

AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE OSMOSE INVERSA APLICADOS NO TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO VISANDO A PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO

Waldyr Ramos Junior⁽¹⁾

Mestre em Engenharia Ambiental pela UFRJ, engenheiro de Recursos Hídricos e Meio Ambiente pela UFF e supervisor de engenharia na AST Ambiente.

Tatianne Costa de Andrade⁽²⁾

Engenheira química pela UFF e analista de engenharia na AST Ambiente.

Giovanna Ramos e Souza e Silva⁽³⁾

Graduanda em Engenharia de Recursos Hídricos e Meio Ambiente pela UFF.

Endereço⁽¹⁾: Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Centro de Tecnologia, Bloco D, 2º andar, Sala D 205 - Cidade Universitária - Rio de Janeiro - RJ - CEP: 21941-909 - Brasil - Tel: +55 (21) 96720-6888 e-mail: waldyr.pea2022@poli.ufrj.br.

RESUMO

O presente estudo avalia a eficiência da tecnologia de osmose inversa no tratamento de lixiviado em dois aterros sanitários localizados na região Nordeste do Brasil, pretendendo examinar a viabilidade do permeado para reúso. Foram analisados parâmetros físico-químicos do lixiviado bruto e tratado, comparando-os com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 para lançamento de efluentes e pelas Resoluções CONERH nº 75/2010 e COEMA nº 02/2017 para reúso. Os resultados demonstraram remoções superiores a 99% para a maioria dos parâmetros cruciais para o tratamento como DBO, DQO, condutividade elétrica, sólidos suspensos, nitrogênio e metais. A qualidade do permeado atendeu integralmente aos critérios para lançamento e, na maioria dos parâmetros, também atendeu aos padrões para reúso. Contudo, foram observados excedentes nos teores de níquel e cobre no Aterro 1, indicando a necessidade de complementação do tratamento para reúso em algumas aplicações. De modo geral, a osmose inversa mostrou-se eficiente e tecnicamente viável como alternativa sustentável na gestão do lixiviado, além de representar uma solução com elevado potencial para geração de água de reúso, contribuindo para a gestão sustentável de recursos hídricos.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de lixiviado, Osmose inversa, Água de reúso.

INTRODUÇÃO

A crescente geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), impulsionada pelo aumento populacional e pela intensificação do consumo e da produção, tem ampliado os desafios relacionados à gestão adequada desses materiais (Silva, 2023). Dentre as etapas mais complexas desse gerenciamento, destaca-se a destinação final destes resíduos em aterros sanitários, que são obras de engenharia projetadas para garantir a disposição segura dos resíduos, com foco na estabilidade estrutural e na proteção ambiental. Essas estruturas contam com sistemas de impermeabilização e drenagem para evitar a contaminação do solo e das águas subterrâneas por lixiviado — um líquido altamente contaminante (Soares; Pinheiro; Soares, 2017).

O lixiviado, também conhecido popularmente como chorume, é um líquido gerado pela percolação da água da chuva e pela decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos dispostos em aterros sanitários. Durante esse processo, diversas substâncias são dissolvidas e transportadas, resultando em um líquido de coloração escura e odor característico. Sua composição é complexa, contendo compostos orgânicos, como ácidos húmicos e fúlvicos, além de íons inorgânicos como amônio (NH_4^+), cloreto (Cl^-) e sulfato (SO_4^{2-}) (Costa; Alfaia; Campos, 2019). Também estão presentes metais pesados e microrganismos patogênicos, o que confere ao lixiviado uma alta carga poluidora e potencial risco ambiental. A quantidade e a composição do lixiviado variam com a natureza dos resíduos, a idade do aterro, suas condições operacionais e o regime pluviométrico local, tornando seu tratamento um desafio dinâmico e multifatorial (Soares; Pinheiro; Soares, 2017; Pazoki; Ghasemzadeh, 2020).

Em termos físico-químicos, o lixiviado apresenta elevados valores de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), de demanda química de oxigênio (DQO) e concentrações significativas de nitrogênio amoniacal. O pH pode variar de ácido a alcalino, conforme o estágio de decomposição, e a turbidez e a cor escura refletem a alta concentração de sólidos suspensos e de substâncias húmicas. (Costa; Alfaia; Campos, 2019).

A biodegradabilidade do lixiviado tende a diminuir com o tempo. À medida que o aterro envelhece, os teores de DBO reduzem e os de DQO aumentam, enquanto o nitrogênio amoniacal se torna mais predominante, devido à decomposição de compostos nitrogenados dos resíduos orgânicos (Abbas *et al.*, 2009). Essa característica agrava o desafio de se escolher um tratamento eficaz, pois além da toxicidade para a microbiota de processos biológicos, o nitrogênio amoniacal contribui para a eutrofização de corpos d'água, se não for removido adequadamente (PROSAB, 2009; Bhalla *et al.*, 2013).

