

II-343 - FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO COMO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

André Câmara de Brito⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental. Mestrando em Engenharia Sanitária pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Dayana Melo Torres

Bióloga e Tecnóloga em Gestão Ambiental. Mestre em Engenharia Sanitária (UFRN). Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB).

André Luís Calado Araújo

Engenheiro Civil. Mestre em Engenharia Sanitária. Doutor em Engenharia Civil (University of Leeds). Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN).

Rui de Oliveira

Engenheiro Civil. Mestre em Engenharia Civil. Doutor em Engenharia Civil (University of Leeds). Docente da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB).

Endereço⁽¹⁾: Av. Porto de Pedras, 4607 – Nova Parnamirim – Parnamirim/RN

RESUMO

Lagoas de estabilização possuem vantagens no tratamento de efluentes, principalmente em regiões de clima quente. Alcançam boas eficiências na remoção de matéria orgânica e organismos patogênicos, além de não utilizarem energia elétrica e apresentarem simplicidade operacional. Entretanto, possuem como desvantagem a elevada concentração de sólidos suspensos, principalmente devido à biomassa algal. O objetivo desta pesquisa consiste em realizar o pós-tratamento de efluentes de lagoas de estabilização visando à remoção das algas através de flotação por ar dissolvido (FAD). A pesquisa foi realizada com o efluente final da ETE Ponta Negra, aplicando-se a FAD em escala de bancada, e variando-se determinadas condições operacionais, a saber: dose de coagulante (policloreto de alumínio), taxa de recirculação de água saturada, pH e tempo de floculação. Os parâmetros analisados foram pH, oxigênio dissolvido, turbidez, sólidos suspensos, cor, DQO, clorofila *a*, fósforo total, ortofosfato solúvel, nitrogênio amoniacal e nitrogênio orgânico. A melhor condição operacional apontou uma quantidade de sólidos removidos, em base seca, de 541 kg/dia para a ETE estudada. Os diagramas de Pareto demonstraram que a dosagem de coagulante foi a variável resposta de maior influência na remoção de todos os parâmetros, tendo-se para esta uma interação linear positiva. É importante destacar que as variáveis operacionais são influenciadas por diversos fatores, sobretudo pelas características do efluente a ser tratado, bem como o tipo de coagulante utilizado.

PALAVRAS-CHAVE: Lagoas de estabilização, Flotação por ar dissolvido, Remoção de algas.

INTRODUÇÃO

As lagoas de estabilização são sistemas biológicos de tratamento de águas residuárias capazes de remover quantidades significativas de matéria orgânica e microrganismos patogênicos, podendo suportar cargas orgânicas e hidráulicas elevadas, além de não necessitarem de energia elétrica para sua operação. A aplicação de lagoas de estabilização é viável principalmente em regiões de clima quente e que possuem grandes áreas disponíveis para sua implantação (VON SPERLING & CHERNICHARO, 2005; JORDÃO & PESSOA, 2011). Cerca de 90% do tratamento de esgotos no Rio Grande do Norte (RN) é constituído por lagoas de estabilização, correspondendo a mais de 80 sistemas (SILVA FILHO, 2007).

Apesar das vantagens das lagoas de estabilização, a grande quantidade de sólidos suspensos, principalmente devido a biomassa algal, e a situação dos corpos receptores com o problema de eutrofização, principalmente quando esses servem como mananciais de abastecimento de água, gera a necessidade de admitir parâmetros mais rigorosos de qualidade dos efluentes, fazendo com que o pós-tratamento seja necessário mesmo que a legislação vigente – Resolução CONAMA nº 430/11 – não exija.

O pós-tratamento de efluentes de lagoas de estabilização com vistas à remoção de matéria orgânica, sólidos e nutrientes já está bastante desenvolvido, principalmente com relação à qualidade dos efluentes gerados. Uma alternativa que se adequa ao pós-tratamento de efluentes de lagoas de estabilização é a flotação que, inclusive, já vem sendo usada por alguns sistemas de tratamento de esgotos (Dantas, 2013). O processo de flotação é definido como a remoção de partículas, por meio da introdução de microbolhas de ar, que, quando em contato com as partículas, formam um aglomerado partícula-bolha de densidade aparente menor que a da água, que tende a flutuar até a superfície do tanque de flotação, onde é removido (CHEREMISINOFF, 2002; RIJK *et al.*, 1993).

