

Análise Probabilística de Transporte de Contaminante em Estudo de Caso do Aterro Sanitário

Juliana Araujo da Cunha

Engenheira Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, araujodacunhajuliana@gmail.com

Mario René Rivera Osorto

Engenheiro Civil, Mestre, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, marior.riverao@outlook.com

Milena Andrea Giraldo Zuluaga

Engenheira Geóloga, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, miangizu44@gmail.com

André Luis Brasil Cavalcante

Professor Associado, Doutor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, albrasilc@gmail.com

RESUMO: Desde a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, a gestão de resíduos sólidos tem se desenvolvido de forma mais sustentável, enfatizando a preservação do meio ambiente. Neste cenário, o uso de aterros sanitários emergiu como uma solução eficaz e ambientalmente responsável para a eliminação final dos resíduos sólidos. Este artigo foca em explorar o impacto de uma abordagem probabilística na avaliação da concentração de contaminantes no solo ao longo do tempo e espaço em aterros sanitários. A metodologia adotada inclui a aplicação de fenômenos como advecção, dispersão hidrodinâmica e sorção para desenvolver a análise probabilística em um estudo de caso real. As simulações foram conduzidas utilizando o modelo de transporte de contaminantes de Ogata & Banks, combinado com a abordagem probabilística do Método de Monte Carlo. Assim, o estudo oferece uma visão mais detalhada sobre como os contaminantes se movem e se distribuem durante a vida útil de um aterro sanitário, permitindo uma gestão de resíduos sólidos mais informada e eficiente.

PALAVRAS-CHAVE: Abordagem Probabilística, Aterro Sanitário, Modelagem, Transporte de Contaminantes, Método Monte Carlo.

ABSTRACT: Since the implementation of the National Solid Waste Policy (PNRS) in Brazil, solid waste management has evolved towards greater sustainability with an emphasis on environmental preservation. In this context, the use of sanitary landfills has emerged as an effective and environmentally responsible method for the final disposal of solid waste. This article aims to explore the impact of a probabilistic approach on assessing the concentration of contaminants in the soil over time and space within sanitary landfills. The adopted methodology involves applying phenomena such as advection, hydrodynamic dispersion, and sorption to develop a probabilistic analysis in a real case study. Simulations were conducted using the Ogata & Banks contaminant transport model, combined with the probabilistic approach of the Monte Carlo Method. Thus, the study offers detailed insights into the movement and distribution of contaminants throughout the lifespan of a sanitary landfill, enabling more informed and efficient solid waste management.

KEYWORDS: Probability, Landfill, Modeling, Contaminant Transport, Monte Carlo Method.

1 INTRODUÇÃO

O aterro sanitário é uma área destinada à disposição de resíduos sólidos, principalmente resíduos sólidos urbanos (RSU). Com a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, o gerenciamento de resíduos sólidos tem evoluído de maneira mais sustentável, visando uma maior preservação ambiental. Atualmente, diversas estratégias de disposição final de resíduos sólidos estão disponíveis, todas

voltadas para a redução do volume ocupado e a preservação ambiental. As principais incluem a incineração, o descarte em aterros sanitários e a reciclagem.

No dimensionamento dos aterros sanitários, devido à deposição de resíduos potencialmente contaminantes, revestimentos de fundo, também denominados liners, são projetados para desempenhar a função de atenuar o fluxo de contaminantes pelo subsolo e proteger as águas subterrâneas e o solo (Baran, 2021).

Dessa forma, os liners devem considerar certos tipos de propriedades a fim de garantir a eficiência da estrutura. Essas propriedades incluem baixa condutividade hidráulica, compatibilidade com o lixiviado, resistência mecânica e durabilidade. Essas características estão relacionadas ao ambiente físico, à composição da solução do percolado e da água subterrânea, bem como à vida útil do projeto (Leite & Zuquette, 1995).

Esse artigo consiste numa análise probabilística do transporte de contaminantes em aterros sanitários. A análise foi dividida em duas partes. Uma primeira análise teórica onde definiu-se os parâmetros do solo como sendo variáveis aleatórias. A segunda parte foi uma modelagem numa situação real, para avaliar a contaminação do solo ao longo tempo.

