

**EFEITO DA OZONIZAÇÃO NA TOXICIDADE DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO
AVALIADO POR BIOENSAIO COM *ALLIUM CEPA***

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.031-008>

Rubiane Buchweitz Fick

Graduanda em Eng. Ambiental e Sanitária
Universidade Federal de Pelotas
E-mail: rubianebfick1@gmail.com
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7762072334737480>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2131-4952>

Ana Clara Marins Mendes

Graduanda em Eng. Ambiental e Sanitária
Universidade Federal de Pelotas
E-mail: anaclaramarinsmendes@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9580-7111>

Jéssica Torres dos Santos

Eng. Ambiental e Sanitarista, Doutoranda em Recursos Hídricos
Universidade Federal de Pelotas
E-mail: jessica_jesantos@hotmail.com
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8535897129145784>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6544-2286>

Rafael Miritz Bartz

Eng. Agrícola, Mestrando em Recursos Hídricos
Universidade Federal de Pelotas
E-mail: rafaelmiritz@gmail.com
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3237020633105128>
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8732-6574>

Jéssica Etcheverria do Prado Hartwig

Gestora ambiental, Doutoranda em Ciências Ambientais
Universidade Federal de Pelotas
E-mail: jessicaetcheverriahartwig@gmail.com
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/8576763999509711>
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9296-0904>

Josiane Pinheiro Farias

Eng. Ambiental e Sanitária, Doutoranda em Ciências e Eng. dos Materiais
Universidade Federal de Pelotas
E-mail: jo.anetst@yahoo.com.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9548569790288183>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8933-4984>

Marcos Antonio da Silva

Químico Industrial, Mestrando em Ciência e Eng. dos Materiais
Universidade Federal de Pelotas
E-mail: marcos.antonio.silva.padua@gmail.com
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8534572990651848>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5372-1168>

Gustavo Luís Calegari

Eng. Civil, Mestrando em Ciências Ambientais
Universidade Federal de Pelotas
E-mail: gustavocalegari@gmail.com
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5052053708370102>
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7050-3129>

Kelian Ramire Waskow Grellert

Graduanda em Eng. Ambiental e Sanitária
Universidade Federal de Pelotas
E-mail: kelianrwwg@gmail.com
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9304919618244781>
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7930-3281>

Ezequiel Tins

Graduando em Eng. Civil
Universidade Federal de Pelotas
E-mail: ezequieltecentins@gmail.com
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/4646349893574828>
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4850-6377>

Luís Eduardo Tavares Martins

Gestor ambiental, Mestrando em Ciências Ambientais
Universidade Federal de Pelotas
E-mail: luiseduardotm2403@gmail.com
Lattes: <https://lattes.cnpq.br/4804889714097522>
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6288-2412>

Luiza Beatriz Gamboa Araújo Morselli

Eng. Civil, Dra. em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Federal de Pelotas
E-mail: luiza.morselli@ufpel.edu.br
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2217724221930510>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1703-7710>

Thays França Afonso

Eng. Geóloga, Dra. em Ciência e Engenharia dos Materiais
Universidade Federal de Pelotas
E-mail: thaysfrancaafonso@gmail.com
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4434140906417586>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7803-7319>

Robson Andreazza

Eng. Agrônomo, Dr. em Solos

Universidade Federal de Pelotas

E-mail: robsonandreazza@yahoo.com.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5706766977817721>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9211-9903>

Maurizio Silveira Quadro

Eng. Agrícola, Dr. em Solos

Universidade Federal de Pelotas

E-mail: mausq@hotmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1749935262841216>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8236-7479>

RESUMO

O lixiviado, também conhecido como chorume ou percolado, é um efluente gerado em aterros sanitários, caracterizado por elevada carga orgânica, coloração escura e alta complexidade química, podendo causar contaminação do solo e dos recursos hídricos quando não submetido a tratamento adequado. Nesse cenário, a ozonização surge como alternativa tecnológica promissora, por empregar o ozônio (O_3) como agente oxidante capaz de degradar compostos orgânicos recalcitrantes. Entretanto, a aplicação do processo pode favorecer a formação de subprodutos com potencial toxicidade residual, tornando indispensável a avaliação biológica do efluente tratado. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a eficiência da ozonização na redução da toxicidade do lixiviado de aterro sanitário por meio de ensaios de fitotoxicidade com sementes de *Allium cepa*, utilizando o Índice de Germinação (IG%) como indicador de resposta biológica. O lixiviado foi coletado por amostragem simples em aterro sanitário localizado no município de Candiota/RS, sul do Brasil, e submetido a doses de 75, 150 e 300 mg O_3 L⁻¹. As amostras brutas e tratadas foram avaliadas nas diluições de 1:10, 1:50 e 1:100 (v/v), além do controle com água destilada. Os resultados demonstraram que a ozonização promoveu redução significativa da fitotoxicidade, destacando-se a dose de 150 mg O_3 L⁻¹ associada à diluição 1:50 (v/v), que apresentou o maior índice de germinação. Os achados evidenciam que a otimização da dose de ozônio e da diluição do lixiviado é fundamental para maximizar a eficiência do tratamento e garantir maior segurança ambiental do efluente tratado.

Palavras-chave: Lixiviado; Ozonização; Fitotoxicidade; *Allium cepa*.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças nos padrões de consumo, associadas ao crescimento populacional e à urbanização acelerada, têm intensificado a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Esse cenário amplia os desafios

relacionados ao gerenciamento e à destinação desses resíduos, uma vez que o descarte inadequado pode provocar impactos significativos ao meio ambiente e à saúde pública (Kaza *et al.*, 2018). Nesse contexto, os aterros sanitários destacam-se como alternativa tecnicamente adequada para a disposição final dos RSU, por serem estruturados com sistemas de impermeabilização, coleta e drenagem de lixiviado, além do manejo e controle do gás de aterro (Youcai; Ziyang, 2017).

