

QUALIDADE DO LIXIVIADO TRATADO DE UM ATERRO SANITÁRIO, DESCARTADO NA MACRODRENAGEM DO RIACHO DOCE

Paulo Matheus Matos do Bomfim Santos¹; Victor Micael Gomes de Omena², Elder de Oliveira Santana³; Daysy Lira Oliveira Cavalcanti⁴; Nadjane Teles Leite⁵ & Nélia Henriques Callado⁶

RESUMO – A gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil apresenta desafios significativos, sobretudo quanto ao tratamento de lixiviado gerado, considerado como um efluente altamente poluente, cuja complexidade exige tecnologias avançadas de tratamento. Este estudo avaliou a eficiência da nanofiltração (NF) aplicada como polimento final do lixiviado tratado do aterro sanitário de Maceió, composto por tratamento biológico por lagoas seguido de coagulação-floculação-decantação, com descarte final na macrodrenagem da Bacia do riacho Doce. Para tanto foram realizadas análises físico-químicas da alimentação e do permeado da NF. Os resultados mostraram que a NF promoveu reduções dos principais parâmetros de poluição: 99,07% da DQO, 85% da turbidez, 97% dos sólidos totais. Após o tratamento, verificou-se que efluente se enquadra nos valores de referência de padrões de lançamento estabelecidos na Resolução CONAMA 430/2011, sem que interfira na qualidade da água requerida pela Resolução CONAMA 357/2005. Os resultados evidenciam que a NF é eficiente na recuperação de água e na mitigação de impactos ambientais, promovendo sustentabilidade urbana. Entretanto, desafios operacionais, como controle de vazão e manutenção das membranas, ainda demandam atenção para otimização do Sistema.

Palavras-Chave – Nanofiltração, chorume, tratamento de efluente.

ABSTRACT– The management of municipal solid waste in Brazil presents significant challenges, particularly regarding the treatment of leachate, which is considered a highly polluting effluent whose complexity requires advanced treatment technologies. This study evaluated the efficiency of nanofiltration (NF) applied as a final polishing step for treated leachate from the Maceió landfill, which undergoes biological treatment in lagoons followed by coagulation-flocculation-settling, with final discharge into the main drainage system of the Doce Stream Basin. To this end, physicochemical analyses were performed on the feed and permeate of the NF system. The results showed that NF reduced the main pollution parameters: 99.07% of COD, 85% of turbidity, and 97% of total solids. After treatment, it was found that the effluent meets the reference values for discharge standards established in CONAMA Resolution 430/2011, without compromising the water quality required by CONAMA Resolution 357/2005. The results demonstrate that the NF system is effective in water recovery and in mitigating environmental impacts, promoting urban sustainability. However, operational challenges, such as flow control and membrane maintenance, still require attention to optimize the system.

Key-words – Nanofiltration, leachate, wastewater treatment.

1) Graduando pela Universidade Federal de Alagoas, (82) 999017211, paulo.bonfim@ctec.ufal.br

2) Graduando pela Universidade Federal de Alagoas, (82) 988513966, victor.omena@ctec.ufal.br

3) Mestrando pela Universidade Federal de Alagoas, (82) 988880363, elder.santana@ctec.ufal.br

4) Profa. Adjunta da Universidade Federal de Alagoas, (82) 99905363, daysy.oliveira@ctec.ufal.br

5) Técnica da Universidade Federal de Alagoas, (82) 999341456, nadane.santos@ctec.ufal.br

6) Profa. Titular da Universidade Federal de Alagoas, (82) 999928087, ncallado@ctec.ufal.br

INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil ainda enfrenta sérios desafios, sobretudo em relação à destinação final adequada. Segundo a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), cerca de 27,9 milhões de toneladas de resíduos são descartadas de forma irregular no país anualmente, o que contribui para a degradação ambiental, riscos à saúde pública e perda de recursos econômicos. Nesse contexto, os aterros sanitários se consolidam como a principal alternativa técnica e ambientalmente segura para disposição final de resíduos, desde que operem com sistemas de controle e tratamento eficientes.

