

Análise Probabilística da Eficiência de Liners na Contenção de Contaminantes em Aterros Sanitários: Comparação entre Sistemas

D. M. Aragão

Engenheiro Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, dvmartins05@gmail.com

M. R. R. Osorto

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

A. L. B. Cavalcante

Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, albrasilc@gmail.com

RESUMO: A disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos pode resultar na contaminação do solo e das águas subterrâneas devido à percolação de lixiviados contendo substâncias químicas nocivas. Neste contexto, este estudo apresenta uma análise probabilística do transporte de contaminantes em um aterro sanitário, utilizando o Método de Monte Carlo (MMC) para avaliar a eficiência de diferentes sistemas de impermeabilização. Foram comparados um liner convencional de argila compactada (CCL) e um liner alternativo de solo (SL) quanto à sua capacidade de atenuação da migração do benzeno. A modelagem estatística considerou a variabilidade dos parâmetros geotécnicos, aplicando distribuições de probabilidade, com destaque para a Distribuição de Rayleigh na caracterização da condutividade hidráulica. Os resultados demonstraram que o liner CCL apresentou um desempenho significativamente superior ao SL, garantindo maior proteção ambiental e atendendo aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009. Assim, a pesquisa reforça a importância de abordagens probabilísticas na avaliação da eficiência de sistemas de contenção em aterros sanitários e destaca a necessidade de materiais mais eficientes para minimizar impactos ambientais.

PALAVRAS-CHAVE: Transporte de Contaminantes, Método de Monte Carlo, Aterro Sanitário, Análise Probabilística, Distribuição de Rayleigh.

ABSTRACT: The improper disposal of municipal solid waste can lead to soil and groundwater contamination due to the percolation of leachate containing harmful chemical substances. In this context, this study presents a probabilistic analysis of contaminant transport in a sanitary landfill, using the Monte Carlo Method (MCM) to evaluate the efficiency of different impermeabilization systems. A conventional compacted clay liner (CCL) and an alternative soil liner (SL) were compared in terms of their ability to attenuate benzene migration. The statistical modeling considered the variability of geotechnical parameters, applying probability distributions, with emphasis on the Rayleigh Distribution for characterizing hydraulic conductivity. The results showed that the CCL liner performed significantly better than the SL, ensuring greater environmental protection and meeting the limits established by CONAMA Resolution 420/2009. Thus, this research reinforces the importance of probabilistic approaches in evaluating the efficiency of containment systems in sanitary landfills and highlights the need for more effective materials to minimize environmental impacts.

KEYWORDS: Contaminant Transport, Monte Carlo Method, Sanitary Landfill, Probabilistic Analysis, Rayleigh Distribution.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da quantidade de resíduos sólidos urbanos depositados em lixões e aterros sanitários gera fluxos contínuos de lixiviado. O lixiviado de aterro sanitário, derivado da precipitação, drenagem superficial e decomposição dos resíduos sólidos urbanos, contém altas concentrações de matéria orgânica dissolvida, sais inorgânicos, metais pesados e compostos orgânicos xenobióticos. Caso o aterro não seja devidamente



revestido com material impermeável ou o revestimento falhe devido a condições geológicas, o lixiviado poderá infiltrar-se no lençol freático, configurando um dos mais significativos problemas ambientais associados aos aterros sanitários (Lemos *et al.*, 2023).

No dimensionamento dos aterros sanitários, os 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 química 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).

Este artigo apresenta uma análise probabilística do transporte de contaminantes em aterros sanitários, comparando a eficiência do *liner* de argila existente com outra solução de contenção estudada por Lemos *et al.* (2023). Os parâmetros do solo foram definidos como variáveis aleatórias em uma modelagem que avalia a contaminação do solo ao longo do tempo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Mecanismos físico-químicos

O fluxo de transporte de contaminantes e sedimentos em meios porosos é um fenômeno complexo, governado por uma interação não linear entre propriedades físicas, químicas e biológicas tanto das substâncias transportadas quanto do solo onde ocorre a percolação. Esse processo pode ser analisado a partir de dois mecanismos fundamentais (Baran, 2021):

- (i) o transporte físico do contaminante, que envolve fenômenos como advecção e dispersão hidrodinâmica, responsáveis pela transferência de massa no meio poroso;
- (ii) a interação entre o contaminante e o solo, a qual compreende processos como sorção, dessorção e decaimento radioativo, os quais influenciam diretamente a taxa de propagação e a distribuição das concentrações ao longo do meio de transporte.

