

REVISTA AIDIS

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

IMPACTO DA RECIRCULAÇÃO DE LIXIVIADO NA PRODUÇÃO E QUALIDADE DO BIOGÁS GERADO EM ATERROS SANITÁRIOS: REVISÃO SISTEMÁTICA

* Fernanda Nascimento de Andrade ¹
Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk ¹

IMPACT OF LEACHATE RECIRCULATION ON THE PRODUCTION AND QUALITY OF BIOGAS IN LANDFILLS: SYSTEMATIC REVIEW

Recibido el 5 de abril de 2022. Aceptado el 28 de junio de 2022

Abstract

Biogas and leachate generated from the decomposition of municipal solid waste (MSW) in landfills, when not collected and treated, might cause environmental impacts. Leachate recirculation (LR) is a technique that has been used, among others factors, as a way of reducing the costs associated with the transport and treatment of leachate, as well as contributing to a faster stabilization of the organic fraction of MSW, which could impact an increase in biogas production in a shorter period of time. This work aimed to evaluate the influence of LR on the production and quality of biogas generated in landfills through a systematic review of research carried out in the last decade, thus to support an updated synthesis of the main results obtained in laboratory and large scale. The results found showed that the accumulation of toxic compounds is one of the main problems observed with the practice of LR. The use of additives, the control of the rate and frequency of recirculation and the supplementation of heat to the recirculated leachate were some of the techniques observed that have been investigated as a way of improving the influence of recirculation in the process of biodegradation of waste and increase the production of biogas. The results found showed that LR impacted in different ways the production and quality of the biogas generated through the decomposition of waste, proving to be effective in some studies to increase the production and quality of biogas, as well as ineffective in other studies.

Keywords: biogas, landfill, leachate recirculation, systematic review.

¹ Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

* *Autor correspondente:* Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rua São Francisco Xavier, 564, 5º andar – Maracanã, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 20550013. Brasil. Email: andrade.fernanda@posgraduacao.uerj.br

Resumo

O biogás e o lixiviado, gerados a partir da decomposição dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários, podem causar grandes impactos ambientais quando não coletados e tratados adequadamente. A recirculação de lixiviado (RL) é uma técnica que vem dentre outros fatores, sendo usada como um meio de reduzir os custos atrelados ao transporte e tratamento do lixiviado, assim como, de contribuir para uma mais rápida estabilização da fração orgânica dos RSU. Fato que pode impactar num aumento da produção do biogás em um tempo menor. Desta forma, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da RL na produção e qualidade do biogás gerado em aterros sanitários por meio de uma revisão sistemática de pesquisas realizadas na última década, para assim, construir uma síntese atualizada dos principais resultados obtidos em laboratório e em larga escala. Os resultados encontrados mostraram que o acúmulo de compostos tóxicos é um dos principais problemas observados com a prática da RL. O uso de aditivos, do controle da taxa e frequência da recirculação e da suplementação de calor ao lixiviado recirculado, foram algumas das técnicas observadas que vem sendo investigadas como meio de aprimorar a influência da recirculação no processo de biodegradação dos resíduos e aumento da produção de biogás. Os resultados encontrados evidenciaram que a RL impactou de diferentes formas a produção e qualidade do biogás gerado através da decomposição dos resíduos, mostrando-se eficaz em algumas pesquisas para o aumento da produção e qualidade do biogás, assim como, ineficaz em outras pesquisas.

Palavras-chave: aterro, biogas, recirculação de lixiviado, revisão sistemática.

Introdução

Os aterros sanitários são elementos essenciais na gestão de resíduos sólidos (Scharff, 2014) e para torná-los seguros e sustentáveis é necessário que sua construção, operação e manutenção sejam bem planejadas e executadas (Cossu, 2019), minimizando os impactos negativos causados principalmente pelas emissões de lixiviado e biogás (Towsend *et al.*, 2015; van-Elk *et al.*, 2022).

Com relação às emissões de biogás, o setor de resíduos contribui com aproximadamente 5% das emissões globais de gases de efeito estufa e os ambientes de disposição de resíduos dentro deste setor são os que mais contribuem para as emissões desses gases, emitindo principalmente gás metano para a atmosfera (IPCC, 2007; The World Bank, 2018).

Devido aos efeitos negativos que a disposição de resíduos nesses ambientes tende a causar, medidas de mitigação vem sendo desenvolvidas e aprimoradas ao longo das últimas décadas a fim de reduzir ou mesmo evitar, as emissões gasosas fugitivas desses locais e/ou realizar a captação do gás para queima ou fins de aproveitamento energético (van-Elk, 2007; Speight, 2018).

Quando ao invés de queimado, o biogás, é aproveitado energeticamente, este pode ser utilizado para geração de energia elétrica, energia mecânica, energia térmica ou como biometano (European Commission, 2016). No entanto, para a recuperação energética desse gás, alguns tratamentos podem ser necessários a fim de se retirar excesso de umidade e determinadas

impurezas para o seu adequado uso. As características do biogás e o tipo de aproveitamento energético que se almeja, definirá o tipo de tratamento necessário para a purificação desse gás (EPA, 2016).

Uma técnica que vem sendo usada como meio de reduzir os custos relativos ao tratamento do lixiviado e o aumento da produção de biogás com vistas ao aproveitamento energético, é a recirculação de lixiviado (RL). Essa técnica, utilizada desde a década de 70, com diferentes objetivos, consiste na reintrodução do lixiviado coletado novamente no aterro (Beaven Richard e Knox, 2009; Cossu, 2019).

A RL promove um aumento do teor de umidade na massa de resíduos, favorecendo o transporte de microorganismos e nutrientes, contribuindo assim, para um processo mais rápido de biodegradação (Bilgili *et al.*, 2007; Sethi *et al.*, 2013; Di-Addario e Ruggeri, 2016).

A forma de execução da RL pode ser realizada através de diferentes técnicas que variam bastante entre si como, por exemplo: aplicação direta sobre os resíduos durante o descarte no aterro (pre-umificação dos resíduos), irrigação por pulverização da superfície do aterro, valas/lagoas de infiltração de superfície e aplicação subterrânea através de poços e sistema de drenagem (Reinhart, 1996; Pazoki e Ghasemzadeh, 2020).

A escolha por uma técnica específica vai depender de alguns fatores, tais como: objetivos dos operadores dos aterros sanitários, o tipo de aterro, escala e capacidade de recirculação do projeto, se a recirculação irá acontecer durante ou após a fase de operação do aterro, os equipamentos disponíveis, as regulamentações em vigor e os custos atrelados (Reinhart, 1996; Beaven R. e Knox, 2009; Di-Addario e Ruggeri, 2016).