Entretanto, um dos principais passivos ambientais dos aterros sanitários é o lixiviado, líquido altamente contaminante gerado a partir da decomposição da matéria orgânica e da infiltração de águas pluviais nos resíduos depositados. Devido à sua complexidade, o tratamento desse efluente exige o uso de tecnologias específicas e eficazes, capazes de remover poluentes orgânicos, inorgânicos, metais pesados e nutrientes nitrogenados.

Os sistemas mais usuais empregados para o tratamento de lixiviado são baseados em processos físico-químicos e/ou biológicos (SEIBERT, 2017). Os processos biológicos têm dificuldade de degradar substâncias tóxicas tais como hidrocarbonetos poliaromáticos e tensoativos, entre outros, e nem sempre conseguem enquadrar o lixiviado tratado dentro dos padrões de lançamento exigidos pela CONAMA 430/2011. Por isso, são geralmente empregadas como pré-tratamento visando atender os requisitos qualitativos do pós-tratamento, que geralmente ocorre por processos físico-químicos e polimento final em filtração por membranas.

A nanofiltração consiste num processo de separação com membranas (PSM), no qual as membranas atuam como uma barreira seletiva ao transporte para a separação de duas bases fluidas, e são utilizados para remover impurezas e solutos da água, sendo muito eficaz na remoção de compostos orgânicos e íons bivalentes. A separação ocorre devido à diferença de tamanho entre as partículas e moléculas, sendo utilizadas membranas porosas através das quais os compostos são retidos e a água é capaz de atravessar a membrana (SOARES et al, 2017).

No do aterro sanitário de Maceió (Ecoparque), o tratamento do lixiviado do aterro sanitário ocorre em duas etapas, a primeira é um pré-tratamento biológico constituído por lagoa anaeróbia, lagoas pré-aeradas, a segunda é um pós-tratamento por coagulação/floculação/decantação, finalizando com um polimento por nanofiltração. Por limitação de vazão da NF e do volume de descarte outorgado, em períodos chuvosos é necessário enviar lixiviado para lagoas de contenção, para posterior tratamento em períodos de estiagem. Existem duas linhas de NF em paralelo. Uma com vazão de 25 m³/h e outra com vazão de 7 m³/h gerando de 50 a 70% de permeado (efluente tratado)

e de 50 a 30% de CM (rejeito) os quais retornam para as lagoas pré-aeradas do pré-tratamento. O efluente tratado é descartado na macrodrenagem da bacia urbana do Riacho Doce, em corpo de água doce classe 2.

Diante disso, a presente pesquisa tem como objetivo analisar a eficiência do processo de nanofiltração aplicado ao tratamento do lixiviado no aterro sanitário de Maceió, verificando seu desempenho na remoção de poluentes e o potencial de produção de água de reúso, além de discutir os desafios operacionais e ambientais associados ao uso dessa tecnologia.

METODOLOGIA

Nesse estudo foi analisado o lixiviado do aterro sanitário de Maceió-AL, localizado no bairro do Benedito Bentes, o Centro de tratamento de resíduo -CTR (Figura 1) opera como destino padrão para os resíduos do município.



Figura 1: Ecoparque Maceió

Fonte: Google Earth

Para avaliação e monitoramento do sistema de nanofiltração foram utilizados dados primários levantados por meio de coleta de amostras diretamente no Ecoparque, com frequência quinzenal, no período de abril/2024 a jul/2025, em dois pontos de coleta: (P1) lixiviado tratado afluente a NF, (P2) permeado (efluente final tratado após passar pela nanofiltração).

Para cada ponto de coleta foram feitas análises de cor, turbidez, sólidos totais, fixos e voláteis, potencial hidrogeniônico (pH), alcalinidade, cloretos, condutividade, demanda química de oxigênio (DQO), ácidos voláteis, Níoniacal, fosforo total e metais pesados. Essas análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) do CTEC/UFAL, seguindo a

metodologia proposta do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* - SMEWW, publicação da American Public Health Association – APHA (2017). A Figura 2 ilustra um dia de coleta no Ecoparque de Maceió.