2.2 Solução analítica do modelo acoplado

Ogata & Banks (1961) descrevem o transporte advectivo-dispersivo de um líquido em meio poroso pela equação:

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

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

$$H = 2\lambda \frac{D_h}{v_p^2} \quad (3)$$

onde c_w é a concentração do material em função do tempo e profundidade [ML^{-3}], c_0 é a concentração inicial [ML^{-3}], v_p é a velocidade real de percolação [LT^{-1}], D_h é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica no meio poroso [L^2T^{-1}], R é o coeficiente de retardamento e λ é a constante de decaimento radioativo do isótopo que constitui a amostra [T^{-1}]. A equação norteia a análise probabilística, não sendo considerado elementos radioativos na modelagem (decaimento radioativo é nulo).

Outrossim, v_p , R e D_h podem ser expressos como:

$$v_p = \frac{v}{n} \quad (4)$$

$$R = 1 + \frac{\rho_d k_d}{n} \quad (5)$$

$$D_h = D_0 + D_m$$

(6)

onde v é a velocidade do fluido [LT^{-1}], n é a porosidade, ρ_d a massa específica seca do meio poroso [ML^{-3}], k_d é o coeficiente de distribuição [L^3M^{-1}], D_0 é o coeficiente de difusão molecular efetivo no meio poroso [L^2T^{-1}] e D_m é o coeficiente de dispersão mecânica no meio poroso [L^2T^{-1}].

2.3 Análise Probabilística com MMC

O Método de Monte Carlo (MMC) tem como objetivo obter uma solução numérica aproximada para a distribuição de probabilidade da variável dependente y , a qual é definida por uma função de engenharia. Esse processo é realizado por meio de amostragens aleatórias dos valores das variáveis independentes x_i e sucessivas avaliações da referida função. Para cada conjunto de valores amostrados dos parâmetros independentes, a função de engenharia é avaliada, resultando em um valor correspondente da variável dependente. Ao repetir esse procedimento N vezes, obtém-se um conjunto discreto de valores para y , permitindo o cálculo de estatísticas descritivas, como média e desvio-padrão, bem como a construção de um histograma de frequências e a identificação da distribuição probabilística mais adequada. À medida que o número de simulações N aumenta indefinidamente, as estatísticas amostrais e a forma da distribuição de probabilidade da variável y convergem para os valores populacionais, tornando a solução assintoticamente exata (Assis *et al.*, 2018).

Dessa forma, o MMC foi empregado para determinar as distribuições de probabilidade mais adequadas ao conjunto de dados analisado, com especial interesse na Distribuição de Rayleigh. Essa distribuição representa um caso particular da distribuição de Weibull e descreve a soma de um grande número de vetores coplanares com amplitudes aleatórias e fases uniformemente distribuídas, ilustrada na Figura 1. A Distribuição de Rayleigh é amplamente utilizada em problemas de propagação de ondas de rádio e possui aplicações relevantes em engenharia, teoria das comunicações e oceanografia física (Marchetti, 2024).

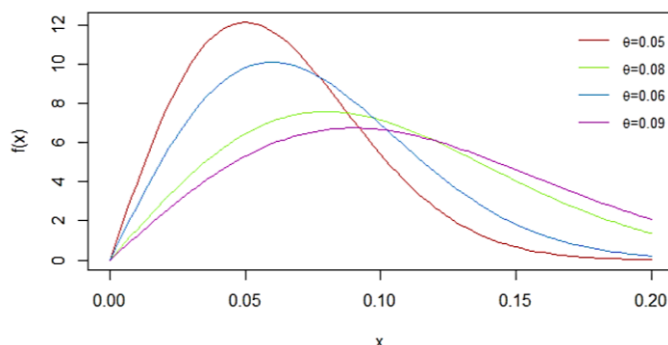


Figura 1. Função Densidade da distribuição de Rayleigh (Marchetti, 2024)