Dentre os tipos de flotação, uma que tem sido utilizada como pós-tratamento é a flotação por ar dissolvido (FAD), em que ocorre a injeção de água saturada com ar sob pressão no tanque de flotação, que se encontra à pressão atmosférica, ocorrendo a liberação de microbolhas (CHEREMISINOFF, 2002). Este tipo de flotação é o mais recomendado por minimizar a ruptura dos flocos formados na etapa de coagulação/floculação (LACERDA *et al.*, 1997). A vantagem da flotação em relação à sedimentação está, principalmente, devido a tendência das algas em flutuar, seu pequeno tamanho, baixa densidade da célula e carga superficial negativa (EDZWALD, 1993; SHELF & WACHS, 1974; TEIXEIRA & ROSA, 2006).

Coward, *et al.* (2013) faz a comparação com as principais técnicas de retirada de algas que incluem: centrifugação, filtração, floculação, sedimentação e flotação. Os autores concluem que a flotação tem uma relação custo/benefício extremamente vantajosa quando comparada a maioria das técnicas de retirada de algas, consumindo apenas 0,015 kW/m³.

Tessele *et al.* (2005) estudaram a FAD para polimento do efluente final da ETE Samambaia/DF e atingiram remoções globais acima de 90% para DBO, sólidos suspensos e fósforo total. Fabreti (2006) realizou testes comparando a sedimentação e a flotação na remoção de algas de efluente de lagoas da ETE de Lins-SP, em escalas de bancada e piloto, bem como os tipos de coagulantes utilizados no processo físico-químico, obtendo a flotação como melhor processo de separação sólido-líquido e o sulfato de alumínio como reagente de maior potencial técnico. Tais resultados foram compatíveis com os obtidos por Teixeira & Rosa (2006), que também compararam os dois processos e concluíram que a coagulação seguida de floculação e flotação é mais eficiente do que a sedimentação na remoção de clorofila “a”, cujos resultados apresentaram eficiência de remoção de clorofila “a” entre 93 e 98%.

O objetivo desta pesquisa consiste em realizar o pós-tratamento de efluentes de lagoas de estabilização visando à remoção das algas através da FAD.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada com o efluente final da Estação de Tratamento de Esgoto de Ponta Negra, Natal, Rio Grande do Norte (5° 47' 42" de latitude sul e 35° 12' 34" de longitude oeste) (Figura 1), a qual atende uma população predominantemente de classe média-alta e foi dimensionada para uma vazão média de final de plano de 95 L/s (8.200 m³/d). A ETE de Ponta Negra apresenta tratamento preliminar composto por gradeamento e caixas de areia, bem como calha Parshall, com de medidor ultrassônico de vazão; após o tratamento preliminar o sistema apresenta uma lagoa facultativa primária, seguida de duas lagoas de maturação em série. O efluente final é disposto no solo em valas de infiltração.

As características físicas das lagoas da ETE Ponta Negra foram identificadas e quantificadas entre os anos de 2009 e 2011 (Tabela 1).



Figura 1: Fotografia aérea da ETE Ponta Negra (Natal).
Fonte: Diniz (2012)

Tabela 1: Caracterização física da ETE Ponta Negra.

Características	Reatores		
	LFP	LM1	LM2
Área (m ²)	55.174	28.038	28.600
Volume (m ³)	110.348	42.057	43.889
Profundidade (m)	2	1,5	1,5
Λs (KgDBO ₅ /ha.dia)	269	209	149
TDH (dia)	23,3	8,7	9

Fonte: Araújo (2011).

Foram realizados ensaios em jarteste para avaliar as faixas mais adequadas de dosagens de coagulante e faixa de pH a serem testados nos ensaios com a FAD. Nesta fase foram testadas doses de coagulantes na faixa de 25 a 150 mg/L para avaliar os tamanhos dos flocos durante a floculação. Com relação ao pH, a faixa avaliada foi entre 6,5 e 8,5.