Os desafios mais comumente relatados em projetos que almejam a execução da RL em aterros sanitários são principalmente a respeito da quantidade ideal de lixiviado a ser recirculada, problemas geotécnicos referentes à estabilidade, infiltrações indesejáveis, entupimento das instalações e distribuição não homogênea do lixiviado dentro da massa de resíduos (Beaven R. e Knox, 2009; Di-Addario e Ruggeri, 2016).

A eficiência da RL com relação ao aumento da produção e melhoria do biogás, vem sendo melhor investigada nas últimas décadas, sendo especialmente motivada pelo interesse no aproveitamento energético (Knox *et al.*, 2019). No Brasil, existem poucos estudos sobre o uso da RL e seus impactos na geração de biogás em aterros sanitários (Santos, 2017). As pesquisas que analisam a RL em aterros sanitários no Brasil se limitam muitas vezes às análises da qualidade e tratamento do lixiviado sem verificar a influência da técnica na produção e qualidade do biogás produzido (Martins *et al.*, 2010; Martildes *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2020).

A vista disso, esse trabalho teve por objetivo principal analisar as pesquisas desenvolvidas ao longo dos últimos anos com relação à RL e sua influência na produção e qualidade do biogás gerado em aterros sanitários em todo mundo. Verificando assim, os maiores desafios dessa técnica, suas principais implicações e se sua execução realmente tende a aumentar a produção e/ou qualidade do biogás gerado. Para isso, uma revisão sistemática foi conduzida utilizando as bases de dados da Scopus e da Web of Science. A revisão considerou as pesquisas desenvolvidas de 2010 a 2021 e sintetizou seus principais resultados.

Metodologia

Pergunta de pesquisa

Nesse trabalho uma revisão sistemática foi realizada a fim de responder com base na avaliação e síntese de pesquisas desenvolvidas de 2010 a 2021 a seguinte questão: qual a influência da recirculação de lixiviado na qualidade e/ou produção do biogás gerado em aterros sanitários?

Método de busca

Para realização desta revisão foram utilizadas as bases de dados da Scopus e Web of Science (WOS). 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”.

Triagem e elegibilidade das pesquisas

Os resultados encontrados passaram por uma triagem prévia. Nessa etapa, foi realizada uma leitura do título e resumo desses trabalhos. Essa leitura permitiu verificar quais trabalhos poderiam ou não responder a pergunta de pesquisa e, assim, passar para a próxima fase de seleção. Na fase de elegibilidade, os trabalhos previamente selecionados foram lidos na íntegra e avaliados quanto à adequação à presente revisão sistemática para, assim, serem incluídos ou não no trabalho por meio dos critérios estabelecidos.

Critérios de exclusão e inclusão

Na Tabela 1 podem ser observados os critérios que foram estabelecidos nesta revisão sistemática para a inclusão ou exclusão das pesquisas encontradas e analisadas. Vale destacar que o fator de impacto das revistas/periódicos não foi um dos critérios estabelecidos para seleção dos trabalhos encontrados.

Tabela 1. Critérios de inclusão e exclusão.

Critérios de inclusão	<ul style="list-style-type: none"> • Pesquisas que utilizaram RSU nos seus experimentos; • Pesquisas que fizeram uso da RL; • Pesquisas que verificaram a produção ou a qualidade do biogás gerado; • Pesquisas desenvolvidas a partir de 2010; • Pesquisas desenvolvidas em aterros, células pilotos ou em biorreatores em escala de bancada.
Critérios de exclusão	<ul style="list-style-type: none"> • Trabalhos de pesquisa que tiveram leitura inacessível; • Trabalhos repetidos; • Trabalhos de pesquisa de validação de modelos; • Pesquisas que utilizaram resíduos diferentes de RSU; • Pesquisas desenvolvidas anteriormente a 2010; • Pesquisas realizadas em aterros controlados ou lixões.

Processo de construção da revisão sistemática

Além dos trabalhos que foram incluídos por meio das buscas nas já referidas bases de dados, foram incluídas também outras seis pesquisas encontradas ao longo da execução dessa revisão: uma pesquisa desenvolvida em escala laboratorial e as demais desenvolvidas em aterros do Brasil, China e Itália. Ambas pesquisas foram desenvolvidas dentro do mesmo recorte temporal estabelecido nas bases de dados utilizadas (2010 a 2021). Na Figura 1 verifica-se uma síntese de todo o processo de construção dessa pesquisa.

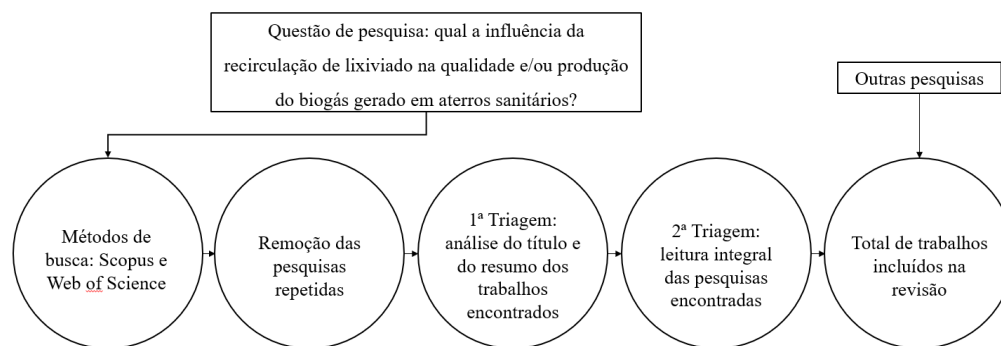


Figura 1. Processo de construção da revisão sistemática.

Compilação e análise dos resultados

Foi realizada uma análise bibliométrica dos resultados brutos das bases de dados através do software gratuito Bibliometrix-R. Posteriormente foi executada uma análise bibliométrica apenas dos artigos selecionados para esta revisão. As informações bibliométricas e a síntese dos dados mais importantes dos artigos, depois de organizadas em tabelas e gráficos passaram por um processo de análise crítica imparcial para, assim, construir essa revisão.

Resultados e discussões

Através da Figura 2 pode ser observado o fluxograma das principais etapas da revisão sistemática juntamente com os resultados encontrados. Através das palavras chaves utilizadas e do filtro temporal que considerou apenas os trabalhos que foram desenvolvidos a partir de 2010, foram encontrados 84 resultados na base de dados da Scopus e 112 na WOS, totalizando 196 trabalhos científicos.

