. A fórmula algébrica para a aplicação do método suíço, onde se estima a vazão de percolado é mostrada na Equação 2.

$$Q = \frac{(P.A.K)}{t} \quad \text{Equação (2)}$$

Q = Vazão média do percolado em litros por segundo;

P = Precipitação média mensal (mm);

A = Área total do aterro (m²);

t = Número de segundos em 1 mês, que é de 2,592.000 segundos;

K = Coeficiente que depende do grau de compactação dos resíduos sólidos urbano.

O coeficiente K diz respeito ao grau de compactação e pode variar entre aterros fracamente compactados a fortemente compactados. No primeiro caso, o peso específico do RSU varia de 0.4 a 0.7 por m³, variando o coeficiente de 0.25 a 0.50. Para os aterros fortemente compactados, o peso específico é maior que 0.7 m³, com K entre 0.15 e 0.25.

O método desenvolvido por Fenn et al. (1975) é o mais utilizado, por ser prático, pois necessita da disposição de dados locais que viabilizem sua aplicação. É um método mais consistente que o Método suíço, pois considera em sua formulação, além do índice pluviométrico, a evapotranspiração, o escoamento superficial e a capacidade de armazenamento de água no solo. De forma geral, é um estudo com a premissa de conservação de massa, em que se relacionam precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e o armazenamento da água no solo (Castilho jr., 2003). Dessa forma, a aplicação do método consiste em registrar mês a mês, durante o período de um ano, os valores dos parâmetros indicados na equação 3.

$$PER = ES - P - AAS - ER \quad \text{Equação (3)}$$

PER = volume de lixiviado, valores médios mensais;

P = índice de precipitação pluviométrica, valores médios mensais;

ES = escoamento superficial;

AAS = troca de armazenamento de água no solo;

ER = evapotranspiração real.

A precipitação e a evaporação podem ser obtidas com boletins meteorológicos. Neste caso foram utilizados os dados pluviométricos do estudo de Lopes *et al.*, (2020). Enquanto que o escoamento superficial, a infiltração e o armazenamento são obtidos com o auxílio de cálculos e valores referências disponíveis na literatura.

Resultados e discussão

Caracterização e diagnóstico ambiental da área de estudo

Segundo o Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos de Tucuruí (PMGIRS) (Semma, 2014) o município, durante a sua história, teve 05 (cinco) áreas que serviram para a disposição final de resíduos sólidos, que posteriormente foram ocupadas em função do processo migratório, ocasionado pelas obras da Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Atualmente o lixão está localizado a aproximadamente 13 km de distância do centro da cidade, possui área aproximada de 27,500 m², a pouco mais de 3 km da rodovia BR 422 nas proximidades de seu KM 58 (DNIT), exposto na Figura 3.

A distância do referido lixão ao corpo hídrico é de pouco mais de 650 m. A NBR 13896/97, que trata sobre as condições mínimas exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, recomenda uma distância mínima de 200 m entre um aterro sanitário e um corpo hídrico. Porém, no período chuvoso, o desnível de aproximadamente 25 m da parte mais baixa do lixão, o solo com característica argilosa e a existência de uma via de acesso, podem direcionar o lixiviado sem qualquer barreira vegetal para o corpo hídrico.

Além disso, de acordo com um levantamento documental junto a Secretaria de Meio Ambiente de Tucuruí, bem como com as visitas técnicas, foi constatado a existência de uma nascente nas proximidades da área do lixão, distando aproximadamente 900 metros, onde a mesma deságua no Lago da Usina Hidrelétrica, evidenciadas na Figura 3.

Devido à falta de informações atuais a respeito da geração per capita de resíduos e cobertura de coleta, fez-se necessário utilizar informações contidas no Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos de 2014. Com as informações supracitadas, juntamente com os dados do censo de 2022 do IBGE, onde a população de Tucuruí é de 91,306 habitantes, estimou-se que estão sendo enviados aproximadamente 44,733 kg/dia de resíduos para o lixão.

Durante as visitas à área de estudo foram levantadas alguns aspectos e impactos ambientais relativos à disposição de resíduos no local. Entre as questões observadas, destacou-se a grande quantidade de resíduos despejados sem a utilização de camadas de cobertura (Figura 4a).



Figura 4. Principais aspectos levantados na área: a) despejo de resíduos a céu aberto, vetores e focos de queimada e b) acúmulo de lixiviado.

A falta das ações relativas a camadas de cobertura leva a entrada excessiva de ar, acúmulo de líquidos na massa de resíduos, proliferação de vetores de doenças atraídos pelo lixo, além de desfavorecer esteticamente a área (Porto *et al.*, 2004). A execução dos serviços de camadas de cobertura não é feita com frequência e, isso pôde ser confirmado nas inspeções de campo, pois foi evidenciada a presença de grandes quantidades de resíduos espalhados a céu aberto.

