

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/424

Uma breve discussão sobre a recirculação de lixiviado em aterros sanitários e seu efeito na produção de biogás

Fernanda Andrade do Nascimento

Mestre em Engenharia Ambiental, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, E-mail: andrade.fn@gmail.com

Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk

Professora Associada, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, E-mail: anaghislane@eng.uerj.br

RESUMO: A Recirculação de Lixiviado (RL) é uma prática antiga, caracterizada pela reintrodução do lixiviado gerado no interior das células de aterro sanitário. O uso da técnica é motivada principalmente pelo interesse em acelerar a estabilização dos resíduos orgânicos biodegradáveis, aumentar a produção de biogás, remover contaminantes do lixiviado, prolongar a vida útil do aterro e reduzir os custos de tratamento do lixiviado. Frente a essas questões, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma compilação dos dados e resultados de diversas pesquisas sobre a recirculação de lixiviado em aterros sanitários, através de experimentos in situ, sintetizá-los e analisá-los, verificando a real efetividade dessa prática na produção e qualidade do biogás. Com esse objetivo foram utilizadas as bases de dados Scopus e Web of Science para pesquisas internacionais, enquanto o Google Acadêmico foi utilizado para pesquisas nacionais. O período considerado para a pesquisa bibliográfica foi de 2010 a 2021. As palavras-chave utilizadas foram diferentes combinações de recirculação de lixiviado, biogás, aterro e resíduos sólidos urbanos. Os resultados mostraram que a RL impactou de diferentes formas a produção e qualidade do biogás gerado pela decomposição dos resíduos, sendo eficaz em algumas pesquisas para o aumento da produção e qualidade do biogás, enquanto em outras se mostrou ineficaz.

PALAVRAS-CHAVE: Recirculação de lixiviado, Aterros sanitários, Biogás, Resíduos sólidos urbanos

ABSTRACT: Leachate Recirculation (LR) is an established practice involving the reintroduction of leachate generated within landfill cells. The primary motivations for employing this technique in landfills include accelerating the stabilization of degradable organic waste, enhancing biogas production, removing contaminants from leachate, extending the landfill's operational lifespan, and reducing leachate treatment costs. This study aims to compile and analyze data and results from various research studies on leachate recirculation in landfills, based on in situ experiments, to evaluate the actual effectiveness of this practice in biogas production and quality. For international research, the Scopus and Web of Science databases were utilized, while Google Scholar was employed for national research. The literature search covered the period from 2010 to 2021, using keywords such as leachate recirculation, biogas, landfill, and municipal solid waste. The results indicated that LR had varying impacts on the production and quality of biogas generated through waste decomposition, proving effective in enhancing both production and quality in some studies, while being ineffective in others.

KEYWORDS: Leachate recirculation, Landfills, Biogas, Municipal solid waste

1 INTRODUÇÃO

O lixiviado é um dos maiores problemas ambientais causados pela disposição de resíduos em aterros sanitários. Devendo-se principalmente a grande quantidade de contaminantes presentes em sua composição. Um aterro sanitário, sem um sistema adequado de impermeabilização, drenagem, captação e descarte do lixiviado, pode promover a contaminação do solo, assim como dos corpos d'água superficiais e subterrâneos (Pohland, 1975; Bengtsson *et al.*, 1994; Fatta; Papadopoulos; Loizidou, 1999; Butt *et al.*, 2009; Ngo; Guo; Xing, 2009; Butt *et al.*, 2014).

Após o encerramento de um aterro sanitário, a poluição causada pelo lixiviado, pode permanecer em altos níveis por várias décadas, continuando a ser uma potencial fonte de ameaça a seguridade ambiental e a saúde humana (Ngo; Guo; Xing, 2009; Ehrig; Stegmann, 2019). Além dos problemas relacionados à poluição,

o acúmulo de lixiviado gerado pode contribuir para a diminuição da eficiência dos revestimentos de proteção instalados durante a construção do aterro sanitário, por conta do aumento da carga hidráulica, assim como, pode promover problemas de instabilidade no interior da célula devido ao aumento das poro-pressões (Ramke, 2008).

