



Tratamento de esgoto simplificado, possibilitando atendimento a diversos critérios para reúso

Juliana G. B. de Andrada¹; Pablo S. Santos¹ & Marcos von Sperling¹

¹ Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Av. do Contorno, n° 842, 7° andar. Centro, Belo Horizonte, MG. CEP 30.110-060. Fone: (31) 3238-1935. E-mail: marcos@desa.ufmg.br

Protocolo 29

Resumo: Reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB) seguidos por lagoas de polimento constituem-se em sistemas simplificados e econômicos de tratamento de esgotos, capazes de alcançar elevadíssimas eficiências de remoção de organismos patogênicos, possibilitando a utilização do efluente para irrigação irrestrita; no entanto, para outros tipos de uso do efluente (urbano e industrial), as lagoas sofrem a limitação de gerar efluentes com elevados teores de sólidos em suspensão (algas). O presente trabalho investiga um sistema com filtros de pedra para o polimento do efluente das lagoas. Avalia-se a eficiência do sistema, como um todo, e a adequabilidade do efluente para distintos tipos de uso. Os excelentes resultados obtidos (concentrações efluentes médias: DBO: 27 mg L⁻¹, DQO: 97 mg L⁻¹, SS: 26 mg L⁻¹, *E. coli*: 450 NMP por 100mL) indicam a possibilidade do uso agrícola irrestrito e usos urbano e industrial restritos, segundo a OMS e EPA.

Palavras-chave: reatores UASB, filtros de pedras, lagoas de polimento, uso do efluente

Simplified wastewater treatment allowing compliance to several criteria for reuse

Abstract: UASB reactors followed by polishing ponds comprise simple and economic wastewater treatment systems, capable of reaching a very high removal efficiency of pathogenic organisms, leading to the potential use of the effluent for unrestricted irrigation. However, for other types of reuse (urban and industrial), ponds are limited in the sense of producing effluents with high suspended solids (algae) concentrations. The work investigates a system with coarse rock filters for polishing the pond effluent. The overall performance of the system is analysed, together with the potential for different types of reuse. The excellent results obtained (mean effluent concentrations: BOD: 27 mg L⁻¹, COD: 97 mg L⁻¹, SS: 26 mg L⁻¹, *E. coli*: 450 MPN per 100mL) indicate the possibility of unrestricted use of the effluent for agriculture and restricted urban and industrial uses, according to WHO and EPA.

Keywords: UASB reactors, rock filters, polishing ponds, effluent use

INTRODUÇÃO

O uso agrícola de esgotos tratados tem sido bastante utilizado em várias regiões do mundo, e conta com diretrizes da Organização Mundial de Saúde (WHO, 1989) para nortear a irrigação restrita e irrestrita. Esses critérios estabelecem valores limite de 1 ovo de helminto por litro (irrigação restrita e irrestrita) e 1000 coliformes termotolerantes por 100 mL (irrigação irrestrita). Para outras formas de reúso, há distintos critérios de qualidade, citando-se, como exemplo, as diretrizes dos Estados Unidos (USEPA, 1992), resumidas na Tabela 1. Deve-se notar que as diretrizes norte-americanas para irrigação são essencialmente mais restritivas que as da Organização Mundial de Saúde.

O sistema reator UASB - lagoas de polimento rasas em série tem sido investigado em nosso meio, com bons resultados em termos de remoção de matéria orgânica e excelentes resultados em relação à remoção de coliformes (van Haandel & Lettinga, 1994; Cavalcanti, 2003; von Sperling et al, 2003; von Sperling et al, 2005). Deve-se destacar, ainda, que o sistema de lagoas é o único que remove as quatro categorias de organismos patogênicos (bactérias, vírus, cistos de protozoários e ovos de helmintos).

Neste contexto avalia-se, na presente pesquisa, um sistema de tratamento de esgotos composto por reator UASB – lagoas de polimento rasas – filtros grosseiros de pedra com vistas ao atendimento a diversos critérios de qualidade para reúso. O sistema é simples, de baixo custo de implantação e operação,

sustentável, sem mecanização, sem consumo de energia e de produtos químicos e com manuseio do lodo relativamente simples.