Durante a inspeção de campo foi observada a presença de resíduo eletroeletrônico, os quais de acordo com Gerbase e Oliveira (2012) contém chumbo em sua composição. Ressalta-se que esse metal pesado pode causar danos ao sistema nervoso, circulatório e renal, além de dificultar a aprendizagem em crianças. Lembrando ainda, que as características químicas do lixiviado são dependentes dos tipos de resíduos presentes na área. Além disso, foram observadas poças de lixiviado (Figura 4b), que segundo Gomes e Belém (2020) surgem a partir da decomposição de matéria orgânica presente no resíduo, além do mau cheiro, é um contaminante para as águas subterrâneas e superficiais o que, consequentemente, afeta a saúde de organismos vivos.

No que envolve esses impactos, realizou-se planos de coletas de amostragem do solo local, para análise da qualidade do mesmo e investigação sobre a potencial contaminação.

Análise da qualidade do solo na área

De acordo com os parâmetros granulométricos, o solo estudado mostrou-se muito argiloso, apresentando em média 2.95% de areia fina, 3.67% de areia grossa, 27.10% de silte e 66.29% de argila, sendo essa característica predominante em todos os pontos analisados. Essa característica indica que o solo apresenta uma maior capacidade de reter os metais oriundos da decomposição dos resíduos ou de qualquer outra fonte (Alcântara *et al.*, 2011).

Além disso, as características de baixa permeabilidade de solos argilosos é considerada uma vantagem nesse caso, diferente da área de disposição de resíduos estudada por Pinheiro e Mochel (2018), que realizou uma avaliação de áreas contaminadas pela disposição de resíduos sólidos no município de Paço Lumiar – Maranhão, uma vez que o solo estudado por estes autores apresentou característica predominantemente arenosa, o que, segundo Lisk (1991), por ser um solo altamente permeável facilita a contaminação das águas subterrâneas pelo lixiviado.

Analizando possíveis mudanças na composição química do solo com relação à variação sazonal (períodos seco, transição e chuvoso), os resultados utilizando o teste de Friedman não se mostraram estatisticamente significativos ($p > 0,05$) para as propriedades pH, C, MO, C/N, P, Cu e Fe. No entanto, foram detectadas diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) para as medidas de Zn e N. Os valores de zinco se mostraram diferentes para as medidas realizadas entre os períodos de transição (possivelmente maiores) e chuvoso. Já para os teores de N, os valores se mostraram diferentes entre os períodos seco (possivelmente maiores) e chuvoso.

De maneira geral, os pontos coletados apresentaram um pH ácido, o que, de acordo com (Barreto *et al.*, 2006) pode ter relação com a mineralização da matéria orgânica e os exsudatos ácidos liberados pelas raízes das plantas (geralmente é uma caracterização determinada pelo material de origem). Além disso, o pH ácido do solo permite que os contaminantes presentes em percolados do aterro, principalmente os metais pesados, estejam mais disponíveis (Almeida, 2009). Os fatores que aumentam a acidez do solo podem levar à mobilização de metais pesados que estavam imobilizados, aumentando seus efeitos degradantes (Oliveira *et al.*, 2016).

Os resultados das análises de metais pesados estão disponíveis na Tabela 5. Onde alguns parâmetros como níquel (Ni), cádmio (Cd) e chumbo (Pb) apresentaram concentrações abaixo do limite de detecção.

De acordo com avaliação da qualidade de solo, quanto à presença de substâncias químicas, determinada na Resolução Conama 420/09, o solo da área estudada se enquadra na classe 3, uma vez que apresentou concentrações maiores do que os valores de prevenção (VP) de pelo menos uma substância química, neste caso, os valores de cobre. De acordo com o Conama 420/09, as atividades de gerenciamento que esta classe de solo requer são: identificação da fonte potencial de contaminação, avaliação da ocorrência natural da substância e controle das fontes de contaminação e monitoramento da qualidade do solo e da água subterrânea.

Nos resultados de metais pesados, observou-se que a concentração de cobre apresentou valores acima do valor de prevenção (VP) e níquel acima do valor de referência de qualidade da CETESB, mostrado na Tabela 3. Durante as visitas foi constatado que houve movimentação de terra por maquinário, o que pode ter ligação com o fato de não terem sido observadas alterações

significativas para os demais elementos. Essa informação pode ser ratificada quando observado o comportamento do níquel, que apresentou variadas concentrações para os diferentes períodos, ultrapassando o valor de referência no período transição, e com a mesma metodologia de análise, não houve concentração detectada no período chuvoso.

Tabela 5. Resultados das análises de metais pesados do solo.

