

II-864 - UTILIZAÇÃO DA OSMOSE INVERSA NA RECUPERAÇÃO DA SOLUÇÃO OSMÓTICA DE UM BIORREATOR OSMÓTICO ANAERÓBIO

Gemima Santos Arcanjo⁽¹⁾

Engenheira Ambiental, Mestre e Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa, Professora Adjunta no Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal da Bahia.

Gabriela Almeida Guimarães⁽²⁾

Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal da Bahia.

Carolina Rodrigues dos Santos⁽³⁾

Engenheira Civil, Mestre e Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais.

Bárbara Caroline Ricci Nunes⁽⁴⁾

Engenheira Química, Mestre e Doutora no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Professora no Departamento de Engenharia Química da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

Miriam Cristina Santos Amaral⁽⁵⁾

Engenheira Química, Mestre e Doutora no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Professora Associada no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

Endereço⁽¹⁾: Rua Professor Aristides Novis, Número 02, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Federação - Salvador – Bahia – Brasil - CEP: 40210-613 - País - Tel: +55 (71) 3283-9452 - e-mail: gemima.arcanjo@ufba.br.

RESUMO

Neste trabalho pode-se analisar a viabilidade da osmose inversa acoplada ao Biorreator osmótico (BRMO), na reconcentração da solução osmótica e recuperação da água, no tratamento de esgoto com base na população do município de Malhada de Pedra, utilizando o Programa Wave para simular os resultados da osmose inversa (OI). A simulação analisou os seguintes compostos, que foram NH_4^+ , PO_4^{3-} , alcalinidade, Mg^{+2} , Cl^- e pH. A solução osmótica apresentou um fluxo inverso de sal de 0,111 g/L na membrana da osmose direta (OD). Em relação à qualidade do permeado da OI, a simulação apresentou rejeições de 86,14%, 100%, 96,69%, 99,72% e 99,72% para NH_4^+ , PO_4^{3-} , STD, Mg^{2+} e Cl^- respectivamente, com uma recuperação de 50%. O sistema apresentou elevada pressão hidráulica na OI devida a alta salinidade da solução osmótica e possibilidade de incrustação. Contudo, o sistema BRMO-OI pode gerar efluentes de qualidade, com a possibilidade de reúso da água.

PALAVRAS-CHAVE: Osmose inversa, Biorreator osmótico, Programa Wave, tratamento de esgoto.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por recursos hídricos demonstra a importância de novas estratégias para a utilização da água e para o desenvolvimento de processos que possibilitem sua melhor qualidade e conservação. É importante ressaltar que uma das medidas que podem possibilitar o uso sustentável dos recursos hídricos é o reúso de efluentes tratados, que irá influenciar na diminuição da demanda por água doce (LOPES et al., 2020). Segundo Silva (2009), o reúso da água pode ser feito de duas maneiras: uma é a utilização da água de rejeito em processo que necessita de água com qualidade inferior e o outro seria um sistema de ciclo fechado, onde todo o efluente gerado é tratado e pode ser reutilizado no mesmo processo.

Uma das tecnologias indicadas para tratamento de água para reúso é o biorreator com membranas (BRM), que é a junção do processo de separação por membrana com o tratamento convencional biológico, sendo um processo atrativo por produzir efluentes de alta qualidade. Uma das vantagens desse processo é a rejeição completa dos sólidos suspensos e a eficiente degradação dos poluentes por permitir maior concentração de microrganismos. Porém, uma das desvantagens do BRM é a possibilidade de incrustação da membrana devido

à grande quantidade de sólidos suspensos no sistema, influenciando na redução do fluxo do permeado (ACHILLI, 2009; SILVA, 2009).

Com o objetivo de mitigar as incrustações na membrana foi desenvolvido um biorreator com membrana osmótica (BRMO), que integra os biorreatores com membrana de osmose direta altamente seletiva (AMARAL, 2019). A tecnologia da osmose direta (OD) é baseada no fenômeno da osmose, em que a água da solução de alimentação (SA) passa de um meio menos concentrado para um mais concentrado, que é a solução osmótica (SO). Uma vantagem do processo é a baixa propensão à incrustação, além de atuar como uma barreira de solutos e proporcionar uma alta rejeição dos contaminantes de águas residuárias, porém requer uma unidade para reconcentração da SO e recuperação do permeado (CABREARA-CASTILHO et al., 2021; ACHILLI, 2009).