No Brasil, o tratamento de lixiviados em aterros sanitários geralmente envolve a combinação de diferentes métodos, agrupados em três categorias principais: tratamentos físico-químicos, biológicos e processos oxidativos avançados (POA) (Renou *et al.*, 2008; Mahamuni; Adewuyi, 2010; Queiroz *et al.*, 2011; Torretta *et al.*, 2017; Iskander *et al.*, 2018; Luo *et al.*, 2020). Tecnologias mais avançadas, como os biorreatores com membranas (MBR), combinam o processo de lodos ativados com uma etapa de separação por membranas, aumentando a eficiência do tratamento (Andrade, 201; Brito, 2013). Já os tratamentos físico-químicos mais comuns incluem coagulação/floculação, precipitação química, stripping de amônia e adsorção, muitas vezes aplicados em conjunto para otimizar a remoção de poluentes (Renou *et al.*, 2008; Kurniawan *et al.*, 2006; Abbas *et al.*, 2009).

Por outro lado, os processos de separação por membranas representam uma tecnologia consolidada e altamente eficiente no tratamento de lixiviados, permitindo a remoção de uma ampla gama de contaminantes com base no tamanho dos poros das membranas, o que define sua seletividade (Kurniawan *et al.*, 2006; Torretta *et al.*, 2017). Dentre as principais técnicas, a microfiltração (MF) remove partículas suspensas, bactérias e protozoários; a ultrafiltração (UF) retém vírus, colóides e macromoléculas orgânicas; a nanofiltração (NF) remove sólidos em suspensão, íons multivalentes e moléculas orgânicas de médio peso molecular; e a osmose inversa (OI) oferece a maior capacidade de retenção, removendo sais monovalentes, metais pesados, matéria orgânica dissolvida e poluentes emergentes (Zhang *et al.*, 2012; Ahmed e Lan, 2012; Luo *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a osmose inversa tem ganhado destaque como tecnologia avançada de tratamento, devido à sua elevada eficiência na remoção de sólidos dissolvidos, matéria orgânica, metais pesados e poluentes emergentes. O lixiviado tratado, também chamado de permeado, por esses sistemas caracteriza-se por sua elevada pureza, devido ao baixo teor de sais, sendo então aplicável para diversos fins, inclusive como água de reúso.

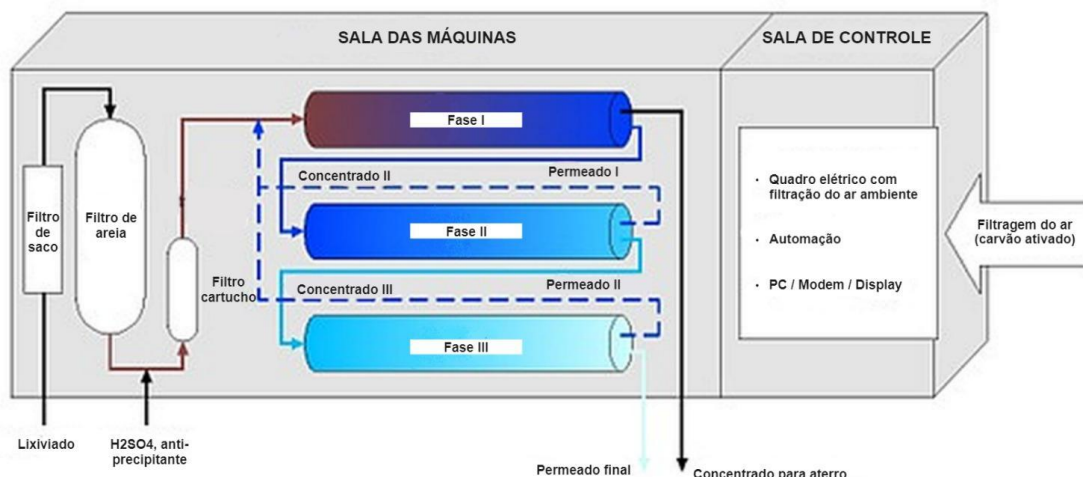
Dessa forma, este artigo teve como objetivo analisar a eficiência da osmose inversa no tratamento de lixiviado de aterros sanitários, bem como avaliar a viabilidade para água de reúso do permeado como alternativa sustentável na gestão hídrica em aterros sanitários.

METODOLOGIA

Os dois aterros selecionados estão localizados na região Nordeste do Brasil e fazem uso da tecnologia de osmose inversa como etapa única de tratamento de lixiviado. O Aterro 1 se encontra em uma área de Mata Atlântica e recebe cerca de 850 toneladas por dia de RSU, enquanto o Aterro 2 está situado no agreste nordestino e recebe cerca de 600 toneladas por dia de RSU. O clima da região Nordeste, caracterizado por altas temperaturas e baixos índices pluviométricos que figuram entre 500 a 800 mm/ano (INMET, 2022; Gomes; Zanella, 2023), o que pode contribuir para uma maior concentração dos contaminantes no lixiviado, podendo afetar diretamente a eficiência dos processos de tratamento.