Período	Ponto	Profund. (cm)	Cu (mg/Kg)	Mn (mg/Kg)	Fe (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)	Ni (mg/Kg)	Cd (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)
SECO	P1	0-20	41.55	237.73	93,657.53	21.19	5.68	ND	ND
	P2	0-20	77.38*	187.73	126,616.7	28.08	2.94	ND	ND
		20-40	76.07*	172.34	129,280.13	22.38	2.34	ND	ND
	P3	0-20	39.53	89.36	121,728.53	32.31	ND	0.17	ND
		20-40	35.5	63.28	110,567.00	17.95	ND	0.02	ND
	P4	0-20	46.01	179.14	113,433.60	23.66	ND	0.14	ND
TRANSIÇÃO	P5	0-20	48.46	292.12	95,964.44	19.16	0.29	0.04	ND
	P1	0-20	38.56	195.58	78,886.73	18.49	4.59	ND	ND
	P2	0-20	84.56*	200.28	121,536.97	23.01	4.45	ND	ND
		20-40	88.11*	198.73	119,531.00	24.86	4.43	0.19	ND
	P3	0-20	39.74	107.47	102,560.92	17.91	ND	0.15	ND
		20-40	39.87	104.16	101,806.05	20.23	ND	0.13	ND
CHUVOSO	P4	0-20	51.29	83.04	115,162.67	44.73	14.37	0.15	ND
	P5	0-20	47.53	177.87	90,155.72	20.28	1.28	0.07	ND
	P1	0-20	30.81	158.56	59,351.67	15.3	ND	0.1	ND
	P2	0-20	38.11	132.72	82,400.47	13.04	ND	ND	ND
		20-40	57.50	171.23	123,264.6	17.26	ND	ND	ND
	P3	0-20	33.03	94.41	97,318.18	14.13	ND	ND	ND
		20-40	41.01	79.63	95,651.54	13.57	ND	ND	ND
	P4	0-20	59.19	78.3	116,875.23	22.11	ND	ND	ND
	P5	0-20	48.49	312.14	110,126.70	20.26	ND	ND	ND

ND: não detectado; *: em negrito – Valores que estão acima do VP de acordo com a Resolução CONAMA nº 420/09.

Em todos os pontos analisados o micronutriente cobre apresentou concentrações acima dos valores de referência de qualidade da CETESB, exceto no ponto P3 no período chuvoso. Em um comparativo, estas concentrações ficaram abaixo das obtidas na célula de despejo de resíduos no município de Paço do Lumiar (MA) (Pinheiro; Mochel, 2018), a qual apresentou concentrações de cobre que ultrapassaram o valor de prevenção (VP) da CETESB, 2016. No lixão de Tucuruí o ponto

de maior concentração foi o ponto P2, o que pode ser explicado em decorrência de o referido ponto ser uma das áreas de maior despejo de resíduos.

Para os índices foram utilizados como *background* os valores de P1 dos períodos seco, transição e chuvoso, conforme descrito na Tabela 4. Os resultados obtidos para a classificação das amostras através do *Pollution Index* estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados de *Pollution Index*.

Período	Pontos	Profund.	Cu	Mn	Fe	Zn	Ni	Cd	Pb
SECO	P2	0-20	1.86	0.79	1.35	1.33	0.52	-	-
		20-40	1.83	0.72	1.38	1.06	0.41	-	-
	P3	0-20	0.95	0.38	1.30	1.52	-	-	-
		20-40	0.85	0.27	1.18	0.85	-	-	-
	P4	0-20	1.11	0.75	1.21	1.12	-	-	-
	P5	0-20	1.17	1.23	1.02	0.90	0.05	-	-
TRANSIÇÃO	P2	0-20	2.19	1.02	1.54	1.24	0.97	-	-
		20-40	2.29	1.02	1.52	1.34	0.97	-	-
	P3	0-20	1.03	0.55	1.30	0.97	-	-	-
		20-40	1.03	0.53	1.29	1.09	-	-	-
	P4	0-20	1.33	0.42	1.46	2.42	3.13	-	-
	P5	0-20	1.23	0.91	1.14	1.10	0.28	-	-
CHUVOSO	P2	0-20	1.24	0.84	1.39	0.85	-	-	-
		20-40	1.87	1.08	2.08	1.13	-	-	-
	P3	0-20	1.07	0.60	1.64	0.92	-	-	-
		20-40	1.33	0.50	1.61	0.89	-	-	-
	P4	0-20	1.92	0.49	1.97	1.45	-	-	-
	P5	0-20	1.57	1.97	1.86	1.32	-	-	-

Verde: $PI \leq 1$ Nível baixo; Amarelo: $1 \leq PI \leq 3$ Nível médio; Vermelho: $PI > 3$ Nível alto.

Pode ser observado que os resultados variaram de “baixo nível de poluição” ($PI \leq 1$) a “nível alto de poluição” ($1 \leq PI \leq 3$), sendo o menor valor 0.05 e o maior 3.13. Estes resultados indicaram pouca contaminação, no entanto, vale ressaltar que o cálculo deste índice se dá por meio da

relação entre o *background* e o ponto analisado, sendo assim, a concentração mensurada do elemento no solo de referência tem grande influencia no valor do PI, exemplo disso é o resultado para Níquel (Ni), que no cálculo do PI apresentou um nível alto de poluição, no entanto, as concentrações desse metal encontram-se dentro dos padrões de qualidade apresentados na Resolução Conama 420/09. Os demais valores ausentes se dão pelo fato de que as concentrações não foram detectadas nas análises.