2.4 Estudo de caso

O estudo de caso desta pesquisa concentra-se no Aterro Sanitário de Brasília, uma unidade de disposição de resíduos em operação no Distrito Federal. O sistema de revestimento do aterro é constituído por uma barreira de múltiplas camadas, composta por uma camada superficial de 0,5 m de solo argiloso compactado, sobreposta a uma geomembrana, que, por sua vez, recobre uma camada adicional de argila compactada com 1,5 m de espessura. A vida útil estimada do aterro é de 13 anos, conforme apontado por Lemos *et al.* (2023).

As propriedades dos materiais do Aterro Sanitário de Brasília, especificamente em relação ao transporte do contaminante benzeno, estão apresentadas na Tabela 1, a qual contém valores representativos do desempenho da primeira camada de argila compactada CCL (*compacted clay liner*) do sistema de revestimento. Na mesma tabela, é descrita uma camada alternativa de solo SL (*soil liner*) utilizada por Lemos *et al.* (2023).

Nesta pesquisa, a análise probabilística foi conduzida com base na solução de Ogata & Banks (1961), considerando parâmetros geotécnicos essenciais, tais como porosidade, coeficiente de permeabilidade e peso específico do *liner* do aterro sanitário. A média e os coeficientes de variação desses parâmetros encontram-se detalhados na Tabela 2 de acordo com Cunha *et al.* (2024). Já para o cálculo do desvio padrão dos elementos do segundo *liner*, presentes na Tabela 4, recorreu-se aos coeficientes de variação mais prováveis descritos na Tabela 3.

Tabela 1. Parâmetros da camada de argila e solo (Lemos *et al.*, 2023).

Parâmetros	Camada do Liner CCL	Camada do Liner SL
L (m)	0,5	0,5
n	0,35	0,30
ρ_d (g/cm ³)	1,66	1,62
D_0 (m ² /s)	$4,1 \times 10^{-10}$	8×10^{-10}
k (m/s)	1×10^{-9}	1×10^{-7}
k_d (ml/g)	1,86	0

Tabela 2. Parâmetros da camada CCL (Cunha *et al.*, 2024).

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

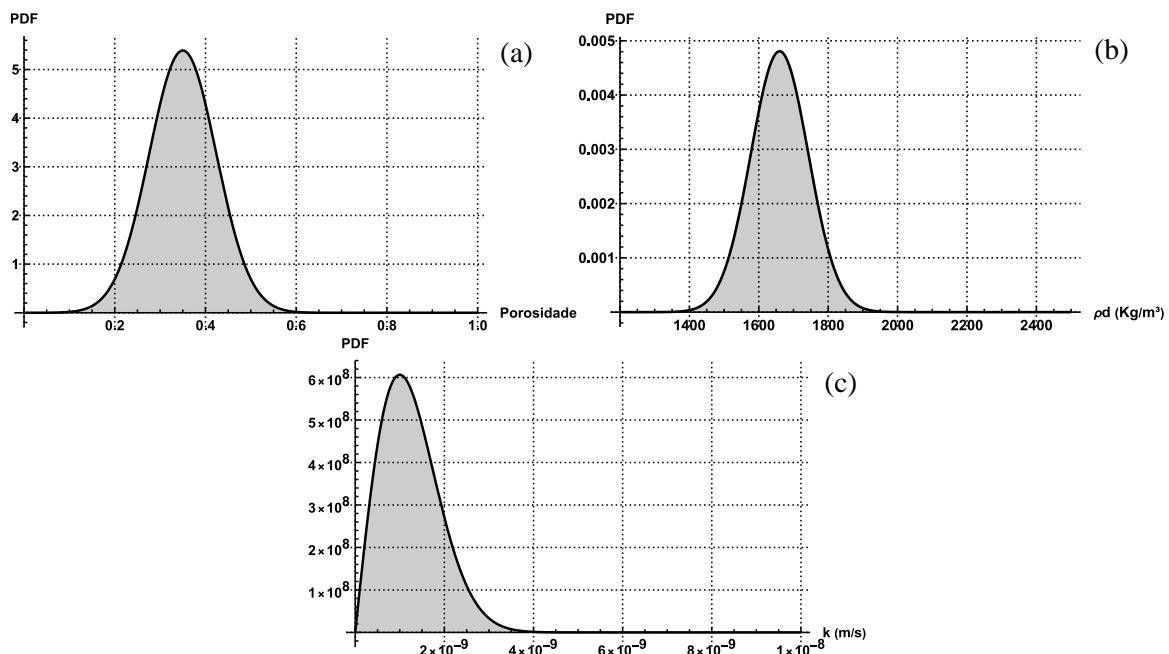
Tabela 3. Valores de coeficientes de variação (Assis *et al.*, 2018)

