



## II-300 - DIMENSIONAMENTO E AVALIAÇÃO DE LAGOAS AERADAS PARA TRATAMENTO DE LIXIVIADOS DE ATERRO SANITÁRIO ESTABILIZADO

**Wagner Guadagnin Moravia**<sup>(1)</sup>

Engenheiro Civil, Pesquisador DTI - CNPq do PROSAB 5, Mestre e Doutorando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

**Míriam Cristina Santos Amaral**<sup>(2)</sup>

Engenheira Química, Mestre e Doutoranda em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

**Liséte Celina Lange**<sup>(3)</sup>

Química, Doutora em Tecnologia Ambiental pela Universidade de Londres - Inglaterra, Profª. Adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

**Lineker Max Goulart Coelho**<sup>(4)</sup>

Graduando em Engenharia Civil, Bolsista CNPq de Iniciação Científica no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil.

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Universidade Federal de Minas Gerais/Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Av. do Contorno, 842 - 7º andar - Centro, Belo Horizonte - MG. CEP: 30.110-060 Tel: +55 (31) 3409-1007; Fax: +55 (31) 3409-1879; e-mail: [moravia@desa.ufmg.br](mailto:moravia@desa.ufmg.br)

### RESUMO

O lixiviado de aterro sanitário é um líquido formado por produtos da degradação dos resíduos e pela água que percola as células de aterramento. Esse efluente possui elevado potencial poluidor, sendo seu tratamento indispensável. Quanto as formas de tratamento, os sistemas mais utilizados envolvem processos biológicos, dentre os quais se destacam as lagoas aeróbias. Sendo assim, o presente trabalho tem por objetivo apresentar os resultados referentes ao dimensionamento, implantação, monitoramento e avaliação de um sistema de lagoas aeradas, em escala demonstrativa, utilizadas no tratamento de lixiviado de aterro sanitário com características refratárias. Ressalta-se que para a determinação das dimensões da lagoa foram considerados os seguintes critérios: tempo de detenção hidráulica (*TDH*), vazão (*Q*), carga afluente de DQO (*L*), taxa de aplicação superficial (*Ls*), profundidade (*h*), relação geométrica (comprimento/largura = *L/B*) e o coeficiente de remoção de matéria orgânica (*K*). Os valores encontrados na literatura auxiliaram na determinação dos parâmetros da lagoa. Já a caracterização do lixiviado bruto foi mensal e realizada durante 12 meses onde foram selecionados os seguintes parâmetros físico-químicos: DQO, DBO, pH, alcalinidade, série sólidos, nitrogênio total e amoniacal. Em relação a partida do sistema, nota-se que este se apresentou estável após o 56º dia de partida, com concentração de SSV máxima igual a 65 mg/L, eficiência média de remoção de DQO solúvel em torno de 20% e baixa remoção de nutrientes quando operada com tempo de detenção hidráulica de 7 dias. Os resultados do monitoramento, portanto, revelam uma baixa eficiência do tratamento, provavelmente por se tratar de lixiviado proveniente de células de aterramento antigas, sendo pouco biodegradável.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lixiviados, Dimensionamento, Tratamento aeróbio, Lagoas aeradas.

### INTRODUÇÃO

A interação entre o processo de biodegradação da fração orgânica dos resíduos sólidos e a infiltração de águas pluviais na massa de resíduos solubilizam componentes orgânicos e inorgânicos, gerando um líquido escuro de composição variável, comumente denominado lixiviado. Vários fatores podem influenciar na qualidade e quantidade do lixiviado gerado tais como: idade do aterro, características do material aterrado, grau de compactação, quantidade de infiltração de água e regime de chuva (QASIN et CHIANG, 1994). Esse efluente possui elevado potencial poluidor, sendo seu tratamento indispensável.



Ressalta-se a dificuldade de tratamento desse efluente no caso de aterros sanitários estabilizados, visto que, nessas circunstâncias o lixiviado pode apresentar características como: alta concentração de matéria orgânica refratária, amônia e compostos tóxicos.