A recirculação de lixiviado é uma prática antiga, remete aos anos 70, e é caracterizada basicamente pela introdução do lixiviado gerado no interior das células do aterro. Essa prática tende a aumentar o conteúdo de umidade, podendo estimular a biodegradação, o transporte de bactérias e nutrientes, além de possibilitar a diminuição do volume do lixiviado a ser tratado. Fato que impacta diretamente em uma redução dos custos atrelados ao transporte e tratamento desse efluente a longo prazo (Pohland, 1975; Reinhart; Al-Yousfi, 1996; Beaven R.; Knox, 2009; White *et al.*, 2011; Knox; Beave; Cossu, 2019).

O uso dessa técnica em aterros sanitários, vem sendo motivado principalmente pelo interesse na aceleração do processo de estabilização dos resíduos orgânicos degradáveis, aumento da produção do biogás, remoção de contaminantes do lixiviado, aumento da vida útil do aterro, através da aceleração dos processos de subsidência, e redução dos custos de tratamento lixiviado (Warith; Sharma, 1998; Knox; Beave; Cossu, 2019; Beaven *et al.*, 2009). Uma outra razão pelo interesse na investigação dessa técnica é o aproveitamento energético (Knox; Beave; Cossu, 2019).

O biogás gerado a partir da decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos é rico em metano, que pode ser utilizado para geração de energia ou como combustível (van Elk, 2007). A captação e o aproveitamento desse gás são cruciais, pois o metano é um contribuinte significativo para as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e, conseqüentemente, para o aquecimento global. Em um horizonte de 20 anos, o metano é 80 vezes mais eficiente na retenção de calor na estratosfera do que o dióxido de carbono (UNEP, 2024). Em 2016, as emissões do setor de resíduos representaram aproximadamente 5% das emissões globais de gases de efeito estufa (Kaza *et al.*, 2018), sendo os aterros sanitários os principais responsáveis por essas emissões, liberando principalmente gás metano para a atmosfera (Bogner *et al.*, 2007).

Apesar das potenciais vantagens, a recirculação de lixiviado enfrenta diversos desafios significativos. Nos projetos que visam sua implementação em aterros sanitários, os principais problemas relatados incluem a determinação da quantidade ideal de lixiviado a ser recirculada, questões geotécnicas relacionadas à estabilidade do maciço, infiltrações indesejadas, entupimento das instalações e a distribuição não homogênea do lixiviado dentro da massa de resíduos. (EA, 2009; DI-ADDARIO; RUGGERI, 2016).

Dentro deste contexto, o presente artigo oferece uma síntese de diversas pesquisas sobre a influência da recirculação de lixiviados em aterros sanitários, com foco na produção e qualidade do biogás.

2 METODOLOGIA

A proposta do presente trabalho consiste em apresentar uma revisão sobre os experimentos realizados em células de aterros sanitários e construídas especialmente para avaliar a qualidade e produção do biogás gerado a partir da recirculação de lixiviado. Para realização desta revisão foram utilizadas as bases de dados da Scopus, Web of Science (WOS) e Google Acadêmico. As palavras chaves utilizadas foram as diferentes combinações possíveis entre recirculação de lixiviado, biogás, aterro e resíduos sólidos urbanos. Foi utilizado termos sinônimos ou semelhantes, variação entre singular e plural, para assim, tentar encontrar o máximo de pesquisas dentro da temática de interesse conforme disposto abaixo:

- **combinação 1:** “leachate recirculation” OR “recycle leachate” OR “leachate recycling” AND;
- **combinação 2:** “methane” OR “landfill gas” OR “biogas” AND;
- **combinação 3:** “municipal solid waste” OR “municipal solid wastes” OR “MSW”.

Além das palavras chaves, foi utilizado também um filtro temporal. Esse filtro selecionou as pesquisas que foram desenvolvidas a partir de 2010 até julho de 2021.

3 RESULTADOS E DISCUSSOES

A seguir são apresentados os resultados de pesquisas realizadas em células já existentes em aterros sanitários ou em células experimentais construídas especialmente para realizar os ensaios experimentais. Por meio da Tabela 1 verifica-se uma síntese das informações referentes às pesquisas que foram encontradas.