A osmose inversa (OI) é uma tecnologia indicada para a reconcentração da SO e recuperação da água. A OI é um processo em que a água da SA passa pela membrana devido à pressão hidráulica elevada como força motriz. A proposta de um sistema de OD-OI para um BRM possibilita uma dupla barreira aos contaminantes, juntamente com o tratamento biológico e proporciona um menor potencial para incrustação (VINARDELL et al., 2020). Entretanto, é necessário avaliar o desempenho da OI tendo a SO como alimentação, uma vez que a pressão osmótica da SO é elevada.

Portanto, este trabalho buscou simular e avaliar a reconcentração da SO de um biorreator osmótico anaeróbio no tratamento de esgoto, utilizando o programa WAVE (*Water Application Value Engine*), da DUPONT.

OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo do estudo foi avaliar a eficiência da osmose inversa para a reconcentração e recuperação de água da SO de um biorreator osmótico anaeróbio no tratamento de esgoto.

MATERIAIS E MÉTODOS

O biorreator osmótico anaeróbio (BRMO) foi operado por 32 dias, sendo alimentado com esgoto sanitário sintético, de forma contínua, conforme reportado por Arcanjo et al. (2022). A SO era composta por $MgCl_2$ na concentração de 1,55 mol/L. O volume do BRMO era de 4,5 L e a área de membrana de OD era de 264 cm^2 . A vazão de recirculação da SO foi de 75 L/h e o tanque de SO foi colocado sobre uma balança, que permitiu o cálculo do fluxo de permeado na OD em função da variação das massas de SO. A Figura 1 descreve o sistema do BRMO-OI.

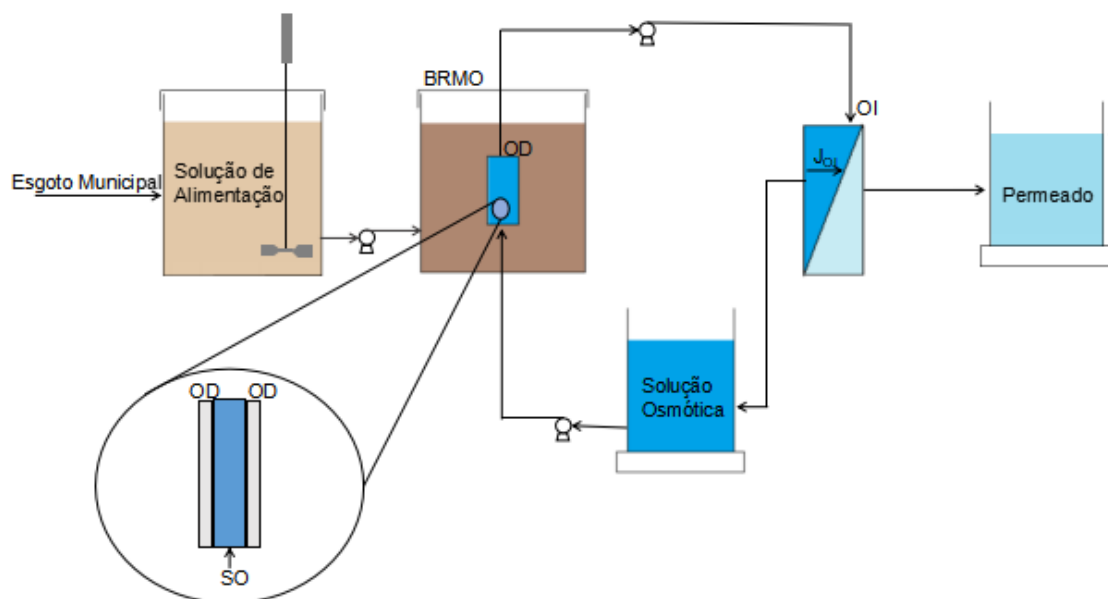


Figura 1: Descrição do BRMO-OI

Foram realizadas simulações através do Software Water Application Value Engine (WAVE), versão 1.18, que é um software de modelagem dos processos de ultrafiltração, nanofiltração, osmose inversa e troca iônica.