Para realização dos ensaios de pós-tratamento utilizou-se o flotatestes, que possui três colunas de flotação (reator) com capacidade de 4 litros cada, mais uma câmara de saturação com capacidade para 4 litros, todas confeccionadas em acrílico para a melhor visualização do processo (Figura 2). Para cada reator há uma haste metálica interligada ao misturador com mostrador digital que permite o emprego de uma rotação predeterminada resultando em diferentes gradientes de velocidade.

Para a mistura rápida foi adotado um gradiente de velocidade de 274 s^{-1} durante 20 segundos, enquanto que para a mistura lenta foi fixado um gradiente de velocidade de 63 s^{-1} , variando-se o tempo de floculação. A pressão na câmara de saturação é controlada por uma válvula, na qual permanece constante o valor de 4 bar por um tempo de 20 minutos.

Foram testados os seguintes fatores a fim de se obter as condições operacionais que maximizem as eficiências de remoção da biomassa algal: dose de coagulante, pH, taxa de recirculação e tempo de mistura lenta.

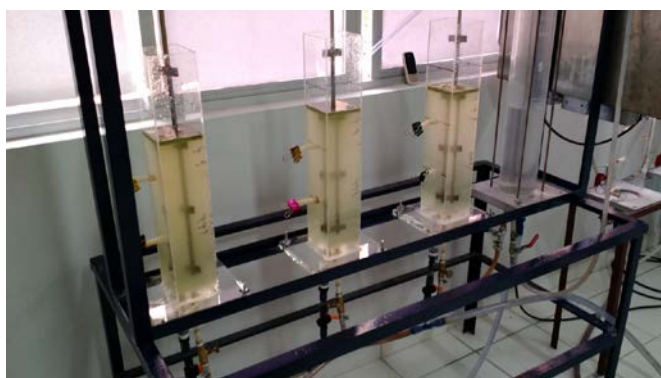


Figura 2: Flotatest para os ensaios de pós-tratamento dos efluentes.

Para a realização dos ensaios com a FAD foi feito um planejamento experimental aplicado ao coagulante policloreto de alumínio (PAC), envolvendo os fatores pH, concentração de coagulante, taxa de recirculação da água saturada e tempo de floculação (Tabela 2). Estes fatores foram variados em três níveis (-, 0 e +) em todas as etapas realizadas, para a determinação das condições operacionais ótimas.

Tabela 2: Variáveis controladas no processo de coagulação-floculação-flotação

Variáveis	Nível		
	-	0	+
pH	7,0	7,5	8,0
Concentração de coagulante (mg/L)	50	75	100
Taxa de recirculação (%)	10	20	30
Tempo de floculação (min)	10	15	20

Os valores adotados foram obtidos através de testes preliminares em jarteste e em flotatest, além das bibliografias. Segundo Finch & Smith (1986), um planejamento experimental permite extrair eficientemente a informação desejada utilizando um número mínimo de testes.

Os ensaios, foram realizados em triplicata, planejados em fatorial aleatório, utilizando o critério k^{a-1} , em que k é o número de níveis e a é o número de fatores, resultando, no presente caso, em 81 ensaios ($3^{4-1} = 27$ ensaios x 3 réplicas). Os experimentos foram realizados entre dezembro de 2014 e março de 2015.

As amostras foram coletadas semanalmente no período da manhã, caracterizando-se os efluentes brutos e pós-tratados através de análises de pH, oxigênio dissolvido, turbidez, sólidos suspensos totais, cor, DQO, clorofila a , fosforo total, ortofosfato solúvel, nitrogênio amoniacal e nitrogênio orgânico, todos seguindo os procedimentos padrões segundo APHA *et al.* (2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características físico-químicas do efluente final da ETE Ponta Negra foram determinadas entre os períodos de dezembro de 2014 e março de 2015, e são apresentadas na Tabela 3. Constatou-se que os sólidos suspensos totais e a clorofila a são elevados, podendo causar prejuízos ambientais e sanitários, de acordo com disposição dada. Os sólidos removidos a partir do pós-tratamento podem ser utilizados para outros fins, assim como, o efluente pós-tratado.

Tabela 3: Caracterização físico-química do efluente final da ETE Ponta Negra (média e faixa de variação).

pH	T (°C)	OD (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/L)	Clorofila a (µg/l)
7,3	28,3	1,6	299	116	1415
7,2-7,4	27,4-29,5	0,8-3,6	211-372	96-146	1184-1699

A partir dos experimentos realizados no flotatest, foram obtidos os resultados de eficiência apresentados na Tabela 4, a qual apresenta os 27 testes realizados, variando-se algumas condições operacionais, de acordo com os níveis apresentados na Tabela 2.

