

## II-609 – TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO ATRAVÉS DA COMBINAÇÃO DE PROCESSOS DE SEPARAÇÃO COM MEMBRANAS

**Amanda Loreti Hupsel<sup>(1)</sup>**

Química Industrial pela Escola de Química/UFRJ. Mestranda em Engenharia Química pelo Programa de Engenharia Química da COPPE/UFRJ. Pesquisadora na Fundação Coppetec.

**Cristiano Piacsek Borges<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Químico pela Escola de Química/UFRJ, M.Sc. e D.Sc. em Engenharia Química pela COPPE/UFRJ. Professor do Programa de Engenharia Química da COPPE/UFRJ.

**Dilson da Costa Maia Filho<sup>(3)</sup>**

Químico Industrial pela UFRJ, M.Sc. em Ciência de Polímeros pelo IMA/UFRJ e D.Sc. em Engenharia Química pela COPPE/UFRJ. Responsável Técnico da PAM Membranas Seletivas Ltda.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Horácio Macedo, 2030 – Bloco G – Ilha do Fundão – Cidade Universitária – Rio de Janeiro - RJ - CEP: 21941-914 - Brasil - Tel: (21) 3938-8185 - e-mail: [ahupsel@peq.coppe.ufrj.br](mailto:ahupsel@peq.coppe.ufrj.br)

### RESUMO

O tratamento do lixiviado gerado em aterros sanitários é ainda um grande problema no Brasil e no mundo, e seu descarte indevido pode gerar sérias consequências ambientais. Portanto, é importante o desenvolvimento de métodos de tratamento economicamente viáveis e que possuam efetividade no tratamento. O processo de osmose inversa (OI) é capaz de reduzir contaminantes orgânicos e inorgânicos com capacidades de rejeição que podem ser superiores a 98%, apresentando-se como uma alternativa eficaz para o tratamento do lixiviado. Os maiores problemas relacionados a este tratamento são intrínsecos aos processos com membranas, como a redução do fluxo permeado. Diversos fatores podem ser estudados para a otimização do processo de OI, sendo um destes a melhora do pré-tratamento. Neste contexto, a OI pode ser combinada com outros processos com membranas, tais como a microfiltração e a nanofiltração, a fim de atenuar a concentração dos contaminantes que afetam o seu desempenho. Este trabalho busca avaliar o tratamento de lixiviado proveniente de aterro sanitário pela combinação de processos de separação com membranas. Foram investigados o desempenho dos processos de microfiltração, nanofiltração e osmose inversa com e sem acidificação da alimentação, a qualidade do produto final gerado após a combinação dos três processos e o seu enquadramento às normas ambientais, visando o descarte em corpo receptor. A análise dos resultados indicou que os processos foram capazes de reduzir significativamente a concentração de sais, nitrogênio amoniacal, demanda química de oxigênio e alcalinidade. A etapa de acidificação permitiu, ainda, maior aumento na remoção destes parâmetros e melhora no desempenho dos processos de osmose inversa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tratamento de lixiviado, processos de separação com membranas, microfiltração, nanofiltração, osmose inversa.

### INTRODUÇÃO

O lixiviado, também denominado chorume, é um líquido gerado através da degradação de matéria orgânica em aterros sanitários. Pode possuir alta carga orgânica, além de grandes quantidades de nitrogênio amoniacal, cloreto e outros compostos inorgânicos, sendo assim um líquido altamente poluente. O tratamento de lixiviado continua sendo um grande problema no Brasil e no mundo. A complexidade da composição do lixiviado é um entrave para o seu tratamento, assim como os aspectos econômicos que impedem a utilização de tratamentos que possuem efetividade comprovada (ROBERT; MIKSCH, 2006). Além disso, as suas características podem variar ao longo do tempo, diminuindo a biodegradabilidade e dificultando a efetividade dos tratamentos biológicos convencionais (RAGHAB et al., 2013). Considerando a grande quantidade de contaminantes orgânicos e inorgânicos presentes nos lixiviados de aterro sanitários, o controle indevido de seu descarte pode gerar sérias consequências ambientais.

