

# REATORES ANAERÓBIOS OPERADOS EM BATELADA SEQUENCIAL SEGUIDOS DE LAGOAS DE POLIMENTO PARA O TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE SUINOCULTURA. PARTE II: REMOÇÃO DE NUTRIENTES E COLIFORMES<sup>1</sup>

ROSE M. DUDA<sup>2</sup>, ROBERTO A. DE OLIVEIRA<sup>3</sup>

**RESUMO:** Neste trabalho, avaliou-se o desempenho de dois reatores anaeróbios operados em batelada sequencial (ASBR), instalados em série, em escala-piloto (volumes de 280 L e 140 L, respectivamente), no tratamento de águas residuárias de suinocultura, com concentrações de sólidos suspensos totais (SST) em torno de 10.000 mg L<sup>-1</sup>. Para o pós-tratamento do efluente do sistema de tratamento com os ASBR, utilizou-se de duas lagoas de polimento (volume de 1.000 L, cada) em série. As cargas orgânicas volumétricas (COV) aplicadas no primeiro ASBR variaram de 4,43 a 12,75 g DQO<sub>total</sub> (L d)<sup>-1</sup>. As eficiências médias de remoção de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e fósforo total (P-total) variaram de 30 a 82% e de 42 a 100%, respectivamente, no sistema de tratamento anaeróbio composto pelos ASBR seguidos das lagoas de polimento. A utilização das lagoas de polimento em série permitiu manter eficiências médias de remoção acima de 80% para o Fe, Mn e Zn e de 76% para o Cu. O número de coliformes termotolerantes foi reduzido a 8x10<sup>3</sup> NMP/100 mL.

**PALAVRAS-CHAVE:** carga orgânica volumétrica, digestão anaeróbia, dois estágios, pós-tratamento, remoção de metais.

## PERFORMANCE OF ANAEROBIC SEQUENCING BATCH REACTORS IN SERIES FOLLOWED BY POLISHING PONDS ON THE TREATMENT OF SWINE WASTEWATER PART II: REMOVAL OF NUTRIENTS AND COLIFORMS

**ABSTRACT:** On this study the performance of two anaerobic sequencing batch reactors (ASBR) installed in series was evaluated, on a pilot-scale testing (volumes of 280 L and 140 L, respectively) for the treatment of swine wastewater with total suspended solids concentrations (TSS) around 10,000 mg L<sup>-1</sup>. For the post-treatment of the effluents from ASBR, two polishing ponds in series were used (1,000 L of volume each). The organic loading rates (OLR) applied on the first ASBR varied from 4.43 to 12.75 g<sub>total</sub>COD (L d)<sup>-1</sup>. The mean removal efficiencies for total Kjeldahl nitrogen (TKN) and total-P varied of 30 to 82% and 42 to 100%, respectively, on the anaerobic treatment system compounded by the ASBR followed by polishing ponds. The use of polishing ponds in series has allowed the maintenance of mean removal efficiencies above 80% for Fe, Mn and Zn and 76% for Cu. A number of fecal coliforms above 8 x 10<sup>3</sup> NMP/100/mL were observed on the effluents.

**KEYWORDS:** anaerobic digestion, metals removal, organic loading rate, post-treatment, two-stages.

<sup>1</sup> Extraído da Dissertação de Mestrado do primeiro autor. Trabalho financiado pela FAPESP.

<sup>2</sup> Eng<sup>a</sup> Química, Mestre em Microbiologia Agropecuária, Doutoranda em Microbiologia Agropecuária, UNESP, Jaboticabal - SP, Fone: (0XX16) 3209-2638.

<sup>3</sup> Eng<sup>a</sup> Agrônomo e Tecnólogo em Construção Civil, Mestre em Agronomia - Produção Vegetal, Doutor em Engenharia Civil - Hidráulica e Saneamento, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Rural, UNESP, Jaboticabal - SP, raoder@fcav.unesp.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 5-6-2007

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 18-2-2009

## INTRODUÇÃO

A digestão anaeróbia em reatores biológicos é uma tecnologia que pode oferecer efetiva proteção ao meio ambiente, a baixo custo. Os processos anaeróbios requerem, em geral, menor espaço e têm baixa produção de lodo e também podem oferecer a possibilidade de recuperação e de utilização do gás metano com combustível (ISOLDI & KOETZ, 2004) e da água e nutrientes para a fertirrigação.

Para a avaliação do custo de uma biotecnologia e o potencial agrônômico do efluente gerado na digestão anaeróbia, também é importante a avaliação dos nutrientes. Entretanto, são poucos os relatos do efeito da digestão anaeróbia sobre os nutrientes presentes nas águas residuárias, exceto o nitrogênio e o fósforo (MASSÉ et al., 2007).

O reator anaeróbio operado em batelada sequencial (ASBR - Anaerobic Sequencing Batch Reactor), desenvolvido por DAGUE et al. (1992), vem sendo amplamente estudado como alternativa aos sistemas contínuos, com algumas vantagens, como a eliminação da sedimentação secundária, boa retenção de biomassa, operação simples e flexibilidade. O tratamento biológico no ASBR é realizado em uma única unidade por meio de sequência operacional (ciclo) composta de quatro etapas distintas, realizadas em uma única unidade: alimentação, reação, sedimentação e descarte.

Embora os reatores anaeróbios sejam unidades relativamente eficientes para a remoção de material orgânico e sólidos em suspensão, têm pouco efeito sobre a redução da concentração dos nutrientes presentes nas águas residuárias (MARCHETTO, 2001). O nitrogênio e o fósforo geralmente são conservados durante a digestão anaeróbia, com o aumento da fração mineralizada (MASSÉ et al., 2007).

Reatores anaeróbios necessitam ser integrados em programa de tratamento global, porque outros processos de tratamento são requeridos para a recuperação ou reutilização das águas residuárias (ISOLDI & KOETZ, 2004). As exigências crescentes para o lançamento de efluentes tratados estão determinando a aplicação de diferentes tecnologias para o aprimoramento dos sistemas de tratamento.

Uma alternativa de pós-tratamento bastante atraente é representada pelas lagoas de polimento, pelo fato de se manter em todo o sistema a simplicidade conceitual já assumida para os reatores anaeróbios (SPERLING, 2002).