Ambos os aterros contam cada um com um sistema de osmose inversa contentorizado fabricado por uma empresa portuguesa especializada no fornecimento de sistemas para tratamento de lixiviado de aterro sanitário por osmose inversa. Os sistemas têm uma etapa de pré-filtração que antecede a etapa de osmose inversa, composta por filtro de saco, filtro de areia e filtro de cartucho, em seguida o lixiviado passa por três passos de osmose inversa conforme mostrados na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do processo de osmose inversa para tratamento de lixiviado



Fonte: Adaptado de Löblich (2019).

Foram utilizados os dados de monitoramento físico-químico do lixiviado bruto e tratado realizados em laboratórios externos credenciados pelo INMETRO e contratados pelos aterros selecionados. Os dados referentes aos Aterros 1 e 2 foram coletados a partir de 2019 e 2022, respectivamente. Isso permitiu a avaliação dos valores médio, mínimo, máximo e desvio padrão das análises do lixiviado bruto e tratado. As coletas e análises foram realizadas de forma sistemática, possibilitando um monitoramento detalhado da eficiência dos tratamentos aplicados nesses locais.

A Tabela 1 apresenta os métodos analíticos utilizados na determinação de cada parâmetro investigado. As análises foram realizadas de acordo com os métodos descritos no livro *Standard Methods of Wastewater* e a *Environmental Protection Agency* dos Estados Unidos.

Tabela 1 - Parâmetros analisados para os lixiviados brutos e tratados dos quatro aterros em análise.

Parâmetros	Unid.	Método
Alumínio	mg/L	Método EPA 6010 D: 2018, EPA 3010 A: 1992
Arsênio	mg/L	Método EPA 6010 D: 2018, EPA 3010 A: 1992
Boro	mg/L	Método EPA 6010 D: 2018, EPA 3010 A: 1992
Cádmio	mg/L	Método 3113 B ¹ , Método 3120 B ² , Método EPA 6010 D: 2018, EPA 3010 A: 1992
Chumbo	mg/L	Método EPA 6010 D: 2018, EPA 3010 A: 1992
Cobre	mg/L	Método EPA 6010 D: 2018, EPA 3010 A: 1992
CE*	µS/cm	Método 2510 B ^{1,2,3}
Cromo		Método 3500 D ²
DBO	mg/L	Método 5210 B ^{1,2,3}
DQO	mg/L	Método 5220 D ^{1,2,3}
Ferro	mg/L	Método EPA 6010 D: 2018, EPA 3010 A: 1992
Fluoreto	mg/L	Método 4500 F - C ^{1,2,3}
Manganês	mg/L	Método EPA 6010 D: 2018, EPA 3010 A: 1992
Mercurio	mg/L	Método EPA 245.7: 2005 ^{1,2,3}
Níquel	mg/L	Método EPA 6010 D: 2018, EPA 3010 A: 1992
NAT**	mg/L	Método 4500 NH3 E ^{1,2,3}
NT***	mg/L	POP PA 005 ^{1,2,3}
pH	-	Método 4500 H+B ^{1,2,3}
Selênio	mg/L	Método EPA 6010 D: 2018, EPA 3010 A: 1992
Sódio	mg/L	Método EPA 6010 D: 2018, EPA 3010 A: 1992
SST****	mg/L	Métodos 2540 D e E ^{1,2,3}
Zinco	mg/L	Método EPA 6010 D: 2018, EPA 3010 A: 1992

1 - SMWW, 22ª Edição, 2017

2 - SMWW, 23ª Edição, 2017

3- SMWW, 24ª Edição, 2022

*CE - Condutividade Elétrica

**NAT - Nitrogênio Amoniacal Total

***NT - Nitrogênio Total

****SST - Sólidos Suspensos Totais

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, os valores do permeado foram comparados com os limites de descarte estabelecidos pelas Resoluções CONAMA 430/2011 e com os padrões máximos requeridos nas legislações estaduais nordestinas que tratam sobre critérios de qualidade para água de reúso, Resolução CONERH 75/2010 do estado da Bahia e Resolução COEMA nº 02/2017 do estado do Ceará, que são as únicas normativas que tratam sobre o assunto entre os estados da região do nordeste (Santos; Lima, 2025).

RESULTADOS

Os resultados analíticos referentes ao monitoramento físico-químico dos parâmetros analisados no Aterro 1 e Aterro 2 estão dispostos nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 – Resultados analíticos do lixiviado bruto e tratado do Aterro 1