Tabela 1. Síntese das pesquisas encontradas.

Referência	Localização	Idade da massa de resíduos/ células analisadas (anos)	Características do lixiviado recirculado	Duração da RL(meses)	Sistema de recirculação	A RL aumentou a qualidade ou a produção do biogás?
Calabrò <i>et al.</i> (2010)	Toscana, Itália	13	Concentrado do tratamento de osmose reversa	30	-	Não
Manzur <i>et al.</i> (2012)	Denton, EUA	25	Sem tratamento especificado	7	Aplicação subterrânea	Sim
Andrade (2014)	Bahia, Brasil	4 a 15	Sem tratamento especificado	15	Aplicação subterrânea	Não
Chung <i>et al.</i> (2015)	Asan, Coreia	10	Tratado por oxidação biológica	-	Valas/lagoas de infiltração	Apenas inicialmente
Bialowiec <i>et al.</i> (2017)	Kosiny Bartosowe, Polônia	0.6	Proveniente de wetlands com aeração prévia	1.6 (intermitente)	Valas/lagoas de infiltração	Sim
Castro <i>et al.</i> (2017)	São Paulo, Brasil	3 a 9	Sem tratamento especificado	10	-	Sim
Santos (2017)	Bahia, Brasil	6 a 17	Sem tratamento especificado	7	Aplicação subterrânea	Não
Zhan <i>et al.</i> (2017)	Hangzhou, China	resíduos frescos	Sem tratamento especificado	-	Tubos horizontais	Sim
Liu <i>et al.</i> (2018)	Hubei, China	1.25 a 1.58	Sem tratamento especificado	12	Poços horizontais	Sim
Top <i>et al.</i> (2019)	Istambul, Turquia	-	Sem tratamento especificado	15	-	Sim
Chamem, Fellner e Zairi (2020)	Gabes, Tunisia	10	Concentrado bruto e por osmose reversa	60	Valas/lagoas de infiltração	Não
Mehrdad <i>et al.</i> (2021)	Tehran, Irã	-	Sem tratamento especificado	36	Valas/lagoas de infiltração	Sim

Rasapoor <i>et al.</i> (2021)	Waikato, Nova Zelândia	2	Proveniente de compostagem	-	Poços verticais de infiltração	Sim
-------------------------------	------------------------	---	----------------------------	---	--------------------------------	-----

Em Chamem, Fellner e Zairi (2020), a pesquisa foi realizada através de um sistema de recirculação composto por tubos horizontais perfurados com aproximadamente 10 milímetros de diâmetro, os quais foram dipostos em valas de 0,5 metro de largura e 30 a 60 metros de comprimento dentro da camada superior dos resíduos. Esse sistema, segundo os autores, cobria cerca de 40% da superfície total da célula estudada.

Os resultados encontrados pelos autores mostraram que a quantidade de gás que conseguiu ser extraída correspondeu apenas a 14% do que havia sido estimado pelo modelo utilizado. Além da baixa produção, foi verificada também uma baixa qualidade do biogás gerado (baixo teor de CH₄), em comparação com as partes do aterro que não fizeram uso da recirculação.

Para os autores, os baixos teores de CH₄ observados foram originados por um processo inibitório da metanogênese que ocorreu por uma elevada concentração de nitrogênio amoniacal. Os autores verificaram também altas concentrações de cloreto no lixiviado.

As altas concentrações desses dois poluentes foram atribuídas à uma baixa infiltração de água de chuva no local e a prática da recirculação do lixiviado em si, já que a combinação desses fatores poderia contribuir para uma diminuição da diluição dessas substâncias.

Na pesquisa desenvolvida por Chung *et al.* (2015), os autores conduziram o experimento através de uma planta piloto que recebeu um volume de resíduos de aproximadamente 4.500 m³, entre os anos de 1998 a 2001. Vale destacar que o experimento foi iniciado após sete anos do fechamento do aterro, logo parte da massa de resíduos analisada já tinha aproximadamente dez anos.