Os sistemas de tratamento biológicos são os mais utilizados para o tratamento de lixiviado. As principais vantagens desses sistemas são: eficiência de remoção de poluentes, viabilidade econômica e simplicidade operacional, constituindo assim uma solução interessante do ponto de vista técnico e ambiental. O tratamento biológico do lixiviado propicia a degradação da matéria orgânica e de outros compostos de difícil degradação de forma natural, pela ação de microrganismos, transformando-os em substâncias mais simples.

Dentre os processos biológicos, pode-se destacar a lagoa de estabilização. Essa corresponde a um dos processos de tratamento de efluentes mais difundidos no mundo por apresentar inúmeras vantagens, principalmente em regiões de clima tropical e onde a disponibilidade de área não é um fator limitante. É um método natural simples e importante para o tratamento de efluentes, e é usada no tratamento de lixiviados em muitos aterros sanitários (HAMADA e MATSUNAGA, 2000).

Uma variante desse sistema é a lagoa aerada que se diferenciam pelo fato de o oxigênio ser fornecido artificialmente através de aeradores, produzindo uma zona aeróbia que pode alcançar a totalidade da lagoa dependendo da intensidade de aeração e da profundidade da lagoa.

Quanto ao dimensionamento as lagoas de estabilização vários são os parâmetros envolvidos como: tempo de detenção hidráulica ( $TDH$ ), vazão ( $Q$ ), carga afluente de DQO ( $L$ ), taxa de aplicação superficial ( $L_s$ ), profundidade ( $h$ ) e relação geométrica (comprimento/largura =  $L/B$ ). Outro parâmetro importante é o coeficiente de remoção de matéria orgânica ( $K$ ) que representa a taxa de remoção de matéria orgânica na lagoa. Esse muitas vezes é utilizado como base para definição do  $TDH$ .

O presente trabalho tem por objetivo apresentar os resultados referentes ao dimensionamento, implantação, monitoramento e avaliação de um sistema de lagoas aeradas, em escala demonstrativa, utilizadas no tratamento de lixiviado de aterro sanitário com características refratárias.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Amostragem

O lixiviado utilizado para a realização dos experimentos proveio do Aterro Sanitário da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos (CTRS) da cidade de Belo Horizonte / MG - Brasil. O aterro ocupa uma área de 133 hectares, possui células de aterramento com diferentes idades e características, e encontra-se com suas atividades encerradas. O lixiviado bruto foi coletado no tanque de equalização da Estação Vermelha de Tratamento de Efluentes da CTRS, que recebe lixiviado de todas as células do aterro.

### Caracterização físico-química do lixiviado bruto

A caracterização do lixiviado bruto foi mensal durante 12 meses onde foram selecionados os seguintes parâmetros físico-químicos: DQO, DBO, pH, alcalinidade, série sólidos, nitrogênio total e amoniacal. As análises foram realizadas em conformidade com as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

### Determinação do coeficiente de remoção de matéria orgânica ( $K$ )

Para a determinação do coeficiente de remoção de matéria orgânica ótimo foram montados, em escala de bancada, reatores aeróbios simulando condições biológicas com diferentes concentrações de inóculo. Os reatores foram alimentados com 1 litro de lixiviado bruto, o inóculo utilizado foi proveniente de reatores de lodos ativados da ETE/Arrudas – COPASA, as concentrações de inóculo testadas foram de 2040, 1075, 537 e 200 mg/L e o sistema de aeração foi através de aeradores elétricos. O decaimento da DQO foi monitorado com periodicidade de 1 hora nas primeiras 5 horas e em seguida, de 2 em 2 dias. A remoção de DQO foi considerada seguindo cinética de 1ª ordem e o coeficiente  $K$  foi determinado de acordo com a Equação 1.



$$S = S_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad \text{onde, } S = \text{DQO inicial; } S_0 = \text{DQO final e } t = \text{tempo de incubação} \quad (\text{eq. 1})$$

### Dimensionamento

Para a determinação das dimensões da lagoa foram considerados os seguintes critérios: tempo de detenção hidráulica (*TDH*), vazão (*Q*), carga afluente de DQO (*L*), taxa de aplicação superficial (*L<sub>s</sub>*), profundidade (*h*) e relação geométrica (comprimento/largura = *L/B*). Os valores encontrados na literatura auxiliaram na determinação dos parâmetros da lagoa.