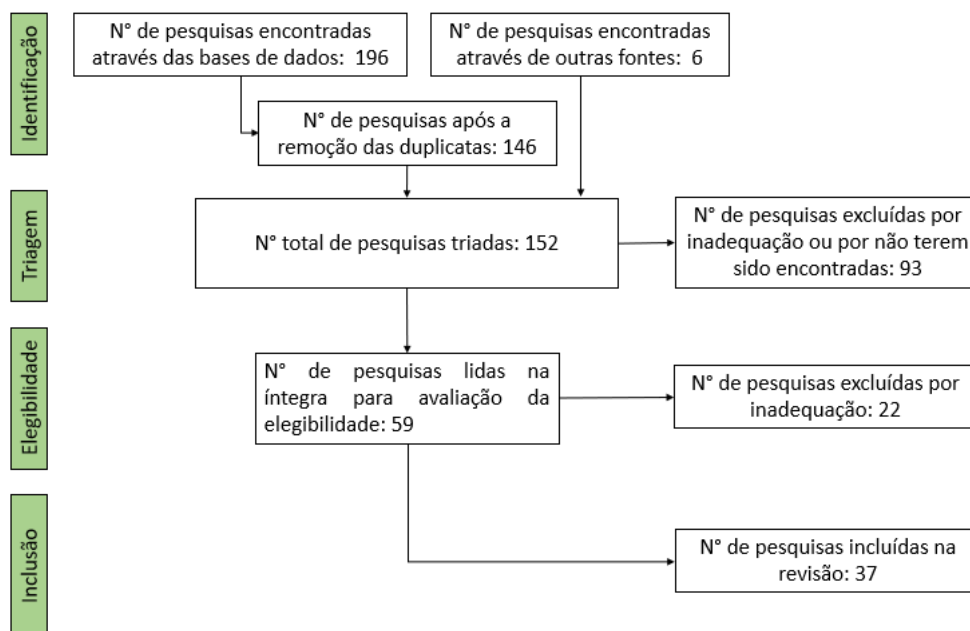


Figura 2. Fluxograma das diferentes fases da revisão sistemática com os seus resultados. *Nota: Adaptada de Moher et al., 2009.*

Vale destacar que ao término de todas as fases do processo de revisão, um total de 165 trabalhos foram descartados. Esse total correspondeu aos artigos repetidos, aos que não puderam ser encontrados e aos que foram excluídos na fase de triagem e elegibilidade. Já o total de trabalhos incluídos foi de 37, o qual, compreendeu as pesquisas que foram selecionadas através das bases de dados e outras seis que foram encontradas ao longo da execução dessa revisão. É importante salientar que algumas pesquisas não tiveram por objetivo principal verificar a influência da recirculação na produção de biogás, no entanto, os dados referentes a isso foram obtidos de forma indireta nos resultados alcançados.

As análises bibliométricas permitiram verificar que, com relação ao período de publicação das pesquisas incluídas na revisão, 2014 e 2017 foram os anos que tiveram o maior número de publicações. Foi verificado também que a respeito dos tipos de trabalhos científicos, as pesquisas

se dividiram em cinco categorias: tese, dissertação, artigo de revista/jornal, artigo de conferência/simpósio e capítulo de livro. Salienta-se que os artigos de revistas/jornais corresponderam a 78.38% do total dos trabalhos encontrados e que esses trabalhos foram oriundos de 19 fontes distintas, tendo o *Jornal Waste Management* sido a fonte que apresentou o maior número de trabalhos.

Os trabalhos selecionados através dessa revisão foram divididos entre dois grupos principais: 1) as pesquisas realizadas em escala laboratorial e 2) as pesquisas desenvolvidas em grande escala. O primeiro grupo correspondeu a um total de 64.86% das pesquisas analisadas, já o segundo grupo teve um percentual de 35.14% (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2. Síntese das pesquisas desenvolvidas em escala laboratorial.

Referência	Idade dos Resíduos (anos)	Tempo de operação do experimento (dias)	A RL aumentou a qualidade ou produção do biogás?
Kong (2010)	Mistura simulada de RSU	240	Sim
Jayasinghe <i>et al.</i> (2011)	30	40	Sim (com adição de enzimas)
Swati <i>et al.</i> (2011)	Resíduos frescos + resíduos com 10 anos	300	Sim
Sandip, Kanchan e Ashok (2012)	Mistura simulada de RSU	270	Sim
Abdallah <i>et al.</i> (2013)	Mistura simulada de RSU	270	Sim
Abdallah <i>et al.</i> (2013)	Mistura simulada de RSU	280	Sim
Fei, Zekkos e Raskin (2013)	0.25	250	-
Yang <i>et al.</i> (2013)	Resíduos frescos	210	Não
Hernández-Berriel <i>et al.</i> 2014	Resíduos frescos	201	Sim (com determinadas taxas de recirculação)
Liu <i>et al.</i> (2014)	Mistura simulada de RSU	210	Sim (com adição de cinzas volantes e escória)
Nair <i>et al.</i> (2014)	Mistura simulada da fração orgânica dos RSU	55	Sim
Xu <i>et al.</i> (2014)	Mistura simulada de RSU	300	Sim (combinada com aeração)
Reddy <i>et al.</i> (2015)	Resíduos frescos	-	Sim
Xu <i>et al.</i> (2015)	Mistura simulada de RSU	300	Sim (combinada com aeração)
Addario e Ruggeri (2016)	5	750	Sim
Frank <i>et al.</i> (2016)	5 a 20	130	Sim (com adição de enzimas)
Ko, Yang e Xu (2016)	Mistura simulada de RSU	158	Sim
Lakshmikanthan e Babu (2017)	Resíduos frescos	370	Sim
Ahmadifar, Sartaj e Abdallah (2016)	Mistura simulada de RSU	160	Sim
Munawar <i>et al.</i> (2019)	10	140	Não
Rasapoor <i>et al.</i> (2020)	15	-	Sim (com adição de enzimas)
Ali <i>et al.</i> (2020)	Resíduos frescos	120	Não
Shi <i>et al.</i> (2020)	Mistura simulada da fração orgânica de RSU	300	Sim
Karimi e Bareither (2021)	Resíduos frescos	220	Sim

Tabela 3. Síntese das pesquisas desenvolvidas em grande escala.

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, Tunísia	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

Taxa e frequência da RL

Um dos objetivos ao se promover a RL é aumentar o teor de umidade dos resíduos, o qual, é considerado um dos principais parâmetros que atuam no processo de degradação em aterros e consequentemente na produção de biogás (Kumar *et al.*, 2011). Para obter uma melhor performance dos aterros que funcionam como biorreatores, busca-se manter um teor de umidade próximo a capacidade de campo (de 35 a 65%). Para isso, determinados líquidos são adicionados à massa de resíduos aterrada como, por exemplo, o próprio lixiviado gerado (EPA, 2021).