Figura 2: Visita técnica ao Ecoparque Maceió.

Com os resultados obtidos foram calculadas as eficiências médias de remoção e o desvio médio absoluto (DMA) da NF ao longo do período de estudo em função da qualidade do lixiviado afluente. Os dados do efluente tratado final serão comparados com os valores de referência estabelecidos Resolução CONAMA 430/2011 e 357/2005.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação dos resultados da análise do desempenho da nano filtração está apresentada, iniciando pelos parâmetros físicos, seguidos dos químicos.

Cor e turbidez

Observa-se que afluente da nanofiltração, mesmo sendo remanescente do processo de coagulação-floculação-decantação, ainda apresenta elevados valores de cor aparente e turbidez, já a coloração elevada pode ser devida a presença de substâncias orgânicas que podem atuar como complexantes, facilitando a mobilidade e biodisponibilidade de metais pesados tóxicos. Após a nanofiltração, a turbidez e a cor aparente são significativamente reduzidas, $5,56 \pm 4,14$ UNT e $8 \pm 2,8$ UC, evidenciando a eficácia do processo 98,9% de remoção de cor e 89% de turbidez, com melhoria da qualidade do efluente. Isso contribui para minimizar os riscos ambientais associados ao descarte do lixiviado, em conformidade com o Artigo 3º da Resolução CONAMA nº 430/2011.

Sólidos Totais, Fixos e Voláteis

Os sólidos totais, apresentam altos valores em torno de 500 mg/L, com predominância de sólidos fixos, relação SF/ST de 0,818, certamente saís visto que o concentrado da nanofiltração é recirculado para o pré-tratamento biológico. Já no permeado, observa-se uma drástica redução dos sólidos totais, com valores inferiores a 300 mg/L, evidenciando a alta eficácia (97%) desse processo. Observou-se também uma redução expressiva nos valores absolutos de sólidos fixos, com concentrações abaixo de 200 mg/L. Apesar disso, a relação SF/ST permaneceu elevada (0,823), o que indica que a maior parte dos sólidos remanescentes é inorgânica. Já com relação aos sólidos voláteis o processo de nanofiltração foi capaz de remover 93,7%, resultando em efluente com menor carga poluente e menor impacto ambiental.

pH e alcalinidade

O pH e a alcalinidade estão intimamente relacionados, e, portanto, essa análise foi feita em conjunto. Observou-se que os valores de pH do afluente foram em torno de 7,0, indicando um efluente próximo a neutralidade. Já o permeado do processo de nanofiltração apresentou oscilações com valores entre 5,76 e 8,17, mas permaneceram dentro do intervalo legal permitido para lançamento de efluente pela Resolução CONAMA nº 430/2011 (entre 5,0 e 9,0).

O afluente da nanofiltração apresentava alcalinidade superior a 1000 mg/L, enquanto o permeado, apresentou alcalinidade significativamente reduzida tanto devido ao processo de nanofiltração que por ser um processo de separação por membrana que remove íons da água, como cálcio e magnésio, que contribuem para a redução da alcalinidade e consequentemente do pH.

Cloretos e condutividade

A condutividade elétrica reflete é a capacidade de uma substância conduzir corrente elétrica, e é proporcional à concentração de íons livres na solução, como os cloretos, assim esses parâmetros estão diretamente relacionados. Nota-se que os valores de cloretos e consequentemente a condutividade do afluente da nanofiltração eram elevados, mesmo tendo passado por um tratamento biológico e físico-químico, o que pode estar associado a recirculação do rejeito da nanofiltração para o pré-tratamento.

Altos níveis de cloreto são preocupantes, pois favorecem a formação de complexos solúveis com metais pesados, aumentando sua mobilidade e toxicidade (Kjeldsen *et al.*, 2002). O tratamento por nanofiltração foi eficiente em reduzir as concentrações finais para valores entre 14,27 e 228,10 mg/L, compatíveis com padrões de potabilidade e adequados para lançamento em corpos receptores, pois embora a CONAMA nº 430/2011 não faça referência a concentração de cloretos a 357/2005 que exige que o efluente tratado não comprometa os usos do corpo hídrico.