O objetivo do presente trabalho é avaliar a qualidade do efluente do sistema em termos de atendimento a critérios para distintas formas de reúso.

MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa, utilizou-se um sistema de tratamento em escala de demonstração para 250 habitantes, construído no âmbito do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB. Localizada na ETE Arrudas, na grande Belo Horizonte, MG, a ETE Experimental UFMG-COPASA possui um aparato experimental composto por um reator anaeróbio tipo UASB, quatro lagoas de polimento rasas e filtros de pedra (Figuras 1 e 2). O esgoto utilizado é captado após o tratamento preliminar da ETE Arrudas. As principais características do reator UASB e das lagoas de polimento, tal como operados na presente pesquisa, são:

Reator UASB

Volume: 14,2 m³
 Altura: 4,5 m
 Diâmetro: 2,0 m
 TDH: 7,5 h
 Vazão Média: 40 m³d⁻¹

Lagoas de Polimento 1 e 2

Comprimento no fundo: 25,00 m
 Largura no fundo: 5,25 m
 Profundidades: 0,80 m
 TDH: 3,1 d (cada lagoa)

Lagoas de Polimento 3 e 4 (na presente pesquisa)

Comprimento no fundo: 16,56 m
 Largura no fundo: 5,25 m
 Profundidades: 0,40 m
 TDH: 4,2 d (cada lagoa)

As lagoas foram projetadas para trabalharem com total flexibilidade, todas em série, em paralelo ou qualquer outra combinação, em seção trapezoidal. Para a realização desta pesquisa, as lagoas 1 e 2 trabalharam em série, estratégia operacional que conduziu a bons resultados em pesquisas anteriores, com profundidade média de 0,80 m de altura, e as lagoas 3 e 4 trabalharam em paralelo, com profundidade média de 0,40 m.

No final das lagoas 3 e 4, foram inseridos filtros de pedra com granulometrias diferentes e coeficientes de uniformidade também diferentes, sendo um com material de menor dimensão (brita 3 comercial) e outro com material de maior dimensão (pedra de mão comercial), objetivando a retenção das algas. Os dois materiais foram selecionados tendo em vista sua fácil disponibilidade no território nacional e baixo custo de aquisição. As principais características dos filtros de pedra são:

Filtros de pedra 1 e 2

Comprimento a 0,40 m de altura: 8,44 m
 Comprimento do fundo: 8,44 m
 Largura a 0,40 m de altura: 6,05 m
 Largura no fundo: 5,25 m
 Altura da lâmina d'água: 0,40; 0,60 m
 Altura do filtro: 0,70 m
 Inclinação dos taludes: 45°

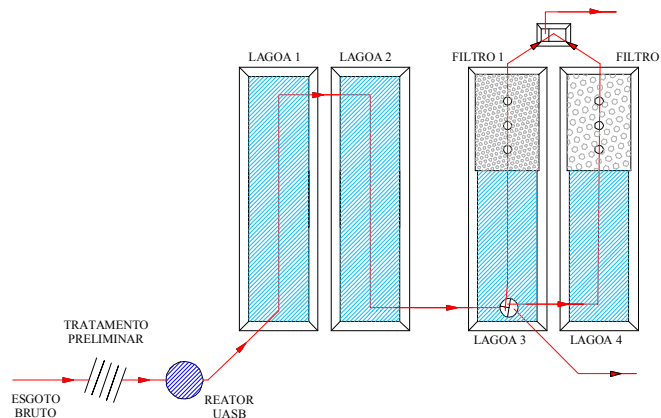


Figura 1. Esquema do aparato experimental: ETE Experimental Arrudas



Figura 2. Aparato experimental: Reator UASB, Lagoas 1, 2, 3 e 4 e filtros 1 e 2

O tempo de detenção hidráulica total (volume/vazão) no sistema foi de 12,7 dias, assim distribuídos: UASB (0,3 d), lagoa 1 (3,1 d), lagoa 2 (3,1 d), lagoa 3 (4,2 d), filtro 1 (2,0 d).