O aterro sanitário representa uma alternativa mais acessível em relação à incineração ou à compostagem e tem por finalidade destinar os resíduos ao solo de maneira segura, evitando prejuízos à saúde pública e reduzindo ao máximo os impactos ambientais negativos (Ma *et al.*, 2024). Para atender a esse propósito, o monitoramento torna-se fundamental tanto durante as etapas de construção e operação do aterro quanto após seu fechamento. Aspectos como o gerenciamento de lixiviado, possíveis vazamentos no sistema de revestimento, qualidade da água subterrânea, migração de gases do aterro e estabilidade estrutural são fatores cruciais a serem avaliados (Meegoda; Hettiarachchi; Hettiaratchi, 2016).

O lixiviado de aterro sanitário, também conhecido como percolato ou chorume, é um líquido escuro, viscoso, com elevada turbidez e odor intenso (Scandelai; Martins; De Syllos; Tavares, 2025). Esse efluente pode apresentar elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal, cloretos, matéria orgânica e compostos de difícil degradação, como substâncias húmicas, além de, ocasionalmente, metais (Kawahigashi *et al.*, 2014). Quando não tratado adequadamente, pode causar sérios danos ao meio ambiente, incluindo a contaminação do solo e dos lençóis freáticos (Barbosa; Rocha, 2023).

O tratamento do chorume de aterro é um desafio técnico que desempenha um papel essencial na gestão ambiental e na proteção da saúde pública (Nath; Debnath, 2022). Esse processo é influenciado por diversos fatores, como a idade do aterro, os tipos de resíduos depositados, as condições climáticas locais e as tecnologias operacionais utilizadas no gerenciamento do aterro (Mor; Ravindra, 2023). Sendo assim, diversas técnicas de tratamento têm sido desenvolvidas atualmente para a remoção de contaminantes tóxicos presentes no lixiviado, visando atender aos padrões regulatórios de descarga, que se tornam cada vez mais restritivos (Abdelfattah; El-Shamy, 2024).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, estabelece a necessidade de um gerenciamento adequado do chorume, enfatizando a importância de seu tratamento e destinação ambientalmente responsável (Galavote *et al.*, 2022). Dentre os principais métodos de tratamento, destacam-se os biológicos, que podem ser aeróbios ou anaeróbios, e os físico-químicos (Gomes; Schoenell, 2018). Entre essas opções, os tratamentos biológicos são os mais utilizados, principalmente devido ao menor custo operacional.

Além do tratamento biológico aeróbio ou anaeróbio realizado em Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs), outras alternativas para o tratamento do lixiviado incluem a recirculação interna no próprio aterro, a utilização de reatores biológicos em bateladas sequenciais e diferentes métodos físico-

químicos, como flotação, coagulação, adsorção, borbulhamento, precipitação, troca iônica e oxidação química (Abbas *et al.*, 2009).

Gautam, Kumar e Lokhandwala (2019) também apontam os Processos Oxidativos Avançados (POAs) como um processo promissor e eficaz para o tratamento de chorume de aterros sanitários de resíduos perigosos, reduzindo a demanda química de oxigênio (DQO) em até 60% e o teor de metais em 70%-90%. Configurando-se como alternativa promissora para aumentar a eficiência no tratamento de lixiviados complexos e ampliar a biodegradabilidade do efluente. No entanto, a eficiência do tratamento depende do tipo de POA selecionado, dos poluentes alvo e das condições operacionais (Deng; Zhao, 2015).

Os POAs baseiam-se na geração *in situ* de espécies altamente reativas, especialmente radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), cuja elevada constante de oxidação permite a degradação de compostos orgânicos persistentes e de baixa biodegradabilidade. A formação dessas espécies pode ocorrer por meio da combinação de ozônio com peróxido de hidrogênio, radiação UV ou sistemas catalíticos, ampliando a capacidade de ruptura de estruturas aromáticas e macromoléculas húmicas frequentemente presentes em lixiviados (Pandis *et al.*, 2022). Segundo Bezerra (2025), a aplicação dos POAs, tanto em escala laboratorial quanto industrial, tem se mostrado uma alternativa promissora para o tratamento de efluentes, permitindo uma remoção mais eficiente de micropoluentes por meio da oxidação desses compostos em produtos de menor toxicidade.

O ozônio (O_3) é reconhecido como agente oxidante altamente eficiente, amplamente utilizado em processos de ozonização para a oxidação direta de poluentes (Tripathi; Hussain, 2022). Essa tecnologia tem se mostrado eficaz na remoção de cor, odor e microrganismos do chorume de aterros, além de atuar na degradação de compostos orgânicos específicos (Yang *et al.*, 2021a). O mecanismo de oxidação direta do ozônio permite reações rápidas, o que o torna uma alternativa relevante para aumentar a biodegradabilidade de compostos recalcitrantes presentes no lixiviado (Yang *et al.*, 2021b). Estudos indicam que a ozonização pode alcançar remoções de 80%–90% da cor e 70%–85% da DQO, dependendo das condições do processo.

A eficiência do método é influenciada por fatores como a dosagem de ozônio, o tempo de contato e a qualidade inicial da água a ser tratada. Suas principais vantagens incluem a remoção eficaz de cor e odor, sua capacidade desinfetante e a ausência de geração de lodo residual (Hussain *et al.*, 2022). Contudo, o processo possui limitações, como o alto consumo de energia necessário para a geração de gás ozônio e a possibilidade de formação de subprodutos durante a oxidação de determinados poluentes (Wang e Chen, 2020). Apesar dessas desvantagens, a ozonização permanece como uma opção preferencial para o tratamento de chorume em aplicações específicas, especialmente para poluentes que respondem de forma eficaz à oxidação pelo ozônio.

Embora a ozonização seja amplamente reconhecida pela elevada eficiência na remoção de cor e matéria orgânica em lixiviados, a oxidação parcial de compostos recalcitrantes pode resultar na formação de intermediários potencialmente mais tóxicos do que os precursores originais (Pulicharla, 2020). Nesse sentido, a simples redução de parâmetros físico-químicos, como DQO ou cor, não necessariamente reflete melhoria ambiental do efluente tratado. Ainda são limitados os estudos que correlacionam diferentes doses de ozônio com a resposta biológica direta em bioindicadores vegetais sensíveis, especialmente no contexto de lixiviados de aterros sanitários. Dessa forma, este estudo investigou a influência da dosagem de ozônio na toxicidade residual do lixiviado, utilizando sementes de *Allium cepa* como organismo teste e o Índice de Germinação (IG%) como indicador integrado de efeito fitotóxico, buscando contribuir para a avaliação ambiental mais abrangente da eficiência do processo.