Lagoas de polimento associadas ao pré-tratamento anaeróbio são indicadas para a remoção de coliformes termotolerantes e quando se pretende remover nitrogênio e fósforo do efluente final, em virtude das condições ambientais favoráveis (KATO & FLORÊNCIO, 2001).

Devido aos baixos tempos de detenção hidráulica nos reatores anaeróbios (da ordem de horas), a remoção de patogênicos é baixa nessas unidades. Nesse sentido, as lagoas de polimento podem contribuir substancialmente para se obterem elevadas remoções de patogênicos (SPERLING, 2002), tornando-se alternativa atraente para o pós-tratamento de águas residuárias com o propósito de reutilização na agricultura (CHERNICHARO, 2006).

Portanto, com este trabalho, pretendeu-se avaliar o desempenho de reatores ASBR em dois estágios, seguidos de lagoas de polimento em série, em escala-piloto, no tratamento de águas residuárias de suinocultura, com concentrações de sólidos suspensos totais (SST) em torno de  $10.000 \text{ mg L}^{-1}$ , variando-se a carga orgânica volumétrica (COV) e o tempo de detenção hidráulica (TDH), quanto à remoção de nutrientes e coliformes. Essa informação pode ser útil para a avaliação dos benefícios ambientais, agrônômicos e econômicos do tratamento de águas residuárias de suinocultura em ASBR em dois estágios, seguidos de lagoas de polimento em série.

## MATERIAL E MÉTODOS

A unidade experimental (Figura 1) utilizada para o tratamento secundário das águas residuárias de suinocultura foi constituída por uma bomba centrífuga, um depósito de dejetos de suínos (afluente), dois reatores operados em batelada sequencial (ASBR-*Anaerobic Sequencing Batch Reactor*), em escala-piloto, instalados em série (Figuras 2 e 3).

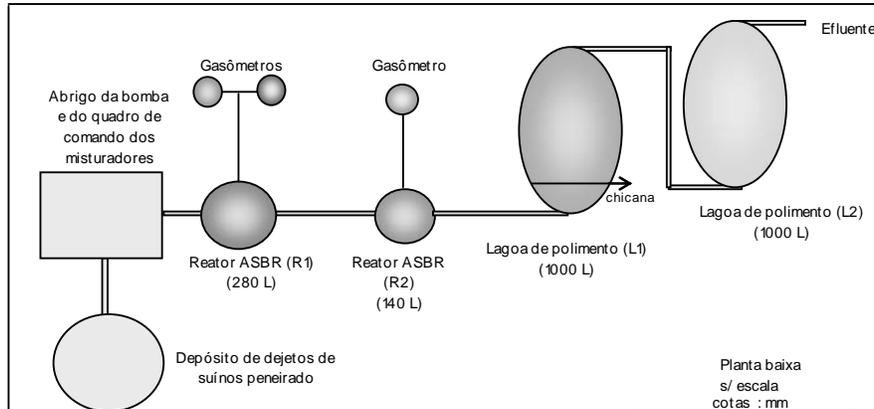


FIGURA 1. Representação esquemática do sistema de tratamento anaeróbio em dois estágios com os reatores ASBR (R1 e R2) e do sistema de pós-tratamento constituído por lagoas de polimento (L1 e L2), em série, em escala-piloto. **Scheme of the experimental apparatus anaerobic sequencing batch reactor (R1 and R2), followed by polishing ponds (L1 and L2), in series, in pilot scale.**

Para a monitorização da produção de biogás, foram instalados gasômetros, conforme descrito por FERNANDES & OLIVEIRA (2006). O pós-tratamento do efluente dos ASBR foi realizado em lagoas de polimento em série.

Os reatores anaeróbios operados em batelada sequencial foram construídos com tubos de PVC, com diâmetros de 500 e 400 mm, com volume total de 280 L e 140 L, para o primeiro (R1) e segundo (R2) reatores, respectivamente (Figura 2). O volume reservado para a acumulação de gás na parte superior dos ASBR foi adotado como 14% do volume total dos reatores (40 L e 20 L para o R1 e o R2, respectivamente). Nos ASBR (R1 e R2) foram instalados sistemas de agitação mecânica, compostos por três impelidores, eixo e motorreductor, com acionamento intermitente, controlado por temporizadores.

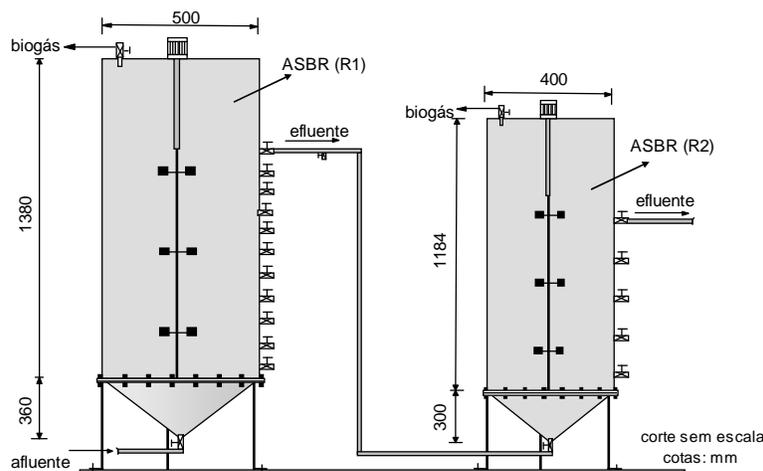


FIGURA 2. Representação esquemática do sistema de tratamento anaeróbio em dois estágios com reatores ASBR em série, em escala-piloto. **Representation of cross section of the ASBR in two stages (R1 and R2), in series, in pilot scale.**

Para as lagoas de polimento (L1 e L2), foram utilizadas caixas de polietileno com volume de 1.000 L, profundidade de 0,55 m e área superficial de 2,25 m<sup>2</sup>. A primeira lagoa possuía compartimento na entrada que ocupava 20% do seu volume total (200 L).