Os resultados dessa pesquisa mostraram que a produção de metano aumentou significativamente nas primeiras semanas após o início da recirculação, o que conforme os autores, poderia ser um indicativo que a recirculação estimulou a decomposição anaeróbia dos resíduos. No entanto, foi verificado posteriormente, uma inibição da metanogênese, que pode ter sido, segundo os autores, resultado do processo de nitrificação parcial do lixiviado que foi realizado a fim de reduzir o teor de nitrogênio amoniacal acumulado no aterro.

Conforme verificado nessas duas últimas pesquisas citadas e, em outras como Ogata *et al.* (2016) e Berge *et al.* (2006), altas concentrações de nitrogênio amoniacal vêm sendo recorrentemente apontadas como uma das desvantagens da prática da recirculação, tanto para a produção de biogás, quanto para a qualidade do lixiviado. Vale destacar que o nitrogênio amoniacal no processo de digestão anaeróbia pode se apresentar sob a forma de amônia livre (NH₃) ou amônia ionizada (NH₄⁺) e sua concentração pode ser afetada por variações nos parâmetros de pH e temperatura (Benabdallah-El-Hadj *et al.* 2009). De acordo com Kayhanian (1999), Sprott e Patel (1986), as altas concentrações dessa substância pode aumentar a toxicidade do lixiviado e também inibir alguns processos biológicos, o que explica as alterações verificadas na produção de biogás.

Outra pesquisa que apresentou resultados pouco satisfatórios com o uso da recirculação na produção de biogás foi de Andrade (2014). A autora analisou uma macrocélula que recebeu aproximadamente 4.658.145,86 m³ de RSU, entre os anos de 1997 a 2010. Os dados medidos em campo foram próximos aos estimados. No entanto, foi verificado que não houve um impacto significativo na produção de biogás depois do início da recirculação de lixiviado (em 2012), o que pode estar relacionado ao fato da prática de recirculação ter sido executada com resíduos já com avançada fase de decomposição (4 a 15 anos).

Apesar disso, a autora ressalta que mesmo não tendo havido um aumento da produção do biogás após a recirculação, o fato de ter mantido uma estabilização das vazões de CH₄ no final do período de monitoramento, pode sugerir que a recirculação tenha ajudado a prolongar a fase de produção de biogás.

O monitoramento realizado por Andrade (2014) foi finalizado em 2013, no entanto, a operação da recirculação de lixiviado foi retomada em 2014 e se estendeu até 2015, sendo acopanhada posteriormente por Santos (2017).

Todavia, os resultados alcançados por Santos (2017), através de um monitoramento, com período maior que Andrade, 2014, também não evidenciaram efeitos significativos na produção de biogás. O autor sugeriu que o estágio avançado de decomposição dos resíduos pode ter contribuído para a baixa produção de gás, mas que apesar disso, a prática da recirculação, ao menos, mostrou-se favorável à melhora da qualidade do lixiviado.

Calabrò *et al.* (2010) conduziram um experimento em uma célula de um aterro que se encontrava em operação desde 1989, no entanto, a recirculação local só foi iniciada a partir de 2006. O experimento durou

trinta meses e foi verificado que não houve uma melhora da produção e nem da qualidade do biogás gerado. Os autores atribuíram ao fato dos resíduos dispostos no aterro desde 2003 passarem por um pré-tratamento biológico mecânico antes do aterramento, o que pode ter favorecido diretamente a estabilização orgânica destes, impactando numa baixa produção de gás.

Em Rasapoor *et al.* (2021), por sua vez, a adição de umidade se mostrou positiva para o aumento da geração de gás. A geração do biogás foi investigada pelos autores através do monitoramento de cinco poços de gás durante 5 meses em uma área de teste dentro de um aterro.

Os poços foram operados de forma diferenciada: a) como controle, sendo apenas monitorada a pressão do gás, b) operado com recirculação com águas pluviais, c) operado com recirculação de lixiviado proveniente de planta de compostagem, d) operado com recirculação de lixiviado proveniente de planta de compostagem e vermelho neutro adicionado e e) operado com recirculação de lixiviado proveniente de planta de compostagem e biochar adicionado.

Os resultados encontrados mostraram que durante o período de monitoramento maiores fluxos de gás foram observado nos poços que fizeram uso da recirculação com lixiviado, sendo o poço, que não utilizou aditivos, o que apresentou maior fluxo em praticamente todo monitoramento.