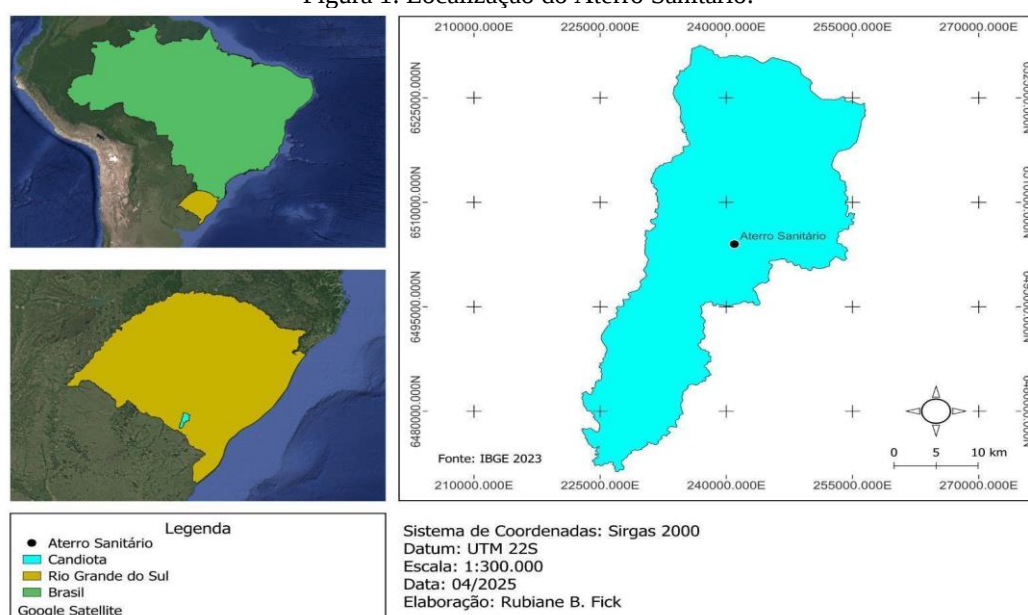
2 METODOLOGIA

O estudo experimental foi conduzido no Laboratório de Análise de Águas e Efluentes, localizado no Centro de Engenharias (CEng) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

2.1 LOCALIZAÇÃO

O lixiviado utilizado nos experimentos foi coletado em aterro sanitário localizado no município de Candiota-RS (Figura 1). O empreendimento recebe aproximadamente 700 toneladas diárias de RSU provenientes de 20 municípios da região Sul do estado, tendo sido implantado em 2011 e sendo atualmente gerenciado por empresa privada.

Figura 1. Localização do Aterro Sanitário.



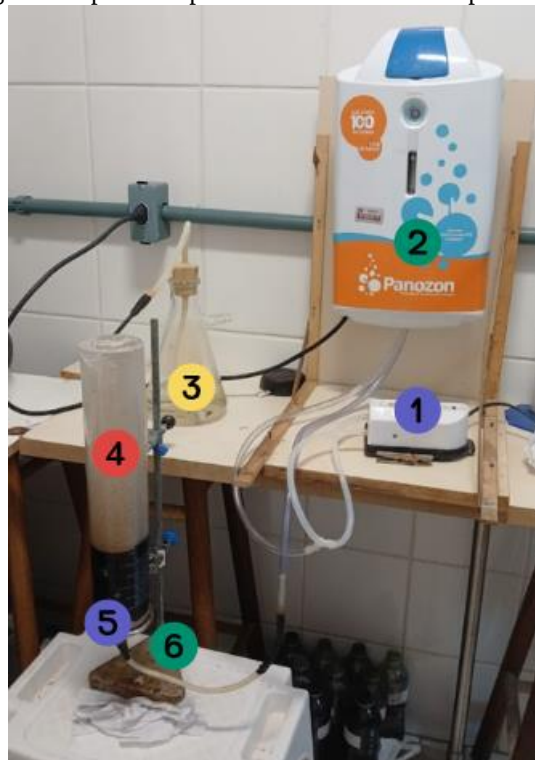
Fonte: Autores, 2026.

O aterro possui apenas uma lagoa de estabilização em operação, destinada ao armazenamento temporário do efluente e à sua posterior recirculação ao aterro por meio de sistema de aspersão. O lixiviado bruto foi coletado por meio de amostragem simples. Após a coleta, as amostras foram armazenadas em galões de 20 L e encaminhadas para o laboratório, para acondicionamento e realização das análises.

2.2 APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental utilizado nos experimentos está ilustrado na Figura 2. O sistema foi composto pelos seguintes componentes: um compressor de ar (1); um gerador de ozônio (2); um frasco lavador de gás (3); uma coluna de ozonização (4); um difusor poroso (5); e um suporte universal com anel de ferro (6).

Figura 2. Aparato experimental utilizado no experimento.



Fonte: Autores, 2026.

Para os tratamentos, foi utilizada coluna de vidro com capacidade total de 1000 mL (4), de formato cilíndrico, equipada com difusor poroso (5) para a introdução do ozônio. Foi utilizado um ozonizador da marca Panozon, modelo 053308 P+70 (2), juntamente de um compressor de ar (1) para a inserção de oxigênio na coluna.

O gás é conduzido até a coluna por meio de um tubo de silicone e passa através de uma pedra porosa cilíndrica localizada dentro da coluna. A taxa de geração de ozônio foi determinada pelo método

iodométrico, adaptado de APHA (2005) e Rakness *et al.* (1996), a fim de assegurar a quantificação precisa da dosagem aplicada nos ensaios. Para o experimento, foram empregados dois frascos lavadores de gás, cada um contendo 400 mL de uma solução de iodeto de potássio a 2%. O ozônio foi borbulhado na sequência de frascos por um período de 10 minutos. Após esse processo, 10 mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄) 2N foram adicionados às soluções, que em seguida foram transferidas para um frasco Erlenmeyer com capacidade de 1 litro.