Lixiviado Bruto							Permeado				
Parâmetros	Unid.	n	Máx	Méd.	Mín.	Des. Pad.	n	Máx.	Méd.	Mín.	Des. Pad.
Alumínio	mg/L	10	3,22	1,134	0,09	0,99	3	0,16	0,09	0,01	0,08
Arsênio	mg/L	14	0,14	0,08	<0,005*	0,05	7	<0,005*	<0,005*	<0,005*	-
Boro	mg/L	14	3,37	2,117	0,854	0,73	7	0,6	0,43	<0,01*	0,2
Cádmio	mg/L	14	<0,0005*	<0,0005*	<0,0005*	-	7	<0,0005*	<0,0005*	<0,0005*	-
Chumbo	mg/L	14	0,63	0,39	<0,005*	0,18	7	<0,005*	<0,005*	<0,005*	0,2
Cobre	mg/L	14	0,14	0,11	<0,002*	0,04	7	0,18	0,07	<0,002*	0,07
CE	µS/cm	6	30.148	19.682	3.560	9.017	5	245	145,39	88,85	61,65
Cromo	mg/L	11	0,517	0,173	<0,005*	0,148	4	0,08	0,04	<0,005*	0,01
DBO	mg/L	14	2.581	1.000	367	576,5	7	67,73	14,97	2	23,6
DQO	mg/L	14	5.214	3.239	1.282	1.201	5	14,42	10,57	5	3,5
Ferro	mg/L	14	10,99	4,73	0,68	3,7	7	0,66	0,2	<0,01*	0,23
Fluoreto	mg/L	14	10	2,932	0,1	3,7	7	0,2	0,14	0,1	0,05
Manganês	mg/L	14	0,62	0,259	0,12	0,13	7	0,1	0,06	0,01	0,05
Mercurio	mg/L	14	0,0011	0,0003	<0,0001*	0,0003	7	<0,0001*	<0,0001*	<0,0001*	-
Níquel	mg/L	14	0,5	0,246	<0,005*	0,169	7	<0,005*	<0,005*	<0,005*	-
NAT	mg/L	14	2.822	2.064	860,8	558,08	7	19,6	10,61	1,12	6,97
NT	mg/L	9	7.160	3.216	976	2.264	2	18	14,04	10,08	5,6
pH	-	14	8,7	7,7	5,02	0,88	7	7,7	6,1	4,9	1,23
Selênio	mg/L	14	0,012	0,007	<0,005*	2,131	6	<0,005*	<0,005*	<0,005*	-
Sódio	mg/L	12	3.450	1.874	650	790,2	4	1,66	1,23	0,96	0,32
SST	mg/L	10	692	203,4	56	186,9	3	10	10	10	-
Zinco	mg/L	14	2,0	0,37	0,07	0,5	7	<0,005*	<0,005*	<0,005*	-

*LD: Limite de Detecção da análise

Fonte: Elaboração própria

Tabela 3 — Resultados analíticos do lixiviado bruto e tratado do Aterro 2

Lixiviado Bruto							Permeado				
Parâmetros	Unid.	n	Máx	Méd.	Mín.	Des. Pad.	n	Máx.	Méd.	Mín.	Des. Pad.
Alumínio	mg/L	9	1,77	1,3	0,67	0,469	1	0,104	0,104	0,104	-
Arsênio	mg/L	14	0,1	0,062	0,01	0,041	3	<0,005*	<0,005*	<0,005*	-
Boro	mg/L	12	3,41	2,27	0,43	0,72	3	0,582	0,406	0,316	0,152
Cádmio	mg/L	15	0,1	0,018	0,001	0,033	3	<0,0005*	<0,0005*	<0,0005*	-
Chumbo	mg/L	15	0,5	0,086	0,005	0,122	3	0,02	0,01	0,01	0,122
Cobre	mg/L	14	0,157	0,05	0,005	0,044	3	0,009	0,006	0,005	0,002
CE	µS/cm	11	35.700	28.058	15.300	5.278	1	138	138	138	-
Cromo Total	mg/L	13	0,5	0,259	0,1	0,105	3	<0,005*	<0,005*	<0,005*	-
DBO	mg/L	15	2.398	1.210	121	687,5	3	12	5,3	2	5,774
DQO	mg/L	15	6.900	3.945	1.870	1.255	3	17,9	11,53	5	6,452
Ferro	mg/L	11	12,1	3,20	1,2	3,05	3	0,032	0,017	0,01	0,013
Fluoreto	mg/L	14	5	2,55	0,38	1,854	3	1	0,467	<0,2*	0,462
Manganês	mg/L	14	0,432	0,27	0,05	0,095	3	0,022	0,014	0,01	0,007
Mercúrio	mg/L	13	0,002	0,0005	<0,0001*	0,0005	3	<0,0001*	<0,0001*	<0,0001*	-
Níquel	mg/L	13	0,5	0,24	0,1	0,098	3	0,019	0,013	0,01	0,005
NAT	mg/L	14	2.660	1.811	812	628,3	3	17,6	12,7	5	6,73
NT	mg/L	9	9.650	3.073	1.080	2.625	1	10,34	10,34	10,34	-
pH	-	15	8,98	8,04	6,31	0,59	3	8,75	8,027	7,45	0,662
Selênio	mg/L	13	0,08	0,037	<0,005*	0,024	3	<0,005*	<0,005*	<0,005*	-
Sódio	mg/L	10	4.100	2.341	507	964	3 1	1,06	1,06	1,06	-
SST	mg/L	9	2.710	125	44	86,29	1	10	10	10	-
Zinco	mg/L	14	0,44	0,232	0,072	0,116	3	0,02	0,013	0,009	0,006

*LD: Limite de Detecção da análise

Fonte: Elaboração própria

Observando as Tabelas 2 e 3, nota-se que alguns parâmetros apresentaram valores abaixo do limite de detecção das análises ao longo de todo o monitoramento ou na maior parte dele nos resultados do lixiviado bruto e/ou do tratado, sendo esses os parâmetros: arsênio, cádmio, chumbo, cromo, mercúrio, níquel, selênio e zinco.