Tabela 4: Eficiências de remoção obtidas no pós-tratamento por meio da FAD para o efluente final da ETE Ponta Negra.

Coagulante (mg/L)	pH	Taxa de recirculação (%)	Tempo de Floculação (min)	DQO	SS	Turbidez	Cor	Clorofila <i>a</i>
50	7	10	10	57%	29%	55%	50%	54%
50	7	20	20	36%	33%	54%	53%	50%
50	7	30	15	48%	42%	50%	55%	48%
50	7,5	10	20	46%	38%	51%	54%	48%
50	7,5	20	15	45%	29%	55%	51%	43%
50	7,5	30	10	64%	34%	20%	45%	49%
50	8	10	15	39%	33%	59%	49%	44%
50	8	20	10	54%	30%	56%	49%	48%
50	8	30	20	31%	30%	56%	48%	23%
75	7	10	20	74%	47%	66%	67%	65%
75	7	20	15	46%	43%	73%	65%	63%
75	7	30	10	32%	42%	77%	74%	70%
75	7,5	10	15	40%	54%	83%	77%	78%
75	7,5	20	10	56%	37%	65%	61%	50%
75	7,5	30	20	41%	42%	71%	60%	62%
75	8	10	10	50%	48%	73%	63%	64%
75	8	20	20	44%	40%	72%	71%	61%
75	8	30	15	55%	52%	83%	74%	74%
100	7	10	15	70%	66%	83%	74%	73%
100	7	20	10	53%	45%	66%	61%	60%
100	7	30	20	70%	50%	74%	71%	71%
100	7,5	10	10	45%	62%	81%	71%	68%
100	7,5	20	20	59%	52%	78%	67%	69%
100	7,5	30	15	70%	61%	82%	74%	71%
100	8	10	20	62%	55%	76%	69%	63%
100	8	20	15	52%	54%	78%	72%	68%
100	8	30	10	58%	64%	81%	70%	74%

Com base nos dados obtidos, constatou-se que o fator de maior influência no pós-tratamento do efluente final da ETE Ponta Negra foi a dosagem do coagulante PAC. De acordo com o aumento da dosagem, as concentrações dos parâmetros analisados diminuíram, tendo uma média de DQO de 118 mg/L para a dosagem de 100 mg/L de PAC. Para essa mesma dosagem a concentração no efluente pós-tratado foi de 52 mg/L para sólidos suspensos, 51 mg/L para turbidez, 740 PtCo/L para cor, e 453 µg/L para clorofila *a*. As Figuras 3 e 4 apresentam a variação obtida para sólidos suspensos e turbidez, respectivamente, para o efluente final da ETE e o pós-tratado por meio da FAD.

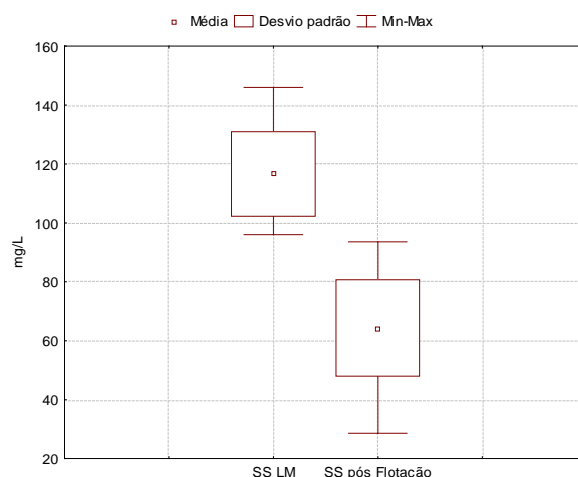


Figura 3: Resultados do pós-tratamento para SS.