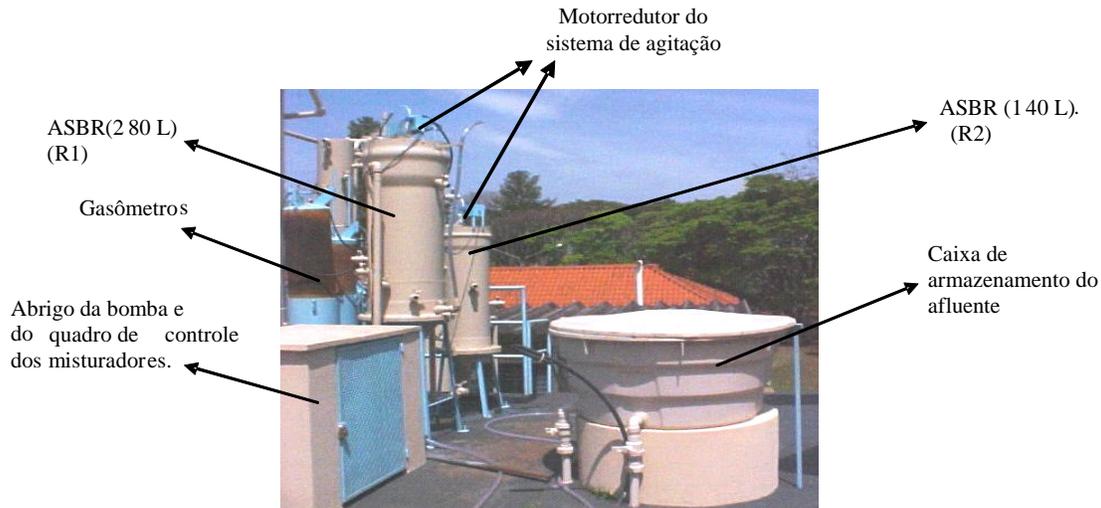


FIGURA 3. Instalações experimentais do sistema de tratamento anaeróbico em dois estágios composto pelos reatores ASBR instalados em série (R1 e R2). **Anaerobic treatment system composed of ASBR reactors in two stages (R1 and R2).**

Os dejetos de suínos utilizados como afluente nos ASBR foram coletados diariamente, em instalações de confinamento de suínos em fase de crescimento e terminação, alimentados com ração à base de milho e soja, com complemento vitamínico e mineral. Essas instalações fazem uso intensivo de água (lâmina d'água).

O experimento foi dividido em quatro ensaios, variando-se os volumes de alimentação diário nos ASBR (R1 e R2) e procurando-se manter as concentrações de sólidos suspensos totais no afluente em torno de 10.000 mg L<sup>-1</sup>.

Nos ensaios 1 e 2, o ciclo operacional do ASBR foi de 24 horas (1 ciclo ao dia), e no terceiro e quarto ensaios de 12 horas (2 ciclos ao dia), conforme descritos na Tabela 1.

TABELA 1. Distribuição dos tempos do ciclo operacional e volumes de afluente para cada condição operacional dos reatores anaeróbios operados em batelada sequencial. **Distribution of the times of the operational cycle and affluent volumes for each operational condition of the anaerobic reactors operated in sequential batch (ASBR).**

Características	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Tempo do ciclo (h)	24	24	12	12
Volume de alimentação por ciclo (L)	60	80	60	80
Tempo de alimentação (h)	0,17	0,17	0,17	0,17
Tempo de reação (h)	19,00	19,00	9,00	9,00
Tempo de sedimentação (h)	4,66	4,66	2,66	2,66
Tempo de retirada do sobrenadante (h)	0,17	0,17	0,17	0,17

Durante a etapa de reação, o sistema de agitação, num gradiente de velocidade (G) em torno de 100 s<sup>-1</sup>, foi acionado intermitentemente (15 minutos/h<sup>-1</sup>), com rotações de 20 a 25 rpm no R1, e de 25 a 35 rpm no R2.

A avaliação de desempenho da unidade experimental baseou-se na monitorização da água residuária de suinocultura bruta afluyente e do efluente tratado, em amostras simples, com frequência de amostragem de duas vezes por semana, determinando-se pH, nitrogênio total Kjeldalh (NTK), nitrogênio amoniacal (N-am.), nitrogênio orgânico (N-org.), fósforo total (P-total), Ca, Mg, Na, K, Fe, Zn, Cu, Mn e coliformes totais e termotolerantes. As análises foram realizadas conforme descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA/AWWA/WPCF, 1998). As temperaturas médias do ar foram obtidas na Estação Agroclimatológica do Departamento de Ciências Exatas da UNESP, Jaboticabal - SP.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As cargas orgânicas volumétricas (COV) aplicadas no primeiro ASBR variaram de 4,43 a 12,75 g DQO<sub>total</sub> (L d)<sup>-1</sup>. Os tempos de detenção hidráulica (TDH) aplicados no sistema de tratamento anaeróbio, em dois estágios seguidos das lagoas de polimento em série, para o pós-tratamento, variaram de 8,4 a 39,2 dias (Tabela 2).

Os valores médios de NTK, N-am. , N-org.e P-total no afluyente variaram de 752 a 1.116 mg L<sup>-1</sup>, 164 a 274 mg L<sup>-1</sup>, 631 a 858 mg L<sup>-1</sup> e de 338 a 448 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, nos ensaios 1; 2; 3 e 4 (Tabela 2).

A relação N-am./NTK no afluyente e no efluente dos ASBR variaram de 0,21 a 0,30 e de 0,58 a 0,82, respectivamente, nos quatro ensaios. MASSÉ et al.(2007) observaram aumento na relação N-am./NTK de 0,57, no afluyente, para 0,80, no efluente de um ASBR (41 L), tratando águas residuárias de suinocultura na temperatura de 17° C. Isso indica que, para as condições operacionais e ambientais impostas aos ASBR, não ocorreram limitações para a amonificação do N-org. das águas residuárias de suinocultura.

As eficiências médias de remoção do sistema de tratamento anaeróbio com os ASBR (R1 + R2) foram superiores a 21% para o NTK, 56% para o N-org., 32% para o P-total, 98,88% para os coliformes totais e de 96,87% para os coliformes termotolerantes, nos ensaios 1; 2; 3 e 4 (Tabela 3). Observa-se que as menores eficiências de remoção de NTK e N-org. de 21 e 56%, respectivamente, no sistema R1+R2, ocorreram quando se aplicou a maior COV no R1 (12,75 g DQO<sub>total</sub> (L d)<sup>-1</sup>) (Figura 4).