A solução foi submetida à titulação com tiosulfato de sódio até atingir uma coloração amarelo pálido. Posteriormente, cerca de 5 mL de solução indicadora de amido foram adicionados, resultando em uma coloração azulada. A titulação foi então continuada até que a coloração azul desaparecesse completamente. A dose de ozônio foi calculada utilizando a Equação 1:

$$\text{Dose de ozônio (mg min}^{-1}\text{)} = (A + B) \times N \times 24/t \quad (1)$$

Onde: *A* representa o volume do titulante do frasco A (mL), *B* o volume do titulante do frasco B (mL), *N* a normalidade do tiosulfato de sódio (Na₂S₂O₃), e *t* o tempo de ozonização (min).

Com base nessa análise, foi determinada a capacidade de geração de ozônio de 1,56 mg de O₃/min.

Com base na taxa de geração de ozônio determinada experimentalmente, foi possível calcular o tempo necessário para atingir as doses previamente estabelecidas. Assim, o tempo de ozonização é obtido pela razão entre a dose de ozônio requerida e a taxa de produção de ozônio do equipamento, conforme a Equação 2.

$$\text{Tempo (min)} = \text{Dose requerida de O}_3 \text{ (mg)} / \text{Taxa de O}_3 \text{ produzida (mg min}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

Considerando as doses requeridas de 75, 150 e 300 mg O₃ L⁻¹, foram obtidos tempos de ozonização de 50, 100 e 200 minutos, respectivamente.

2.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Nos ensaios de ozonização foram aplicadas 3 dosagens diferentes de ozônio (Tabela 1). Em cada ensaio foram utilizados 250 mL de efluente bruto, em duplicata, submetidos aos tempos de 50, 100 e 200 minutos de ozonização, com intervalos de 10 minutos a cada 30 minutos de aplicação contínua. Para garantir as mesmas condições das distintas amostras, os testes de duplicata de mesmo tempo e quantidade de ozônio foram realizados nos mesmos dias e condições ambientais semelhantes.

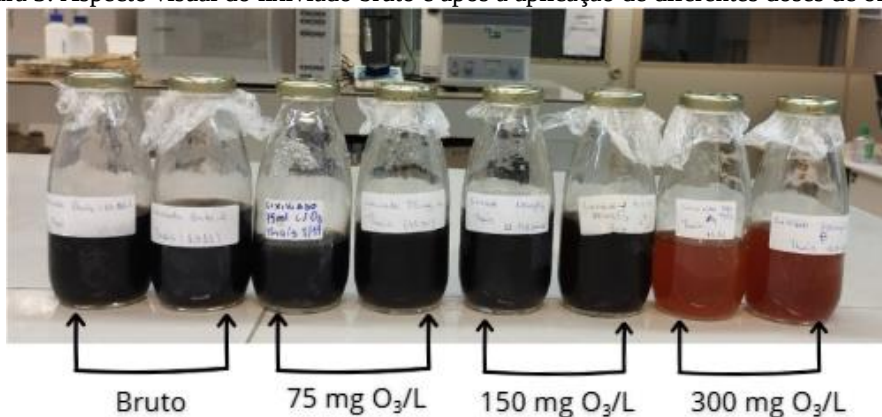
Tabela 1. Relação entre o tempo e a dosagem de ozônio aplicados.

Tempo de ozonização (min)	Quantidade de ozônio (mg O ₃ /min)	Dose de ozônio aplicada (mg O ₃ /L)
50	~1,56	75
100	~1,56	150
200	~1,56	300

Fonte: Autores, 2026.

A Figura 3 apresenta a variação visual da coloração do lixiviado bruto após a aplicação de diferentes doses de ozônio, evidenciando o efeito do aumento da dose de O₃ na remoção de compostos responsáveis pela cor do efluente.

Figura 3. Aspecto visual do lixiviado bruto e após a aplicação de diferentes doses de ozônio.



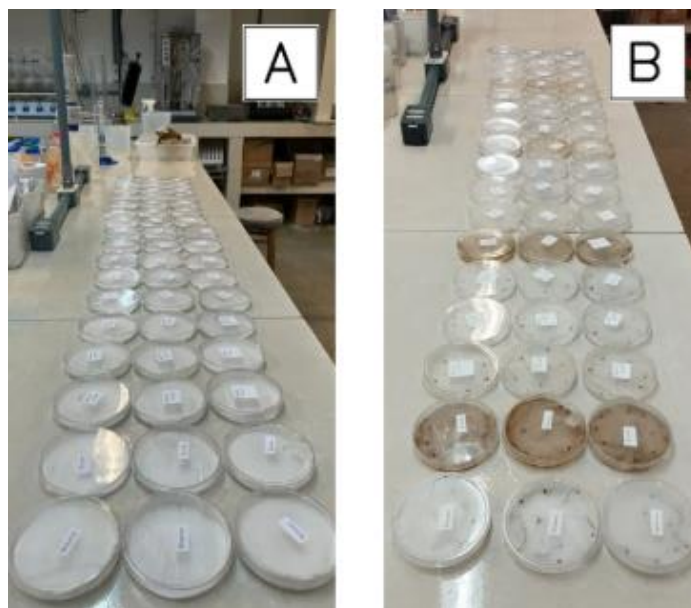
Fonte: Autores, 2026.

2.4 ANÁLISE DE FITOTOXICIDADE

Para o teste de fitotoxicidade, amostras brutas e tratadas, além do controle com água destilada (Branco), foram aplicadas em placas de Petri (Ø 80 mm) contendo dupla camada de papel de filtro de café, em triplicata com sementes de *Allium cepa*. Utilizaram-se sementes do tipo sem tratamento químico contra pragas, da marca Isla, adquiridas no site eletrônico <https://www.isla.com.br/>. Na sequência, os papéis de filtro foram umedecidos com o volume definido no teste preliminar de 5 mL, nas concentrações (v/v) de 1:10, 1:50 e 1:100 (Figura 4). Posteriormente, as placas foram envolvidas por plástico filme para reduzir a perda de umidade interna.