Os experimentos foram realizados ao longo de 8 meses (21/10/2004 a 30/06/2005) com taxa de aplicação hidráulica (TAH) nos filtros de 0,50 m³ de brita por m³d⁻¹ de esgoto por m³ de brita, operando com uma vazão de 40 m³d⁻¹ nas lagoas 1 e 2 e 10 m³d⁻¹ nas lagoas 3 e 4. A taxa de aplicação hidráulica foi estabelecida com base em valores intermediários reportados por USEPA (2002) com TAH de 0,25 m³(m³.d)⁻¹ na Califórnia, Missouri em 1975; Queiroz (2001) com uma TAH de 0,04 m³(m³.d)⁻¹ no Brasil; USEPA (2002) no Estado de Illinois com uma TAH de 0,80 m³(m³.d)⁻¹; Johnson & Mara (2004) no Reino Unido com uma TAH de 0,15 m³(m³.d)⁻¹.

O programa de monitoramento do sistema foi constituído de um conjunto de análises físico-químicas e microbiológicas realizadas uma vez por semana no esgoto bruto, no efluente do reator UASB, nas saídas de cada lagoa de polimento (lagoas 1, 2, 3 e 4) e no efluente dos filtros 1 e 2. Semanalmente, o esgoto bruto era coletado por meio de amostragem composta (24 horas) com o auxílio de um amostrador automático. Nos efluentes das lagoas e nos efluentes dos filtros, as amostragens foram simples.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se uma avaliação do sistema, como um todo, ou seja, desde a entrada do sistema (esgoto bruto), passando

pelo reator UASB, lagoas 1 e 2 (série) e lagoa 3 com filtro 1 (paralelo). Por uma questão de simplicidade, no presente trabalho não serão apresentados nem interpretados os resultados obtidos em relação à lagoa 4 e ao Filtro 2 (pedra de mão), concentrando-se a avaliação no sistema de melhor desempenho: reator UASB – lagoas 1 a 3 em série - filtro 1 (brita 3).

A Tabela 2 apresenta os valores das concentrações médias e eficiências médias de remoção de DBO total, DQO total, SST e *E. coli* obtidos na pesquisa. As estatísticas descritivas das concentrações são apresentadas na Tabela 3 e os gráficos Box-plot na Figura 3. Não se analisam, no presente trabalho, as concentrações dos nutrientes nitrogênio e fósforo, uma vez que a desejabilidade de se ter maiores ou menores

Tabela 2. Tabela-resumo de concentrações médias e eficiências médias de remoção de DBO, DQO, SS e *E. coli*

Parâmetro	Esgoto Bruto	Efluente UASB	Efluente Lagoa 1	Efluente Lagoa 2	Efluente Lagoa 3	Efluente Filtro 1
Concentrações médias						
DBO total ¹	235	46	38	36	40	27
DQO total ¹	377	132	160	154	203	97
SST ¹	187	60	84	72	108	26
<i>E. coli</i> ²	2,03E+08	4,24E+07	2,29E+05	3,34E+04	1,00E+03	4,50E+02
Eficiências médias de remoção						
Parâmetro	Efic. UASB	Efic. Lagoa 1	Efic. Lagoa 2	Efic. Lagoa 3	Efic. Filtro 1	Efic. Global
DBO total ³	78	6	1	-10	37	88
DQO total ³	63	-39	1	-29	46	74
SST ³	68	-77	10	-73	73	85
<i>E. coli</i> ⁴	0,71	2,21	0,84	1,52	0,44	5,68

¹ mg/L⁻¹;

² *E. coli* (médias geométricas) NMP(100mL)⁻¹

³ % de remoção; ⁴ unidades logarítmicas removidas; eficiências médias calculadas com base nas concentrações médias afluentes e efluentes de cada unidade

Tabela 3. Estatística descritiva das concentrações no sistema (DBO, DQO, SST e *E. coli*)