Para simular o tratamento da SO pela unidade de OI, no programa WAVE, foi necessário definir alguns parâmetros de projeto. A vazão de esgoto foi definida com base nos dados do município de Malhada de Pedra, na Bahia, cuja população é de 8.326 habitantes, e um coeficiente de consumo de água per capita de 110,08 L/hab.dia (SNIS, 2022) e conforme a NBR 9649 (ABNT, 1986), utilizou-se 0,8 para o coeficiente de retorno. Com base nos dados e no cálculo da vazão média de esgoto, a vazão de esgoto bruto de entrada no sistema é de 30,55 m³/h.

Os cálculos das vazões das diferentes linhas de corrente no sistema foram feitos com base no balanço de massa, conforme detalhado em Arcanjo et al. (2020). A vazão inicial do sistema, ou seja, a vazão de entrada na osmose direta foi de 30,55 m³/h. Considerando 50% de recuperação, a vazão do permeado da osmose direta foi de 15,28 m³/h. Além disso, foi considerada uma diluição de 50% da SO, ou seja, a vazão de SO que entra no compartimento da OD é igual à vazão do permeado da OD e igual a 15,28 m³/h. Logo, a vazão que sai do compartimento da OD é igual a 30,55 m³/h, que também corresponde à vazão de alimentação da OI.

A membrana do sistema OI foi escolhida com base na maior rejeição de sal entre os modelos apresentados pelo programa WAVE, assim o modelo da membrana foi SW30XHR-440, com rejeição teórica de NaCl de 99,82%. A simulação foi realizada com três estágios, contendo o primeiro estágio três vasos de pressão e seis elementos por vaso de pressão e o segundo e terceiro estágios contendo dois vasos de pressão e oito elementos por vaso de pressão, conforme mostrado na Figura 2.

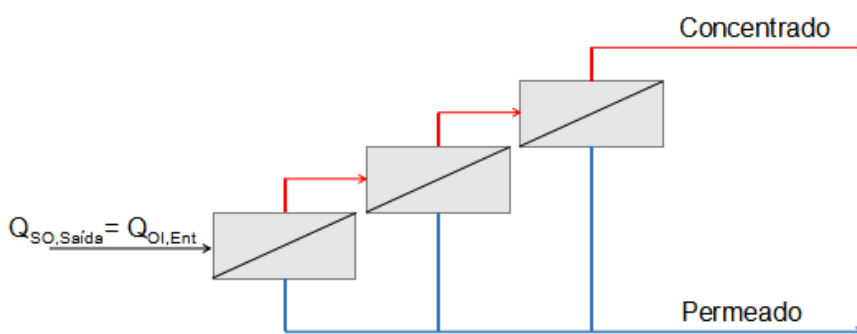


Figura 2: Configuração do sistema de OI do programa Wave

Além dessas definições, houve a necessidade de fazer o balanço iônico dos íons presentes na SO, no próprio WAVE. A Tabela 1 apresenta os valores iniciais dos concentrados e os ajustes realizados pelo programa. Os compostos analisados no estudo e usados como parâmetros de entrada na OI foram NH_4^+ , PO_4^{3-} , alcalinidade, Mg^{+2} , Cl^- e pH.

Tabela 1: Valor inicial da concentração na entrada da unidade de OI e valor ajustado da concentração pelo WAVE

Parâmetros	Valor inicial da concentração	Valor ajustado da concentração
Cl^- (mg/L)	54.961,56	54.640,33
Mg^{2+} (mg/L)	18.624,38	18.733,87
NH_4^+ (mg/L)	5,16	5,19
PO_4^{3-} (mg/L)	0,05*	0,05*
Alcalinidade (mg/L CaCO_3)	38,28	38,22

*Limite de detecção do método.