### Implantação e partida da lagoa

A lagoa aerada foi construída próximo à área da Estação Vermelha de Tratamento de Efluentes da CTRS, devido à facilidade de alimentação. A lagoa é alimentada por um sistema de reservatórios (principal + regulador de vazão) que operam por gravidade. Por sua vez, o reservatório principal recebe lixiviado, por bombeamento, através de uma mangueira conectada na saída do tanque de equalização da estação. Na partida da lagoa aerada ocorreu o emprego de inoculação conforme a concentração determinada para o coeficiente de remoção de matéria orgânica ótimo. A alimentação aplicada foi contínua de acordo com a vazão e o tempo de detenção hidráulica determinados no dimensionamento.

### Avaliação do tratamento

O tratamento de lixiviado através de lagoa aerada foi avaliado por meio dos seguintes parâmetros: pH, oxigênio dissolvido, DQO solúvel e sólidos suspensos voláteis. Os resultados obtidos em escala demonstrativa foram comparados como os previstos no dimensionamento.

## RESULTADOS OBTIDOS

### Caracterização físico-química das amostras

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios obtidos dos parâmetros convencionais de caracterização do lixiviado bruto.

**Tabela 1 - Caracterização físico-química do lixiviado bruto.**

Parâmetros	Unidade	Valor médio	Desvio-Padrão
DQO	mg/L	2873	186
DBO <sub>5</sub>	mg/L	112	14
DBO/DQO	-	0,04	-
pH	-	8,25	0,17
Nitrogênio Total Kjeldahl	mg/L	1425	288
Nitrogênio Amoniacal	mg/L	1195	306
Alcalinidade	mg/L	7143	435
SST	mg/L	2338	230
SSF	mg/L	58	26
SSV	mg/L	25	14
Cloretos	mg/L	8	4
Fósforo	mg/L	16	6

*SST = Sólidos Suspensos Totais; SSF = Sólidos Suspensos Fixos; SSV = Sólidos Suspensos Voláteis*

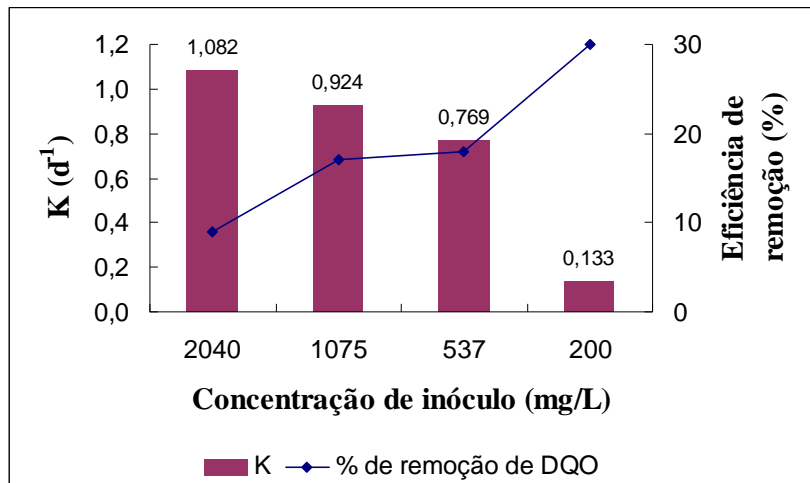
Os altos valores de desvios podem ser atribuídos às variações sazonais (diluição em períodos chuvosos) durante o período de caracterização. Os baixos valores da relação DBO/DQO indicam baixa biodegradabilidade aeróbia do lixiviado, confirmando a proximidade de um estado avançado de estabilização, demonstrando ainda a alta condição de oxidação dos lixiviados. Observa-se também baixo teor de sólidos em

suspensão e baixa relação DBO/NTK ( $C/N = 1/12$ ), indiciando excesso de nitrogênio em relação a tratamentos biológicos aeróbios, que se apresenta principalmente na forma de amônia.

### Determinação do coeficiente de remoção de matéria orgânica

A Figura 1 mostra os valores dos coeficientes  $K$  obtidos pela Equação 1, aplicada no monitoramento dos reatores em escala de bancada, e respectivas eficiências de remoção de matéria orgânica para as concentrações de inóculo de 2040, 1075, 596 e 200 mg/L.