No entanto, analisar o teor de umidade em grande escala, não é tão trivial visto que devido à grande heterogeneidade dos resíduos, ocorre um fluxo de umidade preferencial dentro da massa aterrada e que resulta muitas vezes numa distribuição não homogênea dos líquidos presentes (Craig, 2000; Gawande *et al.*, 2003; Onk *et al.*, 2013; Yochim *et al.*, 2013).

Essa falta de homogeneidade na distribuição do teor de umidade pode gerar alguns problemas, tais como insuficiente teor de umidade em algumas partes da massa de resíduos. Fato que pode resultar numa limitada taxa de biodegradação, assim como, pode provocar em outras partes, um excedente de líquidos que pode favorecer, por exemplo, infiltrações indesejáveis, problemas geotécnicos de estabilidade e baixa coleta de gás (Imhoff *et al.*, 2007).

Desta forma, o controle da taxa e frequência da recirculação de lixiviado mostra-se como peça-chave para se obter resultados mais vantajosos no processo de biodegradação e produção de biogás (Karimi e Bareither, 2021). O que pode evitar também, eventuais problemas que possam surgir durante a operação do aterro.

Hernández-Berriel *et al.* (2014) e Karimi e Bareither (2021), analisaram através de experimentos laboratoriais a influência de diferentes taxas de recirculação na degradação dos resíduos e geração de metano. Ao término das análises, Hernández-Berriel *et al.* (2014), concluíram que as taxas de 15 a 80%V estiveram correlacionadas de forma positiva tanto ao processo de biodegradação dos resíduos quanto a geração de metano. Já Karimi e Bareither (2021), observaram que as maiores taxas de recirculação conseguiram produzir metano mais rápido logo após o início da adição de umidade.

Uso de aditivos na RL

O uso de diferentes tipos de aditivos no lixiviado vem sendo investigado a fim de verificar se aliado ao aumento do teor de umidade, poderia resultar numa maior produção e qualidade do biogás gerado. O que poderia estabelecer condições mais favoráveis às atividades dos microorganismos no processo de degradação dos resíduos (Rasapoor *et al.*, 2020; Rasapoor *et al.*, 2021).

Através da Tabela 4 verificam-se alguns dos tipos de aditivos que vem sendo estudados com esta finalidade e os principais resultados alcançados.

Tabela 4. Aditivos utilizados no lixiviado recirculado.

Referência	Tipo de aditivo	Resultados relevantes
Jayasinghe <i>et al.</i> (2011)	peroxidase de lignina	Aumento da produção e da taxa de produção de metano
Jayasinghe <i>et al.</i> (2011)	peroxidase de manganês	Aumento da produção e da taxa de produção de metano
Jayasinghe <i>et al.</i> (2011)	peroxidase de soja	Aumento da produção e da taxa de produção de metano
Yang <i>et al.</i> (2013)	íons de prata	Não houve diferenças significativas na produção de metano
Yang <i>et al.</i> (2013)	nanopartículas de prata metálica	Redução da produção de metano e acúmulo de ácidos
Liu <i>et al.</i> (2014)	cinzas volantes	Aceleração da degradação e estabilização dos resíduos. Aumento da produção e conteúdo de metano
Liu <i>et al.</i> (2014)	escória	Aceleração da degradação e estabilização dos resíduos. Aumento da produção e conteúdo de metano
Frank <i>et al.</i> (2016)	enzimas celulolíticas	Aumento na produção de biogás
Rasapoor <i>et al.</i> (2020)	biochar	Potencial aumento da produção de metano
Rasapoor <i>et al.</i> (2020)	fenazina sintética	Potencial aumento da produção de metano

RL com lixiviado de diferentes idades

O lixiviado em termos de idade normalmente é classificado como novo ou velho, sendo este fator um dos mais importantes para caracterizar sua composição (Peng *et al.*, 2008; Ehrig e Stegmann, 2019). Comparativamente ao lixiviado mais maduro, o lixiviado novo possui alta concentração de demanda química e bioquímica de oxigênio e nitrogênio amoniacal, além de uma alta concentração de ácidos graxos voláteis que resultam, conseqüentemente, em um pH mais baixo. O lixiviado mais maduro, por sua vez, apresenta um pH mais alcalino e concentrações mais baixas de demanda química e bioquímica de oxigênio (Tchobanoglous; Kreith, 2002; Nair *et al.*, 2014).

Nair *et al.* (2014) e Shi *et al.* (2020), conduziram suas pesquisas a fim de avaliar o impacto da mistura de lixiviado de diferentes fases no processo de biodegradação dos resíduos e produção de biogás. Em Nair *et al.* (2014), os autores avaliaram a hipótese que essa mistura poderia aumentar tanto a biodegradação quanto a produção de biogás em aterros.

Segundo Nair *et al.* (2014), essa hipótese se sustenta no fato de que devido a pouca disponibilidade de substrato no lixiviado mais maduro, os microorganismos poderiam ser beneficiados com a chegada de uma maior disponibilidade de substrato trazida pelo lixiviado mais novo. Para os autores, a estratégia de misturar lixiviados de diferentes idades ou recircular apenas lixiviado antigo, poderia resultar numa redução do tempo necessário para alcançar a etapa de alta produção de metano e estabilização dos resíduos.

Os resultados encontrados por Nair *et al.* (2014) mostraram que a mistura de lixiviado jovem e maduro pôde aumentar a produção de biogás, assim como, acelerá-la. Ao fim do experimento conduzido pelos autores, foi verificada uma melhora na produção de biogás que variou de 19-41% dependendo da taxa de mistura que foi realizada. Os melhores resultados corresponderam à operação que utilizou 100% de lixiviado antigo.

Na pesquisa conduzida por Shi *et al.* (2020), entretanto, foram evidenciados resultados um pouco diferentes, já que a mistura de lixiviado em diferentes fases promoveu uma eficiente aceleração da produção de biogás, mas não um aumento da sua quantidade total.

Outras estratégias de aprimoramento da RL

Algumas pesquisas vêm analisando a combinação da RL com outras técnicas a fim de atingir uma melhor degradação dos resíduos aterrados. Como, por exemplo, o uso da aeração, do aquecimento do lixiviado e controle de pH.