A Tabela 4 apresenta as eficiências de remoção de cada parâmetro dos aterros sanitários analisados.

Tabela 4 - Eficiência de remoção dos sistemas de OI nos aterros 1 e 2

Parâmetros	Unid.	Aterro 1	Aterro 2
		Remoção (%)	Remoção (%)
Alumínio	mg/L	92,1	92,0
Arsênio	mg/L	93,8	91,9
Boro	mg/L	79,7	82,1
Cádmio	mg/L	-	97,2
Chumbo	mg/L	98,7	88,4
Cobre	mg/L	36,4	88,0
CE	µS/cm	99,3	99,5
Cromo Total	mg/L	76,9	98,1
DBO	mg/L	98,5	99,6
DQO	mg/L	99,7	99,7
Ferro	mg/L	95,8	99,5
Fluoreto	mg/L	95,2	81,7
Manganês	mg/L	76,8	94,8
Mercúrio	mg/L	66,7	80,0
Níquel	mg/L	98,0	94,6
NAT	mg/L	99,5	99,3
NT	mg/L	99,6	99,7
Selênio	mg/L	28,6	86,5
Sódio	mg/L	99,9	99,9
SST	mg/L	95,1	92,0
Zinco	mg/L	98,7	94,4

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 5 apresenta a concentração média dos parâmetros no lixiviado tratado pelos dois sistemas de Osmose Inversa e os respectivos padrões máximos de lançamento dispostos na Resolução CONAMA nº 430/2011 e os padrões máximo tolerados para reúso pela Resolução CONERH nº 75/2010 e pela Resolução COEMA nº 02/2017.

Tabela 5 – Concentração média dos parâmetros no permeado de cada aterro e os limites da Resolução CONAMA nº 430/2011, CONERH nº 75/2010 Resolução COEMA nº 02/2017

Parâmetros	Unid.	CONAMA nº 430/11	CONERH nº75/ 10	COEMA nº02/17	Aterro 1	Aterro 2
Alumínio	mg/L	-	5,0	-	0,09	0,104
Arsênio	mg/L	0,5	0,10	-	<0,005	<0,005
Boro	mg/L	5,0	0,50	-	0,43	0,406
Cádmio	mg/L	0,2	0,01	-	<0,0005	<0,0005
Chumbo	mg/L	0,5	5,0	-	0,15	0,01
Cobre	mg/L	1,0	0,05	-	0,07	0,006
E. coli	NMP/100ml	-	103	5000	-	-
CE	µS/cm	-	200-3000	3000	145,39	138
Cromo Total	mg/L	-	0,10	-	0,04	<0,005
DBO	%	remoção > 60%	-	-	98,5	99,6
DQO	mg/L	-	-	-	10,57	11,53
Ferro	mg/L	15,0	5,0	-	0,2	0,017
Fluoreto	mg/L	10,0	1,0	-	0,14	0,467
Manganês	mg/L	1,0	0,20	-	0,06	0,014
Mercúrio	mg/L	0,01	0,002	-	0,0001	0,0002
Níquel	mg/L	2,0	0,20	-	0,22	0,013
NAT	mg/L	20,0	-	-	10,61	12,7
NT	mg/L	-	-	-	14,04	10,34
Ovos de Helmintos	ovos/L	-	1	1	-	-
pH	-	5,0 - 9,0	-	6,0 - 8,5	6,1	8,0
Selênio	mg/L	0,30	0,02	-	0,01	<0,005
Sódio	mg/L	-	70,0	-	1,23	1,06
SST	mg/L	remoção > 20%	-	-	10	10
Zinco	mg/L	5,0	2	-	0,06	0,013

Fonte: Elaboração própria com base nas Resoluções

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Observando os resultados obtidos nos Aterros 1 e 2 apresentados nas tabelas 2, 3 e 4 evidencia-se a eficiência da osmose inversa (OI) na remoção de contaminantes presentes no lixiviado de aterro sanitário. Os sistemas de OI analisados apresentaram desempenho relevante para parâmetros críticos como DBO, DQO, nitrogênio total, ferro, condutividade elétrica e sólidos suspensos totais, com remoções médias superiores a 99% na maioria dos parâmetros. Como observado na remoção de DBO foi de 98,5% no Aterro 1 e 99,6% no Aterro 2, enquanto a remoção de DQO ultrapassou o valor de 99% para os dois aterros. A condutividade elétrica apresentou redução significativa, de 19.682 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para 145,39 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no Aterro 1 e de 28.058 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para 138 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no Aterro 2, indicando remoções superiores a 95%.