No estudo desenvolvido por Top *et al.* (2019) foi comparada a performance de quatro células testes (dimensões: 20 metros de largura, 40 metros de comprimento e 5 metros de altura) que foram operadas também de forma diferenciada durante o período de 450 dias.

As células foram operadas de diferentes formas: a) anaerobia, sem recirculação de lixiviado, b) anaeróbia com recirculação de lixiviado, c) semi-anaeróbia e d) aeróbia. Para a célula operada de forma anaeróbia e com recirculação de lixiviado, os resultados, segundo os autores, evidenciaram um aumento na produção de biogás, na qualidade do lixiviado e uma aceleração do processo de degradação dos resíduos.

Já em Białowiec *et al.* (2017) foi conduzida uma pesquisa realizada em dois períodos distintos de monitoramento: trinta dias e um ano após o fechamento do aterro.

No primeiro período de monitoramento a produção de gás dobrou após quinze dias de iniciada a recirculação, saindo de aproximadamente 100 m³/h para 200 m³/h. No segundo período de monitoramento a produção de metano foi de 148 m³/h a 270 m³/h, essa produção foi atingida 23 dias após o início da recirculação. Os resultados também evidenciaram um aumento de 2% e 5% na concentração de metano na primeira e na segunda fase da pesquisa, respectivamente.

Manzur *et al.* (2012) também verificaram que a recirculação de lixiviado teve uma influência direta no fluxo de gás gerado, ocasionando um aumento do biogás. A pesquisa foi conduzida através de imagens de resistividade e monitoramento da taxa de fluxo e composição do biogás gerado em duas tubulações, localizados em uma mesma célula. A recirculação foi feita através de intervalos regulares ao longo dessas tubulações e o total de lixiviado recirculado variou de 758.000 a 4.548.000 litros.

A comparação entre os dados de campo e os dados estimados através do LANDTECGEMTM 2000 mostraram que uma das tubulações obteve um fluxo de gás maior que o estimado em todos os meses de monitoramento, já na outra tubulação analisada, o fluxo de gás esteve abaixo do estimado na maior parte do monitoramento.

Um resultado que merece destaque é que a tubulação na qual esperava-se um maior potencial de geração de gás, devido à sua maior cobertura em termos de quantidade de resíduos, apresentou um menor fluxo de gás comparado ao da outra tubulação na qual, cobria uma quantidade menor de resíduos. O que pode estar relacionado à uma melhor distribuição de umidade, já que de acordo com os dados que foram obtidos através das imagens de resistividade, a tubulação que atingiu o maior fluxo de gás, foi justamente a que conseguiu ter uma área ao redor com uma maior distribuição de umidade.

O espaçamento das tubulações também foi colocado pelos autores como um dos prováveis fatores de influência na diferença dos fluxos de gás obtidos. Os autores destacaram que a tubulação com maior fluxo de gás foi capaz de capturar de forma mais eficiente o gás gerado devido ao menor espaçamento entre o tubo e a massa de resíduos. Com relação à composição do gás extraído, foi verificado nessa pesquisa um percentual de metano que variou de 45 a 55% nos tubos.

Castro *et al.* (2017), por sua vez, conduziram uma pesquisa que analisou o comportamento de quatro células, que foram divididas em dois grupos: a) com massa de resíduos com idade de 3 a 5 anos e b) com massa de resíduos com idade de 7 a 9 anos. A recirculação de lixiviado aconteceu apenas em uma das células de cada grupo a fim de comparar o processo de biodegradação e produção de biogás com e sem recirculação.

O monitoramento durou dez meses e os resultados mostraram que a recirculação contribuiu para a manutenção da umidade, favorecendo os processos biológicos referentes à biodegradação, mesmo durante os períodos de estiagem. Os pontos do aterro que foram submetidos à recirculação e que tinham resíduos mais novos, tiveram um impacto maior na vazão do biogás. Foi observado também que o processo de degradação foi mais acentuado nas células com recirculação, evidenciando assim, que a prática da recirculação pode contribuir para uma estabilização mais rápida do aterro.