**Figura 1 - Valores do coeficiente  $K$  e eficiências de remoção de DQO solúvel para lixiviados.**



Dentre as concentrações de inóculo testadas, a de 200 mg/L foi a que apresentou maior eficiência de remoção de matéria orgânica (30%). Notou-se um aumento da eficiência de remoção de matéria orgânica com a redução do coeficiente  $K$ , o que pode estar associado ao rápido consumo de substrato de fácil degradação por parte dos microrganismos envolvidos e posterior limitação de consumo, quando este não se encontra mais disponível, resultando no decaimento endógeno dos microrganismos e conseqüente liberação de produtos da lise celular no meio contribuindo para o incremento da DQO solúvel.

### Dimensionamento

O tempo de detenção hidráulica foi adotado como o tempo máximo antes do acontecimento da lise celular no reator, determinado anteriormente nos ensaios para a determinação do coeficiente  $K$ .

$$k \rightarrow \text{lise celular no reator} \rightarrow TDH = 7 \text{ dias} \quad (\text{eq. 2})$$

A vazão da lagoa foi adotada em função da limitação operacional do aparato experimental.

$$Q = 0,4 \text{ m}^3 / \text{dia} \quad (\text{eq. 3})$$

A carga afluyente de DQO ( $L$ ) foi calculada em função da vazão adotada ( $Q$ ) e da concentração média afluyente de DQO do lixiviado ( $S_0 = 2.800 \text{ mg/L}$ ).

$$L = S_0 \times Q = \frac{2.800 \text{ g} / \text{m}^3 \times 0,4 \text{ m}^3 / \text{dia}}{1.000 \text{ g} / \text{kg}} = 1,1 \text{ kgDQO} / \text{dia} \quad (\text{eq. 4})$$

A taxa de aplicação superficial ( $L_s$ ) foi adotada de acordo com a metade do valor recomendado por von Sperling (1996) para regiões com inverno e insolação moderados, visando desenvolvimento dos



microrganismos, e levando-se em conta que os valores de DBO foram convertidos em DQO obedecendo uma relação de DBO/DQO igual a 0,04 (1.500 kgDQO/ha.dia)

$$L_s = 1.500 \text{ kgDQO} / \text{ha.dia} \quad (\text{eq. 5})$$

A área superficial requerida para a lagoa ( $A$ ) foi calculada em função da carga afluente ( $L$ ) e da taxa de aplicação superficial ( $L_s$ ).

$$A = \frac{L}{L_s} = \frac{1,1 \text{ kgDQO} / \text{dia}}{1.500 \text{ kgDQO} / \text{ha.dia}} = 7,3 \times 10^{-4} \text{ ha} = 7 \text{ m}^2 \quad (\text{eq. 6})$$

A relação geométrica ( $L/B$ ) para este tipo de lagoa de estabilização situa-se entre 2,0 e 4,0 para fluxo em pistão e mistura completa respectivamente. A relação geométrica foi estabelecida em 3,0 visando à simplificação dos cálculos e a escolha de um valor intermediário. As dimensões da lagoa foram determinadas em função da relação geométrica ( $L/B$ ) e da área superficial requerida ( $A$ ).

$$L/B = 3 \rightarrow A = L \times B = (3B) \times B = 3B^2 \rightarrow 7 \text{ m}^2 = 3B^2 \rightarrow B = 1,5 \text{ m} \rightarrow L = 3B \rightarrow L = 4,5 \text{ m} \quad (\text{eq. 7})$$

A profundidade da lagoa foi adotada favoravelmente à penetração da luz solar na massa líquida, levando-se em consideração a escala de demonstração da lagoa.

$$h = 0,5 \text{ m} \quad (\text{eq. 8})$$

O volume foi determinado em função da vazão ( $Q$ ) e tempo de detenção hidráulica ( $t$ ).

$$V = Q \times t = 0,4 \text{ m}^3 / \text{dia} \times 7 \text{ dia} = 2,8 \text{ m}^3 \quad (\text{eq. 9})$$

A estimativa do número de dispersão ( $d$ ) e a conversão do valor do coeficiente de remoção de matéria orgânica, determinado nos reatores em escala de bancada, para o regime de fluxo disperso (situação mais próxima da real) foram de acordo com von Sperling (1996).