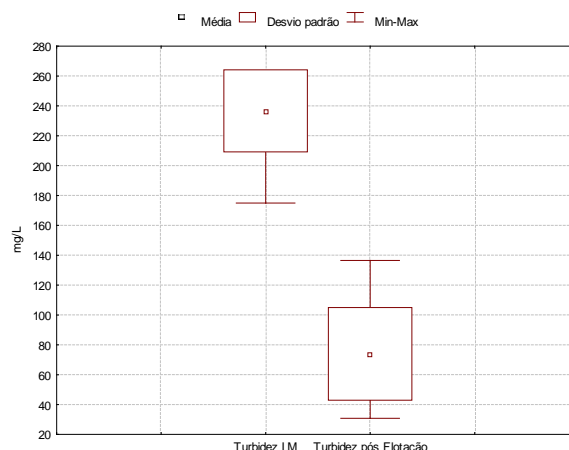


Figura 4: Resultados do pós-tratamento para turbidez.

Analisando-se os resultados obtidos nos testes, foi escolhida a melhor condição operacional, a fim de se avaliar a quantidade de sólidos, em base seca, gerados diariamente pela ETE, caso fosse aplicada a FAD como pós-tratamento. A melhor condição operacional foi a do teste 7 (pH 7, concentração de coagulante igual a 100 mg/l, taxa de recirculação de 10% e tempo de floculação de 15 minutos). Para essa situação, o efluente final apresentou uma concentração de sólidos suspensos de 100 mg/L, removendo-se através da FAD 66 mg/L, obtendo-se assim, uma produção de sólidos pela ETE de 541 kg/dia.

No diagrama de Pareto de efeitos padronizados, ilustrado na Figura 5, pode-se observar, para um nível de confiança de 95%, que a dosagem de coagulante foi a variável resposta de maior influência na remoção de todos os parâmetros, tendo-se para esta uma interação linear positiva, ou seja, quanto maior a dosagem, melhor é a eficiência obtida, e consequentemente, menor será o valor do parâmetro analisado no efluente pós-tratado.