Em Liu *et al.* (2018) foi analisada a performance de três células operadas de forma diferenciada: sem recirculação de lixiviado, com recirculação contínua e com recirculação descendente. Os autores verificaram que a célula operada com recirculação contínua de lixiviado apresentou os melhores resultados em termos de produção e qualidade do biogás. Os resultados encontrados mostraram que o fluxo na célula operada com recirculação constante foi 2,2 vezes maior que o verificado na célula operada sem recirculação e que o percentual de metano durante o período de monitoramento aumentou de 53,2% para 58,2%.

Através da operação de dois aterros pilotos construídos com capacidade total para 9.327 toneladas de RSU, Mehrdad *et al.* (2021) analisaram a influência da recirculação de lixiviado. Um dos aterros foi usado como controle e o outro foi operado com recirculação. Os resultados encontrados após 3 anos de monitoramento mostraram que a recirculação contribuiu para uma melhor biodegradabilidade dos resíduos e aumento da temperatura da célula. Os dados da pesquisa mostraram que o aterro operado sem recirculação apresentou uma emissão de metano 35% menor que a verificada no aterro operado com recirculação.

Já em Zhan *et al.* (2017), os autores investigaram o comportamento bioquímico, hidrológico e mecânico de RSU com alto teor de resíduos alimentares. A pesquisa foi conduzida através de uma célula experimental de 5 m de comprimento, 5 m de largura e 7,5m de profundidade, preenchida com 91,3 toneladas de RSU não processados. As análises avaliaram dentre outros fatores, os efeitos do uso de lixiviado de idade mais avançada e o aquecimento deste antes da recirculação, durante o processo de biodegradação dos resíduos.

Os resultados encontrados mostraram que o uso da recirculação do lixiviado de fase mais avançada foi capaz de reduzir a inibição do processo de metanogênese causado pela ocorrência do acúmulo de DQO e baixo pH. Já o aquecimento do lixiviado, por sua vez, mostrou-se eficiente para solucionar o problema de desaceleração do processo de metanogênese ocasionado pelas baixas temperaturas dos resíduos. Vale destacar, que ao final do experimento, as concentrações de CH₄ e CO₂ estabilizaram em aproximadamente 67% e 33%, respectivamente, evidenciando uma boa qualidade do biogás gerado.

4 CONCLUSÃO

Os experimentos de campo mostraram que a recirculação de lixiviado vem sendo aplicada de diferentes formas a fim de se conseguir melhores taxas de biodegradação dos resíduos, assim como uma maior produção e qualidade do biogás gerado.

Os resultados indicaram que essa prática foi promissora em algumas pesquisas para a degradação dos resíduos e produção de biogás. No entanto, também foram observados efeitos insatisfatórios, como a baixa qualidade do biogás produzido. De acordo com algumas pesquisas citadas neste trabalho, a recirculação de lixiviado com alta concentração de nitrogênio amoniacal, pode inibir a metanogênese e a produção de biogás em um aterro sanitário. De modo geral, a toxicidade do lixiviado causada pelo nitrogênio amoniacal, desacelera os processos biológicos. Outros fatores que contribuíram para a baixa efetividade da recirculação de lixiviado na produção de biogás incluem a combinação de alta concentração de nitrogênio amoniacal no lixiviado com a baixa infiltração de água de chuva. Além desses fatores, a idade dos resíduos também foi considerada, pois resíduos mais antigos já passaram pelos principais processos de degradação.

Por outro lado, algumas pesquisas constataram que a recirculação de lixiviado era um fator importante para a produção e qualidade do biogás, mesmo em resíduos mais antigos e em células com menor quantidade de resíduos. Assim, o aumento da umidade na massa de resíduos, decorrente da recirculação de lixiviado, apresenta-se como uma alternativa potencial para o aumento da produção de biogás.