Xu *et al.* (2014) verificaram o impacto da aeração e RL em biorreatores híbridos. O experimento foi conduzido comparando dois reatores: um operado com recirculação e aeração temporária e um outro operado apenas com recirculação simples. Os resultados evidenciaram que a aeração temporária pôde melhorar a qualidade do lixiviado, acelerar a fase metanogênica e favorecer a taxa de produção de metano.

Os autores atribuíram os resultados alcançados ao fato da aeração promovida nas camadas superiores terem contribuído para a redução da concentração de lixiviado ácido, o que permitiu que logo após o encerramento da aeração, fosse atingida de forma rápida condições favoráveis a metanogênese.

Xu *et al.* (2015) também analisaram a influência da RL atrelada a uma aeração temporária. Neste experimento os autores utilizaram três reatores: um operado apenas com recirculação e os outros dois operados com recirculação e diferentes taxas de aeração. Os resultados encontrados mostraram que o uso de biorreatores híbridos pode promover uma melhor taxa de degradação, assim como, acelerar a produção de metano. No entanto, os autores ressaltam que a produção de metano pode ser prejudicada caso a aeração seja conduzida em altas frequências, já que devido a decomposição aeróbia pode se ter uma perda orgânica muito grande, fato que não é positivo para os operadores de aterros que buscam o aproveitamento energético.

Outro parâmetro que é controlado nos experimentos que visam uma melhor biodegradação dos resíduos é o pH. Seu aumento ou diminuição pode comprometer a manutenção de determinados grupos de microorganismos, já que algumas espécies conseguem viver apenas dentro de uma variação específica de pH. Um baixo pH, por exemplo, pode resultar no acúmulo de ácidos graxos voláteis e influenciar negativamente a fase metanogênica. Um aumento desse parâmetro, por sua vez, pode resultar na formação de nitrogênio amoniacal (Boe, 2006; Panigrahi e Dubey, 2019).

Kong (2010) analisou os efeitos da recirculação do lixiviado e controle de pH sobre as atividades microbianas durante a degradação dos resíduos. Os resultados alcançados mostraram que em termos de concentração de metano e produção de biogás não foi observada nenhuma diferença significativa entre o reator operado com ajuste de pH e o operado sem ajuste desse parâmetro. Tal fato segundo os próprios autores pode ter sido decorrente do curto período de controle do experimento.

A temperatura é outro importante parâmetro atuante no processo de biodegradação dos resíduos pois afeta diretamente a performance metabólica dos microorganismos envolvidos no processo de digestão anaeróbia. As principais faixas de temperatura na digestão anaeróbia são a mesofílica e a termofílica. Essas faixas possuem como temperatura ótima 35°C e 55°C, respectivamente (Fernández-Rodríguez *et al.*, 2013).

Abdallah *et al.* (2013) analisaram através do uso de dois biorreatores a influência da suplementação de calor ao lixiviado recirculado. Os resultados obtidos pelos autores evidenciaram uma maior taxa de degradação e uma melhor atividade metanogênica, que levou a uma maior produção de metano no biorreator com lixiviado aquecido. O biorreator operado com suplementação de calor teve um aumento médio de 7°C no lixiviado recirculado, enquanto o outro foi operado em temperatura ambiente ($21 \pm 1^\circ\text{C}$).

Os desafios da RL na produção e qualidade do biogás

Apesar da maioria das pesquisas analisadas nesse trabalho ter identificado efeitos positivos quanto ao uso da RL na degradação dos resíduos e produção de biogás, alguns experimentos mostraram resultados não muito promissores, seja pela baixa produção de biogás ou pelo acúmulo de compostos tóxicos.

Na pesquisa desenvolvida por Ali *et al.* (2020), os autores verificaram que a prática da RL não gerou efeitos significativos na taxa de degradação dos resíduos e nem na produção de biogás. Com relação ao teor de metano, foi verificado também que não houve uma influência significativa da RL na qualidade do biogás gerado, tendo o biorreator operado sem recirculação atingido um pico de 58% e o biorreator operado com recirculação um pico de 59%. Os autores, sugeriram que o acúmulo de compostos tóxicos pode ter atuado inibindo o crescimento de microorganismos no reator que operava com recirculação.

No experimento conduzido por Munawar *et al.* (2019), os autores também observaram efeitos insatisfatórios na produção de biogás com a prática da recirculação. Ao operarem por 140 dias dois reatores, com e sem RL, observaram que a maior concentração de metano foi verificada no reator sem recirculação de lixiviado, apresentando um percentual 11.2% maior que o reator operado com recirculação. A tendência de crescimento da produção total de gás foi muito similar em ambos os reatores. Os resultados também mostraram uma maior concentração de metais pesados e nitrogênio amoniacal no reator operado com recirculação, fato que pode ter impactado negativamente a produção de metano nesse reator.

Tais problemas em experimentos de grande escala também foram observados, os resultados obtidos através da pesquisa desenvolvida por Chamem *et al.*, (2020) 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 metano) em comparação com as partes do aterro que não fizeram uso da recirculação.

Para os autores, os baixos teores de metano 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 à prática da RL em sim, já que a combinação desses fatores poderia contribuir para uma diminuição da diluição dessas substâncias.

Em Chung *et al.* (2015), foi verificado 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 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.

Com relação aos problemas de acúmulo de compostos tóxicos em biorreatores operados com RL conforme relatado acima, Abdallah *et al.* (2013) verificaram em seu experimento em escala laboratorial, que é possível, através de um sistema de controle computacional, resolver determinados problemas referentes à toxicidade em um esquema de circuito fechado.

No caso do experimento conduzido por Abdallah *et al.* (2013), o desafio foi resolver os problemas de toxicidade relativos à elevadas concentrações de ácidos graxos voláteis e amônia.

O sistema desenvolvido pelos autores, trabalhou basicamente com os dados de monitoramento, acompanhando o progresso da estabilização do biorreator e manipulando, quando preciso, as características do lixiviado. Favorecendo assim, as condições necessárias para o bom desenvolvimento da atividade metanogênica do biorreator, assim como, sua estabilização.

Apesar dos resultados positivos dessa estratégia de controle, é importante destacar que em grande escala, essa manipulação tende a ser muito mais complexa e pode não atingir os resultados desejados devido às inúmeras interferências de fatores atuantes num sistema aberto.

Outra pesquisa que apresentou resultados pouco satisfatórios com o uso da recirculação na produção de biogás em grande escala foi Andrade (2014). A autora analisou uma macrocélula de um aterro brasileiro que recebeu aproximadamente 4.658.145,86 m³ de RSU 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 RL (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 se mantido uma estabilização das vazões de metano 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 acompanhada posteriormente por Santos (2017).