$$d = \frac{1}{(L/B)} = \frac{1}{(4,5/1,5)} = 0,33 \quad (\text{eq. 10})$$

$$K_{20^\circ\text{C}} = 0,133 \text{ d}^{-1} \text{ (fluxo em pistão)} \quad (\text{eq. 11})$$

$$\frac{K_{\text{pist}}}{K_{\text{disp}}} = 1,0 - \left[ 0,2425 \times (K_{\text{disp}} \cdot t)^{0,5351} \times d^{0,3415} \right] =$$

$$\frac{0,133}{K_{\text{disp}}} = 1,0 - \left[ 0,2425 \times (K_{\text{disp}} \cdot 7)^{0,5351} \times 0,33^{0,3415} \right] \rightarrow K_{20^\circ\text{C}} = 0,162 \text{ dia}^{-1} \text{ (fluxo disperso)} \quad (\text{eq. 12})$$

O valor do coeficiente de remoção de matéria orgânica corrigido em função da temperatura ( $K_T$ ) foi calculado de acordo com a equação de Arrhenius, considerando temperatura média na massa líquida de 23°C e coeficiente de temperatura ( $\theta$ ) adotado em 1,07, conforme recomendado por Yáñez (1993).

$$K_T = K_{20^\circ\text{C}} \times \theta^{(T-20)} = 0,162 \times 1,07^{(23-20)} = 0,198 \quad (\text{eq. 13})$$

A estimativa da DQO solúvel total efluente ( $S_s$ ) considera a fração passível de degradação biológica aeróbia ( $S_0$ ) do lixiviado de Belo Horizonte, que é de aproximadamente 55%.



$$S_0' = 0,55 \times S_0 = 0,55 \times 2.800 = 1.540 \text{ mg/L} \quad (\text{eq. 14})$$

Para o regime hidráulico adotado, de fluxo disperso, a determinação da DQO solúvel residual ao tratamento ( $S'$ ) foi calculada de acordo com von Sperling (1996). A DQO solúvel total efluente ( $S_s$ ) é constituída da soma da fração da DQO inerte ( $S_0 - S_0'$ ) com a DQO solúvel residual ao tratamento ( $S'$ ).

$$a = \sqrt{1 + 4 \cdot K \cdot t \cdot d} = \sqrt{1 + 4 \cdot 0,198 \cdot 7 \cdot 0,33} = 1,68 \quad (\text{eq. 15})$$

$$S' = S_0' \frac{4ae^{1/2d}}{(1+a)^2 e^{a/2d} - (1-a)^2 e^{-a/2d}} = 1.540 \frac{4 \cdot 1,68 e^{1/2 \cdot 0,33}}{(1+1,68)^2 e^{1,68/2 \cdot 0,33} - (1-1,68)^2 e^{-1,68/2 \cdot 0,33}} = 514 \text{ mg/L} \quad (\text{eq. 16})$$

$$S_s = [(S_0 - S_0') + S'] = [(2.800 - 1.540) + 514] = 1.774 \text{ mg/L} \quad (\text{eq. 17})$$

A DQO particulada total efluente ( $S_p$ ) foi calculada assumindo que cada 1,0 mgSS/L corresponde de 1,3 mgDQO/L e que a concentração de sólidos em suspensão no efluente da lagoa é 60 mgSS/L.

$$S_p = 1,3 \times \text{mgDQO} / \text{mgSS} \times 60 \text{ mgSS/L} = 78 \text{ mgDQO/L} \quad (\text{eq. 18})$$

A estimativa da DQO total efluente pode ser obtida pela soma das parcelas da DQO total solúvel e DQO total particulada efluente.

$$\text{DQO total efluente} = \text{DQO solúvel} + \text{DQO particulada} = 1.774 + 78 = 1.852 \text{ mg/L} \quad (\text{eq. 19})$$

A eficiência real estimada de remoção de matéria orgânica foi determinada através do percentual da DQO total efluente removida correspondente a DQO inicial afluente.