No entanto, é crucial considerar as particularidades ou características específicas do local onde o aterro sanitário está situado e as dificuldades operacionais inerentes à técnica. Em áreas com alta pluviosidade, há uma maior formação de lixiviado e uma possível inibição na produção de biogás. Nessas circunstâncias, o uso da técnica de recirculação de lixiviado para aumentar a produção de biogás, pode não ser a abordagem mais adequada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, S.F. (2014) *Aplicação da técnica de recirculação de chorume em aterros tropicais: estudo de caso do Aterro Sanitário Metropolitano Centro (ASMC)*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental Urbana, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, 173p.
- Beaven R.; Knox, K.; Powrie, W. (2009) A technical assessment of leachate recirculation. UK Environment Agency - England.
- Benabdallah-el-hadj, T. Astals, S.; Gali, A.; Mace, S. (2009) Ammonia influence in anaerobic digestion of OFMSW. *Water science and technology*, IWA Publishing, v. 59, n. 6, p. 1153–1158. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.100>
- Bengtsson, L., Bendz, D., [Hogland, W.](#), Rosquist, H., Åkesson, M. Water balance for landfills of different age. *Journal of Hydrology*, Elsevier, v.158, n.3-4, p.203–217,1994.
- Berge, N.D., Reinhart, D.R., Dietz, J., Townsend, T. (2006) In situ ammonia removal in bioreactor landfill leachate. *Waste Management*, Elsevier, v.26, n.4, p.334–343.
- Białowiec, A. et al. (2017) The influence of leachate recirculation on biogas production in a landfill bioreactor. *Environment Protection Engineering*, v.43, n.1.
- Bogner, J. et al. (2007) Waste management, in climate change 2007: Mitigation. contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1177/0734242X07088433>
- Butt, T.E., Coulon, F., Oduyemi, K.O.K.(2009) A review of literature and computer models on exposure assessment. *Environmental Technology*, Taylor & Francis, v.30, n.14, p. 1487–1501.
- Butt, T.E., Gouda, H.M., Baloch, M.I., Paul, P., Javadi, A.A, Alan, A. (2014) Literature review of baseline study for risk analysis: The landfill leachate case. *Environment international*, Elsevier, v. 63, p. 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.09.015>
- Calabrò, P.S. Sbaffoni, S., Orsi, S., Gentili, E., Meoni, C. (2010) The landfill reinjection of concentrated leachate: Findings from a monitoring study at an Italian site. *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier, v.181, n. 1-3, p.962–968.
- Castro, M.C.A.A. et al. (2017) Influência da recirculação de lixiviado na vazão e na composição do biogás para resíduos com diferentes tempos de aterramento em aterro sanitário de médio. *Congresso ABES- Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - Fenasan*.
- Chamem, O.; Fellner, J.; Zairi, M. (2020) Ammonia inhibition of waste degradation in landfills a possible consequence of leachate recirculation in arid climates. *Waste Management & Research*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v.38, n.10, p. 1078–1086.
- Chung, J. Kim, S., Baek, S., Lee, N.H., Park, S., Lee, J., Lee, H., Bae, W. (2015) Acceleration of aged landfill stabilization by combining partial nitrification and leachate recirculation: A field scale study. *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier, v.285, p.436–444.
- Di-addario, M.; Ruggeri, B. (2016) Landfill bioreactor technology for waste management. In: *Recycling of Solid Waste for Biofuels and Bio-chemicals*. [S.l.]: Springer, p.211–235.
- EA. ENVIRONMENTAGENCY. (2009) A technical assessment of leachate recirculation. [S.l.]. Disponível em:
<https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/291196/scho1109brjc-e-e.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2021.
- Ehrig, H.J.; Stegmann, R. (2019) Leachate quality. In: *Solid Waste Landfilling: Processes, technology, and environmental impacts*. 1.ed.[S.l.]: Elsevier, p. 511–539.