De acordo com os resultados do PI, a área de estudo apresentou um baixo ou moderado nível de poluição por metais, isso pode ser explicado por conta do reaterro na área do lixão, resultando na alteração das características do solo e, conseqüentemente, nos resultados das análises. Além disso, verificou-se que as áreas adjacentes ao lixão (P5) também apresentaram baixa contaminação, apesar de receber influência de escoamento superficial desta atividade, por estar em uma cota mais baixa. Isso pode se dar, entre outras coisas, pelas características locais do solo (predominância argilosa), de baixa permeabilidade. Dessa forma, uma vez que o estudo foi direcionado para qualidade do solo, há necessidade de estudos para realização de análises das águas superficiais e subterrâneas das redondezas.

A Figura 5 mostra a distribuições dos valores dos índices de poluição para esses quatro metais.

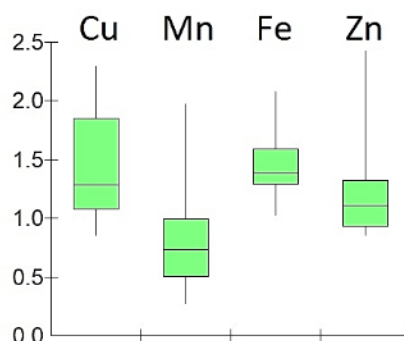


Figura 5. Boxplots para as distribuições dos valores dos índices de poluição para os metais.

Os resultados utilizando o teste de Friedman revelaram diferenças estatisticamente significativas para as distribuições dos valores de índices de poluição entre Cu e Mn ($p < 0,05$), Mn e Fe ($p < 0,05$) e entre Fe e Zn ($p < 0,05$). De maneira geral, o Cu apresentou maiores valores do índice poluição. Fatores como o teor de matéria orgânica, pH e textura do solo, interferem na adsorção e difusividade dos nutrientes no solo (Siqueira et al., 2008). Entre os micronutrientes o cobre é o menos móvel no solo devido à sua interação com a argila e a matéria orgânica (Abreu et al., 2007).

Estimativas de lixiviado na área

Foi realizada a estimativa de percolado com balanço hídrico e método suíço, obtendo-se os valores representados na Figura 6.

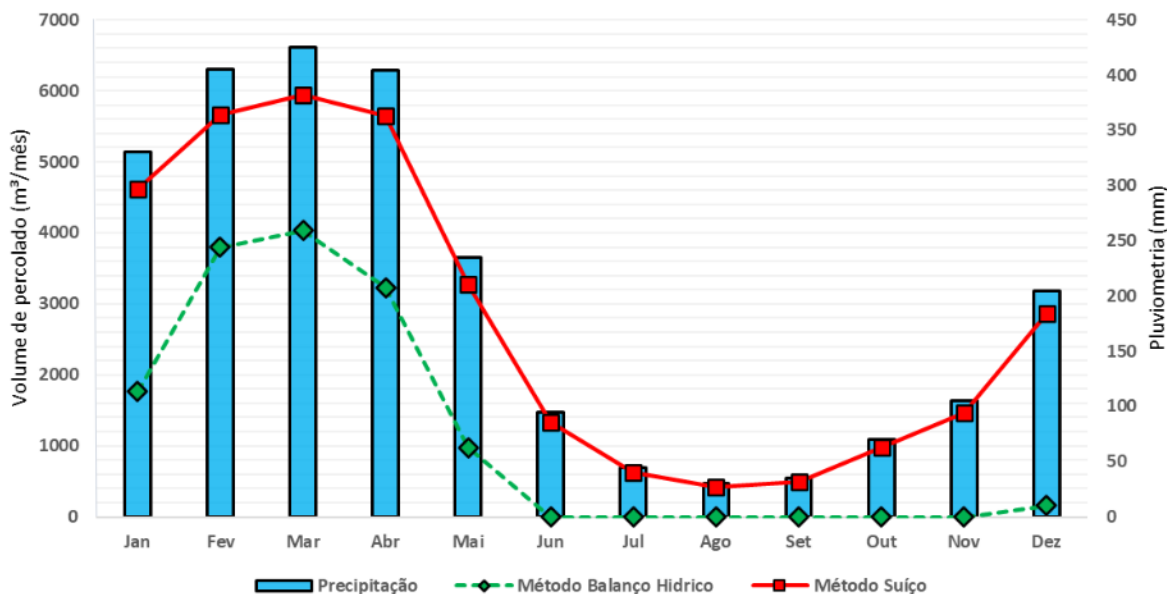


Figura 6. Estimativa da vazão de percolado.

Pôde-se observar que a vazão de percolado teve maior registro no mês de março, e o menor no mês de agosto, sendo este, respectivamente, os meses de maior e menor precipitação. Nos meses que compreendem o período menos chuvoso (junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro) a geração de lixiviado é reduzida. Para os resultados apresentados na Figura 5, obteve-se uma vazão média de percolado de 1,163.27 m³/mês para o lixão do município de Tucuruí, levando em consideração dados pluviométricos de Lopes et al., (2020).