Conforme constatado por OLIVEIRA (1997) e RAMIRES (2005) e também observado neste estudo, a concentração de N-am. no efluente não aumentou proporcionalmente a redução na concentração de N-org., indicando que maior quantidade de N-org. ficou retido no lodo dos reatores. No R2, onde ocorreram grandes arrastes de sólidos do lodo, verificaram-se concentrações de N-org. no efluente muito próximas às do afluyente.

No efluente da L1, as concentrações médias de NTK, N-am. e N-org. foram de 290 a 743 mg L<sup>-1</sup>, 267 a 466 mg L<sup>-1</sup> e de 23 a 253 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, durante a realização dos quatro ensaios (Tabela 2).

Na L1, observaram-se valores médios de eficiências de remoção de NTK de 45; 36 e 19%; de N-am. de 45; 34 e 13, e de N-org. de 47; 72 e 36% durante os ensaios 1; 2 e 4, respectivamente. No ensaio 3, na L1, ocorreu somente 16% de remoção de N-org. (Tabela 3).

Nos ensaios 1 e 2, com a aplicação de maiores TDH (de 33,2 e 25 dias) no sistema de pós-tratamento com as lagoas em série (L1 + L2), verificaram-se as maiores eficiências de remoção, de NTK de 71 e 72%, de N-am. de 83 e 65% e de N-org. de 41 e 97% (Tabela 3).

TABELA 2. Condições operacionais e concentrações médias do nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrogênio amoniacal (N-am.), nitrogênio orgânico (N-org.), fósforo total (P-total), pH, número mais provável de coliformes totais e termotolerantes no afluente e no efluente do sistema de tratamento anaeróbio, em dois estágios, com os reatores ASBR (R1 e R2) seguidos de lagoas de polimento (L1 e L2) em série, nos ensaios 1; 2; 3 e 4. **Operational conditions and concentrations of the total kjeldahl nitrogen (TKN), amonium nitrogen (NH<sub>4</sub>-N), organic nitrogen (org-N), total-P, pH, fecal coliforms more probable number (MPN/100 mL) in the affluent and effluent of the anaerobic treatment system of in two-stage with ASBR (R1 and R2) followed by polishing ponds in series (L1 and L2), in the assays 1; 2; 3 and 4.**

Parâmetros		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4	
		Média	C.V.	Média	C.V.	Média	C.V.	Média	C.V.
Duração do ensaio (dias)	-	60	-	59	-	59	-	53	-
Temperatura média do ar (°C)		24	7	23	11	18	11	22	11
TDH (d)	R1	4,0	-	3,0	-	2,0	-	1,5	-
	R2	2,0	-	1,5	-	1,0	-	0,7	-
	L1	16,6	-	12,5	-	8,3	-	6,2	-
	L2	16,6	-	12,5	-	8,3	-	*	-
COV (g DQO <sub>total</sub> (L d) <sup>-1</sup> )	R1	4,43	26	5,62	35	9,73	31	12,75	30
	R2	1,37	42	2,41	83	8,50	41	4,37	28
	L1	0,14	25	0,23	75	1,14	37	1,13	64
	L2	0,05	28	0,06	32	0,40	45	*	-
pH	Afluente	5,7	5	5,8	8	5,9	8	6,0	8
	Efluente R1	7,4	3	7,2	2	6,9	7	7,4	5
	Efluente R2	7,6	3	7,2	2	6,9	7	7,4	5
	Efluente L1	7,8	2	7,8	3	7,2	3	7,4	2
	Efluente L2	8,2	4	8,1	0,9	7,6	2	*	-
NTK (mg L <sup>-1</sup> )	Afluente	987	35	752	39	1.116	35	905	25
	Efluente R1	611	53	419	20	665	37	669	20
	Efluente R2	682	39	470	24	752	29	778	26
	Efluente L1	361	35	290	21	743	32	631	12
	Efluente L2	176	33	141	13	749	31	*	-
N-am. (mg L <sup>-1</sup> )	Afluente	225	34	164	21	258	34	274	21
	Efluente R1	452	25	313	26	362	50	426	18
	Efluente R2	530	19	389	39	442	25	521	17
	Efluente L1	281	22	267	23	491	13	466	13
	Efluente L2	87	35	139	14	463	15	*	-
N-org. (mg L <sup>-1</sup> )	Afluente	763	39	588	46	858	43	631	32
	Efluente R1	159	74	106	84	303	64	242	38
	Efluente R2	152	123	82	120	302	51	257	55
	Efluente L1	80	15	23	31	253	78	165	38
	Efluente L2	89	74	2	62	285	74	*	-
P-total (mg L <sup>-1</sup> )	Afluente	426	53	393	36	488	37	338	38
	Efluente R1	335	45	244	30	317	28	221	30
	Efluente R2	293	49	239	41	296	31	235	42
	Efluente L1	95	67	82	123	237	60	198	34
	Efluente L2	79	16	n.d.	-	163	57	*	-
Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	Afluente	1,4 10 <sup>7</sup>	-	4,0 10 <sup>7</sup>	-	1,6 10 <sup>8</sup>	-	7,4 10 <sup>6</sup>	-
	Efluente R1	9,0 10 <sup>4</sup>	-	2,5 10 <sup>6</sup>	-	1,3 10 <sup>7</sup>	-	7,5 10 <sup>5</sup>	-
	Efluente R2	5,5 10 <sup>4</sup>	-	8,5 10 <sup>5</sup>	-	5,0 10 <sup>6</sup>	-	4,5 10 <sup>5</sup>	-
	Efluente L1	1,1 10 <sup>4</sup>	-	2,5 10 <sup>6</sup>	-	1,3 10 <sup>7</sup>	-	7,5 10 <sup>5</sup>	-
	Efluente L2	8,0 10 <sup>3</sup>	-	9,0 10 <sup>4</sup>	-	2,5 10 <sup>4</sup>	-	*	-
Coliformes totais (NMP/100 mL)	Afluente	2,5 10 <sup>7</sup>	-	7,5 10 <sup>8</sup>	-	1,2 10 <sup>9</sup>	-	1,1 10 <sup>9</sup>	-
	Efluente R1	4,5 10 <sup>5</sup>	-	4,7 10 <sup>6</sup>	-	1,2 10 <sup>8</sup>	-	1,2 10 <sup>6</sup>	-
	Efluente R2	1,1 10 <sup>5</sup>	-	1,2 10 <sup>6</sup>	-	1,4 10 <sup>7</sup>	-	4,2 10 <sup>6</sup>	-
	Efluente L1	1,4 10 <sup>5</sup>	-	4,5 10 <sup>5</sup>	-	6,2 10 <sup>5</sup>	-	1,5 10 <sup>5</sup>	-
	Efluente L2	8 10 <sup>4</sup>	-	9 10 <sup>4</sup>	-	1,1 10 <sup>5</sup>	-	*	-

TDH - tempo de detenção hidráulica; COV - carga orgânica volumétrica, NMP- número mais provável; C.V. - coeficiente de variação, \* Não se utilizou a L2.