Todavia, os resultados alcançados por Santos (2017) por meio de um período maior de monitoramento também não evidenciaram efeitos significativos na produção de biogás. O autor também sugeriu que o estágio avançado de decomposição dos resíduos pode ter contribuído para a baixa produção de gás, além das emissões fugitivas e do processo de oxidação causado pela entrada de gás atmosférico por meio das trincas presentes na camada de cobertura.

No Brasil, poucos aterros utilizam a RL como meio de aproveitamento energético (SNIS, 2021). Normalmente a técnica é executada para reduzir os altos custos atrelados ao tratamento do lixiviado. De acordo com Ferreira *et al.* (2001), o uso da técnica no Brasil, devido às condições climatológicas presentes, favorece a redução dos grandes volumes de lixiviado gerado devido à evaporação. No entanto, vale salientar que devido à grande dimensão do país e suas características ambientais específicas, para algumas regiões que possuem um alto índice pluviométrico (Ex: Pará), o uso da RL pode não ser a técnica mais recomendada para gerenciar o lixiviado em aterros sanitários.

Conclusão

Por meio da pergunta de pesquisa “qual a influência da recirculação de lixiviado na qualidade e/ou produção do biogás gerado em aterros sanitários?” uma revisão sistemática foi conduzida.

Por meio das pesquisas analisadas foi verificado que várias estratégias vêm sendo utilizadas na prática da recirculação de lixiviado a fim de promover uma melhor e mais rápida biodegradação dos resíduos, assim como, uma maior produção e qualidade do biogás gerado, tais como: uso de aditivos, mistura de lixiviado de diferentes idades, lixiviado aquecido e operações híbridas.

Apesar da maioria das pesquisas analisadas terem identificado efeitos positivos quanto ao uso da recirculação de lixiviado na degradação dos resíduos e produção de biogás, alguns experimentos mostraram resultados não muito promissores, seja pela baixa produção de biogás ou pelo acúmulo de compostos tóxicos.

A partir dos resultados alcançados foi verificado que devido as diferentes formas que os experimentos laboratoriais foram conduzidos (tempo de monitoramento, idade dos resíduos, método de recirculação, tipo de lixiviado etc) e também as diferentes condições verificadas em grande escala com relação às características específicas das massas de resíduos analisadas e até mesmo das condições ambientais locais, é inviável estabelecer comparações e generalizar soluções.

Vale destacar também que os dados relativos à produção de biogás em grande escala podem ser influenciados não apenas pelos fatores relacionados aos processos de biodegradação, mas também por determinados aspectos operacionais e de projeto. Assim, a influência da recirculação de lixiviado na produção de biogás, pode ser interpretada de forma errada muitas vezes por uma má qualidade e ineficiência do sistema de captura de gás, por exemplo.

Por fim, é importante salientar que em muitos países devido à consolidação de práticas de tratamento e valorização dos resíduos orgânicos, a disposição desse tipo de resíduo em aterros é baixa ou nula. Desta forma, tomando como exemplo a Europa, que diminuiu consideravelmente a disposição de resíduos orgânicos em aterros nos últimos anos, possivelmente a prática de recirculação de lixiviado seja viável a longo prazo apenas em biodigestores ou em países em desenvolvimento que ainda possuam grandes taxas de resíduos orgânicos dispostos em aterros.

Referencias bibliográficas

- Abdallah, M., Kennedy, K., Narbaitz, R., Warith, M., Sartaj, M. (2013) Influence of supplemental heat addition on performance of pilot-scale bioreactor landfills. *Bioprocess and biosystems engineering*, **37**(2), 301–310.
- Abdallah, M., Kennedy, K., Narbaitz, R., Warith, M. (2013) A new computational control strategy for leachate management in bioreactor landfills. *Environmental Technology*, **35**(3), 300–312.
- Ahmadifar, M., Sartaj, M., Abdallah, M. (2015) Investigating the performance of aerobic, semi-aerobic, and anaerobic bioreactor landfills for msw management in developing countries, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **18**(4), 703–714.
- Ali, Q.H., Sugihen, S.R., Munawar, E., Adisalamun. (2020) The effect of leachate recirculation on the greenhouse gases emission from municipal solid waste (MSW) landfill in tropical climate region, 26th Regional Symposium on Chemical Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Andrade, S.F. (2014) Aplicação da técnica de recirculação de chorume em aterros tropicais: estudo de caso do Aterro Sanitário Metropolitano Centro (ASMC), Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental), Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 173 pp.
- Beaven R., Knox, K., Powrie W. (2009) UK Environment Agency, *A technical assessment of leachate recirculation*. Report: SC030144/R6, 71 pp.
- Benabdallah-el-Hadj, T., Astals, S., Gali, A., Mace. S., Mata-Alvarez, J. (2009) Ammonia influence in anaerobic digestion of ofmsw. *Water Science and Technology*, **59**(6), 1153–1158.
- Berge, N.D., Reinhart, D.R., Dietz, J., Townsend, T. (2006) In situ ammonia removal in bioreactor landfill leachate, *Waste Management*, **26**(4), 334–343.
- Białowiec, A., Siudak, M., Jakubowski, B., Wisniewski, D. (2017) The influence of leachate recirculation on biogas production in a landfill bioreactor, *Environment Protection Engineering*, **43**(1).
- Bilgili, M.S., Demir, A., Özkaya, B. (2007) Influence of leachate recirculation on aerobic and anaerobic decomposition of solid wastes, *Journal of Hazardous Materials*, **143**(1-2), 177–183.
- Boe, K. (2006) Online monitoring and control of the biogas process, Tese (Doutorado), Institute of Environment Resources, Technical University of Denmark, Dinamarca, 47 pp.
- 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*, **181**(1-3), 962–968.