Ainda em relação a predição da geração de lixiviado realizada, observou-se que a média anual de geração do volume estimado pelo Método Suíço ficou acima da média anual estimada pelo Balanço Hídrico, isso se deve a simplicidade do primeiro método, que considera apenas a precipitação, a área do local e o grau de compactação dos RSU. O método Suíço, por não considerar a evapotranspiração, apresenta uma geração permanente no decorrer do ano. O Balanço Hídrico apresentam valores mais substanciais de geração de lixiviados, quando a pluviosidade supera valor do potencial de evapotranspiração, enquanto que nos meses mais secos, a geração estimada é praticamente nula (Figura 6).

Quando comparado com aterros sanitários instalados em outras localidades do Brasil, verifica-se que o lixão de Tucuui apresenta valores expressivos no que diz respeito a geração de lixiviado por unidade de área de despejo (Tabela 7).

Tabela 7. Relação da geração de lixiviado com a área de diferentes aterros.

Fonte	Cidade/Estado	Aterro	Área (m ²)	Geração Média (m ³ /mês)	Geração / Área
Cavalcante, (2014) ¹	São Paulo - SP	Bandeirantes	1,350.000	16,684.00	0.01
	São Paulo -SP	Sítio São João	270.000	23,850.08	0.09
	São Paulo-SP	CDR Pedreira	562.052	33,917.83	0.02
	Guarulhos-SP	Guarulhos	413.000	8,785.25	0.02
	Caieiras-SP	CTR Caieiras	1,500.000	52,303.17	0.13
	São Paulo-SP	CTL Floresta	389.500	22,867.50	0.06
Silva et al., (2022) ²	Marituba -PA	Guamá	328.900	3,315.66	0.01
Autores (2023) ²	Tucuui -PA	Lixão de Tucuui	27.567	1,163.27	0.04

¹ Geração média calculada a partir de dados de monitoramentos (série histórica) do estudo

² Geração média calculada a partir de estimativas da geração de lixiviado

Em um aterro sanitário com uma área de aproximadamente 328,900 m², localizado no município de Marituba-PA, a pouco mais de 300 km do lixão de Tucuui, foi realizado um estudo que estimou as médias anuais de vazão de lixiviado (2006 a 2017), onde os autores obtiveram uma vazão média de 3,315.66 m³/mês para o ano de 2012 (SILVA et al., 2022). Em comparação com o volume de lixiviado estimado para o lixão de Tucuui, verifica-se que a geração de lixiviado por unidade de área do lixão é quatro vezes maior que o estimado para o aterro sanitário de Marituba. Vale lembrar ainda, que Tucuui e Marituba estão situados na Região Norte, distantes em 307 km aproximadamente e, portanto, possuem regimes pluviométricos igualmente elevados, destacando-se Marituba com 3,445.20 mm em 2014 (Silva et al., 2022).

Ao cruzar informações de geração de lixiviado por metro quadrado entre o lixão de Tucuui, que recebe aproximadamente 45 toneladas por dia, e o aterro sanitário CDR Pedreira, localizado em São Paulo, que segundo Cavalcante (2014) tem capacidade para receber 6 mil toneladas por dia, foi visto que a a geração estimada de percolado do lixão (por m²) mostrou-se duas vezes maior

que a do aterro, mesmo o aterro CDR Pedreira dispondo de uma área 20 vezes maior que o lixão de Tucuruí.

Vale ressaltar que os métodos de estimativa de vazão de lixiviado são ferramentas auxiliares para projetos de estruturas e operações unitárias no aterro sanitário, no entanto, a geração real de lixiviado depende de vários fatores que muitas vezes não são incorporados nos modelos de predição. Ley et al. (2021) avaliou a aplicabilidade do Método Suíço, neste estudo realizado para o Centro de Tratamento de Resíduos de São Gonçalo, Rio de Janeiro (CTR -SG), a geração estimada resultou em erros de aproximadamente 50% da geração real, o que levaria ao projeto de estruturas, como lagoas de armazenamento de lixiviado e estações de tratamento, menores do que as necessidades reais.

Destaca-se ainda, que as características gerais dos lixiviados como composição e quantidade depende principalmente, da composição dos resíduos sólidos, das condições climáticas, da temperatura, das condições hidrológicas, da idade dos resíduos e das práticas de operação do aterro (Bhalla et al., 2013; Adhikar et al., 2014; Somani et al., 2019).

Na prática as diferenças na geração de lixiviado estão relacionada, dentre outras coisas, aos aspectos operacionais das diferentes áreas de disposição final, onde no aterro sanitário ocorrem procedimentos operacionais inexistentes em um lixão, cita-se principalmente, a realização da cobertura diária dos resíduos com solo e a compactação dos resíduos, o que resulta na redução da entrada de líquidos no maciço de resíduos aterrados.

Tendo em vistas as características locais (tipo de solo, precipitação, grau compactação dos RS) do lixão de Tucuruí, observou-se uma geração estimada de lixiviado por área expressiva, podendo comprometer ainda mais a qualidade do solo na área de despejo e no entorno. Vale ressaltar que, o percolado do lixão do município de Tucuruí, não dispõe de coleta e tratamento, sendo despejado integralmente no meio ambiente, atingindo o solo e podendo chegar as camadas mais profundas, contaminando assim as águas subterrâneas.