Estatística	Esg Bruto	Efl UASB	Efl L1	Efl L2	Efl L3	Efl F1
DBO total						
Nº de dados	21	20	23	24	24	21
Média (mgL ⁻¹)	235	46	38	36	40	27
Mínimo (mgL ⁻¹)	92	14	12	11	6	5
Máximo (mgL ⁻¹)	479	108	105	105	115	106
Coef. Variação	0,47	0,60	0,56	0,59	0,70	0,88
DQO total						
Nº de dados	26	25	26	26	25	23
Média (mgL ⁻¹)	377	132	160	154	203	97
Mínimo (mgL ⁻¹)	157	36	50	63	44	41
Máximo (mgL ⁻¹)	545	197	274	227	451	154
Coef. Variação	0,25	0,30	0,29	0,32	0,47	0,30
SST						
Nº de dados	27	28	28	29	29	26
Média (mgL ⁻¹)	187	60	84	72	108	26
Mínimo (mgL ⁻¹)	111	22	30	19	41	10
Máximo (mgL ⁻¹)	220	134	138	124	190	60
Coef. Variação	0,14	0,50	0,29	0,37	0,34	0,51
<i>E. coli</i>						
Nº de dados	25	26	27	27	27	25
Média geom (NMP(100mL) ⁻¹)	2,03E+08	4,24E+07	2,29E+05	3,34E+04	1,00E+03	4,50E+02
Mínimo (NMP(100mL) ⁻¹)	3,80E+07	1,00E+06	7,40E+03	2,80E+03	1,00E+00	1,00E+00
Máximo (NMP(100mL) ⁻¹)	7,70E+08	1,60E+08	1,10E+06	3,90E+05	2,40E+04	4,30E+04
Coef. Variação	0,64	0,74	0,83	1,29	1,57	2,21

concentrações depende do tipo de reúso (agrícola, industrial, urbano, recreacional). Pelas tabelas, observam-se claramente as características principais já esperadas para cada etapa do tratamento: (a) reator UASB: boa remoção de DBO e DQO; (b) lagoas de polimento: excelente remoção de coliformes, baixa remoção de DBO e DQO e produção de SS (algas); (c) filtro de pedra: remoção complementar de DBO, DQO e, principalmente, SS.

Matéria orgânica

A redução de matéria orgânica efetuada pelo reator UASB, embora substancial, foi complementada com a utilização das lagoas de polimento e, principalmente, do filtro. Foram obtidos resultados muito bons em relação à remoção de DBO no sistema como um todo. A concentração média do efluente do sistema ficou abaixo de 30 mg L^{-1} , valor bastante baixo e que permite diversos tipos de uso do efluente, tais como especificado na Tabela 1. Acrescente-se ainda que 90% dos valores de DBO foram inferiores a 50 mg L^{-1} , o que ressalta o excelente desempenho do sistema.

Sólidos em suspensão

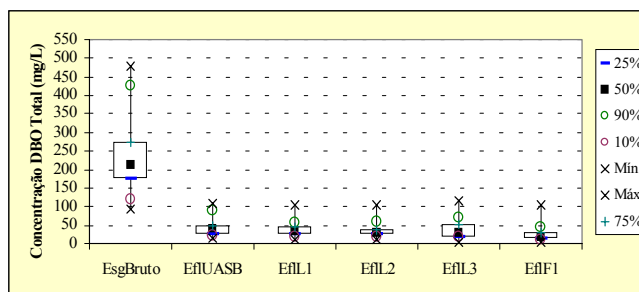
Foram obtidos resultados muito bons em relação à remoção de SST no sistema como um todo. Como seria de se esperar, as lagoas foram responsáveis por uma elevação nos teores de SS, devido à produção de algas. Em contrapartida, o filtro exerceu sua principal função, conduzindo a uma importante remoção destes sólidos (redução da concentração de SS de 108 para 26 mg L^{-1}). A concentração média efluente foi de 26 mg L^{-1} , inferior ao valor-limite para diversos tipos de reúso (ver Tabela 1). A concentração máxima observada no efluente foi de 60 mg L^{-1} , retratando o ótimo desempenho do sistema. Apesar da proliferação das algas nas lagoas (aumento de SST), o filtro de pedra realizou excelente remoção dos sólidos em suspensão. A eficiência média de remoção de SST no filtro foi de 73% com eficiência média global de remoção de SST no sistema de 85%.