- Fatta, D. Ppapakopoulo S.A.; Loizidou, M. (1999) A study on the landfill leachate and its impact on the groundwater quality of the greater area. *Environmental Geochemistry and Health*, Springer, v.21, n.2, p.175–190.
- Kayhanian, M. (1999) Ammonia inhibition in high-solids biogasification: an overview and practical solutions. *Environmental technology*, Taylor & Francis, v. 20, n. 4, p. 355–365.
- Kaza, S. Yao, L.C., Bhada-Tata, P., van Woerden, F. (2018) *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. [S.l.]: The World Bank, <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/d3f9d45e-115f-559b-b14f-28552410e90a>
- Knox, K.; Beave, R.P.; Cossu, R. (2019) Leachate recirculation: History, objectives, and conceptual design. In: *Solid Waste Landfilling: Processes, technology, and environmental impacts*.1. ed. [S.l.]: Elsevier, p.691–701.
- Liu, L.; Xiong, H.; Ma, J., Ge; S, Yu, X.; Zeng, G. (2018) Leachate recirculation for enhancing methane generation within field site in china. *Journal of Chemistry*, Hindawi, v. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9056561>.
- Manzur, S.R.; Hoassaun, M.S; Kemler, V.; Dugger, B. (2012) Performance of horizontal gas collection system in ELR landfill. In: *Geo Congress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*. [S.l.: s.n.], p.3613–3623. <https://doi.org/10.1061/9780784412121.370>.
- Mehrdad, S.M.; Abbasi, M.; Yeganih. B.; Kamalan, H. (2021) Prediction of methane emission from landfills using machine learning models. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1002/ep.13629>.
- Ngo, H.; Guo, W.; Xing, W. (2009) Waste and wastewater treatment technologies. *Encyclopedia of life support systems – volume II: Applied technologies in municipal solid waste landfill leachate treatment*. Oxford, Reino Unido: EOLSS Publishers/UNESCO.
- Ogata, Y.; Ishigaki, T.; Nakagawa, M.; Yamada, M. (2016) Effect of increasing salinity on biogas production in waste landfills with leachate recirculation: a lab-scale model study. *Biotechnology Reports*, Elsevier, v. 10, p.111–116. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.04.004>
- Pohland, F.G. (1975) Georgia Institute of Technology. Sanitary landfill stabilization with leachate recycle and residual treatment. [S.l.].
- Ramke, H.G. (2008) Leachate collection systems. *Proceedings of the 1st Middle European Conference on Landfill Technology*.
- Rasapoor, M., Younga, B., Brarb, R., Baroutiana, S. (2021) Enhancement of landfill gas generation from aged waste by a combination of moisture adjustment and application of biochar and neutral red additives: A field-scale study. *Fuel*, Elsevier, v.283, p.118932. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118932>
- Reinhart, D.R.; Al-yousfi, A.B. (1996) The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics. *Waste Management & Research*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v.14, n.4, p.337–346.
- Santos, Á.C. (2017) *Produção de Metano em Aterro Sanitário: Influência das Técnicas Operacionais no Aterro Metropolitano em Salvador – Ba*. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Ciências, Energia e Ambiente/ Universidade Federal da Bahia, Salvador, 263p.
- Sprott, G.D.; Patel, G.B. (1986) Ammonia toxicity in pure cultures of methanogenic bacteria, *Systematic and Applied Microbiology*, 7(2-3), 358–363.
- Top S., Akkaya G.K., Demir A., Yıldız Ş., Balahorli V., Aykut N.O. and Bilgili M.S. (2019) Investigation of solid waste characteristics in field-scale landfill test cells. *Glob. Nest. J*, v.21, p.153–162.
- UNEP. (2024) Facts about methane. Disponível em: <<https://www.unep.org/explore-topics/energy/facts-about-methane/>>. Acesso em: 11 abr. 2024

- van Elk, A.G.H.P. (2007) Mecanismo de Desenvolvimento Limpo Aplicados à Resíduos Sólidos: Redução de emissões na disposição final. [S.l.]. Segala, K (coord.). IBAM, 2007. 40 p., Série III. Disponível em: https://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/03-aterro_md1_1.pdf. Acesso em: 22 mar. 2024
- Warith, M.A.; Sharma, R. (1998) Technical review of methods to enhance biological degradation in sanitary landfills. *Water Quality Research Journal*, IWA Publishing, v. 33, n.3, p.417–438.
- White, J.K.et al. (2011) Leachate recirculation in a landfill: Some insights obtained from the development of a simple 1-d model. *Waste Management*, Elsevier, v.31, n.6, p. 1210–1221.
- Zhan, L.T.et al. (2017) Biochemical, hydrological, and mechanical behaviours of high food waste content MSW landfill: preliminary findings from a large-scale experiment. *Waste Management*, Elsevier, v.63, p.27–40.