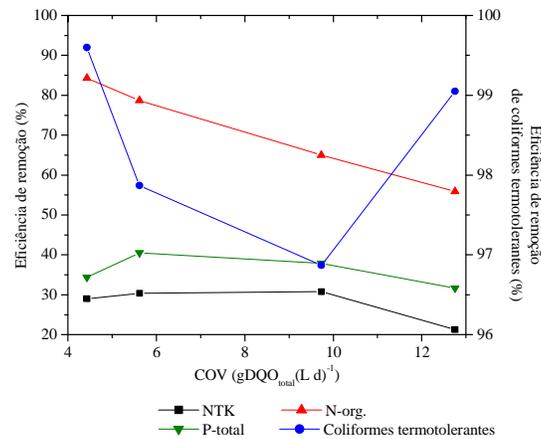


FIGURA 4. Eficiências médias de remoção de NTK, N-org., P-total e coliformes termotolerantes para o sistema de tratamento anaeróbio, em dois estágios, com os reatores ASBR (R1 e R2), em função da COV aplicada no R1. **Removal efficiencies of TKN, total phosphorus for anaerobic treatment system with ASBR (R1 and R2) in function of OLR in R1.**

TABELA 3. Eficiências médias de remoção de nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrogênio amoniacal (N-am.), nitrogênio orgânico (N-org.), fósforo total (P-total) e coliformes totais e termotolerantes do sistema de tratamento anaeróbio em dois estágios, com os reatores ASBR (R1 e R2), seguidos das lagoas de polimento (L1 e L2) em série, nos ensaios 1; 2; 3 e 4. **Removal efficiencies of the total kjeldahl nitrogen (TKN), ammonium nitrogen (NH<sub>4</sub>-N), organic nitrogen (org-N), total-P, total and fecal coliforms of the anaerobic treatment system of in two-stage with ASBR (R1 and R2) followed by polishing ponds in series (L1 and L2), in the assays 1, 2, 3 and 4.**

Parâmetros		Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4	
Eficiência de remoção (%)		Média	C.V.	Média	C.V.	Média	C.V.	Média	C.V.
NTK	R1	35	53	39	43	38	50	31	35
	R1 + R2	29	68	30	83	31	67	21	21
	L1	45	25	36	48	-	-	19	200
	L1 + L2	71	20	72	6	-	-	*	-
	Sistema	81	9	82	4	33	86	30	15
N-org.	R1	80	13	79	19	65	22	59	32
	R1 + R2	84	26	79	37	65	17	56	55
	L1	47	18	72	23	16	15	36	15
	L1 + L2	41	38	97	13	56	20	*	-
	Sistema	88	10	99	10	66	21	73	20
N-am.	L1	45	36	34	37	-	-	-	-
	L1+L2	83	2	65	5	-	-	-	-
	Sistema	62	16	16	105	-	-	-	-
P-total	R1	28	80	39	30	36	71	34	81
	R1 + R2	34	-	40	17	38	54	32	94
	L1	36	99	47	26	19	226	12	291
	L1 + L2	73	18	99,99	0	44	22	*	-
	Sistema	82	102	99,99	0	67	45	42	35
Coliformes termotolerantes	R1	99,35	-	93,75	-	91,87	-	89,86	-
	R1 + R2	99,60	-	97,87	-	96,87	-	99,05	-
	L1	80,00	-	87,05	-	97,50	-	90,44	-
	L1 + L2	85,45	-	97,05	-	98,20	-	*	-
	Sistema	99,94	-	99,77	-	99,98	-	99,41	-
Coliformes totais	R1	98,20	-	99,37	-	90,00	-	99,88	-
	R1 + R2	99,56	-	99,83	-	98,88	-	99,60	-
	L1	-	-	64,00	-	95,57	-	96,42	-
	L1 + L2	27,27	-	90,83	-	98,88	-	*	-
	Sistema	99,68	-	99,98	-	99,99	-	99,98	-

\* Não se utilizou a L2; C.V. - coeficiente de variação

Nos ensaios 1 e 2, ocorreram as maiores temperaturas médias do ar (de 24 e 23 °C) e o pH do efluente das lagoas foi próximo de 8,2; valores superiores aos observados nos ensaios 3 e 4 (valores de pH próximos de 7,6), o que pode ter contribuído para a elevação das eficiências de remoção de NTK, N-am. e N-org. na L1 e na L2. Segundo MASCARENHAS et al. (2004), o principal mecanismo de remoção de amônia em lagoas de polimento é a volatilização, factível sob valores elevados de pH (superiores a 8) e da temperatura, as quais conduzem à elevação da fração não ionizada ( $\text{NH}_3$ ) do N-am. e à diminuição da fração ionizada ( $\text{NH}_4^+$ ).

As eficiências de remoção de NTK no sistema de tratamento com os ASBR em dois estágios, seguidos das lagoas de polimento em série, foram de 81; 82; 33 e 30% nos ensaios 1; 2; 3 e 4, respectivamente. As eficiências médias de remoção de N-am. foram de 62 e 16% nos ensaios 1 e 2, respectivamente. Nos ensaios 3 e 4, não houve remoção de N-am. As eficiências de remoção do N org. foram de 88; 99; 66 e 73% nos ensaios 1; 2; 3 e 4, respectivamente. Observou-se que as maiores eficiências de remoção para NTK, N-am. e N-org. foram obtidas com os maiores TDH, de 39,3 e 29,5 dias (Tabela 3 e Figura 5).