RESULTADOS

A concentração da SO foi de 1,55 mol/L de $MgCl_2$, sendo que no processo ocorreu uma perda de 0,111 g/L de $MgCl_2$ de fluxo de sal específico para a solução de alimentação na etapa da OD, logo 0,0012 mol/L de Mg^{2+} e 0,002 mol/L Cl^- . Dessa forma, na entrada da unidade de OI, a concentração inicial da solução osmótica foi de 0,77 mol/L de $MgCl_2$, ou seja, 0,78 mol/L de Mg^{2+} e 1,55 mol/L de Cl^- .

Na simulação foram obtidas as concentrações de soluto no permeado e concentrado da OI, bem como a rejeição da OI, conforme a Tabela 2. Para avaliar o efeito do acúmulo de poluentes na SO, foi considerado um tempo de detenção hidráulica (TDH) de 6 h, e a simulação foi repetida 10 vezes, levando em conta o balanço de massa

Tabela 2: Concentração dos íons na entrada da OI (C_{OIent}), no fluxo de concentrado (C_{COI}), no permeado (C_{POI}), e a Rejeição da OI (R_{OI})

Parâmetro	TDH 1				TDH 10			
	C_{OIent} (mg/L)	C_{COI} (mg/L)	C_{POI} (mg/L)	R_{OI} (%)	C_{OIent} (mg/L)	C_{COI} (mg/L)	C_{POI} (mg/L)	R_{OI} (%)
Cl^-	54.640,33 ^a	109.681,00	152,4	99,72	54.640,33	109.681,00	152,6	99,72
Mg^{2+}	18.733,87 ^b	37.605,00	52,19	99,72	18.733,87	37.605,00	52,18	99,72
NH_4^+	5,19 ^c	9,58	0,85	83,62	38,68	72,38	5,36	86,14
PO_4^{3-}	0,05 ^d	0,1	0	100,00	0,5	1	0	100,00
HCO_3^-	38,21 ^e	52,69	2,96	92,25	149,21 ^e	167,9	17,67	88,16
STD	73.417,83 ^f	147.343,00 ^f	208,3 ^f	99,72	73.563,18 ^f	147.494,00 ^f	227,83 ^f	99,69

^{a,b,c,d,e} Valores ajustados pelo software WAVE; ^f Valor dado pelo software WAVE

Em relação ao pH, o permeado da OI apresentou uma variação de 5,7 a 5,9, ou seja, características ácidas, já o concentrado teve uma variação de 9,4 a 9,2, tendo um caráter básico. Além disso, o relatório da simulação, gerado pelo programa WAVE, apresentou a pressão hidráulica de 118 bar, o fluxo médio de 7,5 L/m².h e um consumo de energia específico de 8,25 kWh/m³. O programa WAVE também alertou para a possibilidade de incrustações na membrana devido à saturação de $Mg(OH)_2$, cuja concentração era superior a 100% da solubilidade do íon, conforme mostrado na Figura 3.



Alertas de solubilidade da OR

Alerta	Passo No
$Mg(OH)_2$ (% saturação) > 100	1
Antiincrustantes podem ser necessários. Consulte o seu fornecedor de antiincrustantes para obter a dosagem e a recuperação máxima em que o sistema pode operar.	1

Figura 3: Alerta de Solubilidade da OI

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados da simulação apresentaram uma rejeição de 100% para o íon PO_4^{3-} , mesmo considerando como dado de entrada o limite de detecção da análise de P. Já para o íon amônio (NH_4^+), inicialmente a rejeição de 83,62% foi baixa em comparação ao definido para o modelo da membrana, porém no último ciclo se obteve uma rejeição de 86,14%. O pH básico no concentrado pode influenciar na conversão do íon amônio em amônia, contudo o programa não pode identificar a presença da amônia no permeado. Porém, o pH do permeado apresentou características ácida e uma variação de 2,6 a 17,62 mg/L de HCO_3^- , nas simulações realizadas. Já no concentrado da OI (com alcalinidade elevada) na primeira simulação apresentou uma concentração de 52,69 mg/L de HCO_3^- e após 10 (dez) simulações teve um aumento de 115,21 mg/L da