2 FORMATOS ESPECÍFICOS

O processo de fluxo de transporte de contaminantes e sedimentos está relacionado a diversas propriedades físicas, químicas e biológicas das substâncias e do solo onde ocorre sua percolação, sendo regido por interações físico-químicas não lineares. Esse processo destaca dois aspectos preponderantes no fluxo através de meios porosos: o mecanismo físico de transporte do contaminante em si, como o fenômeno de advecção e a dispersão hidrodinâmica, que envolvem as componentes físico-químicas da transferência de massa; e o mecanismo de interação do solo com o contaminante, abrangendo fenômenos como sorção, dessorção e decaimento radioativo, os quais desaceleram ou aceleram a velocidade de propagação e as concentrações das substâncias (Baran, 2021).

2.1 Mecanismos de transporte de contaminantes

A advecção está relacionada ao processo em que os solutos, neste caso o contaminante, são transportados pelo movimento de fluxo de águas subterrâneas, levados a uma velocidade média igual a velocidade linear média da água subterrânea (Freeze & Cherry, 1979).

A equação que descreve o fluxo decorrente na advecção é:

$$J_A = n \cdot v_p \cdot c_w \quad (1)$$

onde J_A é o fluxo da advecção [$ML^{-2}T^{-1}$], c_w é a concentração média de contaminantes no solo [ML^{-3}], n é a porosidade, e v_p é a velocidade real de percolação [LT^{-1}].

A dispersão mecânica é a dispersão que ocorre por causa da mistura mecânica durante a advecção gerada pelo movimento do fluido (Freeze & Cherry, 1979).

A equação que descreve o fluxo decorrente na dispersão mecânica é:

$$J_M = -D_m \cdot n \frac{\partial c_w}{\partial x} \quad (2)$$

$$D_m = \alpha_L \cdot v_p \quad (3)$$

onde, J_M é o fluxo da dispersão mecânica [$ML^{-2}T^{-1}$], D_m é o coeficiente de dispersão mecânica no meio poroso [L^2T^{-1}] e α_L é o coeficiente de dispersão mecânica [L].

A difusão molecular é um mecanismo que se desenvolve em uma escala microscópica como resultado do movimento aleatório das moléculas do soluto dissolvidas em água, onde se movem de regiões de maior concentração para regiões de menor concentração (fluxo químico) (Bear, 2013; Bear & Cheng, 2010; Booker et al., 1995; Fontes, 2012; Hillel, 2003).

O movimento é desenvolvido pela Lei de Fick que estabelece uma relação entre o fluxo decorrente da difusão molecular e o gradiente de concentração, através do coeficiente de difusão molecular, a equação que descreve o movimento é:

$$J_D = -nD_0 \frac{\partial c_w}{\partial x} \quad (4)$$

$$D_0 = D^* \cdot \tau \quad (5)$$

onde, J_D é o fluxo da difusão molecular [$ML^{-2}T^{-1}$], D_0 é o coeficiente de difusão molecular efetivo no meio poroso [L^2T^{-1}], D^* é o coeficiente de difusão molecular em solução aquosa [L^2T^{-1}] e τ é a tortuosidade.

O coeficiente de difusão efetivo D_{dm} representa a difusão que ocorrerá no solo, que será menor do que em solução livre (D_0), pois os caminhos, devido à estrutura do solo, são tortuosos.

A dispersão hidrodinâmica indica a tendência ao espalhamento do contaminante nos caminhos nos quais ele percorre, junta os fenômenos de dispersão mecânica e de difusão molecular, os quais não podem ser separados (Freeze & Cherry, 1979).

A equação que descreve o fluxo decorrente na dispersão hidrodinâmica é mostrada na Equação (6).

$$J_H = -D_h \cdot n \frac{\partial c_w}{\partial x} \quad (6)$$

$$D_h = D_0 + D_m \quad (7)$$

onde, J_H é o fluxo da dispersão hidrodinâmica [$ML^{-2}T^{-1}$] e D_H é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica no meio poroso [L^2T^{-1}].

A sorção é um processo no qual substâncias são adsorvidas ou absorvidas por um material sólido ou líquido por motivo físico-químico durante o processo de percolação. A adsorção refere-se à aderência de moléculas de uma substância à superfície de outra, enquanto a absorção envolve a incorporação de substâncias dentro da matriz do material (Sparks, 2002).