Parâmetros	Valor mais Provável de CV (%)
n	20
ρ_d (g/cm ³)	5
k (m/s)	200

Tabela 4. Parâmetros da camada SL.

Parâmetros	μ	σ
n	0,30	0,07
ρ_d (g/cm ³)	1,62	0,08
k (m/s)	1×10^{-7}	2×10^{-7}

Cunha *et al.* (2024) estabeleceram as distribuições probabilísticas dos parâmetros geotécnicos da Tabela 2 conforme ilustrado na Figura 2. Para os parâmetros de porosidade e peso específico, adotou-se a distribuição normal, enquanto o coeficiente de permeabilidade, devido à sua complexidade e à dificuldade na obtenção de dados precisos, foi modelado por meio de uma distribuição de Rayleigh, uma vez que apresenta um maior coeficiente de variação.

Figura 2. Função de Distribuição de Probabilidade (a) Porosidade, (b) Massa Especifica Seca, (c) Condutividade Hidráulica da camada de argila (Cunha *et al.*, 2024)

3 RESULTADOS OBTIDOS

Partindo dos mesmos princípios, arbitrou-se as curvas de distribuição para os parâmetros geotécnicos iniciais do solo alternativo SL, conforme a Figura 3.

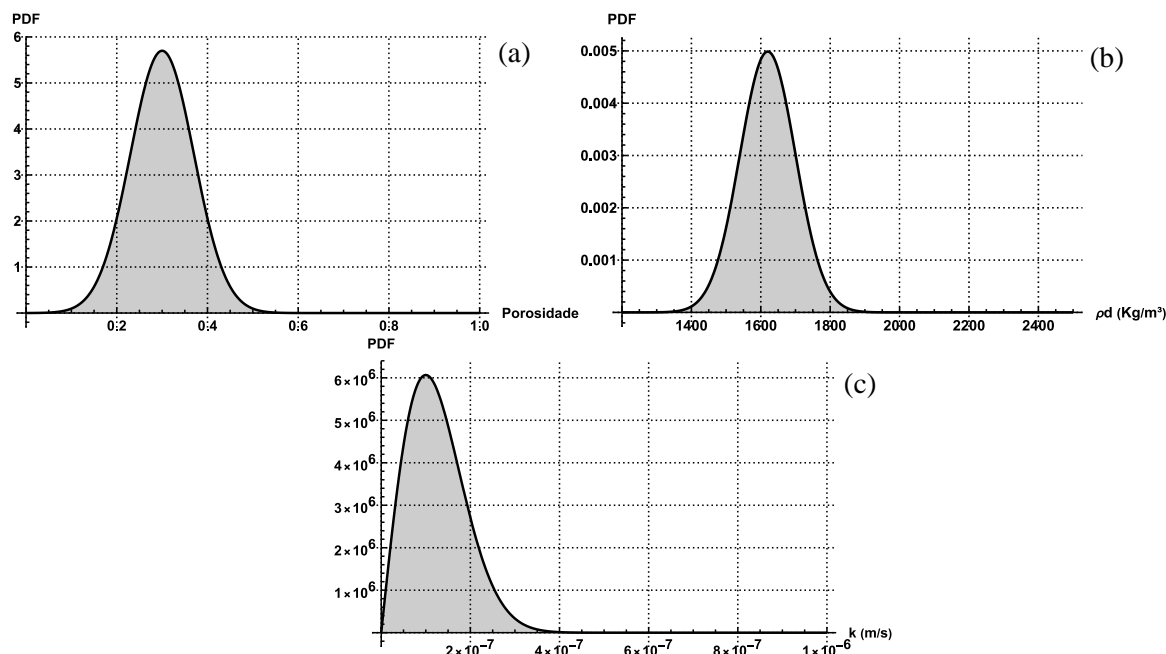


Figura 3. Função de Distribuição de Probabilidade (a) Porosidade, (b) Massa Especifica Seca, (c) Condutividade Hidráulica da camada de solo de Lemos *et al.*, 2023.

A partir das simulações realizadas, foi possível estimar as projeções do nível de contaminação do aterro ao término de sua vida útil, bem como analisar o comportamento da propagação do fluxo ao longo da profundidade do *liner*. A Figura 4 apresenta as curvas do modelo de concentração do contaminante benzeno ao longo da espessura da camada de argila. Cada trajetória é uma iteração do método de Monte Carlo, sendo avaliada 10 iterações para quatro períodos distintos.