- Castro, M.C.A.A., Moreira, C.A., Maintiguer, S.I., Junior, R.P. (2017) Influencia 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*, São Paulo, Brasil.
- 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*, **38**(10), 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*, **285**, 436–444.
- Cossu, R. (2019) Multibarrier principles in landfilling. In: Cossu, R., Stegmann, R. (Eds.), *Solid Waste Landfilling: Concepts, Processes, Technologies*, Elsevier, 53–71.
- Craig, E.P. (2000) Effects of moisture content in solid waste landfills, Tese de mestrado (Master of Science in Engineering and Environmental Management), Faculty of the Graduate School of Engineering and Management of the Air Force Institute of Technology, United States, 103 pp.
- Di-Addario, M., Ruggeri, B. (2016) Landfill bioreactor technology for waste management. In: Karthikeyan, O.P., Heimann, K., Muthu, S.S. (Eds.), *Recycling of Solid Waste for Biofuels and Bio-chemicals*, Springer, Singapore, 211–235.
- EPA, Environmental Protection Agency (2016) LFG Energy Project Development Handbook, Chapter 1 - Landfill Gas Energy Basics. Acesso em 30 de novembro de 2021, disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-11/documents/pdh_full.pdf
- EPA, Environmental Protection Agency (2021) Bioreactor Landfills. Acesso em 22 de agosto de 2021, disponível em: <https://www.epa.gov/landfills/bioreactor-landfills#whatis>
- Ehrig, H.J., Stegmann, R. (2019) Leachate quality. In: Cossu, R., Stegmann, R. (Eds.), *Solid Waste Landfilling: Concepts, Processes, Technologies*, Elsevier, 511–539.
- European-Comission (2016) Optimal use of biogas from waste streams: An assessment of the potential of biogas from digestion in the EU beyond 2020. Acesso em 26 de Janeiro de 2022, disponível em: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ce_delft_3g84_biogas_beyond_2020_final_report.pdf
- Fei, X., Zekkos, D., Raskin, L. (2013) A laboratory landfill simulator for physical, geotechnical, chemical and microbial characterization of solid waste biodegradation processes, *Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics Symposium*, Turin, Italy.
- Ferreira, J.A., Giordano, G., Ritter, Elisabeth., Rosso, T.C.A., Campos, J.C., Lima, P.Z.M. (2001) Uma revisão das técnicas de tratamento de chorume e a realidade do estado do rio de janeiro, *21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Brasil.
- Frank, R.R., Davies, S.T., Wagland, R., Villa, C., Trois, Coulon, F. (2016) Evaluating leachate recirculation with cellulase addition to enhance waste biostabilisation and landfill gas production, *Waste Management*, **55**, 61-70.
- Fernández-Rodríguez, J., Pérez, M., Romero, L.I. (2013) Comparison of mesophilic and thermophilic dry anaerobic digestion of ofmsw: Kinetic analysis, *Chemical Engineering Journal*, **232**, 59–64.
- Gawande, N.A., Reinhart, D.R., Thomas, P.A., McCreanor, P.T., Townsend, T. (2003) Municipal solid waste in situ moisture content measurement using an electrical resistance sensor, *Waste Management*, **23**(7), 667–674.
- Hernández-Berriel, M.C., Mañón-Salas, M.C., Buenrostro-Delgado, O., Sánchez-Yáñez, J.M., Márquez-Benavides, L. (2014) Landfill leachate recirculation. Part I: Solid waste degradation and biogas production. *Environmental Engineering & Management Journal*, **13**(10), 2687-2695.
- Imhoff, P.T., Reinhart, D.R., Englund, M., Guerin, R., Gawande, N., Han, B., Jonnalagadda, S., Townsend, T., Yazdani, R. (2007) Review of state of the art methods for measuring water in landfills, *Waste Management*, **27**(6), 729–745.
- IPCC, The Intergovernmental Panel on Climate Change (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* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.

- Jayasinghe, P.A., Hettiaratchi, J.P.A., Mehrotra, A.K., Kumar, S. (2011) Effect of enzyme additions on methane production and lignin degradation of landfilled sample of municipal solid waste, *Bioresource Technology*, **102**(7), 4633–4637.
- Karimi, S., Bareither, C.A. (2021) The influence of moisture enhancement on solid waste biodegradation, *Waste Management*, **123**, 131–141.
- Kayhanian, M. (1999) Ammonia inhibition in high-solids biogasification: an overview and practical solutions, *Environmental Technology*, **20**(4), 355–365.
- Knox, K., Beave, R.P., Cossu, R. (2019) Leachate recirculation: History, objectives, and conceptual design. In: Cossu, R., Stegmann, R. (Eds.), *Solid Waste Landfilling: Concepts, Processes, Technologies*, Elsevier, 691–701.
- Ko, J.H., Yang, F., Xu, Q. (2016) The impact of compaction and leachate recirculation on waste degradation in simulated landfills, *Bioresource technology*, **211**, 72–79.
- Kong, I.C. (2010) Bioassessments of anaerobically decomposing organic refuse in laboratory lysimeters with and without leachate recycling and pH adjustment, *Waste Management & Research*, **28**(2), 141–148.
- Kumar, S., Chiemchaisri, C., Mudhoo, A. (2011) Bioreactor landfill technology in municipal solid waste treatment: An overview. *Critical Reviews in Biotechnology*, **31**(1), 77–97.
- Lakshmikanthan, P., Babu, G.L.S. (2017) Performance evaluation of the bioreactor landfill in treatment and stabilisation of mechanically biologically treated municipal solid waste, *Waste Management & Research*, **35**(3), 285–293.
- Liu, W., Liu, Y., Zhu, B., Li, X. (2014) Enhanced biogas production from a stimulated landfill bioreactor for the co-disposal of municipal solid waste and coal wastes. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **36**(11), 1186–1194.
- 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*. **2018**(9056561), 1-7. <https://doi.org/10.1155/2018/9056561>
- Manzur, S.R., Hossain, M.S., Kemler, V., Dugger, D. (2012) Performance of horizontal gas collection system in an elr landfill. GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering, Oakland, California.
- Martildes, J.A.L., Florêncio, P.R.C., Silva, A.F., Paiva, W., Santos, L.L., Menezes, S.D.S., Barreto, C.A.A., Bezerra, D.E. (2020) Avaliação do método de tratamento de lixiviado do aterro sanitário de Campina Grande-PB, Brasil, *Brazilian Journal of Development*, **6**(4), 20365-20375.
- Martins, C.L., Júnior, A.B.C., Costa, R.H.R. Desempenho de sistema de tratamento de lixiviado de aterro sanitário com recirculação do efluente, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **15**(4), 401-410.
- Mehrdad, S.M., Abbasi, M., Yeganeh, B., Kamalan, H. (2021) Prediction of methane emission from landfills using machine learning models, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Wiley Online Library. DOI: 10.1002/ep.13629.
- Munawar, E., Emalya, N., Hayati, A.P., Yunardi, Hakim, L. (2019) Analysis of the potential of landfill gas as an alternative for electrical energy source, *The 25th Regional Symposium on Chemical Engineering*, Makati, Philippines.
- Nair, A., Sartaj, M., Kennedy, K., Coelho, N.M.G. (2014) Enhancing biogas production from anaerobic biodegradation of the organic fraction of municipal solid waste through leachate blending and recirculation, *Waste management & research*, **32**(10), 939–946.
- 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*, **10**, 111–116.
- Oonk, H., Van-Zomeran, A., Rees-White, T.C., Beaven, R.P., Hoekstra, N., Luning, L., Hannen, M., Hermkes, H., Woelders, H. (2013) Enhanced biodegradation at the landgraaf bioreactor test-cell, *Waste Management*, **33**(10), 2048–2060.
- Panigrahi, S., dubey, B.K. (2019) A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste, *Renewable Energy*, **143**, 779–797.
- Pazoki, M., Ghasemzadeh, R. (2020) *Municipal Landfill Leachate Management*, 1a ed., Springer, Cham, Iran, 237 pp.