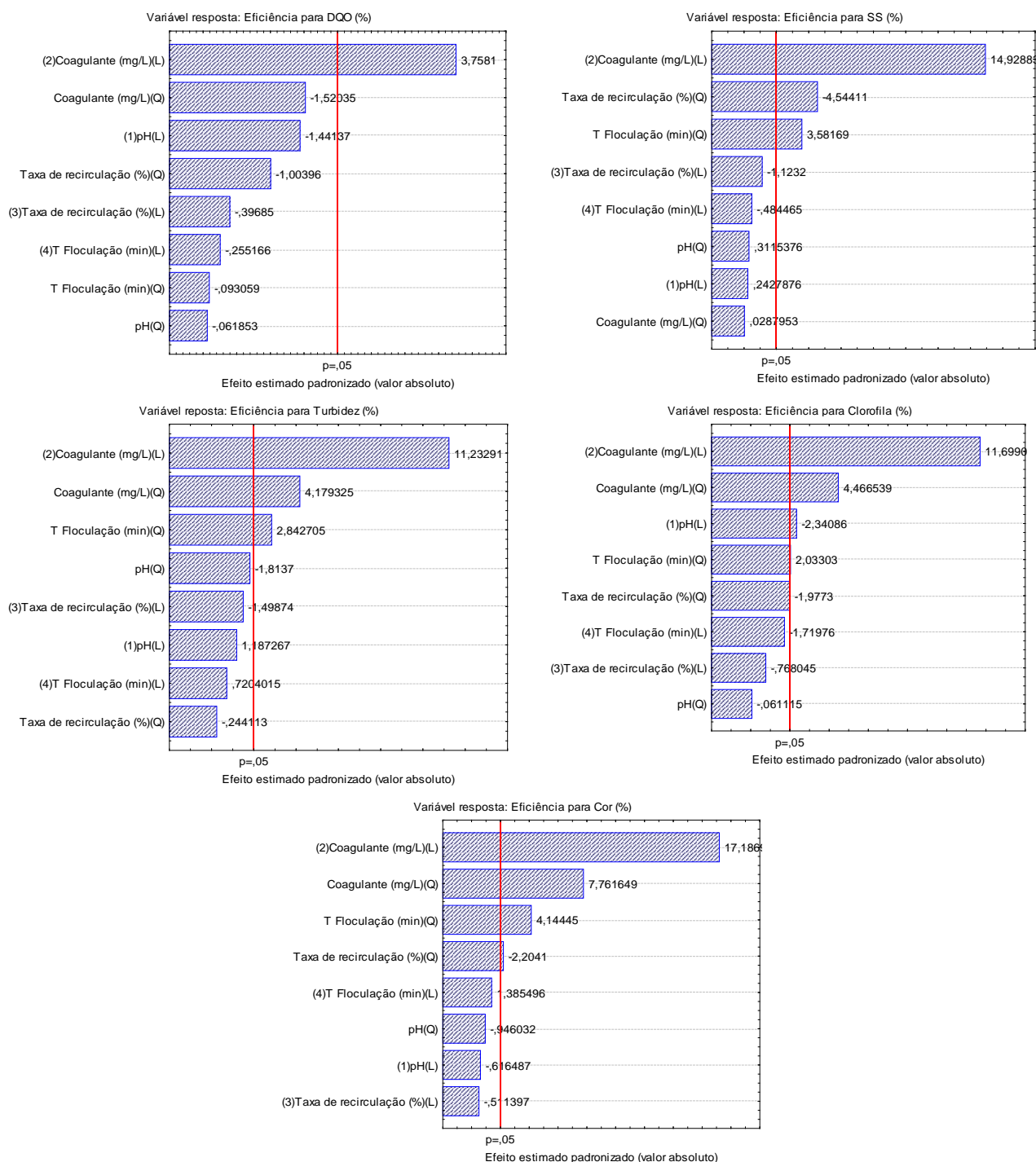


Figura 5: Diagramas de Pareto para avaliação das variáveis resposta x variáveis operacionais.

Além da dosagem de coagulante ter influenciado significativamente as eficiências de remoção, outras variáveis operacionais também refletiram no processo de flotação. Através da Figura 5, verifica-se que a taxa de recirculação possui uma relação quadrática e negativa com sólidos suspensos e cor, enquanto que o tempo de floculação influencia positivamente as eficiências de remoção para sólidos suspensos, turbidez e cor. Com relação ao pH, observou-se que o mesmo influenciou significativamente as remoções para Clorofila *a*, de maneira negativa. Esses resultados demonstram que para o efluente testado não é necessário realizar a correção do pH, e pode-se aplicar o pós-tratamento com o efluente final da ETE com pH natural. É importante destacar

que as variáveis operacionais são influenciadas por diversos fatores, sobretudo pelas características do efluente a ser tratado, bem como o tipo de coagulante utilizado.

Em relação à remoção de nutrientes nitrogenados e fosforados, identificaram-se elevadas remoções para fósforo total (média de 74%, e valor absoluto de 1,9 mg/L) e ortofosfato solúvel (média de 100%). Para as frações de nitrogênio, obteve-se no efluente pós-tratado uma média para amônia de 19,3 mg/L (19% de remoção), para nitrogênio orgânico de 2,5 mg/L (41% de remoção), e para NTK de 21,8 mg/L (22% de remoção).

Segundo Teixeira & Rosa (2006), coagulantes tais como sulfato de alumínio, sulfato férrico, cloreto férrico e coagulantes polimerizados, como o policloreto de alumínio (PAC) têm mostrado resultados satisfatórios no tratamento de efluentes ricos em algas. Além do uso do coagulante certo, para que o processo de FAD seja adequadamente eficiente, é necessário que se garanta as condições ótimas de pH de coagulação e de dosagem do coagulante (EDZWALD & WINGLER, 1990), de maneira que os flocos formados tenham características adequadas (tamanho, densidade e carga) para proporcionar uma melhor agregação entre as microbolhas de ar e os flocos.

A flotação também tem sido aperfeiçoada com o uso de outras técnicas, como no trabalho realizado por Jun *et al.* (2010), que utiliza um processo de coagulação/eletro-flotação, em que é aplicada uma corrente elétrica para favorecer a floculação, para remoção de algas, obtendo-se valores acima de 93% de remoção nos melhores resultados. O uso da flotação associada a outras técnicas também apresenta bons resultados de remoção de algas, como no trabalho realizado por Teixeira & Rosa (2006), em que foi realizado um processo de flotação seguido por nanofiltração, atingindo eficiências de 100% de remoção de clorofila “a” e microcistinas.