Estes percentuais são significativamente superiores aos encontrados em outros métodos de tratamento convencionais aplicados em lixiviados, que geralmente combinam múltiplos processos unitários para alcançar remoções inferiores a esses níveis. Cruz (2021) analisou um sistema composto por lagoas anaeróbias e aeradas, coagulação, flotação, carvão ativado, zeólitas e nanofiltração, que apresentou eficiências inferiores, especialmente para DQO (em torno de 70-85%), nitrogênio total (60-75%) e condutividade (reduções em torno de 40-60%). De forma semelhante, Moravia (2010) avaliou um arranjo baseado em processos oxidativos avançados com reagente de Fenton seguido de nanofiltração, que alcançou remoções próximas a 80% para DBO e uma remoção de 98% de DQO. Esse mesmo estudo também registrou uma remoção de 83% para a condutividade do lixiviado tratado, com isso pode-se inferir que a OI ofereceu elevada eficiência na remoção de poluentes, promovendo uma maior margem de segurança em relação aos limites estabelecidos pela legislação ambiental vigente (60% de remoção de DBO).

Por outro lado, estudos que aplicaram a osmose inversa como tecnologia única de tratamento de lixiviado corroboram os altos índices encontrados neste trabalho, como por exemplo o estudo de Soares, Pinheiro e Soares (2017), que teve resultados de remoção entre 97,5% e 99,4% para DBO, DQO, nitrogênio amoniacal, condutividade e sólidos suspensos totais, valores que se adequam à remoção observada para os Aterros 1 e 2. Essa comparação reforça a superioridade da OI como tecnologia eficaz e compacta, capaz de atingir elevados níveis de polimento do efluente.

Nota-se ao observarmos os resultados das tabelas 2, 3 e 5 que os sistemas avaliados conseguiram produzir um lixiviado tratado capaz de atender com resultado dentro dos padrões com excedente de segurança os limites máximos de descarte de efluentes estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011. Quanto à qualidade do permeado para reúso, a Tabela 5 apresenta as médias dos parâmetros analisados nos Aterros 1 e 2 que, em sua maioria, se enquadram nos limites estabelecidos pela Resolução CONERH nº 75/2010 e pela Resolução COEMA nº 02/2017. Parâmetros como ferro, chumbo e cádmio, ficaram significativamente abaixo dos valores máximos permitidos para reúso urbano, agrícola e florestal. A condutividade elétrica, por exemplo, ficou em torno de 145 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 138 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nos dois aterros, muito abaixo do limite de 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ previsto pela Resolução COEMA nº 02/2017 para reúso não potável.

Por outro lado, é importante destacar que os valores médios de cobre e níquel do lixiviado tratado do Aterro 1 ficaram ligeiramente acima do limite estabelecido pela Resolução CONERH nº 75/2010, que tem valores muito rigorosos. A Resolução CONERH nº 75/2010 possui limites para cobre e níquel 20 e 10 vezes menor do que o estabelecido pela Resolução CONAMA nº 430/2011, respectivamente. Legislações publicadas mais recentemente sobre água de reúso não abordam tais parâmetros (São Paulo, 2017; São Paulo, 2020; Distrito Federal, 2022) ou possuem limites não tão rígidos (Paraná, 2023).

Ademais alguns parâmetros biológicos e físico-químicos contemplados nas resoluções — como coliformes fecais e ovos de helmintos — não foram monitorados diretamente nos aterros estudados. Ainda assim, com base na literatura e nas características do pré-tratamento adotado, é razoável inferir que o permeado não apresenta esses contaminantes. Estudos demonstram que a osmose inversa é eficaz na remoção de coliformes fecais, proporcionando permeado microbiologicamente seguro (APHA, 2017). Além disso, os filtros mecânicos instalados no pré-tratamento (filtro de saco, filtro de areia e filtro de cartucho) são suficientes para reter ovos de helmintos, que apresentam dimensões entre 150 μm e 65 μm (Secretaria de Saúde do Ceará, 2022). Dessa forma, a qualidade do efluente tratado indica a viabilidade do reúso, segundo as diretrizes consideradas neste estudo.

Vale ressaltar também, que os resultados analíticos do lixiviado bruto resultaram em uma média de Cádmiu abaixo dos limites de detecção. Por causa disso, seus valores de remoção foram desconsiderados na Tabela 5, já que sua retenção pela OI não pode ser estimada.

Assim, considerando os parâmetros monitorados e as inferências realizadas, o permeado gerado nos Aterros 1 e 2 pode ser classificado para reúso urbano, agrícola e florestal conforme as resoluções mencionadas, o que reforça o potencial da osmose inversa como solução ambientalmente segura e eficiente para o tratamento de lixiviados.