A afluente da nanofiltração apresentou valores condutividade elevado (15 a 25 mS/cm), enquanto no permeado, a condutividade caiu drasticamente (valores abaixo de 1 mS/cm), demonstrando a eficiência da nanofiltração na retenção de íons e metais. Embora a CONAMA 430/2011 não estabeleça limite para esse parâmetro, seu controle é essencial, pois altos valores comprometem a qualidade da água e indicam a possível presença de metais tóxicos no lixiviado.

Demanda Química de Oxigênio e ácidos voláteis

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é um indicador da carga orgânica total, refletindo a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica, tanto biodegradável (DBO e ácidos voláteis), quanto não biodegradável. A DQO afluente a nanofiltração apresentou valores de DQO da ordem de 200 mg/L, já no permeado, observa-se uma redução expressiva da DQO, com valores entre 11,65 e 125,94 mg/L. Somente uma amostra ficou acima dos padrões de lançamento de em termos de DBO, já que a CONAMA 430/2011 não faz referência a DQO, os demais resultados ficaram abaixo do limite legal, com remoções da ordem 99%, evidenciando a eficiência da nanofiltração na remoção de compostos orgânicos recalcitrantes. Essa tecnologia é reconhecida por sua capacidade de reter moléculas de médio e alto peso molecular, conforme apontado por Tchobanoglous *et al.* (2014), contribuindo para a produção de um efluente com menor impacto ambiental e condições adequadas de descarte ou reúso.

Uma fração dessa DQO é devida aos ácidos voláteis, que acompanharam o padrão esperado em sistemas de tratamento de lixiviados, com altos teores no lixiviado bruto mas que ao longo do processo de tratamento, especialmente após o processo biológico, ocorre uma redução significativa desses compostos para $234,2 \pm 153,5$ mg/L no afluente da nanofiltração. Já no permeado, o uso de membranas por nanofiltração, foi responsável pelas menores concentrações observadas ($40,4 \pm 31,1$ mg/L), demonstrando alta eficiência na remoção de compostos orgânicos de baixo peso molecular.

N-amoniacal

O nitrogênio amoniacal é um importante indicador da poluição nitrogenada em lixiviados de aterros sanitários. Durante o envelhecimento do aterro, há um aumento da concentração de amônia, que, junto com compostos persistentes, metais tóxicos e elevada alcalinidade, eleva a toxicidade do lixiviado, sendo a remoção do material nitrogenado o grande desafio do tratamento de lixiviados. O tratamento biológico e o físico-químico reduzem esses valores, mas não de forma suficiente para atender aos limites ambientais de 20 mg/L (CONAMA 430/2011), pois o nitrogênio amoniacal é estável e difícil de remover sem processos específicos. A etapa final de nanofiltração é eficaz, reduzindo drasticamente a concentração de N-NH_4^+ a valores inferiores a 20 mg/L garantindo a qualidade do efluente, protegendo corpos d'água contra toxicidade e eutrofização.

Fósforo Total

Ainda que o fósforo esteja presente em concentrações menores que o nitrogênio, ele exerce papel crucial no potencial de eutrofização dos corpos receptores. A alimentação da nanofiltração continha cerca 2 mg/L enquanto o permeado apresentou concentrações inferiores a 0,02 mg/L, compatíveis com os padrões de lançamento para descarte em ambiente lóticos.

Metais pesados

A Tabela 2 apresenta as concentrações de metais pesados no afluente e no permeado da nanofiltração, e a comparação dos resultados obtidos para o efluente tratado foi feita com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 (Art. 16, Tabela I).

Os resultados mostram uma redução na concentração na maioria dos metais pesado, estando todos os metais pesados analisados com concentrações dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011, conforme disposto no Art. 16, Tabela I.