EFEITO DA OZONIZAÇÃO NA TOXICIDADE DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO AVALIADO POR BIOENSAIO COM *ALLIUM CEPA*

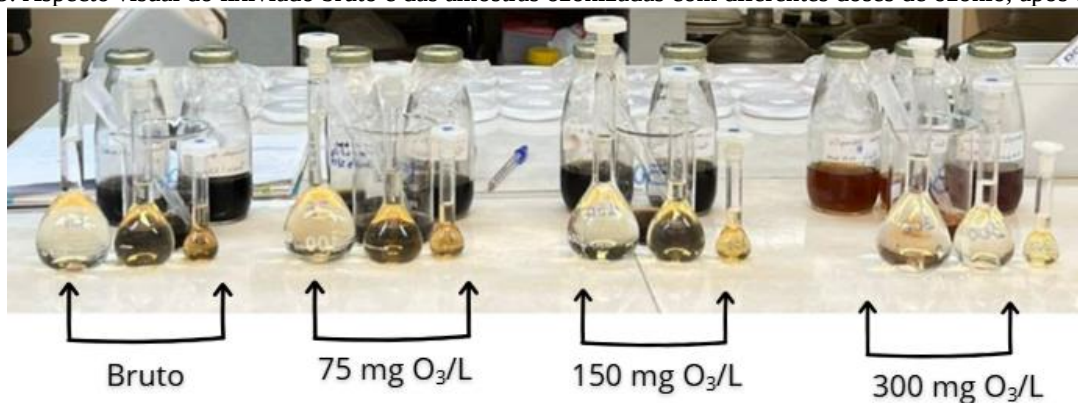
Figura 4. Etapas dos ensaios de fitotoxicidade: A) Placas de Petri com papel de filtro e sementes; B) Placas com amostras envolvidas por plástico filme.



Fonte: Autores, 2026.

As diluições foram realizadas com o objetivo de reduzir a interferência da elevada coloração inicial do lixiviado, permitindo melhor visualização das alterações promovidas pela ozonização (Figura 5).

Figura 5. Aspecto visual do lixiviado bruto e das amostras ozonizadas com diferentes doses de ozônio, após diluições.



Fonte: Autores, 2026.

As placas foram acondicionadas em incubadora do tipo B.O.D., permanecendo incubadas por sete dias, sob temperatura controlada de 25 ± 2 °C, em regime fotoperiódico de 8 horas de luz e 16 horas de escuro. Ao final do período de incubação, foi avaliado o número de sementes germinadas e o comprimento das raízes com o auxílio do aplicativo ImageJ.

O Índice de Germinação (IG%) foi determinado conforme Equação 3 adaptada de Mendes *et al.* (2016):

$$IG (\%) = (Gm / Gc) \times (Lm / Lc) \times 100 \quad (3)$$

Onde: *IG%*: índice de germinação das sementes expressado em percentual; *Gm*: número de sementes germinadas na exposição da amostra de lixiviado; *Lm*: alongamento das raízes das sementes na exposição da amostra de lixiviado (cm); *Gc*: número de sementes germinadas na exposição de água destilada (controle); *Lc*: alongamento das raízes das sementes na exposição de água destilada/controlado (cm).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Índice de Germinação (IG%) foi utilizado como parâmetro comparativo entre as amostras brutas, tratadas com as doses de ozônio aplicadas e o controle, permitindo identificar as condições mais favoráveis à atenuação da toxicidade do lixiviado. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados do teste de fitotoxicidade.

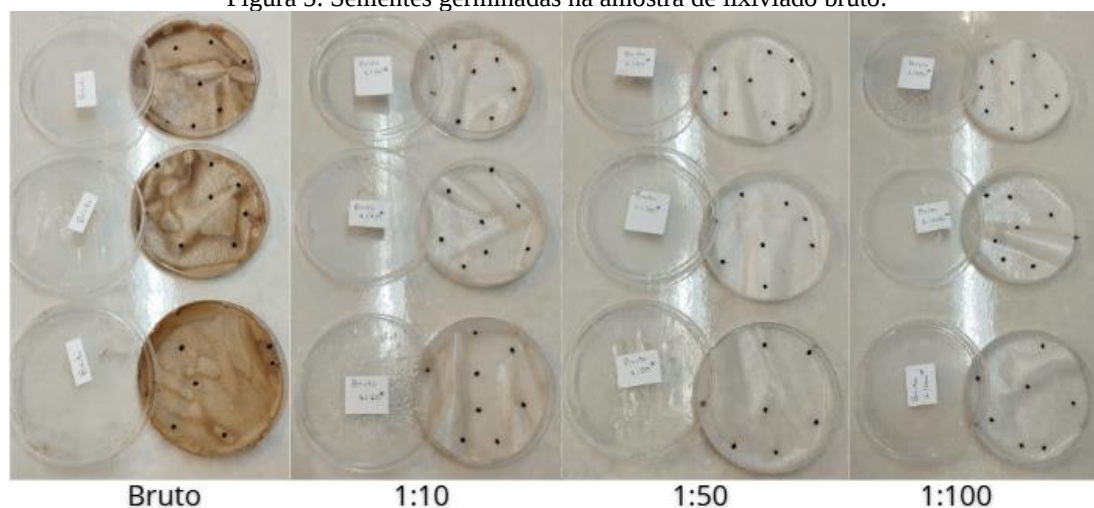
Amostras	Diluição (v/v)	Índice de Germinação (%)
Branco	S/D*	100
Bruto	S/D*	0
	1:10	0
	1:50	0
	1:100	0
75 mg O ₃ /L	S/D*	0
	1:10	5,46
	1:50	57,43
	1:100	58,41
150 mg O ₃ /L	S/D*	0
	1:10	27,16
	1:50	87,62
	1:100	35,41
300 mg O ₃ /L	S/D*	0
	1:10	19,15
	1:50	42,52
	1:100	61,01

*S/D: sem diluição

Fonte: Autores, 2026.