E. coli

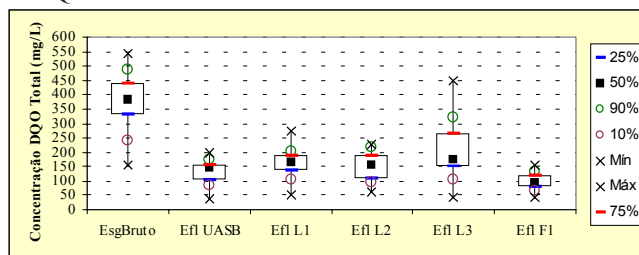
Quanto à remoção de *E. coli* (Tabela 3 e Figuras 3 e 4), obtiveram-se resultados excelentes, considerando-se o baixo tempo de detenção hidráulica total no sistema (12,7 dias). A eficiência global do sistema foi de 5,68 unidades logarítmicas removidas, equivalente a uma eficiência de 99,99979%. Como previsto, as maiores eficiências de remoção foram nas três lagoas da série, sendo que a contribuição do filtro foi menor (0,44 unidades log). Deve-se destacar os bons resultados, considerando-se as condições climáticas do Sudeste brasileiro, e ressaltar que as lagoas podem ter desempenho ainda superior, se operadas em locais de clima mais favorável, como no Nordeste do País (Cavalcanti, 2003).

O efluente final apresentou uma média geométrica inferior a $1000 \text{ NMP}(100\text{mL})^{-1}$, cumprindo, portanto, os requisitos da

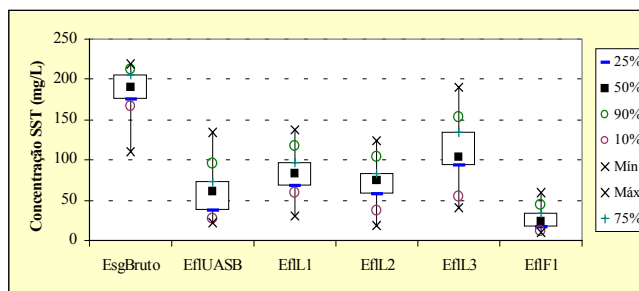
A. DBO total



B. DQO total



C. SST



D. *E. coli*

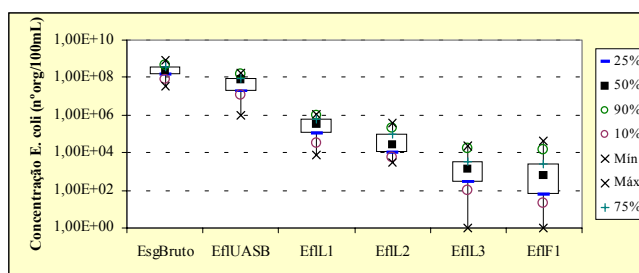


Figura 3. Box-plot das concentrações de (A) DBO, (B) DQO, (C) SST e (D) *E. coli* no sistema

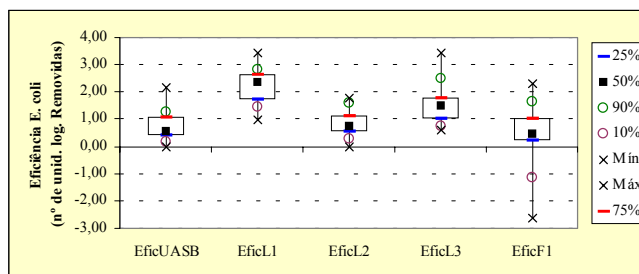


Figura 4. Box-plot das eficiências de remoção de *E. coli* ao longo do sistema

Organização Mundial de Saúde (WHO, 1989) para irrigação irrestrita. Como previsto, os requisitos mais restritivos preconizados pela legislação norte-americana para irrigação

Tabela 4. Interpretação do atendimento aos valores limite sugeridos para distintos tipos de uso dos esgotos tratados, segundo a OMS (WHO, 1989) e USEPA (1992)

Diretriz	Reúso da água	Tipo	Objetivos do tratamento (valores-limite)			
			DBO (mgL ⁻¹)	SST (mgL ⁻¹)	Turbidez (NTU)	Coli termo (NMP por 100mL)
OMS (WHO, 1989)	Irrigação agrícola	Irrestrita				✓
		Restrita				✓
USEPA (1992)	Irrigação agrícola	Culturas alimentícias	X		X	X
		Culturas não alimentícias; culturas alimentícias após processamento	✓	✓		Possível
	Urbano	Irrestrito	X		X	X
		Áreas de acesso restrito	✓	✓		Possível
	Recreacional	Irrestrito	X		X	X
		Restrito	✓	✓		Possível
	Melhoria ambiental		X		X	X
	Uso industrial		✓	✓		Possível