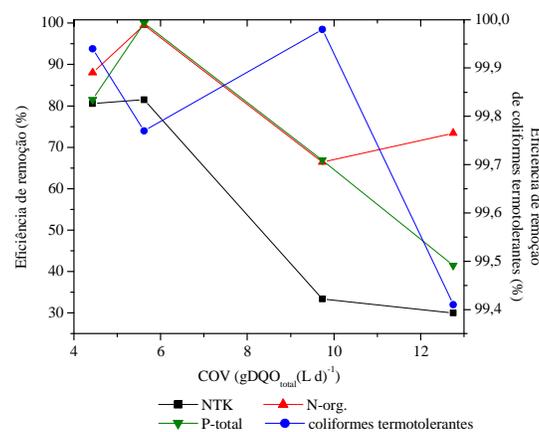


FIGURA 5. Eficiências médias de remoção de NTK, N-org., P-total e coliformes termotolerantes no sistema de tratamento anaeróbico, em dois estágios, com reatores ASBR (R1 e R2), seguidos de lagoas de polimento (L1 e L2), em função da COV aplicada no R1. **Removal efficiencies of TKN, organic-N, total-P and fecal coliforms for anaerobic treatment t system, with reactors ASBR (R1 and R2), followed by polishing ponds (L1 and L2), in function of OLR in R1.**

COSTA & MEDRI (2002) avaliaram o desempenho de duas lagoas anaeróbias, uma lagoa facultativa e uma lagoa com aguapés em série, no tratamento de águas residuárias de suinocultura decantadas, sendo aplicado TDH de 154 dias no conjunto das lagoas. No sistema composto pelas quatro lagoas em série, obteve-se eficiência de remoção de 88% para NTK. Essa remoção de NTK foi pouco superior aos valores encontrados nos ensaios 1 e 2, indicando que a utilização dos ASBR em dois estágios foi mais eficaz para a remoção do nitrogênio do que a aplicação de altos valores de TDH nas lagoas. A amonificação do N-org. ocorreu com maior eficiência nos ASBR.

Os valores médios da concentração de P-total no afluente variaram de 338 a 488 mg L<sup>-1</sup> (Tabela 2), valores próximos aos encontrados por COSTA & MEDRI (2002), de 391 mg L<sup>-1</sup>, para águas residuárias de suinocultura com concentrações de DQO<sub>total</sub> de 15.153 mg L<sup>-1</sup>.

No R1, as concentrações médias de P-total no efluente e as eficiências de remoção foram de 335; 244; 317 e 221 mg L<sup>-1</sup> (Tabela 2) e de 28; 39; 36 e 34% (Tabela 3) nos ensaios 1; 2; 3 e 4, respectivamente. As eficiências de remoção de P-total observadas neste estudo foram superiores às observadas por MASSÉ et al. (2007), de 25,5%, tratando águas residuárias de suinocultura em um ASBR com carga orgânica volumétrica (COV) de 0,14 g DQO<sub>total</sub> (L d)<sup>-1</sup>.

No sistema de tratamento (R1+R2), as eficiências de remoção de P-total foram de 34; 40; 38 e 32% (Tabela 3 e Figura 4), indicando que o R2 pouco contribuiu ou não contribuiu para aumentar a remoção.

As eficiências médias de remoção de P-total na L1 foram de 36; 47; 19 e 12%, nos ensaios 1; 2; 3 e 4, respectivamente. Na L2, foram de 56; 100 e 31%, nos ensaios 1; 2 e 3, respectivamente.

Verificou-se que, com os maiores TDH nas lagoas (L1+L2), de 33,2 e 25 dias, nos ensaios 1 e 2, ocorreram as maiores eficiências médias de remoção de P-total, de 73 e 99,99%, respectivamente, em comparação com o ensaio 3, com TDH de 16,6 dias, no qual a eficiência média de remoção foi de 44%. Nos ensaios 1 e 2, verificaram-se valores de pH acima de 8 na L2, o que pode ter contribuído para a precipitação de fosfatos e, conseqüentemente, a remoção de P-total.

As concentrações de P-total no efluente do sistema de tratamento composto pelos reatores ASBR e as lagoas de polimento variaram de não detectado a 198 mg L<sup>-1</sup>. Observaram-se eficiências de remoção de 82; 99,99; 67 e 42% nos ensaios 1; 2; 3 e 4, com TDH total de 39,3; 29,5; 19,6 e 8,5 dias, respectivamente (Figura 5). COSTA & MEDRI (2002) obtiveram eficiências de remoção de 93% para P-total em sistema composto por quatro lagoas em série, com TDH de 154 dias.

Os valores médios dos números de coliformes totais e termotolerantes no afluente variaram de 2,5x10<sup>7</sup> a 1,2x10<sup>9</sup> NMP/100mL e de 7,4 x 10<sup>6</sup> a 1,6 x 10<sup>8</sup> NMP/100 mL, respectivamente, durante os ensaios 1; 2; 3 e 4, respectivamente. Nos efluentes dos reatores R1 e R2, os coliformes termotolerantes variaram de 9,0 x 10<sup>4</sup> a 1,3 x 10<sup>7</sup> NMP/100 mL e de 5,5 x 10<sup>4</sup> a 5,0 x 10<sup>6</sup>, respectivamente (Tabela 2).

Com os ASBR em série (R1+R2) e COV de 4,43 a 12,75 g DQO<sub>total</sub> (L d)<sup>-1</sup>, obtiveram-se eficiências médias de remoção de coliformes termotolerantes de 99,60; 97,87; 96,87 e 99,05%, respectivamente (Tabela 3 e Figura 4). No sistema de tratamento anaeróbio com os ASBR em dois estágios seguidos de lagoas de polimento em série, verificaram-se altas eficiências de remoção de coliformes termotolerantes, de 99,41 a 99,98%, mas com concentrações nos efluentes acima de 8 x 10<sup>3</sup> NMP/100 mL. Com essas concentrações, não deverá ocorrer a aplicação das águas residuárias tratadas para a irrigação irrestrita de plantas, tomando-se por base o limite de coliformes termotolerantes de 1.000 NMP/100 mL das diretrizes para o uso de águas residuárias na agricultura (WHO, 1989 e 2006). Os limites estabelecidos na Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n° 357 (BRASIL, 2005), na qual estão definidos os valores máximos de coliformes termotolerantes de 200; 1.000 e 4.000 NMP/100 mL em corpos d'água doce de classe 1; 2 e 3, dos quais podem ser captadas águas para irrigação, são inferiores aos verificados nos ensaios.