A análise dos resultados evidencia que o lixiviado bruto apresentou elevada toxicidade, uma vez que não houve germinação em nenhuma das diluições testadas (Figura 5). Segundo Kopliku (2015), o lixiviado de aterros de resíduos sólidos urbanos pode conter substâncias genotóxicas e mutagênicas, capazes de prejudicar o crescimento das raízes de *Allium cepa*, reforçando a necessidade de um tratamento prévio.

Figura 5. Sementes germinadas na amostra de lixiviado bruto.



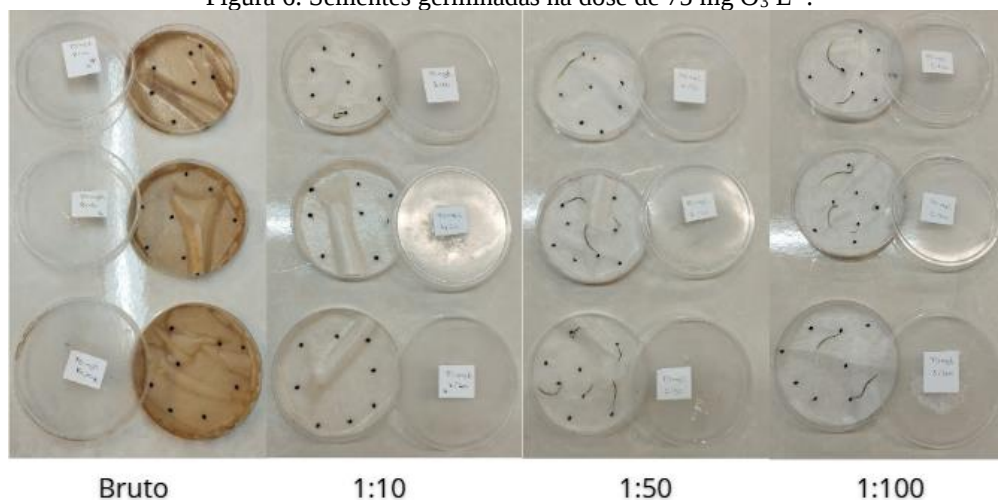
Fonte: Autores, 2026.

Estudos baseados em bioensaios vegetais indicam que lixiviados de aterros sanitários apresentam uma composição complexa, contendo substâncias potencialmente tóxicas, como compostos orgânicos recalcitrantes e metais pesados. Esses contaminantes podem comprometer etapas essenciais da germinação e do desenvolvimento inicial das plântulas, ao interferirem na absorção de água, induzirem estresse oxidativo e afetarem a divisão celular nos meristemas radiculares de *Allium cepa* (Klauck; Rodrigues; Silva, 2015).

Além disso, a toxicidade do lixiviado bruto também foi evidenciada em ensaios ecotoxicológicos realizados com *Allium cepa* e o peixe *Leporinus obtusidens*, nos quais se observou uma redução significativa do crescimento radicular e do índice mitótico em bulbos expostos à concentração de 100% do lixiviado, indicando efeitos genotóxicos relevantes (Klauck; Rodrigues; Silva, 2013). Esses resultados reforçam que a presença de compostos persistentes no lixiviado, mesmo após processos de tratamento, pode manter efeitos fitotóxicos expressivos, justificando a necessidade de alternativas de tratamento complementares ou combinadas antes de sua disposição final ou reutilização.

A aplicação de $75 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$ promoveu redução parcial da toxicidade, com aumento significativo do índice de germinação nas diluições 1:50 (57,43%) e 1:100 (58,41%), embora ainda abaixo do controle (Figura 6).

Figura 6. Sementes germinadas na dose de $75 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$.



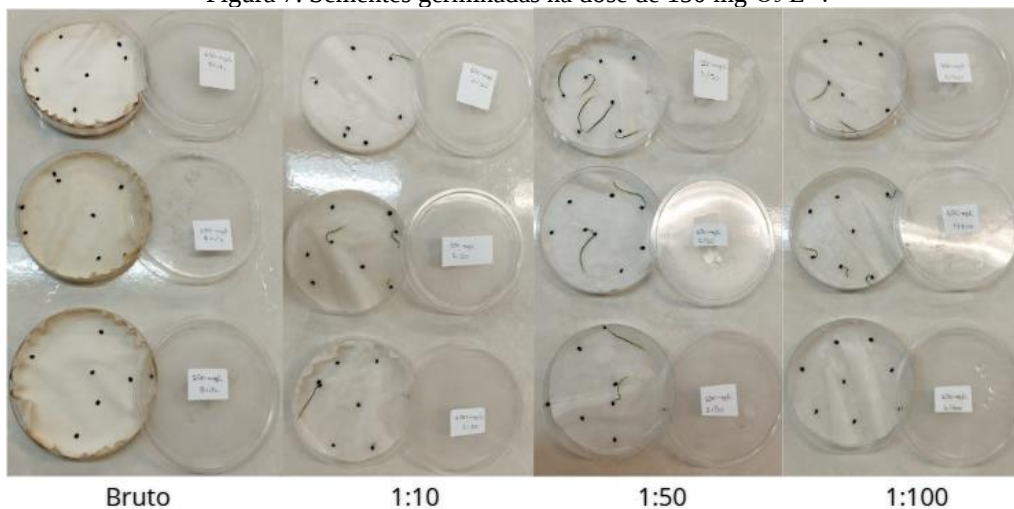
Fonte: Autores, 2026.

A redução parcial da toxicidade observada pode ser atribuída à capacidade do ozônio de oxidar compostos orgânicos complexos, que são grandes responsáveis pela toxicidade e baixa biodegradabilidade desse efluente. Estudos recentes demonstram que a combinação de ozônio com catalisadores metálicos, como sistemas com zeólita $5\text{\AA}$ -Fe-Zn, também pode melhorar significativamente a biodegradabilidade do lixiviado (relação DBO_5/DQO), passando de 0,14 para 0,58. Assim como a conversão do lixiviado inicialmente não biodegradável em uma fração facilmente biodegradável, reforça que a ozonização pode fragmentar moléculas orgânicas recalcitrantes e potencialmente tóxicas em intermediários menos agressivos e mais suscetíveis à degradação biológica (Javaid *et al.*, 2025).