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100 = \frac{2.800 - 1.852}{2.800} = 34\% \quad (\text{eq. 20})$$

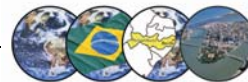
### Avaliação do tratamento

A Figura 2 apresenta os resultados do monitoramento da lagoa aerada em operação. Inicialmente, o monitoramento foi avaliado para o tempo de detenção hidráulica dimensionado (7 dias) e, posteriormente, o TDH foi dobrado com o intuito de avaliar a possibilidade de melhoria no desempenho da lagoa.

Os resultados de DQO solúvel apresentam remoções médias em torno de 21%, para taxa de aplicação superficial e tempo de detenção hidráulica de 1.500 kgDQO/ha.d e 7 dias respectivamente. Os resultados de remoção de DQO solúvel foram compatíveis com os valores encontrados nos ensaios realizados em laboratório e o previsto no dimensionamento. Observou-se a formação de biomassa em torno da concentração média de 65 mg/L, ocorridos durante o monitoramento com tempo de detenção de 7 dias.

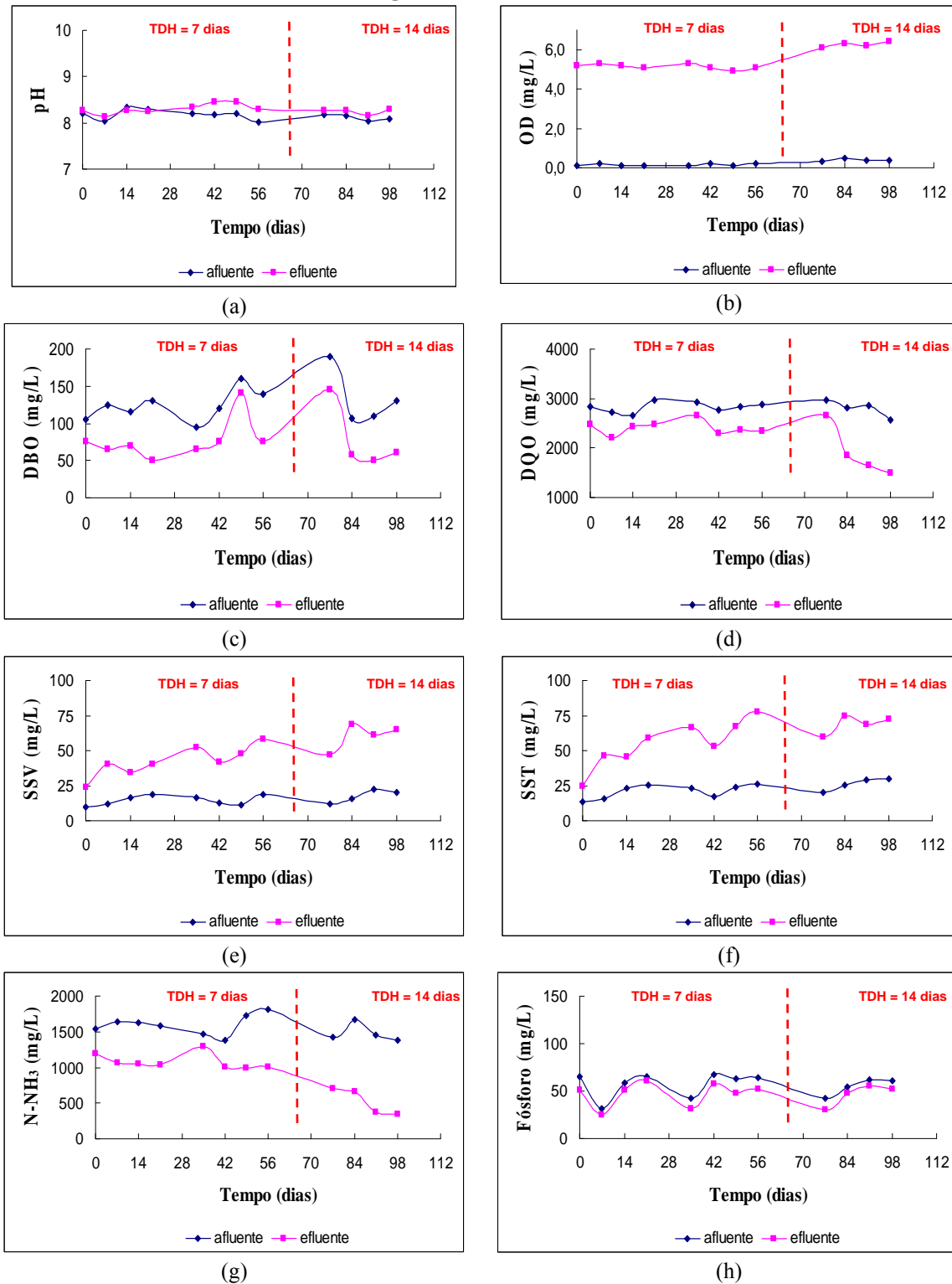
A concentração de sólidos suspensos apresentou comportamento crescente indicando uma atividade biológica na lagoa neste período. O pH apresentou comportamento constante, muito próximo à faixa de degradação biológica aeróbia ótima, ao longo do período de monitoramento com valores do efluente moderadamente superiores ao afluente. O teor de OD na massa líquida foi bem superior aos valores presentes no lixiviado bruto, sendo que a concentração média no efluente da lagoa foi de 5,1 mg/L. Esse valor apresentou baixa variação em função da vazão e aeração contínua.