A isoterma de sorção é a expressão matemática que descreve a quantidade de soluto sorvido por unidade de massa de sorvente sólido (c_s) em função da concentração de soluto remanescente na solução (c_w) em equilíbrio, a uma dada temperatura.

$$c_s = k_d \cdot c_w \quad (8)$$

onde, c_s corresponde à massa de soluto sorvida pela massa de solo e é proporcional à concentração de equilíbrio da solução, denominada de c_w , e k_d é o coeficiente de distribuição (inclinação da reta) [L^3M^{-1}].

O fator de Retardamento representa o retardo médio do centro de massa de um contaminante movendo-se a partir de uma fonte pontual enquanto ocorre a sorção, então, fornece informações sobre o quanto o solo retarda a chegada de uma frente de contaminação com uma determinada concentração (Freeze & Cherry, 1979). A equação que determina o valor do retardamento é:

$$R = 1 + \frac{\rho_d k_d}{n} \quad (9)$$

$$\rho_d = \rho_s \cdot (1 - n) \quad (10)$$

onde R é o coeficiente de retardamento e o ρ_d a massa específica seca do meio poroso [ML^{-3}] e o ρ_s é a massa específica dos grãos [ML^{-3}].

O decaimento radioativo – ou as emissões radioativas – é o fenômeno responsável pela radioatividade, em que são emitidas radiações de núcleos instáveis de alguns elementos químicos. Essas reações são irreversíveis e, no contexto da contaminação, causam uma diminuição da concentração do contaminante na pluma ao longo do tempo. São exemplos de elementos radioativos o urânio, o cobalto, o rádio e o estrôncio, normalmente utilizados como combustíveis de reatores de usinas nucleares e em radioterapia para o tratamento contra o câncer (Krane, 1987).

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} = -\lambda \cdot c_w \quad (11)$$

onde λ é a constante de decaimento radioativo do isótopo que constitui a amostra que no geral é uma constante [T^{-1}] e o c_w é a concentração do material ainda sem decaimento [ML^{-3}].

2.2 Equação de transporte de contaminantes acoplada

A equação de transporte de contaminantes trata-se de um modelo unidimensional utilizada para descrever o transporte do contaminante num meio homogêneo, saturado e em regime de fluxo permanente onde inclui os fenômenos de advecção, dispersão hidrodinâmica, sorção e decaimento, a Equação 12 demonstra o modelo.

$$\frac{\partial c_w}{\partial x} + \lambda c_w = -\frac{v_p}{R} \frac{\partial c_w}{\partial x} + \frac{D_h}{R} \frac{\partial^2 c_w}{\partial x^2} \quad (12)$$

2.3 Solução analítica do modelo acoplado

De acordo com Ogata & Banks (1961) a solução da equação do transporte advectivo-dispersivo pode ser representada da seguinte forma:

$$c_w(x, t) = \frac{c_0}{2} \left\{ \exp \left[\frac{v_p x}{2D_h} (1 - \Gamma) \right] \operatorname{erfc} \left(\frac{x - \frac{v_p t}{R} \Gamma}{2 \sqrt{\frac{D_h t}{R}}} \right) + \exp \left[\frac{v_p x}{2D_h} (1 + \Gamma) \right] \operatorname{erfc} \left(\frac{x + \frac{v_p t}{R} \Gamma}{2 \sqrt{\frac{D_h t}{R}}} \right) \right\} \quad (13)$$

$$\Gamma = \sqrt{1 + 2H} \quad (14)$$

$$H = 2\lambda \frac{D_h}{v_p^2} \quad (15)$$

onde c_0 é a concentração inicial [ML^{-3}]. Na aplicação do estudo de caso do aterro sanitário não foi considerado elementos radioativos, deste modo o decaimento radioativo é nulo.

2.4 Análise Probabilística

O Método de Monte Carlo (MMC) é um método de amostragem artificial utilizado na solução de experimentos aleatórios onde se tem conhecimento das distribuições de probabilidade das variáveis envolvidas. Tem o objetivo a encontrar uma solução numérica aproximada para a distribuição de probabilidade da variável dependente (y), definida por uma função de engenharia.