Dentre as inúmeras possibilidades de tratamento de lixiviado, destaca-se o processo de osmose inversa (OI). Chianese *et al.* (1999) relatam que há diversos estudos provando a grande efetividade do processo de osmose

inversa no tratamento de lixiviados de aterro sanitário, sendo este capaz de reduzir não só os contaminantes orgânicos, mas também os inorgânicos, com capacidades de rejeição superiores a 98%. Os maiores problemas relacionados a este tratamento são intrínsecos aos processos com membranas, como a redução do fluxo permeado, que acarreta em maior custo operacional devido à necessidade de limpeza ou troca de membranas e da maior aplicação de pressão ao longo do processo. No caso do tratamento de lixiviado, estes problemas podem ser ainda mais relevantes (CHIANESE; RANAURO; VERDONE, 1999; PETERS, 1998). A otimização do pré-tratamento anterior à osmose inversa poderia ser capaz de melhorar a performance do processo de OI, aumentando a viabilidade econômica do processo.

Uma possibilidade é a combinação da OI com outros processos com membranas, tais como a microfiltração e a nanofiltração. As características destes processos permitiriam a atenuação dos contaminantes presentes no lixiviado, diminuindo os fenômenos que causam a queda do fluxo permeado da OI e consequentemente melhorando a sua performance. Além disso, as vantagens dos processos com membranas, tais como redução da utilização de produtos químicos, condições mais brandas de operação, menores tamanhos de sistema e facilidade de escalonamento são atrativos do ponto de vista econômico e ambiental, permitindo a possibilidade de redução de custos e do impacto ambiental gerado pelo próprio tratamento.

O objetivo deste trabalho é avaliar a combinação de processos de separação com membranas para o tratamento de lixiviado proveniente de aterro sanitário, sendo investigados os processos de microfiltração, nanofiltração e osmose inversa. Buscou-se avaliar o desempenho dos processos com e sem acidificação. O produto final gerado após a combinação dos três processos foi caracterizado e avaliou-se o seu enquadramento às normas ambientais, visando o descarte em corpo receptor.

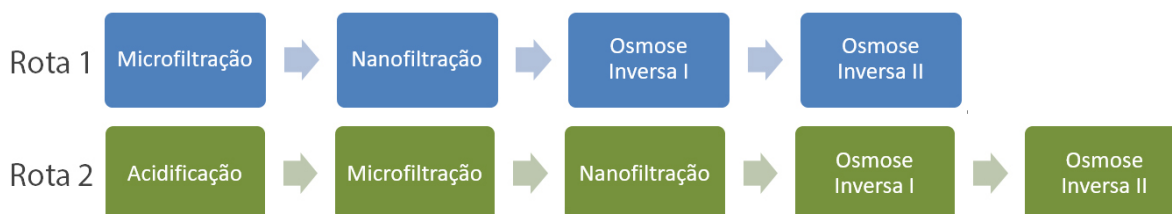
## MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados com uma amostra bruta coletada na captação de um aterro sanitário do estado do Rio de Janeiro, e consistiram em submeter a amostra a diferentes rotas de tratamento e caracterizá-la antes e após cada processo estudado.

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente, foram estudadas duas rotas para execução dos experimentos, que consistiram na aplicação dos processos de microfiltração (MF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI) em série, sendo a OI aplicada duplicadamente (Figura 1).

Na rota 2 foi adicionada uma etapa de acidificação antes da microfiltração. A acidificação foi realizada com adição de solução de  $H_2SO_4$  a 5% v/v na amostra, durante agitação constante com barra de agitação e agitador magnético, até que se atingisse o pH 5. Esta etapa foi feita com o intuito de converter a amônia presente nas amostras em sulfato de amônio ( $(NH_4)_2SO_4$ ), aumentando a sua remoção durante o processo de nanofiltração, que possui grande rejeição à íons multivalentes, e consequentemente melhorando a qualidade do efluente tratado.