As concentrações médias de Cu no afluente variaram de 5,4 a 8,2 mg L<sup>-1</sup>; de Fe, de 20,3 a 27,4 mg L<sup>-1</sup>; de Mn, de 2,9 a 3,6 mg L<sup>-1</sup>, e de Zn, de 7,1 a 11,1 mg L<sup>-1</sup>. As concentrações médias de Cu no efluente do R1 durante os quatro ensaios variaram de 1,4 a 2,0 mg L<sup>-1</sup>; de Fe, de 4,5 a 11,1 mg L<sup>-1</sup>; de Mn, de 1,1 a 1,4 mg L<sup>-1</sup>, e de Zn, de 1,9 a 3,1 mg L<sup>-1</sup> (Tabela 4).

As concentrações médias de Ca, Mg, K e Na variaram de 159 a 676 mg L<sup>-1</sup>, 46 a 79 mg L<sup>-1</sup>, de 59 a 292 mg L<sup>-1</sup> e de 23 a 163 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, no afluente, durante os ensaios 1; 2; 3 e 4 (Tabela 4).

No R1, observaram-se eficiências médias de remoção de 61 a 72% para o Cu; 50 a 82% para o Fe; de 42 a 65% para o Mn, e de 64 a 81% para o Zn (Figura 6). As maiores eficiências de remoção de Fe, Zn e Cu ocorreram no R1 e com a aplicação das menores COV. Esses valores foram superiores aos obtidos por MASSÉ et al. (2007), com eficiências médias de remoção de 41,5% para o Cu; de 15% para o Fe; 21% para o Mn, e 18,4% para o Zn, em ASBR tratando águas residuárias de suinocultura com carga orgânica volumétrica (COV) de 0,14 g DQO<sub>total</sub> (L d)<sup>-1</sup>.

No efluente do R2, verificaram-se concentrações maiores dos micronutrientes estudados (Cu, Fe, Mn e Zn), em relação às do efluente do R1. O R2 contribuiu para o decréscimo das eficiências de remoção do sistema de tratamento (R1+R2), em virtude do arraste de lodo com o efluente.

TABELA 4. Valores médios das concentrações de Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn e Zn no afluente e no efluente obtidos durante a operação do sistema de tratamento anaeróbico em dois estágios com os ASBR (R1 e R2), seguidos de lagoas de polimento (L1 e L2) em série, nos ensaios 1; 2; 3 e 4. **Average values of the Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn e Zn in the affluent and effluent of the anaerobic treatment system of in two-stage with ASBR (R1 and R2) followed by polishing ponds in series (L1 and L2), in the assays 1; 2; 3 and 4.**

Ensaio:	Nutrientes	Afluente	C.V.	Efluente R1	C.V.	Efluente R2	C.V.	Efluente L1	C.V.	Efluente L2	C.V.
1	Cu	6,8	43	1,4	60	1,6	37	0,4	49	0,08	96
2		8,2	60	1,8	72	2,5	106	0,3	118	0,16	89
3		5,4	45	2,0	69	1,9	56	1,6	105	0,27	130
4		6,6	38	2,0	74	4,0	68	1,6	80	*	-
1	Fe	25,4	30	4,5	46	4,5	38	1,3	67	0,10	145
2		20,3	56	6,4	88	8,1	104	0,6	115	Nd	0
3		27,0	46	9,4	39	9,7	70	8,1	147	0,32	271
4		27,4	40	11,1	113	14,5	72	5,2	92	*	-
1	Mn	3,1	75	1,1	84	0,8	88	0,1	224	0,02	264
2		3,6	59	1,2	58	1,1	93	0,2	126	0,09	207
3		2,9	43	1,4	43	1,5	46	1,2	86	0,19	80
4		3,5	35	1,4	35	1,8	48	0,7	62	*	-
1	Zn	11,1	33	2,0	49	2,2	38	0,8	56	0,31	104
2		9,0	59	2,2	68	3,0	103	0,5	121	0,41	95
3		9,1	56	3,1	81	3,7	81	3,9	119	0,68	79
4		7,1	39	1,9	100	3,9	74	1,3	101	*	-
1	Ca	657	22	268	16	286	17	271	17	251	22
2		676	17	324	17	330	29	281	29	250	16
3		269	89	139	100	148	86	160	86	120	116
4		159	44	57	43	98	23	77	24	*	-
1	Mg	79	27	51	26	53	24	47	18	46	13
2		66	19	42	14	42	15	42	9	46	10
3		46	35	33	25	39	31	41	29	33	42
4		57	41	37	32	43	34	42	25	*	-
1	K	118	56	122	49	128	51	96	41	82	27
2		59	56	59	40	58	46	64	29	75	22
3		152	53	15	52	234	101	178	28	177	28
4		292	26	309	39	326	37	377	24	-	-
1	Na	48	37	48	30	47	35	45	19	48	21
2		23	111	31	54	29	65	36	52	51	32
3		100	52	88	43	92	40	94	24	97	25
4		163	30	144	36	155	37	163	19	*	-

\* Não se utilizou a L2; C.V. - coeficiente de variação

No sistema de tratamento composto pelos ASBR em série, seguidos pelas lagoas de polimento, observaram-se remoções de 62; 63; 55 e 52% para o Ca, e 43; 31; 29 e 27% para o Mg, nos ensaios 1; 2; 3 e 4, respectivamente (Figura 7), ou seja, as eficiências de remoção do Ca e Mg diminuíram com a aplicação de TDH menores. O Na não foi removido no sistema de tratamento e para o K obteve-se eficiência de remoção de 30% no ensaio 1, com TDH de 39,3 dias.

A utilização das lagoas de polimento em série, para o pós-tratamento do efluente dos ASBR, permitiu manter eficiências médias de remoção de 80% a 99,99% para o Fe, Zn e Mn, e de 76 a 98% para o Cu (Figura 7).