Esse procedimento ocorre em um valor de N vezes e obtém-se uma amostra de valores discretos da variável (y). Permite o cálculo de estatísticas amostrais, como média e desvio-padrão, a construção de histogramas de frequência e a determinação da distribuição probabilística que melhor se ajusta. À medida que o número de simulações N aumenta, aproximando-se do infinito, as estatísticas amostrais e a forma da distribuição de probabilidade tendem a convergir para o valor populacional, indicando uma solução que pode ser considerada exata. Este método apresenta a vantagem de lidar com funções matemáticas complexas e encontrar soluções precisas, mesmo quando uma solução analítica não é viável (Assis *et al.*, 2018)

3 METODOLOGIA

3.1 Estudo de caso

O estudo de caso desta pesquisa aborda o Aterro Sanitário de Brasília, inaugurado em 17 de janeiro de 2017. Em junho de 2023, o aterro recebeu aproximadamente 4.212.142 toneladas de resíduos. O sistema de revestimento é composto por uma camada tripla de 0,5 m de solo superficial argila compactada, sobreposta a uma geomembrana, que, por sua vez, se sobrepõe a uma camada de argila compactada com 1,5 m de espessura. A expectativa de vida útil do aterro de Brasília é de 13 anos (Lemos et al., 2023).

3.2 Análise Probabilística das variáveis

As variáveis dos materiais do aterro sanitário de Brasília referentes ao contaminante benzeno estão detalhadas na Tabela 1, onde encontram-se valores representativos do desempenho da primeira camada de argila compactada do liner.

Os parâmetros geotécnicos utilizados nesta pesquisa para solução de Ogata & Banks (1961) na análise probabilística foram a porosidade, o coeficiente de permeabilidade e o peso específico do liner do aterro sanitário. A média e os coeficientes de variação destes parâmetros estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 1 – Parâmetros do Aterro Sanitário de Brasília (Lemos et al., 2023).

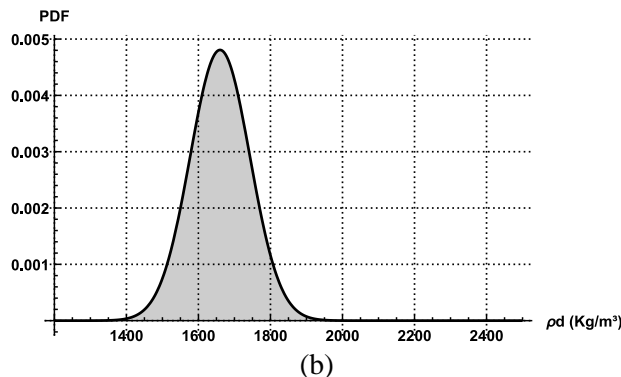
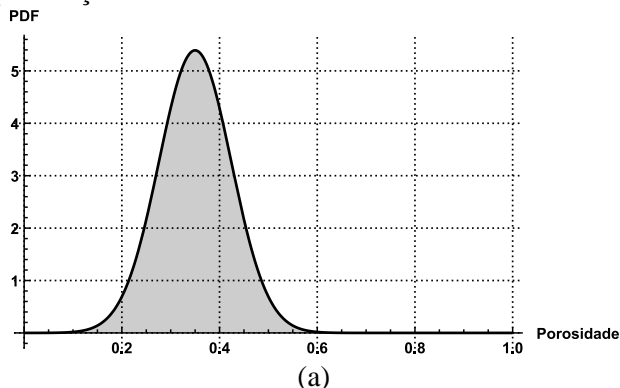
Parâmetros	Camada do Liner
L (m)	0,5
n	0,35
ρ_d (g/cm ³)	1,66
D_0 (m ² /s)	$4,1 \times 10^{-10}$
k (m/s)	1×10^{-9}
k_d (ml/g)	1,86

Tabela 2 – Parâmetros do Aterro Sanitário de Brasília (Assis et al., 2018)

Parâmetros	Média	CV
n	0,35	0,185
ρ_d (g/cm ³)	1,66	0,05
k (m/s)	1×10^{-9}	0,79

4 RESULTADOS

Inicialmente, procedeu-se à análise probabilística utilizando o método de Monte Carlo dos parâmetros geotécnicos pertinentes, a saber: porosidade (Figura 1-a), peso específico (Figura 1-b) e coeficiente de permeabilidade (Figura 1-c). Os parâmetros de porosidade e peso específico foi adotado uma distribuição normal, enquanto o coeficiente de permeabilidade, dada sua complexidade na obtenção de dados precisos, foi tratado com uma distribuição de Rayleigh, devido ao seu maior coeficiente de variação. Ademais, foram conduzidas análises de probabilidade para parâmetros secundários, como velocidade de fluxo, velocidade de percolação e fator de retardamento do contaminante.