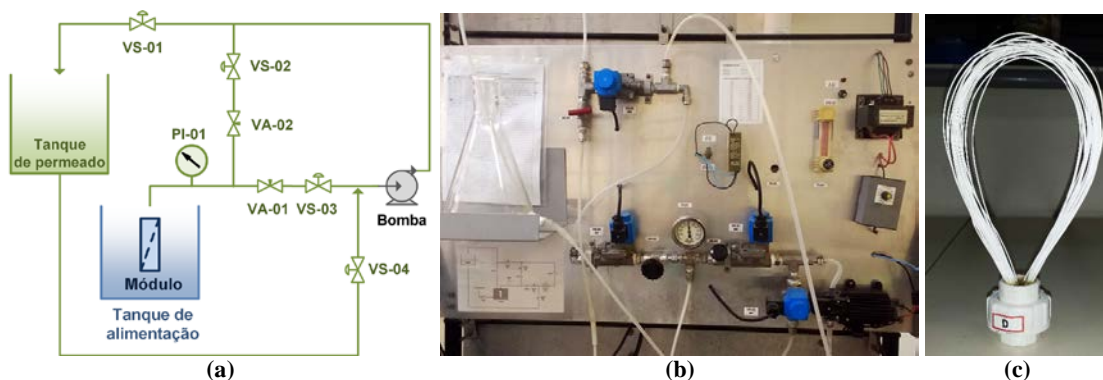


**Figura 1: Rotas de tratamento de lixiviado.**

A microfiltração foi conduzida em um sistema de bancada com módulo de membrana submerso e área de 490 cm<sup>2</sup>, cujo fluxograma e fotografia estão apresentados na Figura 2. O módulo é constituído por membranas compostas de poli(imida) no formato de fibra-oca, cedidos pela empresa PAM Membranas, com tamanho médio de poros de 0,4 µm e retenção de microrganismos e sólidos suspensos superior a 99%. Foram

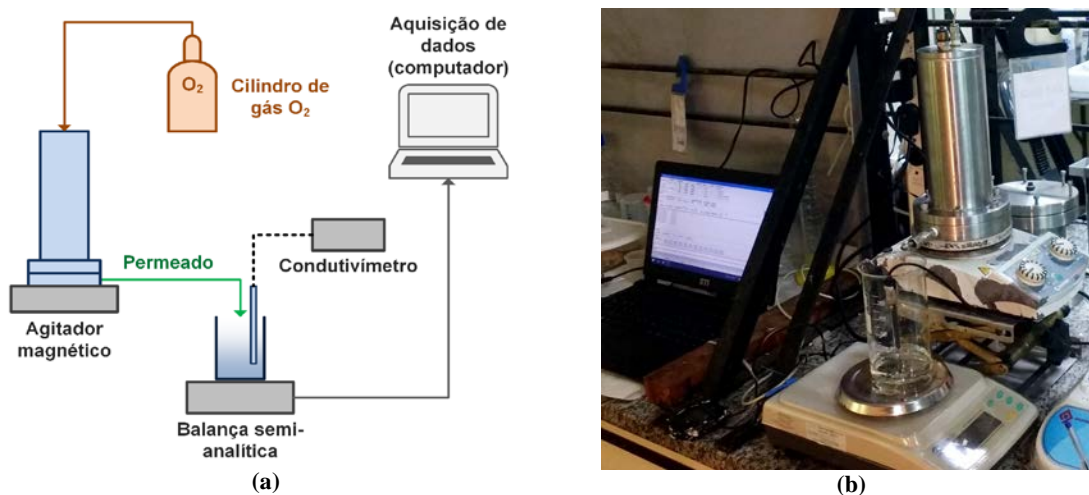
alimentados 2L de amostra, e a operação ocorreu com pressão negativa (vácuo) de 0,5 bar, em temperatura ambiente (cerca de 25°C).