De forma complementar, processos híbridos, como a ozonização eletrocatalítica, têm apresentado elevada eficiência na remoção de poluentes do lixiviado bruto, com reduções superiores a 89% de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Carbono Orgânico Total (TOC) e Demanda Bioquímica de Oxigênio em cinco dias (DBO_5) em condições otimizadas, evidenciando que a associação do ozônio com catalisadores e fontes adicionais de energia pode intensificar a oxidação e a degradação de compostos tóxicos (Mehralian *et al.*, 2024).

A aplicação de $150 \text{ mg O}_3 \text{ L}^{-1}$ resultou no melhor desempenho entre as condições avaliadas, especialmente na diluição 1:50, na qual o índice de germinação atingiu 87,62%. Esse comportamento sugere que a dose intermediária foi suficiente para promover a oxidação de compostos orgânicos recalcitrantes e substâncias húmicas responsáveis pela toxicidade, sem favorecer a formação significativa de intermediários reativos acumulativos. A resposta biológica observada indica um equilíbrio entre degradação oxidativa e minimização de subprodutos tóxicos, configurando uma condição operacional mais eficiente do ponto de vista ecotoxicológico (Figura 7).

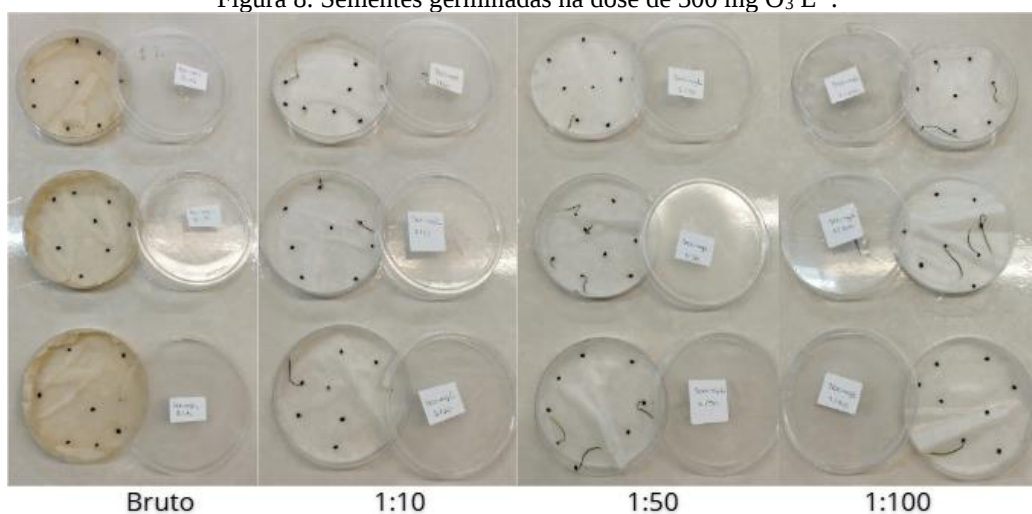
Figura 7. Sementes germinadas na dose de 150 mg O₃ L⁻¹.



Fonte: Autores, 2026.

No entanto, durante a ozonização, a formação de radicais pode originar subprodutos tóxicos, o que reforça a importância dos testes de toxicidade ao longo do tratamento (Campos, 2024). Na dose mais elevada (300 mg O₃ L⁻¹), observou-se redução do índice de germinação em comparação à dose intermediária, indicando possível efeito adverso associado à superdosagem de ozônio. A intensificação da oxidação pode ter promovido a formação de compostos intermediários, como aldeídos, ácidos orgânicos de baixo peso molecular ou derivados parcialmente oxidados, os quais podem apresentar maior biodisponibilidade e toxicidade aguda para organismos vegetais. Esses resultados reforçam que o aumento indiscriminado da dose oxidante não implica necessariamente maior eficiência ambiental, sendo fundamental a otimização do processo (Figura 8).

Figura 8. Sementes germinadas na dose de 300 mg O₃ L⁻¹.



Fonte: Autores, 2026.

Este resultado está alinhado ao estudo de Bastos *et al.* (2021), que, ao investigarem a ozonização de lixiviado de aterro sanitário no estado do Rio de Janeiro, constataram que o melhor desempenho do processo foi alcançado em condições de pH elevado e menor dosagem de ozônio, demonstrando que o aumento da dose nem sempre se traduz em maior eficiência. Dessa forma, a eficácia da ozonização depende não apenas das características do efluente, como a composição da matéria orgânica, a presença de substâncias recalcitrantes e o potencial de formação de subprodutos, mas também de aspectos do tratamento, como a definição adequada da dose de ozônio e da diluição do lixiviado para usos posteriores.

4 CONCLUSÃO

O processo de ozonização demonstrou elevada eficiência na atenuação da fitotoxicidade do lixiviado de aterro sanitário, sendo a dose intermediária de 150 mg O₃ L⁻¹ associada à diluição 1:50 (v/v) a condição que apresentou melhor desempenho biológico. Os resultados indicam que a aplicação controlada do ozônio pode promover a oxidação de compostos orgânicos potencialmente tóxicos, ampliando a segurança ambiental do efluente tratado.

Destaca-se, entretanto, que a definição da dose ótima é fundamental para evitar a formação de subprodutos oxidativos indesejáveis. Assim, a ozonização configura-se como tecnologia promissora no tratamento complementar de lixiviados, podendo viabilizar sua recirculação controlada no próprio aterro ou aplicação agrícola restrita, desde que observados os critérios ambientais e agrônômicos vigentes.

REFERÊNCIAS

ABBAS, A. A.; JINGSONG, G.; PING, L. Z.; YA, P. Y.; AL-REKABI, W. S. Review on landfill leachate treatments. *American Journal of Applied Sciences*, [S.l.], v. 6, n. 4, p. 672–684, 2009.