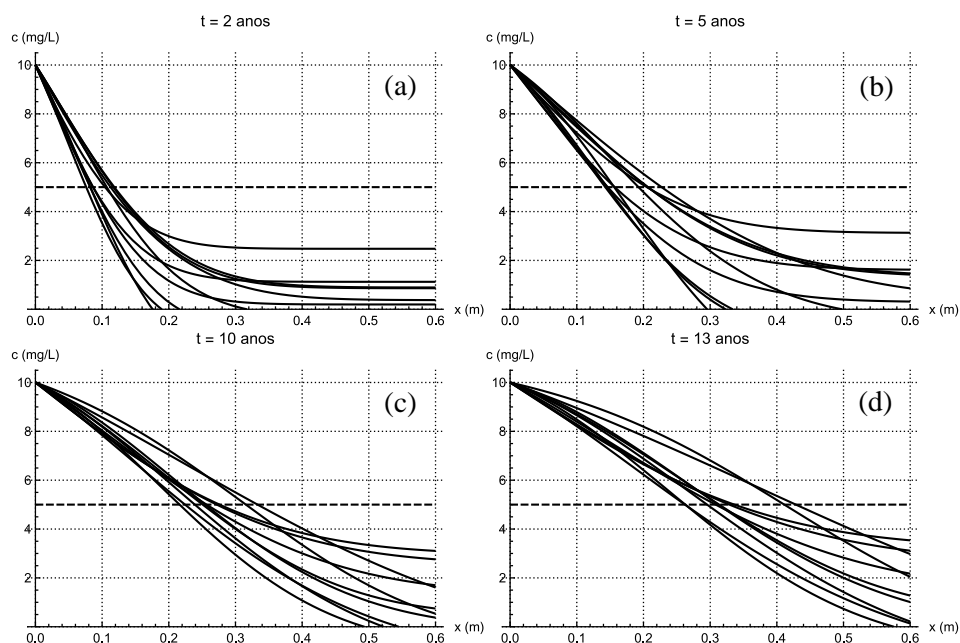


Figura 4. Modelo de concentração de contaminante ao longo da camada CCL depois de: (a) 2 anos; (b) 5 anos; (c) 10 anos; e (d) 13 anos. Em pontilhado é destacado o valor de intervenção de 5 mg/L de benzeno.

Para convergência em c_w de 10 mg/L, considerando que a camada impermeabilizante recebe essa concentração de lixiviados na simulação e não poderia expressar outra quantidade inicial, foi utilizado uma função erro para as distribuições aleatórias:

$$\text{Erro} = c_0 - c_w[0, t] \quad (7)$$

$$c_{w(\text{corrigido})}[x, t] = c_w[x, t] + \text{Erro} \quad (8)$$

A Figura 5 apresenta a distribuição acumulada para valores de concentração de benzeno a cada 0,1 m, em que 0,6 m representa o solo virgem abaixo da camada permeabilizante. Foi adotado 10000 rodadas de Monte Carlo, assegurando tolerância α de 15% e variável normal padronizada $Z_{\alpha/2}$ de 1,43, conforme a equação descrita por Assis *et al.* (2018):

$$N = \left(\frac{Z_{\alpha/2}^2}{4\alpha^2} \right)^n \quad (9)$$

onde N é o número de simulações de Monte Carlo para certo nível de confiança e n é o número de variáveis aleatórias independentes que afetam a variável dependente, considerado três variáveis com distribuições de probabilidade: v_p , D_h e R .