Para realização da retrolavagem, o sentido de filtração é invertido através do acionamento de válvulas solenoides. A retrolavagem foi aplicada a cada 15 minutos durante um tempo de 35 segundos, a uma pressão de 0,5 bar. A performance do sistema foi avaliada através do acompanhamento da queda da permeabilidade hidráulica das membranas, calculada através da razão entre a vazão do permeado pela área da membrana e pressão aplicada, sendo a pressão e vazão monitorados a cada 7,5 minutos de operação.



**Figura 2: Fluxograma (a), fotografia do sistema (b) e do módulo (c) de microfiltração. PI – manômetro; VS - válvulas solenoides; VA – válvulas agulha.**

A nanofiltração e osmose inversa foram realizadas com operação *dead-end* e membrana plana com área de 36 cm<sup>2</sup>, em uma célula de aço inox, pressurizada por meio da inserção de ar comprimido (Figura 3). Para a NF foi utilizada uma amostra de membrana comercial com alta rejeição a sulfato (> 99%), e para a OI foi utilizada a membrana com alta rejeição salina (>99%), ambas da empresa DOW FILMTEC™.



**Figura 3: Fluxograma (a) e fotografia (b) do sistema utilizado para nanofiltração e osmose inversa.**

As amostras alimentadas eram misturadas ao longo da operação por meio de barra de agitação e agitador magnético. Buscou-se manter o fluxo permeado constante durante a operação em  $15 \pm 5 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$  na nanofiltração e  $20 \pm 5 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$  na osmose inversa. Para isso, foi necessário o ajuste da pressão de filtração ao longo do tempo, com limitação máxima do sistema de 33 bar.

O fluxo permeado foi calculado por meio da massa coletada de permeado, medida em balança semi-analítica, cujos dados ao longo do tempo foram armazenados em um computador. A partir do fluxo permeado obtém-se a permeabilidade hidráulica, que é razão entre o fluxo permeado e a pressão aplicada.

A pressão foi monitorada e ajustada a cada 30 minutos, bem como a condutividade iônica, medida por um condutivímetro de bancada (Quimis Q405M), cuja célula foi mantida imersa no permeado durante o experimento. A rejeição salina do processo foi calculada a partir da condutividade final do concentrado ( $C_c$ ) e do permeado ( $C_p$ ), através da Equação 1:

$$R(\%) = 1 - C_p/C_c \quad \text{equação (1)}$$

A recuperação final do processo também foi avaliada, sendo calculada pela razão entre o volume total de permeado coletado e o volume total alimentado.

## CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram realizadas análises de turbidez, pH, condutividade iônica, demanda química de oxigênio (DQO), alcalinidade e nitrogênio amoniacal das amostras brutas e após cada processo, conforme a Tabela 1.

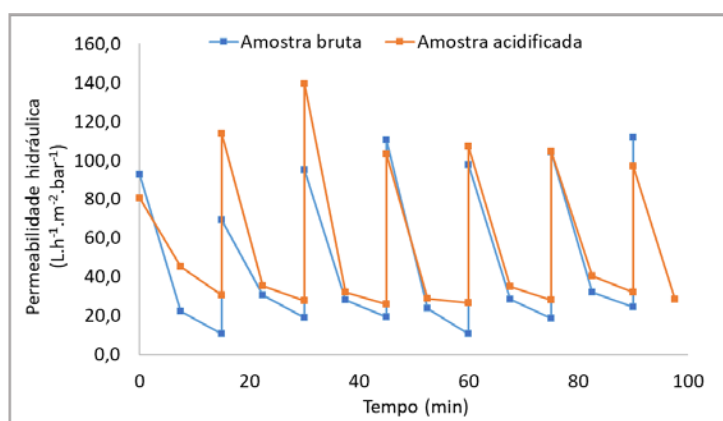
**Tabela 1: Metodologia e equipamentos utilizados nas análises das características físico-químicas dos lixiviados coletados.**