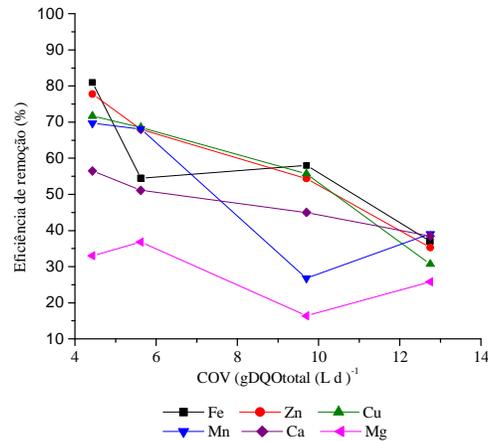


FIGURA 6. Eficiências médias de remoção de Cu, Fe, Mn, Zn, Ca e Mg no sistema de tratamento anaeróbio, em dois estágios, com os reatores ASBR (R1 e R2), em função da COV aplicadas no R1. **Removal efficiencies of Cu, Fe, Mn, Zn, Ca e Mg for anaerobic treatment system with reactors ASBR (R1 and R2), in function of OLR in R1.**

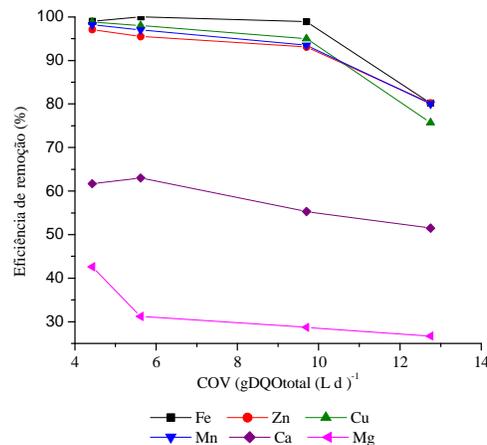


FIGURA 7. Eficiências médias de remoção de Cu, Fe, Mn, Zn, Ca e Mg no sistema de tratamento anaeróbio, em dois estágios, com os reatores ASBR (R1 e R2), seguidos de lagoas de polimento (L1 e L2), em função da COV aplicada no R1. **Removal efficiencies of Cu, Fe, Mn, Zn, Ca e Mg for anaerobic treatment system with reactors ASBR (R1 and R2), followed by polishing ponds in series (L1 and L2) in function of OLR in R1.**

**CONCLUSÕES**

No sistema composto pelos ASBR em série, seguidos das lagoas de polimento, as eficiências médias de remoção para TDH acima de 29,5 dias foram altas, de 80% para o NTK e P-total; 97% para o Fe, Cu, Mn e Zn, e de 99,7% para os coliformes termotolerantes.

Tomando-se por base os limites estabelecidos na Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357, os efluentes obtidos durante a operação do sistema de tratamento composto pelos ASBR e as lagoas de polimento em série, para TDH acima de 29,5 dias, atendem aos padrões de lançamento de efluentes e da classe de água doce para uso na irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras, quanto à presença de Fe, Mn e Zn. O número de coliformes

termotolerantes manteve-se acima de  $8 \times 10^3$  NMP/100 mL, restringindo a aplicação das águas residuárias tratadas para a irrigação de plantas.

## AGRADECIMENTOS

À CAPES, à FAPESP e a TIGRE S.A., pelo auxílio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- APHA/AWWA/WPCF. Standart methods for the examination of water and wastewater. 20<sup>th</sup> ed. Washington, 1998. 1.268 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. *Dispõe sobre a classificação dos corpos de águas e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*. Brasília, 2005. 23 p.
- CHERNICHARO, C.A.L. de. Post-treatment options for the anaerobic treatment of domestic wastewater. *Reviews in Environmental and Science and Bio/Technology*, n.5, p.73-92, 2006.
- COSTA, R.H.R. da; MEDRI, W. Modelling and optimisation of stabilization ponds system for the treatment of swine wastes: organic matter evaluation. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Curitiba, v.45, p.385-392, 2002.
- DAGUE, R.R.; HABBEN, C.E.; PIDAPARTI, S.R. Initial studies on the anaerobic sequencing batch reactor. *Water Science and Technology*, Oxford, v.26, n.9-11, p.2.429-2.432, 1992.
- FERNANDES, G.F.; OLIVEIRA, R.A. Desempenho de processo anaeróbio em dois estágios (reator compartimentado seguido de reator UASB) para tratamento de águas residuárias de suinocultura *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.26, n.1, p.243-256, 2006.
- IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível: <<http://sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 15 de mar. 2008.
- ISOLDI, A.L.; KOETZ, P.R. Tratamentos biológicos para remoção de matéria carbonada e nitrogenada. *Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental*, Rio Grande, v.12, n.1, p.12, 2004.
- KATO, M.T.; FLORÊNCIO, L. Pós-tratamento de efluentes anaeróbios em lagoas de polimento. In: CHERNICHARO C.A.L (Coord.) *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios: coletânea de trabalhos técnicos*. Belo Horizonte: FINEP, 2001. v.2, p.59-68.
- MARCHETTO, M. *Remoção de nutrientes do efluente de reator anaeróbio utilizando reatores microaeróbios e com aeração intermitente seguidos de FAD*. 2001. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- MASSÉ, I.; CROTEAU, F.; MASSÉ, L. The fate of crop nutrients during digestion of swine manure in psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors. *Bioresource Technology*, Kindlington, v.98, p.2.819-2.823, 2007.
- MASCARENHAS, L.C.; SPERLING, M. Von; CHERNICHARO, C.A.L. de. Avaliação de lagoas de polimento rasas, em série, para o pós-tratamento de efluentes de reator UASB. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v.9, n.1, p.45-54, 2004.
- OLIVEIRA, R.A. de. *Efeito da concentração de sólidos suspensos do afluente no desempenho e características do lodo de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo tratando águas residuárias de suinocultura*. 1997. 359 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- RAMIRES, R. dél ARCO. *Produção de metano e remoção de matéria orgânica, nutrientes e microrganismos patogênicos em reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo*

*(UASB) em dois estágios tratando águas residuárias de suinocultura*. 2005. 136 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2005.

SPERLING, M. Von. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Lagoas de estabilização*. 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002. v.3, 196 p.

WHO. World Health Organization. *Guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture*. Genebra, 1989. 74 p. (Technical Report Series, 778).

WHO. World Health Organization. *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater - policy and regulatory aspects*. Genebra, 2006. v.1, 100 p.