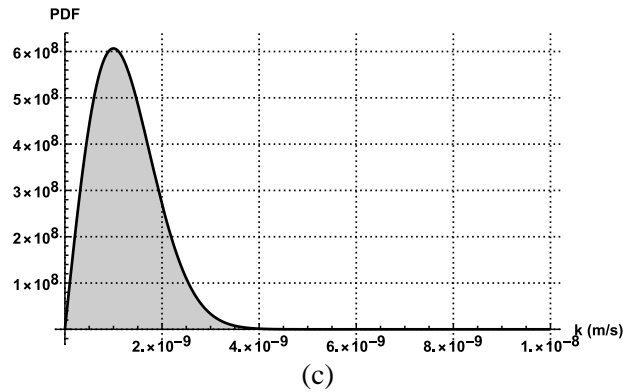


Figura 1 - Função de Distribuição de Probabilidade (a) Porosidade, (b) Massa Específica Seca, (c) Condutividade Hidráulica

Prosseguindo para a aplicação dessas análises probabilísticas no estudo de caso do aterro sanitário de Brasília, foi possível simular as projeções do nível de contaminação do aterro ao final de sua vida útil e compreender seu comportamento de propagação do fluxo ao longo da profundidade do liner. Na Figura 2, são representadas as curvas do modelo de concentração da contaminação ao longo da espessura da camada do liner, a partir de 20 rodadas de Montecarlo, considerando a abordagem probabilística do modelo. Na figura 3 são apresentadas as curvas de probabilidade da contaminação ao longo da espessura do liner para o final da vida útil de 13 anos.