Análise	Metodologia*	Equipamento
Turbidez	2130-B	Turbidímetro Policontrol AP-2000
pH	4500-H <sup>+</sup> B	pHmetro Quimis Q400AS
Condutividade iônica	2510-A	Condutivímetro Quimis Q405M
DQO	5220-D	Digestor e espectrofotômetro Hach DR 2800
Alcalinidade	2320-B	pHmetro Quimis Q400AS
Nitrogênio amoniacal	4500-NH <sub>3</sub> -D	Medidor Orion Star A214

\*Referência: APHA (2012)

## RESULTADOS

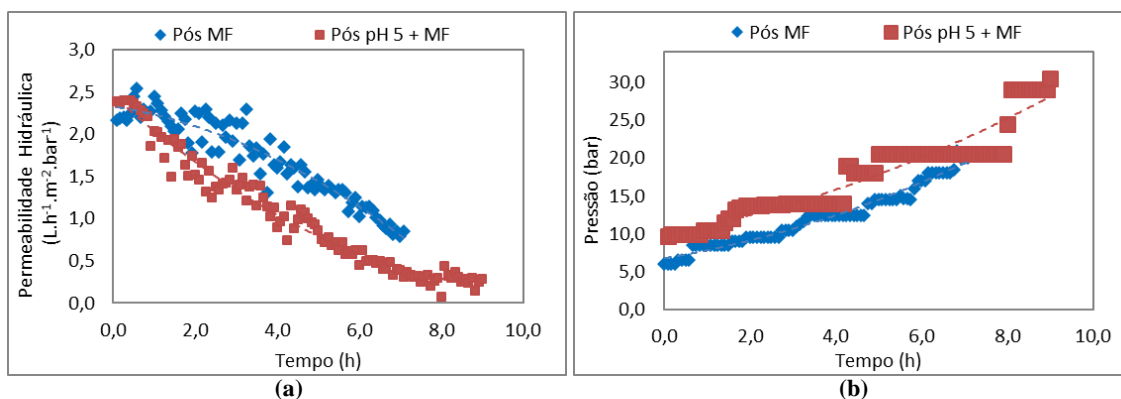
Inicialmente, foi realizada a acidificação da amostra até o pH 5. Observou-se a formação intensa de espuma e de um precipitado de cor escura. Foi realizada então microfiltração da amostra original e da amostra acidificada, cujos resultados estão apresentados na Figura 4.



**Figura 4: Permeabilidade hidráulica ao longo do tempo de MF da amostra de lixiviado bruta e após acidificação até pH 5, com pressão negativa de 0,5 bar e retrolavagem de 35 segundos a cada 15 minutos.**

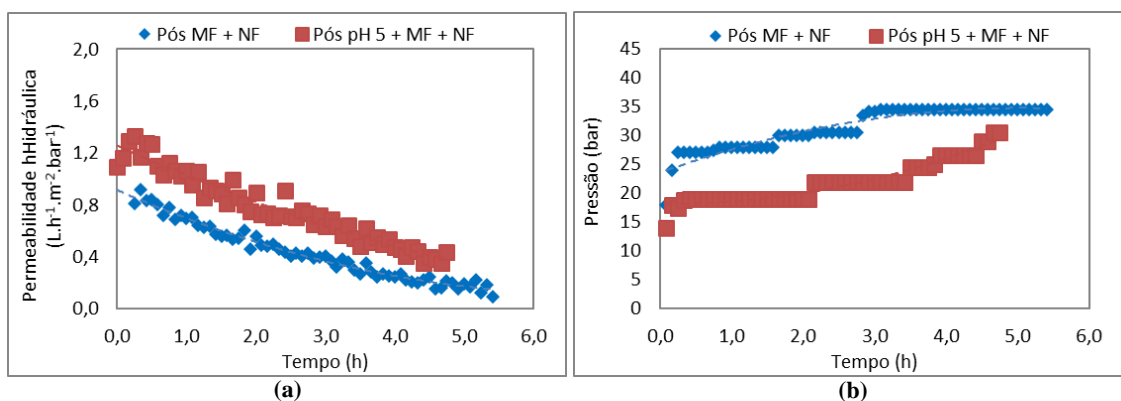
É possível observar que o comportamento da permeabilidade hidráulica se manteve bastante similar para os dois casos, sendo que os valores foram ligeiramente superiores para o caso da amostra acidificada, indicando que a formação de precipitado e espuma não afetou a performance do processo de microfiltração. A permeabilidade é recuperada quando é realizada a retrolavagem, ao que se observa picos ao longo do tempo, porém há uma grande queda subsequente. Assim, a permeabilidade é mantida em uma faixa praticamente constante ao longo do processo, entre 10 e 30 L.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>.bar<sup>-1</sup>. Foi realizada nanofiltração dos permeados da MF, com e sem