A lagoa apresentou eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal média de 32% e 70% até a presente data. Essa remoção se deve principalmente a mecanismos físicos de arraste, favorecidos pela agitação resultante da aeração e pelos valores de pH da lagoa ( $> 8,5$ ). A remoção de fósforo, por sua vez, foi baixa (20%) o que pode ser explicado principalmente pela turbulência criada na massa líquida durante a aeração, desfavorecendo



assim o processo de precipitação. O decréscimo da concentração de fósforo está associado à assimilação deste composto pelos microrganismos e algas presentes em suas funções metabólicas.

**Figura 2 - Avaliação da partida da lagoa de estabilização submetida à aeração: (a) pH; (b) OD; (c) DBO; (d) DQO solúvel; (e) SSV; (f) SST; (g) N-NH<sub>3</sub> e (h) Fósforo.**







## CONCLUSÕES

Acredita-se que os resultados obtidos nesta pesquisa representem uma importante contribuição para o tratamento de lixiviados de aterro sanitário estabilizado empregando lagoas aeradas, em função do dimensionamento das lagoas ter sido baseado em dados experimentais e não com valores de referência. Sendo assim, o trabalho em questão fornece procedimentos operacionais, parâmetros e critérios de projeto específicos para efluentes com tais características.

Em relação à remoção de DQO solúvel, a metodologia de dimensionamento adotada apresentou resultados aproximados aos obtidos em escala demonstrativa. A partida do sistema obteve sucesso e se apresentou estável após o 56º dia de partida, com concentração de SSV média igual a 65 mg/L, eficiência média de remoção de DQO solúvel em torno de 20% e baixa remoção de nutrientes quando operada com tempo de detenção hidráulica de 7 dias. Ressalta-se que o aumento do tempo de detenção hidráulica para 14 dias não afetou a eficiência da lagoa significativamente.

Entretanto, em relação aos poluentes orgânicos, os resultados alcançados retratam que o sistema de lagoas de estabilização é insuficiente para tratabilidade de lixiviados com recalcitrância, por ser um sistema biológico que atua somente na fração biodegradável da carga orgânica. Além disso, o sistema também não se mostrou suficiente para atender a legislação quanto à remoção de nutrientes. Dessa forma os resultados do monitoramento revelam uma baixa eficiência do tratamento, provavelmente por se tratar de lixiviado proveniente de células de aterramento antigas, em estágio avançado de degradação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th Edition. American Public Health Association, Washington, DC. 2005.
2. HAMADA, J.; MATSUNAGA, I. Concepção do Sistema de Tratamento de Chorume para o Aterro Sanitário de Ilhéus - BA. In: IX SILUBESA - SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Porto Seguro, Brasil, 2000.
3. QASIM, S.R.; CHIANG, W. Sanitary landill leachate: generation, control and treatment. Lancaster: Technomic. p.339, 1994.
4. VON SPERLING, M. Lagoas de estabilização. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 3, 196p. 1996.
5. YÁNEZ, F. Lagunes de estabilizacion. Ed.CEPIS, Lima, Peru, 379p. 1993.