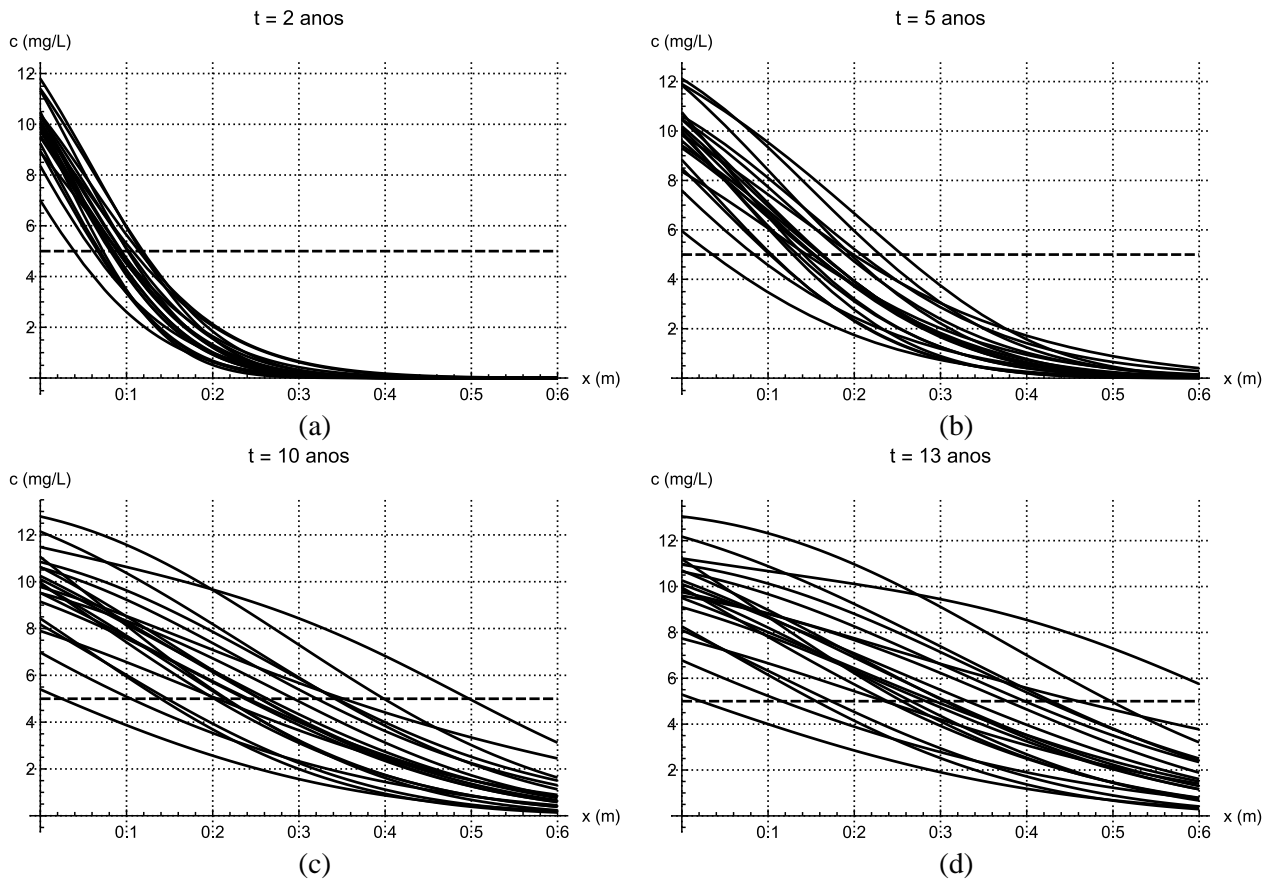


Figura 2 – Modelo de concentração de contaminante ao longo da camada do liner depois de: (a) 2 anos; (b) 5 anos; (c) 10 anos; e (d) 13 anos.

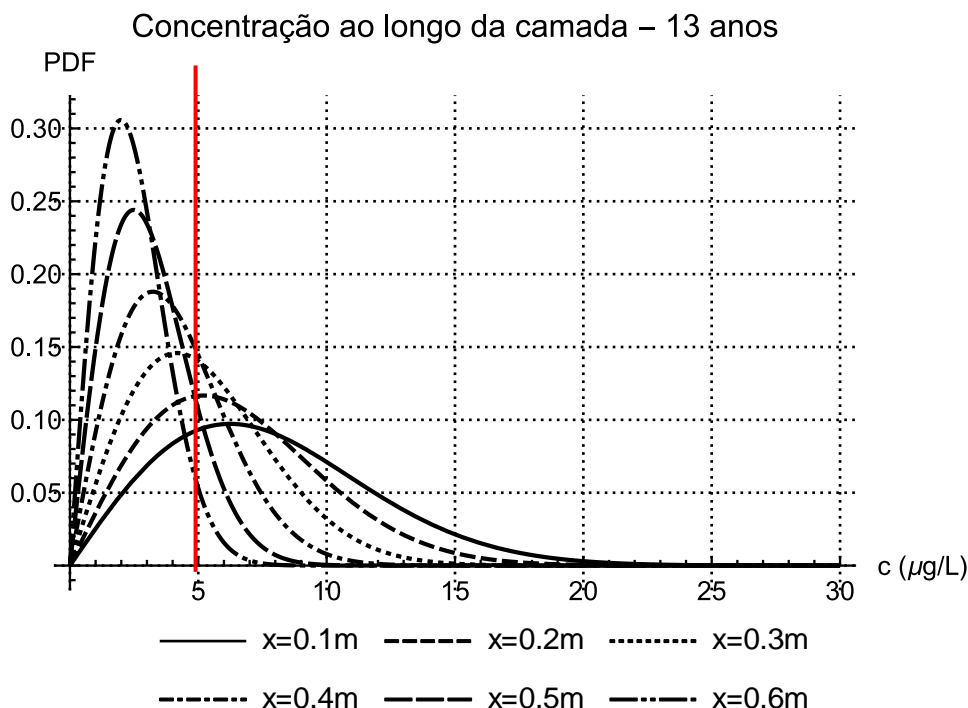


Figura 3 - Função de Distribuição de Probabilidade de contaminação na camada do liner

O nível de contaminação de referência utilizado neste estudo, representado pela linha vermelha na Figura 2, foi de acordo com os valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas pelo CONAMA na Resolução 420/2009. O valor de contaminação referente ao contaminante benzeno é de $5 \mu\text{g/l}$. Em cada curva de distribuição, é possível extrair a média de contaminação de cada profundidade ao longo do tempo. Conforme o gráfico, da Figura 2, a camada do liner tem sua concentração de acordo com a orientação do CONAMA, sendo os primeiros 30 centímetros de profundidade do liner encontra-se o maior nível de contaminação, porém a medida que se aproxima ao fim da camada a contaminação é retida. Conforme as simulações, após 13 anos, a probabilidade média de contaminação na profundidade 0,5 m do liner é de aproximadamente $2 \mu\text{g/l}$, evidenciando que o dimensionamento atende às expectativas da vida útil da estrutura.