acidificação (rota 2 e rota 1, respectivamente). A permeabilidade hidráulica e a pressão da NF para ambas as rotas estão apresentadas nas Figuras 5 (a) e (b), respectivamente.

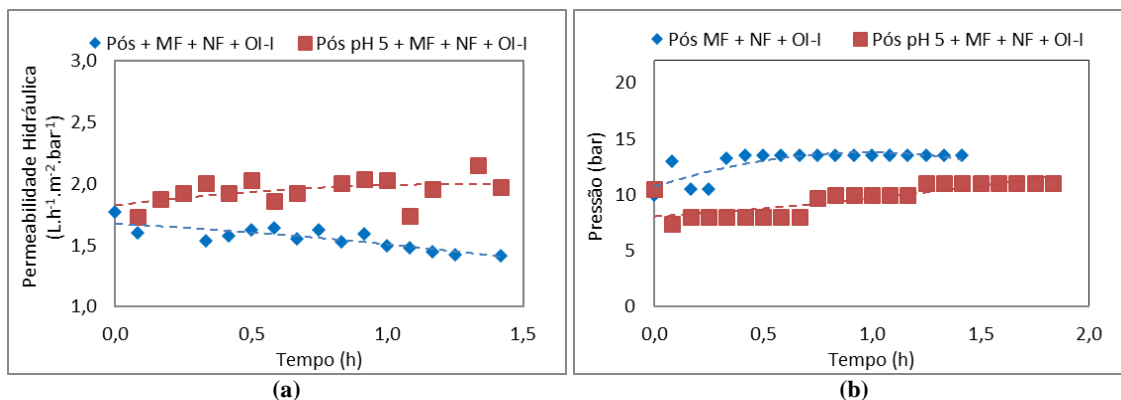


**Figura 5: Permeabilidade hidráulica (a) e pressão (b) ao longo do tempo de NF do permeado da MF das amostras de lixiviado com e sem acidificação.**

Houve uma queda acentuada da permeabilidade hidráulica ao longo do tempo, requerendo que fosse aumentada a pressão significativamente para que o fluxo permeado se mantivesse em 15 L.h<sup>-1</sup>.m<sup>2</sup>. Esta queda foi superior no caso da amostra acidificada, o que pode ser causado devido à maior presença de sulfato na amostra, por conta da adição de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Após a NF, foi realizada osmose inversa duplicadamente de ambas as amostras, cujos resultados estão apresentados nas Figuras 6 e 7.



**Figura 6: Permeabilidade hidráulica (a) e pressão (b) ao longo do tempo de osmose inversa (I) do permeado da NF das amostras de lixiviado com e sem acidificação.**



**Figura 7: Permeabilidade hidráulica (a) e pressão (b) ao longo do tempo de osmose inversa (II) do permeado da NF das amostras de lixiviado com e sem acidificação.**



Ambos os experimentos apresentaram maiores valores de permeabilidade hidráulica para a amostra acidificada, requerendo também menores pressões para que o fluxo de 20 L.h<sup>-1</sup>.m<sup>2</sup> fosse atingido. Estes resultados indicam que a acidificação das amostras, apesar de afetar negativamente a NF, pode melhorar as etapas seguintes, reduzindo problemas operacionais da OI. Os resultados das análises das características físico-químicas das amostras após cada processo estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2: Caracterizações físico-químicas da amostra de lixiviado após cada processo das rotas 1 e 2.**