Considerações finais

A partir das visitas *in loco*, foram constatados problemas ambientais. O despejo descontrolado de resíduos a céu aberto traz problemas de ordem ambiental, sendo possível observar: alteração na qualidade do solo, riscos evidentes de contaminação da água, poluição visual e do ar. Esses aspectos trazem consigo os riscos à saúde e problemas de cunho social, onde os catadores que fazem moradia no local estão sujeitos às condições deste ambiente, em total condição de vulnerabilidade social e são, muitas vezes, marginalizados pela sociedade e enfrentam dificuldades em acessar serviços básicos, como saúde e educação, além de estarem sujeitos à exploração por parte de intermediários que compram materiais recicláveis a preços muito baixos.

As análises granulométricas apresentaram elevados teores de argila na composição do solo da área, característica essa que pode ajudar a conter possíveis focos de contaminação de lixiviados.

O pH do solo se mostrou ácido em toda área do lixão, o que aumenta a disponibilidade de contaminantes nos percolados do lixão, principalmente metais pesados. Para os metais pesados foram obtidas concentrações acima do valor de prevenção da CONAMA 420/09, sendo o solo classificado como Classe III. Os valores obtidos do *Index Pollution* variou de baixo a moderado nível de contaminação, apresentando predominância de médio nível, o que pode estar relacionado ao reaterro realizado na área de disposição final.

E quanto ao percolado, foi observado que a geração apresentou uma vazão média de 1,161.27 m³/mês, essa geração se mostrou expressiva mesmo quando comparado a um cenário de um aterro sanitário de maior porte (em tamanho e em quantidade de resíduos recebidos).

A disposição adequada dos resíduos sólidos é indiscutivelmente necessária, uma vez que tem extrema importância para a saúde humana e preservação do meio ambiente, porém deve-se ressaltar a importância de se seguir os critérios técnicos para que o impacto se torne o menor possível. Este estudo fornece dados científicos que comprovam a existência de contaminação no solo do lixão do município de Tucuruí. Dados estes que podem orientar as autoridades à tomada de decisões mais efetivas, direcionadas às áreas prioritárias para a remediação. Visto que, todas as municipalidades no Brasil têm prazos para se regularizarem quanto às suas formas de disposições finais, sendo impreterível o encerramento de lixões ou aterros controlados.

Referencias bibliográficas

- Adhikari B, Dahal KR, Khanal SN. (2014). A review of factors affecting the composition of municipal solid waste landfill leachate. *Int J Eng Sci Innov Tech*, 3(5):272–281.
- Alcântara, A. J. O., Pierangeli, M. A. P., Souza, C, A, Souza, J. B. (2011) Teores de As, Cd, Pb, Cr e Ni e Atributos de Fertilidade de Argissolo Amarelo Distrófico Usado como Lixão no Município de Cáceres, Estado de Mato Grosso, *Revista Brasileira de Geociências*, 41(3), 539-548.
- Almeida, T. L. (2009) *Implicações Ambientais dos Processos de Atenuação de Lixiviado de Locais de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos*, Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 192p. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-25062009-123008/publico/3.pdf>.
- ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública de Resíduos Especiais (2022) *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022*. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997) *NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos*, ABNT, Rio de Janeiro. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em: <https://engcivil20142.files.wordpress.com/2018/04/nbr-13896-aterros-de-resc3adduos-nc3a3o-perigosos.pdf>.
- Azevedo, P. B., Leite, J. C. A., Oliveira, W. S. N., Silva, F. M., Ferreira, P. M. L. (2015) Diagnóstico da Degradação Ambiental na Área do Lixão de Pombal – PB, *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*. 10(1), 20-34.