- Peng, Y., Zhang, S., Zeng, W., Zheng, S., Mino, T., Satoh, H. (2008) Organic removal by denitrification and methanogenesis and nitrogen removal by nitrification from landfill leachate, *Water Research*, **42**(4-5), 883–892.
- Rasapoor, M., Younga, B., Brarb, R., Sarmah, A., Zhuang, W.Q., Baroutiana, S. (2020) Recognizing the challenges of anaerobic digestion: Critical steps toward improving biogas generation, *Fuel*, **261**, 116497.
- 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*, **283**, 118932, 2021.
- Reddy, K.R., Hettiarachchi, H., Giri, R.K., Gangathulasi, J. (2015) Effects of degradation on geotechnical properties of municipal solid waste from orchard hills landfill, usa. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, Springer, **1**(3), 1–14.
- Reinhart, D.R., Al-Yousfi, A.B. (1996). The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics. *Waste Management & Research*, **14**(4), 337-346.
- Sandip, T.M., Kanchan, C.K., Ashok, H.B. (2012) Enhancement of methane production and bio-stabilisation of municipal solid waste in anaerobic bioreactor landfill, *Bioresource Technology*, **110**, 10–17.
- Santos, Á.C. (2017) Produção de Metano em Aterro Sanitário: Influência das Técnicas Operacionais no Aterro Metropolitano em Salvador–Ba, Tese (Doutorado em Ciências, Energia e Ambiente), Programa de Pós-Graduação em Ciências, Energia e Ambiente, Centro Interdisciplinar de Energia da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 263 pp.
- Scharff, H. (2014) Landfill reduction experience in the Netherlands, *Waste Management*, **34**(11), 2218–2224.
- Sethi, S., Kothiyal, N.C., Nema, A.K. (2013) Stabilisation of municipal solid waste in bioreactor landfills—an overview. *International Journal of Environment and Pollution*, **51**(1-2), 57–78.
- Silva, A.F., Martildes, J.A.L., Cezário, J.A., Silva, T.J.R.D., Nascimento, M.B., Medeiros, J.L.S., Paiva, W. (2020) Técnicas utilizadas para o tratamento do lixiviado gerado por aterros sanitários, *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, **7**(17), 1231-1239.
- Shi, R., Han, Z., Li, H., Wang, S., Guo, N., Zhang, Y. (2020) Carbon emission and energy potential of a novel spatiotemporally anaerobic/semi-aerobic bioreactor for domestic waste treatment. *Waste Management*, **114**, 115–123.
- SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2021) *Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Visão Geral ano de referência 2020*, Brasília, 58pp.
- Speight, J.G. (2018) *Natural gas: a basic handbook*, 2a ed., Gulf Professional Publishing, USA, 462pp.
- Sprott, G.D., Patel, G.B. (1986) Ammonia toxicity in pure cultures of methanogenic bacteria, *Systematic and Applied Microbiology*, **7**(2-3), 358–363.
- Swati, M., Karthikeyan, O.P., Joseph, K., Visvanathan, C., Nagendran, R. (2011) Pilot-scale simulation of landfill bioreactor and controlled dumping of fresh and partially stabilized municipal solid waste in a tropical developing country. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, **15**(4), 321–330.
- Tchobanoglous, G., Kreith, F. (2002) *Handbook of Solid Waste Management*, Second Ed.: Landfilling. formation, composition and management of leachate, The McGraw-Hill Companies, 834 pp.
- The World Bank (2018) *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. Acesso em 03 de setembro de 2021, disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Top, S., Akkaya, G.K., Demir, A., Yildiz, S., Balahorli, V., Bilgili, M.S. (2019) Investigation of solid waste characteristics in field-scale landfill test cells, *International Journal of Environmental Research*, **13**, 829–842.
- Townsend, T.G., Powell, J., Jain, P., Xu, Q., Tolaymat, T., Reinhart, D. (2015) The landfill's role in sustainable waste management. In: Townsend, T.G. (Ed.) *Sustainable practices for landfill design and operation*, Springer, New York, 1–12.
- Townsend, T.G., Powell, J., Jain, P., Xu, Q., Tolaymat, T., Reinhart, D. (2015). Waste and landfill fundamentals. In: Townsend, T.G. (Ed.) *Sustainable practices for landfill design and operation*, Springer, New York, 13–34.

- van-Elk, A.G.H.P., (2007) Mecanismo de Desenvolvimento Limpo Aplicados à Resíduos Sólidos: Redução de Emissões na Disposição Final. Acesso em 03 de março de 2021, disponível em: https://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/03-aterro_md1_1.pdf
- van-Elk, A.G.H.P., D'Oliveira, P. M.S., Giordano, G., Andrade, R.C. (2022) Potencial poluidor da disposição final de resíduos sólidos nas águas da bacia hidrográfica da Baía de Guanabara – RJ, *Engenharia Sanitária Ambiental*, **27**(1), 195-203.
- Xu, Q., Jin, X., Ma, Z., Tao, H., Ko, J.H. (2014) Methane production in simulated hybrid bioreactor landfill, *Bioresource Technology*, **168**, 92–96.
- Xu, Q., Tian, Y., Wang, S., Ko, J.H. (2015) A comparative study of leachate quality and biogas generation in simulated anaerobic and hybrid bioreactors. *Waste Management*, **41**, 94–100.
- Yang, Y., Gajaraj, S., Wall, J., Hu, Z. (2013) A comparison of nanosilver and silver ion effects on bioreactor landfill operations and methanogenic population dynamics, *Water Research*, **47**(10), 3422–3430.
- Yochim, A., Richard, G.Z., Mcbean, E.A., Endres, A.L. (2013) Estimating water content in an active landfill with the aid of gpr, *Waste Management*, **33**(10), 2015–2028.
- Zhan, L.T., Xu, H., Chen, Y.M., Lu, F., Lan, J.W., Shao, L.M., Lin, W.A., He, P.J. (2017) Biochemical, hydrological and mechanical behaviors of high food waste content msw landfill: preliminary findings from a large-scale experiment, *Waste Management*, **63**, 27–40.