Por fim, é importante destacar que a osmose inversa, além de apresentar as maiores eficiências entre as tecnologias analisadas, gera um efluente final com qualidade superior e menor complexidade operacional em comparação aos sistemas combinados em que se utilizam vários processos integrados. Essa característica contribui para a viabilidade técnica da OI, principalmente quando se busca qualidade elevada do permeado para reúso.

Apesar do evidente potencial da osmose inversa para o tratamento de lixiviado, a adoção ampla dessa tecnologia deve considerar aspectos econômicos, técnicos e legais, especialmente no que se refere à regulamentação do reúso do permeado. Atualmente, a Resolução CONERH nº 75/2010 da Bahia e Resolução COEMA nº 02/2017 do Ceará são as únicas legislações estaduais da região nordeste com critérios objetivos para esse fim (Santos; Lima, 2025), evidenciando a necessidade de avanços normativos que facilitem a implementação dessa prática em escala maior.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Através da análise de dados obtidos dos sistemas OI, pode-se avaliar a eficiência da tecnologia de osmose inversa no tratamento de lixiviado de aterros sanitários, bem como a análise da viabilidade do uso do permeado gerado como água de reúso. Com os valores obtidos para os dois aterros localizados na região Nordeste do Brasil, os resultados demonstraram que os sistemas de OI analisados alcançaram elevadas taxas de remoção para diversos parâmetros críticos, com eficiências superiores a 99% em muitos casos, e produziram um efluente final com qualidade significativamente superior aos limites máximos estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 para o lançamento de efluentes.

A comparação com os limites normativos estaduais da Resolução CONERH nº 75/2010 e da Resolução COEMA nº 02/2017, utilizadas como referência legal para reúso na região Nordeste, mostrou que o permeado atende a maioria dos padrões exigidos para reúso urbano, agrícola e florestal.

Apesar dessas exceções pontuais, como cobre e níquel no Aterro 1, os resultados gerais indicam que o permeado possui qualidade adequada para reúso, especialmente nas atividades menos restritivas, como usos urbanos não potáveis. Entretanto, para viabilizar plenamente o reúso agrícola e florestal, seria necessário implementar etapas complementares de polimento ou ajustes operacionais nos sistemas existentes, com foco na remoção dos parâmetros que ficaram acima dos limites.

Parâmetros como DBO, condutividade elétrica, metais pesados e sólidos suspensos totais apresentaram concentrações muito inferiores aos limites legais, evidenciando não apenas a eficiência técnica da OI, mas também sua capacidade de gerar um efluente com grande potencial de reaproveitamento seguro.

Outras tecnologias de tratamento de lixiviado foram abordadas ao longo do estudo como forma de contextualizar os desafios enfrentados por diferentes abordagens e destacar o desempenho da osmose inversa dentro desse cenário. A comparação com sistemas convencionais permitiu evidenciar os ganhos em eficiência, baixa complexidade operacional e qualidade do efluente final proporcionados pela OI.

Com base nos dados obtidos e nas normativas vigentes, conclui-se que a osmose inversa representa uma solução técnica eficaz, segura e ambientalmente sustentável para o tratamento de lixiviados, com potencial concreto para integração em estratégias de reúso de água, contribuindo para a gestão eficiente de recursos hídricos em aterros sanitários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABBAS, A. A. et al. Review on landfill leachate treatments. *Journal of Applied Sciences Research*, v. 5, n. 5, p. 534–545, 2009.
2. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23. ed. Washington, D.C.: APHA Press, 2017.
3. AHMED, F. N.; LAN, C. Q. Treatment of landfill leachate using membrane bioreactors: A review. *Desalination*, v. 287, p. 41–54, 2012.
4. ANDRADE, Laura Hamdan. *Tratamento de efluente de indústria de laticínios por duas configurações de biorreator com membranas e nanofiltração visando o reúso*. 2011. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2011.
5. BAHIA. *Resolução CONERH n° 75, de 29 de julho de 2010*. Estabelece procedimentos para disciplinar a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e/ou florestal. Diário Oficial do Estado da Bahia, 2010.
6. BRASIL. *Resolução CONAMA n° 430 de 13 de maio de 2011*. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Diário Oficial da União, 2011.
7. BRITO, Gabriela Cristina Barbosa. *Avaliação do desempenho do uso de biorreator com membranas inoculado com leveduras (Saccharomyces cerevisiae) no tratamento de lixiviado de aterro sanitário*. 2013. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
8. BHALLA, B.; SURESH, S.; CHANDRA, R. Leachate characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 185, p. 311–322, 2013.
9. CEARÁ. *Resolução COEMA n° 02, de 2 de fevereiro de 2017*. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras. Diário Oficial do Estado do Ceará, 2017.
10. COSTA, A.M.; ALFAIA, R.G.S.M.; CAMPOS, J.C. Landfill leachate treatment in Brazil: an overview. *Journal of Environmental Management*, v. 232, p. 110-116, fev. 2019.
11. CRUZ, Willian Suzarte. *Análise de ciclo de vida do sistema de tratamento de lixiviado em um aterro sanitário municipal*. 2021. 137 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021.
12. Distrito Federal. *Resolução ADASA n° 005, de 9 de maio de 2022*. Estabelece diretrizes para o aproveitamento ou reúso de água não potável em edificações no Distrito Federal. Diário Oficial do Distrito Federal, 2022.
13. GOMES, Flávia Ingrid Bezerra Paiva; ZANELLA, Maria Elisa. Histórico, causas e características da semiáridade do Nordeste do Brasil. *Geografares*, Vitória, n. 37, 2023.
14. INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Normais Climatológicas do Brasil: 1991–2020*. Brasília: INMET, 2022.