5 CONCLUSÃO

Este artigo abordou a importância dos aterros sanitários como locais fundamentais para a disposição adequada de resíduos sólidos, especialmente em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil. Com relação ao dimensionamento desses aterros, ressaltou-se a crucial função dos liners e revestimentos de fundo projetados para mitigar a contaminação do subsolo, preservando as águas subterrâneas e o solo.

O artigo, ao realizar uma análise probabilística do transporte de contaminantes em aterros sanitários, proporcionou uma contribuição valiosa para a compreensão dos desafios e variáveis envolvidas nesse processo. A divisão da análise entre uma abordagem teórica e uma modelagem em situação real enriqueceu a compreensão, oferecendo uma perspectiva abrangente sobre a contaminação do solo ao longo do tempo.

Aplicação desta análise no estudo de caso do aterro sanitário de Brasília demonstrou que o dimensionamento da estrutura está compatível ao seu ciclo de vida útil evitando assim a contaminação acima do permitido segundo a legislação. Portanto, esse estudo contribui significativamente para o avanço do conhecimento e das práticas relacionadas ao gerenciamento ambientalmente sustentável de resíduos sólidos em aterros sanitários.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 306975/2023-8) e pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF Projeto 00193-00001609/2023-44).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assis, A. P., Espósito, T. J., Gardoni, M. G., & Maia, J. A. (2018). Notas de Aula. Disciplina de Métodos Estadísticos e Probabilísticos Aplicados a Geotecnia. In G.AP-AA002/2018. Universidade de Brasília.
- Baran, C. T. (2021). Modelagem do transporte de contaminantes em sistemas de impermeabilização de fundo em múltiplas camadas compostas por argila compactada e geomembrana [Dissertação (Mestrado em Geotecnia)]. Universidade de Brasília.
- Bear, J. (2013). Dynamics of Fluids in Porous Media. In Soil Science (Issue 2). Dover Publications . https://www.amazon.com/Dynamics-Fluids-Porous-Mechanical-Engineering-ebook/dp/B00CB2MJ9U#detailBullets_feature_div
- Bear, J., & Cheng, A. H.-D. (2010). Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport (1st ed.). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6682-5>
- Booker, J. R., Quigley, R. M., & Rowe, R. K. (1995). Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities (1st Edition). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482271928>
- Cavalcante, A. L. B. (2022). Notas de aula. Transporte de contaminantes e sedimentos. In G.AP-AC001/20. Universidade de Brasília.
- Fontes, M. (2012). Behavior of Heavy Metals in Soils: Individual and Multiple Competitive Adsorption. In H. , M. Selim (Ed.), Competitive Sorption and Transport of Heavy Metals in Soils and Geological Media (1st ed., pp. 77–117). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b13041-4>
- Freeze, R., A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice-Hall.
- Hillel, D. (2003). Introduction to Environmental Soil Physics. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348655-4.X5000-X>
- Krane, K. S. (1987). Introductory Nuclear Physics. John Wiley & Sons.
- Leite, J. C., & Zuquette, L. (1995). Prevenção da contaminação e poluição de aquíferos: a utilização de liners. Boletim de Geociências, 14(1).
- Lemos, M. A. C., Baran, C. T., Cavalcante, A. L. B., & Palmeira, E. M. (2023). A Semi-Analytical Model of Contaminant Transport in Barrier Systems with Arbitrary Numbers of Layers. Sustainability, 15(23), 16299. <https://doi.org/10.3390/su152316299>
- Ogata, A., & Banks, R. B. (1961). A Solution of the Differential Equation Longitudinal Dispersion in Porous Media.
- Sparks, D. L. (2002). Environmental Soil Chemistry (2nd ed.). Academic Press.