concentração de HCO_3^- . Além disso, a taxa de rejeição do íon HCO_3^- na primeira simulação foi de 92,25%. Contudo, com o decorrer das simulações foi observado um declínio da taxa de rejeição do íon HCO_3^- pela membrana de OI, sendo na décima simulação uma taxa de rejeição de 88,16%. Como consequência o permeado teve um aumento de 14,71 mg/L de HCO_3^- . Segundo Howe (2017), o ajuste do pH na SA com ácido pode mitigar a precipitação de carbonato na membrana, através da conversão do carbonato em bicarbonato e dióxido de carbono.

Em relação aos sólidos totais dissolvidos, houve um aumento quantitativo no concentrado de 151 mg/L, da primeira simulação para a décima simulação. Já o permeado teve um variação de 18,50 mg/L entre a primeira e décima simulação. O sistema de OI apresentou uma variação da taxa de rejeição para STD de 99,72% a 99,69%. De acordo com Altaee et al (2014), o aumento da taxa de recuperação poderá reduzir o STD no permeado devido ao maior fator de diluição. As concentrações dos íons e do STD no permeado e no concentrado também influenciam no tempo necessário para a troca da SO, onde são acumulados, pois é importante manter a qualidade da água principalmente se o objetivo for o reúso.

Os íons Cl^- e Mg^{2+} apresentaram a mesma taxa de rejeição, ou seja, 99,72% nas 10 (dez) simulações realizadas. A quantidade da concentração do íon Cl^- no concentrado e no permeado foram em média de 109.681,00 mg/L e 152,45 mg/L, respectivamente. Já a concentração do íon de Mg^{2+} no permeado e concentrado foram 52,19 mg/L e 37.605,00 mg/L, respectivamente. Nesta análise, é importante avaliar a quantidade da concentração dos íons Cl^- e Mg^{2+} no permeado, pois a sua elevada concentração no permeado tem influência negativa na saúde humana.

Devido à elevada salinidade da SO, a simulação apresentou uma pressão de 118 bar para a OI. Segundo Howe et al. (2017), recomenda-se uma pressão de 55 a 85 bar para soluções com salinidade parecida com a água do mar. Em um estudo realizado por Osipi et al. (2018), observa-se que a elevada pressão afeta a faixa de recuperação da OI, como também a faixa de concentração da SO na otimização do processo. Esta elevada pressão hidráulica aumenta a passagem de sal para o permeado, além da possível precipitação de sal na superfície da membrana, ou seja, da formação de incrustação na membrana, pelo íon de magnésio, devido à sua elevada quantidade na SO. A possibilidade de incrustação pode influenciar na redução do fluxo do permeado e levar à necessidade de limpeza da membrana com mais frequência, reduzindo a vida útil da membrana. Segundo Altaee et al. (2014), a incrustação na membrana é influenciada pela recuperação do permeado, sendo indicado não exceder 50% a depender do teor da salinidade da SO. Além disso, de acordo com Xie et al. (2014), deve-se implantar um procedimento adicional para mitigar o acúmulo de contaminante na SO como, por exemplo a adsorção de carvão ativado granular, tendo como objetivo garantir a qualidade da água e a sustentabilidade do sistema BRMO-OI.

Por fim, a simulação apresentou um consumo médio de energia específica de 8,26kWh/m³ nas dez simulações realizadas, com uma potência média de 126,2 kWh. Segundo Mazlan et al. (2016), o processo de dessalinização da água do mar pode ter um consumo de energia específica de quase 2 kWh/m³, com uma recuperação de 50%. Contudo a simulação apresentou um consumo de energia específica um pouco elevada. Esta elevação de energia se deve à elevada salinidade da SO, conforme descrito anteriormente.