Tabela 2 - Concentração dos metais pesados no lixiviado na entrada e saída da nanofiltração

Metal Pesado	Afluente	Permeado	Limite CONAMA 430/11	Atende CONAMA 430/11
Arsênio Total (As)	0,1220	<0,005	0,5 mg/L	sim
Bário Total (Ba)	0,0217	0,0071	5,0 mg/L	sim
Cádmio Total (Cd)	<0,100	<0,100	0,2 mg/L	sim
Chumbo Total (Pb)	<0,50	<0,50	0,5 mg/L	sim
Cobre Dissolvido (Cu)	0,076	0,047	1,0 mg/L	sim
Estanho Total (Sn)	<0,005	<0,005	4,0 mg/L	sim
Ferro Dissolvido (Fe)	1,29	<0,20	15,0 mg/L	sim
Manganês Total (Mn)	<0,10	<0,10	1,0 mg/L	sim
Mercúrio Total (Hg)	0,0015	<0,0010	0,01 mg/L	sim
Níquel Total (Ni)	<0,005	<0,005	2,0 mg/L	sim
Prata Total (Ag)	<0,100	<0,100	0,1 mg/L	sim
Zinco Total (Zn)	0,110	<0,100	5,0 mg/L	sim
Cromo Total (Cr)	<0,005	<0,005	0,1 mg/L (Cr ⁶⁺)	sim

Fonte: Autor, 2025.

Eficiências de remoção

Tomando como referência os dados da caracterização do afluente e efluente (permeado) da nanofiltração foi elaborada a Tabela 2, onde se verifica a elevada eficiência do processo.

Tabela 2: Eficiência remoção entre os pontos de entrada e saída da nanofiltração

PARÂMETRO		Eficiência da nanofiltração	
		MÉDIA	DMA (mg/L)
Cor	uC	98,9%	0,61
Turbidez	NTU	89,0%	9,97
Sólidos totais	Mg/ L	97,02%	1,23
Sólidos Fixos	mg/L	97,47%	0,96
Sólidos Voláteis	mg/L	93,08%	1,69
Ácidos Voláteis	mg/L	95,08%	1,61
DQO	mg/L	99,07%	0,20
DBO	mg/L	72,78%	17,61
N-Amoniacal	mg/L	98,33%	1,79
Sulfato	mg/L	91,40%	3,38
Cloreto	mg/L	98,49%	0,89

Fonte: Autor, 2026

CONCLUSÕES

Os resultados indicam que os níveis de contaminantes após o tratamento estão em conformidade com os limites estabelecidos pelas resoluções do CONAMA 430/2011 e 357/2005, atendendo assim às exigências para água de reúso urbano. Dessa forma, a NF se revela uma tecnologia confiável e eficaz tanto na mitigação de impactos ambientais quanto na recuperação de água, reforçando seu papel estratégico em sistemas de tratamento de lixiviado. Apesar de apresentar desafios operacionais, como a necessidade de manutenção periódica das membranas e controle de vazão, o processo mostrou-se capaz de atender às demandas ambientais e sanitárias, confirmando seu potencial como alternativa sustentável para o gerenciamento do lixiviado de aterros de resíduos sólidos urbanos.

REFERÊNCIAS

APHA (American Public Health Association) (2017) American Water Works Association and Water Environment Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th ed. Washington DC: Apha.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 2011.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 2015.

PETER K.; MORTON A. B.; ALIX P. R.; ANDERS B.; ANNA L.; THOMAS H. C. (2002). Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 32, n. 4, p. 297-336. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643380290813462>. Acesso em: 10 de abril de 2025

SEIBERT, D. (2017). Estudo do processo foto-fenton mediado por complexos de Fe(III) aplicado na degradação de lixiviado concentrado de aterro sanitário. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis. Universidade Federal da Fronteira Sul.

SOARES, A. C. P.; PINHEIRO, C. E. S. C.; SOARES, R. (2017). Análise da eficácia técnica e ambiental do tratamento de chorume por osmose reversa na central de tratamento de resíduos de São Gonçalo, RJ. 6º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade, v. 10.

TCHOBANOGLIOUS G.; STENSEL H.; D. TSUCHIHASHI R.; BURTON F. L. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, 5th Edn. Metcalf and Eddy I AECOM. New York, NY: McGraw-Hill Book Company.