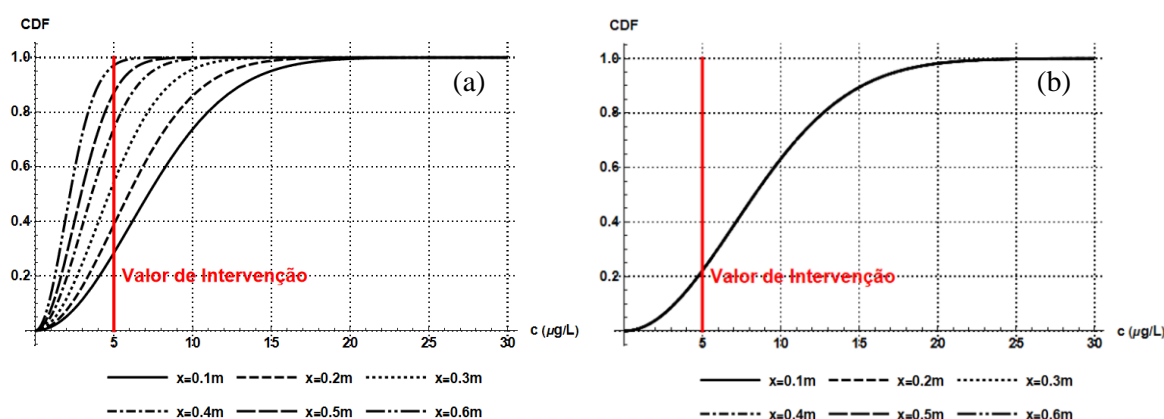


Figura 5. Função de distribuição acumulada da camada CCL (a) e SL (b).

A Tabela 5, apresenta a probabilidade de falha das camadas de acordo com a função de probabilidade acumulada apresentada na Figura 5. Percebe-se que a o *liner* SL não conseguiu conter o benzeno de acordo com os parâmetros de Lemos *et al.* (2023). Já o *liner* CCL foi capaz de interromper a contaminação, chegando a 9% de probabilidade de falha do benzeno conseguir alcançar o solo virgem após 13 anos de operação, com o valor de intervenção de 5 µg/l de benzeno.

O nível de contaminação de referência utilizado neste estudo está 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.

Tabela 5. Probabilidade de falha das camadas permeabilizantes

Profundidade (m)	CCL	SL
0,1	71%	77%
0,2	61%	77%
0,3	45%	77%
0,4	26%	77%
0,5	15%	77%
0,6	9%	77%



Na Figura 5 é apresentado as funções de distribuição de probabilidade também a cada 0,1 m. As distribuições que melhor atenderam aos dados foram distribuições de Rayleigh. Já na Tabela 6 é apresentado as médias das distribuições, onde é possível quantificar uma média populacional para a quantidade de benzeno que atravessa os *liners*. No caso da camada CCL, em 0,6 m de profundidade, está abaixo do valor de intervenção, em 1,88 $\mu\text{g/l}$, garantindo bom funcionamento. Entretanto, mais uma vez, a camada SL mostra não conter o benzeno em função da profundidade, apresentando média populacional de 7,07 $\mu\text{g/l}$ para todas as profundidades em análise.