CONCLUSÕES

O BRMO apresentou um baixo fluxo inverso de sal devido ao cloreto de magnésio na SO, com uma perda de 0,111g/L de MgCl_2 . Porém, a alta salinidade da SO influenciou na pressão hidráulica necessária na OI, de 118 bar, que é um valor acima do estabelecido na literatura. A elevada pressão, como também a alta concentração de MgCl_2 , propicia a incrustação na membrana de OI, podendo ocasionar a redução do fluxo do permeado e/ou maior consumo energético. Observou-se que o software WAVE apresentou limitação quanto à simulação com alta concentração de Mg^{2+} e Cl^- .

Observou-se que o consumo de energia específica e a potência são influenciados pela pressão hidráulica e salinidade da SO. Logo, a simulação apresentou um elevado consumo médio de energia específica de 8,26kWh/m³, com uma potência média de 126,2 kWh.

Em relação à qualidade do permeado, a simulação apresentou rejeições de 86,14%, 100%, 96,69%, 99,72% e 99,72% para NH_4^+ , PO_4^{3-} , STD, Mg^{2+} e Cl^- respectivamente, com uma recuperação de 50%. Na simulação não

foi possível avaliar o impacto da alta salinidade na possível redução do fluxo, sendo no estudo considerado um fluxo constante de 7,5 LMH, em cada ciclo. Além disso, o estudo demonstrou a viabilidade do reúso do permeado, por exemplo, na irrigação das áreas verdes do Município.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACHILLI, A.; MARCHAND, E. A.; CHILDRESS, A. E.. The forward osmosis membrane bioreactor: a low fouling alternative to MBR processes. *Desalination*, v. 239, n. 1-3, p. 10-21, 2009.
2. ALTAEE, A.; ZARAGOZA, G.; TONNINGEN, H. R.. Comparison between Forward Osmosis-Reverse Osmosis and Reverse Osmosis processes for seawater desalination. *Desalination*, V. 336, 2014, p 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.01.002>
3. AMARAL, M. C. S.; RICCI, B. C.; FERREIRA, B. P; COSTA, F. C. R.; LISBOA, F. C. . Estudo do desempenho de um biorreator com membranas anaeróbio osmótico acoplado à destilação assistida por membranas com foco na remoção de matéria orgânica e micropoluentes. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2019.
4. ARCANJO, G. S.; SANTOS, C. R.; COSTA, F. C. R.; BATISTA, I. F.; AMARAL, M. C. S.. Forward osmosis as an opportunity for acid mining effluent reuse - An assessment of concentration polarization effects on forward osmosis performance and economic aspects. *Separation Science and Technology*, 2020
5. CABRESA-CASTILLO, E. H.; CASTILLO, I.; CIUDAD, G.; JEISON, D.; ORTEGA-BRAVO, J. C.. FO-MD setup analysis for acid mine drainage treatment in Chile: An experimental-theoretical economic assessment compared with FO-RO and single RO. *Desalination*, Vol. 514, 2021
6. HOWE, K. J.; HAND, D. W.; CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; TCHOBANOGLIOUS, G.. Princípios de tratamento de água. In __: *Osmose Inversa*. Cengage learning, 2017
7. LOPES, T. S. A; SANTOS, W. B.; SILVA, G. A. B; FERREIRA, W. B. Biorreatores de membrana aplicados ao tratamento de efluentes: características e aspectos importantes. Congresso Nacional de Pesquisa e Ciência, 2020.
8. OSIPI, S.R.; SECCHI, A. R.; BORGES, C.P.. Cost assessment and retro-techno-economic analysis of desalination technologies in onshore produced water treatment. *Desalination*. v. 430, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.015>
9. SILVA, M. K.. Biorreator com membrana: uma alternativa para tratamento de efluente. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.
10. VINARDELL, S.; ASTALS, S.; MATA-ALVAREZ, J.; DOSTA, J.. Techno-economic analysis of combining forward osmosis-reverse osmosis and anaerobic membrane bioreactor technologies for municipal wastewater treatment and water production. *Bioresource Technology*. v. 297, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122395>
11. XIE, M.; NGHIEM, L.D.; PRICE, W.E; ELIMELECH, M.. A forward osmosis membrane distillation hybrid process for direct sewer mining: system performance and limitations. *Environ. Sci. Technol.* 2013. <https://doi.org/10.1021/es404056e>