ABDELFATTAH, I.; EL-SHAMY, A. M. Review on the escalating imperative of zero liquid discharge (ZLD) technology for sustainable water management and environmental resilience. *Journal of Environmental Management*, v. 351, 119614, 2024.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21. ed. Washington, DC: APHA; AWWA; WPCF, 2005.

BARBOSA, N. M.; ROCHA, E. N. da. Efeito do chorume originário mediante o processo de compostagem na cultura de *Phaseolus vulgaris*. *Brazilian Journal of Science*, v. 2, n. 11, p. 51–59, 2023.

BASTOS, H. B. *et al.* Optimization of ozonation process for organic matter and ecotoxicity removal from landfill leachate by applying rotatable central composite design (RCCD). *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, v. 56, n. 14, p. 1457–1470, 2021.

BEZERRA, J. N. R. Processos oxidativos avançados utilizados na degradação do 17 α -etinilestradiol: revisão bibliográfica, comparação entre os principais métodos e análise bibliométrica. 2025.

DENG, Y.; ZHAO, R. Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment. *Current Pollution Reports*, v. 1, p. 167–176, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>.

GALAVOTE, T. *et al.* Energy recovery technologies from municipal solid waste: enhancing Brazilian Solid Waste Policy. *Revista Brasileira de Energia*, v. 28, 2022. DOI: 10.47168/rbe.v28i1.652.

GAUTAM, P.; KUMAR, S.; LOKHANDWALA, S. Advanced oxidation processes for treatment of landfill leachate from hazardous waste: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.117639>.

GOMES, L. P.; SCHOENELL, E. K. Aplicação de ozônio e de ozônio + peróxido de hidrogênio para remoção de compostos recalcitrantes em lixiviados de aterros sanitários. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 23, n. 1, p. 113–124, 2018.

HUSSAIN, K. *et al.* Advancement in ozone-based wastewater treatment technologies: a brief review. *Ecological Questions*, v. 33, p. 1–23, 2022. DOI: 10.12775/eq.2022.010.

JAVOID, R. *et al.* Enhancing biodegradability of landfill leachate by hybrid treatment process: coagulation followed by catalytic ozonation with Z5Å-Fe-Zn for environmental sustainability. *Journal of Water Process Engineering*, v. 75, 107938, 2025.

KAWAHIGASHI, F. *et al.* Pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário com carvão ativado. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 19, n. 3, p. 235–244, 2014.

KAZA, S. *et al.* What a Waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. Washington, DC: World Bank, 2018.

KLAUCK, C. R.; RODRIGUES, M. A. S.; SILVA, L. B. Avaliação da fitotoxicidade de chorume de aterro sanitário antes e após tratamento biológico. *Brazilian Journal of Biology*, v. 75, p. 57–62, 2015.

KLAUCK, C. R.; RODRIGUES, M. A. S.; SILVA, L. B. Toxicological evaluation of landfill leachate using plant (*Allium cepa*) and fish (*Leporinus obtusidens*) bioassays. *Waste Management & Research*, v. 31, n. 11, p. 1148–1153, 2013.

MA, X. *et al.* Characterizing landfill extent, composition, and biogeochemical activity using electrical resistivity tomography and induced polarization under varying geomembrane coverage. *Geophysics*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1190/geo2023-0599.1>.

MEEGODA, J. N.; HETTIARACHCHI, H.; HETTIARATCHI, P. Landfill design and operation. In: *Sustainable solid waste management*. American Society of Civil Engineers, 2016. p. 577–604. DOI: 10.1061/9780784414101.ch18.

MEHRALIAN, M. *et al.* Electro-catalytic ozonation of contaminants in landfill leachate: optimization by BBD, economic evaluation, mechanism, and reaction pathway. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 686, 133263, 2024.

MOR, S.; RAVINDRA, K. Municipal solid waste landfills in lower- and middle-income countries: environmental impacts, challenges and sustainable management practices. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 174, p. 510–530, 2023. DOI: 10.1016/j.psep.2023.04.014.

NATH, A.; DEBNATH, A. A short review on landfill leachate treatment technologies. *Materials Today: Proceedings*, v. 67, p. 1290–1297, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.109.

PANDIS, P. K. *et al.* Key points of advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment, organic pollutants, and pharmaceutical waste: a mini review. *ChemEngineering*, v. 6, n. 8, 2022. DOI: 10.3390/chemengineering6010008.

QUADRO, M. S. *et al.* Manual de análises de águas e efluentes. Pelotas: Editora UFPel, 2016.

RAKNESS, K. *et al.* Guideline for measurement of ozone concentration in the process gas from an ozone generator. *Ozone: Science & Engineering*, v. 18, p. 209–229, 1996.

SCANDELAI, A. P. J. *et al.* Ozonização como tratamento de lixiviado de aterro sanitário: um estudo de revisão. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 4, n. 3, p. 3404–3417, 2021. DOI: 10.34188/bjaerv4n3-048.

TRIPATHI, S.; HUSSAIN, T. Tratamento de água e águas residuais por meio de tecnologias baseadas em ozônio. In: SHAH, M.; RODRIGUEZ-COUTO, S.; BISWAS, J. (org.). *Developments in wastewater treatment research and processes*. Elsevier, 2022. p. 139–172.

WANG, J.; CHEN, H. Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: recent advances and perspective. *Science of the Total Environment*, v. 704, 135249, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135249.

YANG, C. *et al.* Removal of organic pollutants by effluent recirculation constructed wetlands treating landfill leachate. *Environmental Technology & Innovation*, v. 24, 101843, 2021a. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101843

YANG, Y.; DEMEESTERE, K.; VAN HULLE, S. Ozone-based advanced oxidation of biologically treated landfill leachate: oxidation efficiency, mechanisms and surrogate-based monitoring for bulk organics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, 106459, 2021b. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106459.

YOUCAI, Z.; ZIYANG, L. General structure of sanitary landfill. 2017. p. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811867-2.00001-7>.