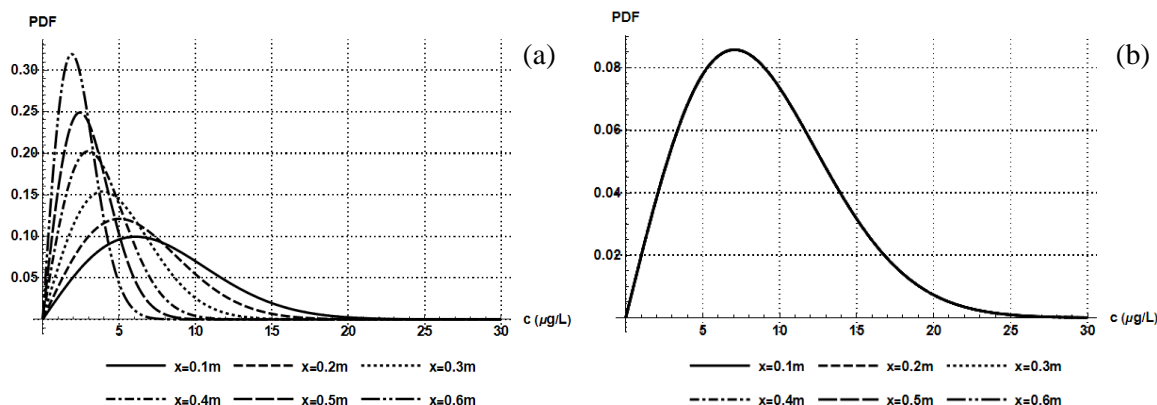


Figura 5. Função de distribuição de probabilidade da camada CCL (a) e SL (b).

Tabela 6. Médias das distribuições de Rayleigh

Profundidade (m)	CCL ($\mu\text{g/l}$)	SL ($\mu\text{g/l}$)
0,1	6,11	7,07
0,2	5,05	7,07
0,3	3,99	7,07
0,4	3,04	7,07
0,5	2,47	7,07
0,6	1,88	7,07

O principal motivo para ocorrência da ineficiência do solo alternativo se dá pela condutividade hidráulica saturada, com duas ordens de grandeza superior ao mesmo parâmetro da argila compactada.

4 CONCLUSÕES

Foi realizada uma análise probabilística do transporte de contaminantes em aterros sanitários, utilizando o Método de Monte Carlo (MMC) para avaliar a eficiência de diferentes camadas de impermeabilização na contenção do benzeno. A comparação entre um *liner* convencional de argila compactada (CCL) e um *liner* alternativo de solo (SL) demonstrou que o primeiro oferece maior eficiência na mitigação da contaminação do solo ao longo do tempo.

Os resultados indicaram que o *liner* CCL foi capaz de reduzir significativamente a propagação do contaminante, apresentando uma probabilidade de falha de 9% ao final da vida útil do aterro, enquanto o *liner* SL mostrou uma ineficácia considerável, com uma taxa de falha de 77% em todas as profundidades analisadas. Além disso, as distribuições de probabilidade obtidas demonstraram que a concentração média de benzeno que atravessa a camada de argila permanece abaixo do valor de intervenção estabelecido pela Resolução CONAMA 420/2009, enquanto a camada de solo excedeu esse limite.

A utilização da Distribuição de Rayleigh para modelar a condutividade hidráulica do solo e a concentração de contaminantes se mostrou adequada. A aplicação conjunta do MMC e da estatística probabilística permitiu uma caracterização robusta do processo de transporte de contaminantes.

Portanto, a pesquisa reforça a importância de considerar a variabilidade dos parâmetros geotécnicos no dimensionamento de sistemas de contenção de aterros sanitários e destaca a necessidade de soluções de en-



engenharia mais eficientes para a proteção do solo e recursos hídricos. Estudos futuros poderão aprofundar a análise incluindo fatores como a degradação química dos *liners* ao longo do tempo.

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.
- Brasil. (2009). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas*. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF,.
- Cunha, J. A., Osorto, M. R. R., Zuluaga, M. A. G., Cavalcante, A. L. B. (2024). *Análise Probabilística de Transporte de Contaminante em Estudo de Caso do Aterro Sanitário*. XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- 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>
- Marchetti, M. A. (2024). *Distribuição Rayleigh de Marshall-Olkin: propriedades e inferência*. Presidente Prudente, 33 p. : il., tabs
- Ogata, A., & Banks, R. B. (1961). *A Solution of the Differential Equation Longitudinal Dispersion in Porous Media*.