- Barreto, A. C., Lima, F. H. S., Freire, M. B. G. S., Freire, F. J. (2006) Características Químicas e Físicas de um Solo Sob Floresta, Sistema Agroflorestal e Pastagem no Sul da Bahia, *Revista Caatinga*, **19**(4), 415-425.
- Benhaddya, M. L., Halis, Y., Boukhelkhal, A., Hadjel, H. M. (2015) Human Health Risks Associated with Metals from Urban Soil and Road Dust in an Oilfield Area of Southeastern Algeria, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **69**(3), 556-571.
- Bhalla B, Saini M, Jha M (2013). Effect of age and seasonal variations on leachate characteristics of municipal solid waste landfill. This paper discusses the effect of age and seasonal variations on leachate characteristics of leachate generated from municipal solid waste (MSW) landfill. *Int J Res Eng Technol*; **2**(8), 223–232.
- Brasil, E. C., Cravo, M. S. (2020) Interpretação dos Resultados da Análise do Solo. In: Brasil, E. C., Cravo, M. S., Viégas, I. J. M. (Eds.), *Recomendações de Calagem e Adubação para o Estado do Pará*, Embrapa, Brasília - DF, Capítulo 6, 61-64.
- Brasil (2010) *LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010*, Brasília – DF, Ministério do Meio Ambiente. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm.
- Brasil (2020) *LEI Nº 14.026, DE 15 DE JULHO DE 2020*, Novo Marco Legal do Saneamento Básico, Brasília - DF. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm.
- Brasil (1998) *LEI Nº 9.605, DE 12 DE FEVEREIRO DE 1998*. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília - DF. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm#:~:text=54.,a%20quatro%20anos%2C%20e%20multa. Acesso em: 23 mai. 2023.
- Brasil (2015) *MEDIDA PROVISÓRIA Nº 685, DE AGOSTO DE 2015*. República Federativa do Brasil, Poder Legislativo. Acesso em: 21/06/2023. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=3491285&disposition=inline>.
- Capelo neto, J.; Mota, S.; Silva, F. J. A. (1999). Geração de percolado em aterro sanitário no semi-árido nordestino: uma abordagem quantitativa. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, **4** (3), 160-167.
- Castilhos Jr., A. (coordenador). (2003). Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 294p.
- Cavalcante, S. S. S. (2014) *Geração de Lixiviado de Aterros Sanitários na Região Metropolitana de São Paulo: Histórico e Perspectivas*, Tese (Mestrado em Saúde Ambiental), Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 170p.
- Cechinel, M. A. P., Mayer, D. A., Mazur, L., Pozdniakova, T. A. (2016) Removal of Metal Ions from a Petrochemical Wastewater Using Brown Macro-Algae as Natural Cation-Exchangers, *Chemical Engineering Journal*. **286**, 1-15.
- CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2016) *Decisão de Diretoria Nº 256/2016/E*, CETESB, São Paulo. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em <https://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-256-2016-E-Valores-Orientadores-Dioxinas-e-Furanos-2016-Intranet.pdf>.
- CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2001) *Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas*, 2ª ed., CETESB, São Paulo, 389 pp.
- CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério do Meio Ambiente (2009) *RESOLUÇÃO Nº 420, DE 28 DE DEZEMBRO DE 2009*, Brasília – DF. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-acr.pdf>.
- Costa, T. G. A., Iwata, B. F., Castro, C. P., Coelho, J. V., Clementino, G. E. S., Cunha, L. M. (2016) Impactos ambientais de lixo a céu aberto no Município de Cristalândia, Estado do Piauí, Nordeste do Brasil, *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, **3**(4), 79-86.
- Cruz, J. V. B., Santos, É. P., Silva, N. J., Lima, F. L. O., Martinelli, P. P., Neto, J. R. T. V. (2021) Influence of Heavy Metals on Cancer Accommodation: A Literature Review, *Research, Society and Development*, **10**(6), e45810615992.

- DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023) *Rodovias Federais*. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em: <https://servicos.dnit.gov.br/vgeo>
- EMBRAPA-CNPQ (1997) *Manual de Métodos de Análise de Solo*, 2a ed., Rio de Janeiro, 212 pp. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/169149/1/Manual-de-metodos-de-analise-de-solo-2-ed-1997.pdf>.
- Galon, T., Marziale, M. H. P. (2016) Condições de Trabalho e Saúde de Catadores de Materiais Recicláveis da América Latina: Uma Revisão de Escopo. In Pereira, C. J.; Goes, F. L. (Eds.), *Catadores de Materiais Recicláveis: Um Encontro Nacional*, Ipea, Brasília, Capítulo 7, 169-201.
- Gerbase, A. E., Oliveira, C. R. (2012) Reciclagem do Lixo de Informática: Uma Oportunidade para a Química, *Química Nova*, **35**(7), 1486-1492.
- Gomes, A. O. S., Belém, M. O. (2022) O Lixo como um Fator de Risco à Saúde Pública na Cidade de Fortaleza, Ceará, *SANARE - Revista de Políticas Públicas*, **21**(1), 21-28.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2020) *Panorama do Município de Tucuruí-PA*. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/tucuru/panorama>.
- Junior, A. B. C. (2003) *Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte*, ABES, Rio de Janeiro, 294 pp. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em: <https://livroaberto.ibict.br/handle/1/492>.
- Lange, L. C., Cantanhade, A. L. G., Teixeira, E. N. (2008) *Resíduos sólidos: Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários*, ReCESA, Belo Horizonte, 120 pp. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em: http://www.dec.uem.br/mbr/Saneamento%20IV/aterro/aterro_sanitario.pdf.
- Lisk, D. J. (1991) Environmental effects of landfills, *Science of The Total Environment*, **100**, 415-468.
- Ley, M. B. R. G.; Ricardo A. F. C. J.; Mendonça, H.V.D.; Nascentes, A. L.; Silva, L. D. B. (2021). Comparison between prediction models and monitored data on leachate generation from a sanitary landfill in the metropolitan region of rio de janeiro, Brazil. *Int J Hydro*; **5** (2), 58-64.
- Lopes, L. N. A., Lira, B. R. P., Teixeira, L. C. G. M., Costa, L. S., Sousa, A. A. N. (2020) Analysis of the Variability of Precipitation in Front of Land Use Changes in the Municipality of Tucuruí-PA, *Research, Society and Development*, **9**(3), e186932726.
- Malkoc, S., Yazici, B., Koparal, A. S. (2010) Assessment of the Levels of Heavy Metal Pollution in Roadside Soils of Eskisehir, Turkey, *Environmental Toxicology and Chemistry*. **29**(12), 2720-2725.
- Meneghin, M. F.C., Ramos, M. L. G., Oliveira, S. A., Junior, W. Q. R., Amabile, R. F. (2008) Avaliação da Disponibilidade de Nitrogênio no Solo para o Trigo em Latossolo Vermelho do Distrito Federal, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **32**(5), 1941-1948.
- Nascimento, A. R. V. J., Nascimento, C. W. A., Cunha, K. P. V. (2020) Solos de Minas de Scheelita como Fontes de Contaminação por Metais Pesados, *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, **25**(4), 555 – 566.
- NFESC, Naval Facilities Engineering Command (2002) *Guidance for environmental background analysis*, v. 1: Soil, Washington, 169 pp.
- Oliveira, B. O. S., Tucci, C. A. F., Júnior, A. F. N., Santos, A. A. (2016) Avaliação dos solos e das águas nas áreas de influência de disposição de resíduos sólidos urbanos de Humaitá, Amazonas, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **21**(3), 593-601.
- Oliveira, F. J. S., Jucá, J. F. T. (2004) Acúmulo de Metais Pesados e Capacidade de Impermeabilização do Solo Imediatamente Abaixo de Uma Célula de um Aterro de Resíduos Sólidos, *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, **9**(3), 2004.
- Pinheiro, N. C. A., Mochel, F. R. (2018) Diagnóstico de Áreas Contaminadas Pela Disposição Final de Resíduos Sólidos no Município de Paço do Lumiar (MA), *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **23**(6), 1173-1184.
- Porto, M. F. S., Juncá, D. C. M., Gonçalves, R. S., Filhote, M. I. F. (2004) Lixo, Trabalho e Saúde: um Estudo de Caso Com Catadores em um Aterro Metropolitano no Rio de Janeiro, Brasil. *Cadernos de Saúde Pública*, 1503-1514.

- Prefeitura Municipal de Tucuruí, Secretaria Municipal de. Meio Ambiente (2014) *Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos*, Tucuruí-PA.
- Raij, B. V., Quaggio, J. A., Cantarella, H., Ferreira, M. E., Lopes, A. S., Bataglia, O. C. (1991) *Análise Química do Solo para Fins de Fertilidade*, Fundação Cargill, Campinas, 170 pp.
- Ramos, N. F., Gomes, J. C., Jr, A. B. C., Gourdon, R. (2017) Desenvolvimento de ferramenta para diagnóstico ambiental de lixões de resíduos sólidos urbanos no Brasil, *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, **22**(6), 1233-1241.
- Sá, L. F., Jucá, J. F. T., Sobrinho, M. A. M. (2012) Tratamento do Lixiviado de Aterro Sanitário Usando Destilador Solar, *Revista Ambiente & Água*, **7**(1), 204-217.
- Santos, G. O., Matos, M. V. B. (2020) Estudo da Fertilidade dos Solos de Cobertura de dm Aterro Sanitário do Estado do Ceará (Nordeste, Brasil), *Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB*, (51), 65-74. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em: <https://novo.periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/3781>.
- Silva, G. R. A., Braga, R. M. Q. L., Fernandes, L. L., Silveira, R. N. P. O. (2022) Estimativas de vazões de lixiviados de um aterro sanitário na região metropolitana de Belém, *Revista DAE*, **70**(235) 77-89.
- Siqueira, M. M., Moraes, M. S. (2009) Saúde coletiva, resíduos sólidos urbanos e os catadores de lixo, *Ciência & Saúde Coletiva*, **14**(6), 2115-2122.
- Sobrinho, N. L. C. (2000) *Uma Análise do Balanço Hídrico do Aterro Sanitário de Presidente Prudente*, Tese (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 114 pp. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/10976/1/texto%20completo.pdf>.
- Somani M, Datta M, Gupta S, Sreekrishnan T, Ramana G. (2019). Comprehensive assessment of the leachate quality and its Pollution potential from six municipal waste dumpsites of India. *Bioresource Technol Rep.*, **6**, 198–206.
- USEPA, United State Environmental Protection Agency (1989) *Health and Environmental Effects Document for 4-Aminopyridine, Cinnamyl – OH*. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em: <https://archive.epa.gov/osa/hsrb/web/pdf/usepa-1989.pdf>.
- USEPA, United State Environmental Protection Agency (1998) *Method 3050B - ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES, AND SOILS*.
- Vilhena, A. (2018) *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*, 2a ed., CEMPRE, São Paulo, 316 pp. Acesso em: 23 mai. 2023. Disponível em: https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/6-Lixo_Municipal_2018.pdf.