Amostra	Turbidez (NTU)	Condutividade iônica (us.cm <sup>-1</sup> )	pH	Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> )	Nitrogênio amoniacal (mg.L <sup>-1</sup> )	DQO (mg.L <sup>-1</sup> )
<b>Bruto</b>	21,733	29750	8,31	9889,64	1148,29	5389,97
<b>Rota 1 - MF + NF + OI-I + OI-II</b>						
<b>Após MF</b>	0,02	27402	8,45	9305,87	1148,33	4362,8
<b>Após NF</b>	0,02	19250	8,82	6758,8	844,08	925,37
<b>Após OI-I</b>	0,02	1976	9,39	950,38	210,86	407,04
<b>Após OI-II</b>	0,02	191,5	10,2	358,88	89,49	273,12
<b>Rota 2 - pH 5 + MF + NF + OI-I + OI-II</b>						
<b>Após pH 5 + MF</b>	0,02	27975	5,56	400,17	1148,33	4038,84
<b>Após NF</b>	0,02	12340	5,74	303,5	578,31	945,13
<b>Após OI-I</b>	0,02	1794	6,03	55,19	86,07	93,78
<b>Após OI-II</b>	0,02	185,1	5,94	10,77	13,13	29,37

As análises demonstraram que ambas as rotas de tratamento foram efetivas para remover a carga orgânica, salinidade e a nitrogênio amoniacal da amostra de lixiviado. Entretanto, maiores remoções foram alcançadas com a acidificação da amostra, que permitiu o enquadramento da concentração de nitrogênio amoniacal para lançamento em corpos receptores, de acordo com a Resolução CONAMA N° 430/2011. Apesar de alcançar grandes remoções, o efluente gerado pela rota 1 não apresentou enquadramento, sendo necessário tratamento posterior para o descarte.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados apresentados demonstraram que os processos de separação com membranas utilizados foram efetivos para o tratamento da amostra de lixiviado. Especialmente no caso da rota 2, não foi necessária qualquer outra etapa normalmente utilizada nos tratamentos convencionais para adequar o efluente para o descarte, em termos de nitrogênio amoniacal e pH, de acordo com os outros resultados obtidos na caracterização. Houve também grande redução da salinidade, alcalinidade e matéria orgânica. A etapa de acidificação foi essencial para melhorar a performance dos processos de osmose inversa, assim como a qualidade final do efluente.

De acordo com as características dos processos com membranas, como a possibilidade de escalonamento, estes resultados indicam que a rota 2 é promissora para utilização em uma planta de tratamento. Como recomendações futuras, destaca-se a necessidade de realizar análises para identificar parâmetros orgânicos e inorgânicos específicos descritos na Resolução CONAMA N° 430/2011, bem como otimizar a performance dos processos de microfiltração e nanofiltração com a avaliação de outros parâmetros operacionais. Além disso, a realização de experimentos em escala piloto e um estudo econômico podem confirmar a aplicabilidade da rota selecionada, a fim de consolidar a criação de um tratamento de lixiviado inovador e sustentável, utilizando somente processos de separação com membranas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, 2012. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22nd Ed.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC.
2. CHIANESE, A.; RANAURO, R.; VERDONE, N. *Treatment of landfill leachate by reverse osmosis*. *Water Research*, v. 33, n. 3, p. 647–652, 1999.
3. BRASIL. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Conselho Nacional do Meio Ambiente: CONAMA, Brasília, DF, maio de 2011.
4. PETERS, T. A. *Purification of landfill leachate with reverse osmosis and nanofiltration*. *Desalination*, v. 119, p. 289–293, 1998.
5. RAGHAB, S. M. et al. *Treatment of leachate from municipal solid waste landfill*. *HBRC Journal*, v. 9, n. 2, p. 187–192, 2013.
6. ROBERT, D.; MIKSCH, K. *Landfill Leachate Treatment Methods : A Review*. 2006.