15. ISKANDER, S. M. *et al.* Leachate treatment: From conventional to innovative technologies. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 17, p. 339–356, 2018.
16. LÖBLICH, S. Tratamento de Chorume por Sistemas Membranares. In: “Workshop - A Evolução na Gestão de Aterros Sanitários: Novas Rotas Tecnológicas para a Drenagem, Monitoramento e Tratamento de Chorume”. 30 de dez. de 2019. *Anais [...]* Distrito Federal: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2019.
17. LUO, Y. *et al.* Treatment technologies of landfill leachate: A review. *Water*, v. 12, n. 2, p. 512, 2020.
18. MAHAMUNI, Naresh N.; ADEWUYI, Yusuf G. Advanced oxidation processes (AOPs) involving ultrasound for wastewater treatment: A review with emphasis on cost estimation. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 17, n. 6, p. 990–1003, 2010.
19. MORAVIA, Wagner Guadagnin. *Avaliação do tratamento de lixiviado de aterro sanitário através de processo oxidativo avançado conjugado com sistema de separação por membranas*. 2010. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
20. Paraná. *Resolução CERH nº 122, de 19 de junho de 2023*. Estabelece diretrizes e critérios gerais para reuso de água no Estado do Paraná. Diário Oficial do Estado do Paraná, 2023.
21. PAZOKI, Maryam; GHASEMZADEH, Reza. Municipal landfill leachate management. Cham: Springer Nature Switzerland, 2020. *Environmental Science and Engineering*. ISBN 978-3-030-50211-9.
22. PROSAB – PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO. *Diagnóstico e avaliação de tecnologias para tratamento de lixiviados de aterros sanitários*. Volume 5: Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos. Brasília: FINEP/PROSAB/CEF, 2009. 188 p.
23. QUEIROZ, L. M. *et al.* Tratamento de lixiviados de aterros sanitários: uma revisão. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 5, n. 5, p. 1011–1022, 2011.
24. RENOU, S. *et al.* Leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, v. 150, n. 3, p. 468–493, 2008.
25. SANTOS, A. S.; LIMA, M. *Panorama Regulatório do Reúso de Água no Brasil*. 2025.
26. São Paulo. *Resolução Conjunta SES/SMA/SSRH nº 01, de 01 de junho de 2017*. Disciplina o reúso direto não potável de água, para fins urbanos, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário e dá providências correlatas. Diário Oficial do Estado de São Paulo, 2017.
27. SECRETARIA DA SAÚDE DO ESTADO DO CEARÁ. *Guia para pesquisa de ovos de helmintos em fezes através do método Kato-Katz*. Fortaleza, 2022.
28. SILVA, Flávia Glória de Lemos. *Situação atual do tratamento de lixiviado de aterros sanitários do estado do Rio de Janeiro, com ênfase nos aterros de Seropédica e Sapucaia*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.
29. SOARES, Agatha Cristinne Prudêncio; PINHEIRO, Carlos Eduardo Soares Canejo; SOARES, Ricardo. Análise da eficácia técnica e ambiental do tratamento de chorume por osmose reversa na Central de Tratamento de Resíduos de São Gonçalo, RJ. In: SIMPÓSIO DE GESTÃO AMBIENTAL E BIODIVERSIDADE, 6., 2017, Seropédica. *Anais [...]*. Seropédica: UFRRJ, 2017. p. 511–520.
30. TORRETTA, Vincenzo *et al.* Treatment of landfill leachate: Case study of an Italian sanitary landfill. *Sustainability*, v. 9, n. 1, art. 9, 2017.

31. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. *Method 3010A: Acid Digestion of Aqueous Samples and Extracts for Total Metals for Analysis by Flame Atomic Absorption Spectroscopy (FLAA) or Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP)*. Revisão 1.0. Cincinnati, OH, 1999.
32. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. *Method 6010D: Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry*. Revisão 4. Washington, DC, 2014.
33. KURNIAWAN, T. A. et al. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, v. 118, p. 83–98, 2006.
34. ZANELLA, Maria Elisa. Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino. *Caderno Prudentino de Geografia*, Presidente Prudente, n. 36, p. 126–142, 2014.
35. ZHANG, F. S. et al. Treatment of landfill leachate using a combined stripping, Fenton, SBR, and coagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, v. 207–208, p. 38–45, 2012.