✓ - a concentração média cumpre o valor-limite

X - valor-limite não alcançável

Célula em branco - ausência de valor-limite nas diretrizes

Diretrizes - ver Tabela 1

Possível - com a incorporação de mais uma lagoa na série, este valor-limite pode ser alcançado

irrestrita (concentrações não detectáveis) não foram cumpridos. Para outros tipos de uso (200 NMP(100mL)⁻¹) é possível se alcançar este valor, desde que se incorpore mais uma lagoa na série. Embora não mostrado neste trabalho, resultados anteriores indicam que o efluente sai também isento de ovos de helmintos (von Sperling et al., 2005), atendendo ao outro critério da OMS para irrigação (1 ovo por L).

Atendimento a distintos critérios de reúso

A Tabela 4 apresenta uma síntese do atendimento do sistema a distintos critérios (OMS e USEPA) de uso do efluente tratado, tal como detalhado na Tabela 1. Observa-se o atendimento integral às diretrizes da OMS (WHO, 1989) para irrigação restrita e irrestrita, e da USEPA (1992) para determinados usos restritos (urbano, industrial e recreacional).

CONCLUSÕES

O sistema, constituído por um reator UASB, três lagoas de polimento rasas em série e um filtro de pedra, mostrou um excelente desempenho, comparável ao de vários sistemas mais sofisticados de tratamento de esgotos.

A qualidade bacteriológica do efluente final permite sua utilização para irrigação irrestrita, segundo as diretrizes da Organização Mundial de Saúde.

A qualidade do efluente final, em termos de DBO, SS e coliformes, permite ainda a utilização para algumas formas de uso urbano, recreacional e industrial restritos, segundo as diretrizes norte-americanas.

A simplicidade do sistema e a ausência de mecanização, de consumo de energia e de produtos químicos, aliadas ao baixo custo de implantação e operação, sugerem a elevada aplicabilidade em nosso meio do sistema analisado.

LITERATURA CITADA

- Cavalcanti, P.F.F. Integrated application of the UASB reactor and ponds for domestic sewage treatment in tropical regions. Wageningen, Wageningen University, 2003. 141 p. PhD Thesis.
- Johnson, M.; Mara D.D. Aerated rock filters for enhanced nitrogen and faecal coliform removal from facultative waste stabilization pond effluents. International Conference on Waste Stabilisation Ponds, 6 and International Conference on Wetland Systems, 9, 2004. Avignon, Anais ... Avignon: International Water Association.
- Levine, A.D.; Asano, T. Recovering sustainable water from wastewater. Environmental science and technology, American Chemical Society, p. 201A-208A. 2004.
- Queiroz, T.R. Remoção de sólidos suspensos de efluentes de lagoas de estabilização por meio de processos naturais. Brasília: UnB, 2001. 229 p. Dissertação Mestrado.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. Guidelines for water reuse. Washington: U. S. Environmental Protection Agency. 1992.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. Wastewater technology fact sheet. Rock media polishing filter for lagoons. U. S. Environmental Protection Agency. Setembro, 2002. <http://www.epa.gov/OW-OWM.html/mtb/polfilla.pdf>. 18/Out/2004.
- van Haandel, A.C.; Lettinga, G. Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate. Chichester, UK: John Wiley. 2004. 226 p.
- von Sperling, M.; Jordão, E.P.; Kato, M.T.; Alem Sobrinho, P.; Bastos, R.K.X.; Piveli, R. Capítulo 7: Lagoas de estabilização. In: Gonçalves, R.F. (coord). Desinfecção de efluentes sanitários. Rio de Janeiro: PROSAB/FINEP. 2003. p. 277-336.

von Sperling, M.; Bastos, R.K.X.; Kato, M.T. Removal of *E. coli* and helminth eggs in UASB – polishing pond systems. Water Science and Technology, v. 51, n. 12. 2005. p. 91-97.

WHO. Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. Technical report series 778. Geneva: World Health Organization. 1989.