CONCLUSÕES

Viabilizar a recuperação da biomassa de algas nos efluentes de lagoas de estabilização garante que os sólidos em suspensão, nutrientes e a matéria orgânica particulada não cheguem aos mananciais ou aos solos, gerando impactos ambientais como, por exemplo, eutrofização das águas, salinização e compactação dos solos.

Identificou-se que a dosagem de PAC utilizada é o fator preponderante no pós-tratamento através da FAD. Isso demonstra que para o efluente testado não é necessário realizar a correção do pH, e pode-se aplicar o pós-tratamento com o pH natural do efluente final. A partir dos resultados constatou-se que a melhor condição operacional foi a do teste 7 (pH 7, concentração de coagulante igual a 100 mg/l, taxa de recirculação de 10% e tempo de floculação de 15 minutos), e extrapolando-se essas condições para o sistema em escala real, obtém-se uma produção de sólidos de 541 kg/dia na ETE estudada.

Dessa forma, conclui-se que é imprescindível o pós-tratamento de efluentes de lagoas de estabilização aplicadas ao tratamento de esgotos sanitários, quando for inevitável o lançamento em corpos d’água ou quando se destinar a usos (reúso) que requeiram baixas concentrações de sólidos em suspensão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA; WATER ENVIRONMENT FEDERATION – WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21ed. Hardcover. 2005. 1368p.
2. ARAÚJO, A. L. C. **Avaliação operacional e da eficiência de lagoas de estabilização no estado do RN: Programa de pesquisa em saúde e saneamento**. Natal: FUNASA, 2011. Relatório Final de Projeto de Pesquisa.
3. BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamentos de efluentes, complementa e altera a Resolução CONAMA nº 357/05. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: Abril. 2015.
4. CHEREMISINOFF, N.P Handbook of water and wastewater treatment technologies. **Polucion Engineering**. BUTTERWORTH HEINEMANN, 2002

5. COWARD, T.; LEE, J.G.M.; CALDWELL, G.S. Development of a foam flotation system for harvesting microalgae biomass. **Algal Research**. ELSEVIER, 2013.
6. DANTAS, C. V. da C. **Avaliação da flotação por ar dissolvido no polimento de efluentes de lagoa de estabilização**. Natal, RN: Dissertação de mestrado (UFRN), 2013.
7. EDZWALD, J.K. Algae, bubble, coagulants, and dissolved air flotation. **Water sci. Technol.** 27 (10), 67-81. 1993.
8. FABRETI, A. A. **Pós-tratamento de efluente de lagoa de estabilização através de processo físico-químico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
9. JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 5. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009.
10. JUN, S.; LI-KE, X.; HUI-PING, D. Enhanced coagulation/electro-flotation process for algae removal. In: 4th Conference on Management and Service Science (MASS), **Anais...**, Wuhan, China, 2010.
11. LACERDA, M. R. S.; MARQUES, S. F. S.; BRANDÃO, C. C. S. A influência do pH de coagulação e do tempo de floculação na flotação por ar dissolvido de águas de baixa turbidez e com presença de algas. In: 19th CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, **Anais...** Foz do Iguaçu: ABES, 1997.
12. RIJK, S.E ; VAN DER GRAAF, J.H.J.M. ; DEN BLANKEN, J.G. Bubble size in flotation thickening. **Water Reserch**. Vol. 28. Nº 2, pp. 465-473, printed in Great Britain, 1994.
13. SHELF, E.S.G ; WACHS, A.M. Improved electroflotation for the removal of suspended solids from algal pond effluents. **Water Reserch**, vol. 8 p.587 to 592. Printed in Great Britain, 1974)
14. SILVA FILHO, P. A. da. **Diagnóstico operacional de lagoas de estabilização**. Natal, RN: Dissertação de mestrado (UFRN), 2007.
15. TESSELE, F.; MONTEGGIA, L. O.; FRONZA, A.; HEGLERT, A. P. Uso Integrado de reator anaeróbio e lagoa de polimento para tratamento de esgoto doméstico diluídos em clima sub-tropical. Anais do 23th Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande, MS. **Anais...** 2005.
16. TEIXEIRA, M. R.; ROSA, M. J. Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of *Microcystis aeruginosa*. Part I: The key operating conditions. **Separation and purification technology**, n. 52, 2006.
17. VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. **Biological wastewater treatment in warm climate regions**. IWA Publishing, 2005. v. 1 e 2.