

## **LAGOAS DE POLIMENTO PARA O PÓS-TRATAMENTO DE ESGOTO DIGERIDO - PARTE 1: REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA E SÓLIDOS EM SUSPENSÃO**

**Maria das Graças Ribeiro Mayer, Eudes Alves Moreira, Paula Frassinetti Feitosa Cavalcanti e Adrianus Van Haandel<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup> DEC CCT UFPb Rua Aprígio Veloso, 882 - Bodocongó – Campina Grande, Pb - CEP: 58.109-970 Tel: (83) 331-4809 - e-mail: [prosab@cgnet.com.br](mailto:prosab@cgnet.com.br)

### **RESUMO**

A utilização de reatores UASB como alternativa de pré-tratamento para esgotos domésticos vem crescendo de forma significativa no Brasil, em face a alta eficiência de remoção de matéria orgânica alcançada (da ordem de 70%) em curtos tempos de detenção e por ser um sistema compacto de baixos custos de implantação e operação. Entretanto, os efluentes de UASB necessitam de pós-tratamento, de forma a atingir índices de remoção compatíveis com as exigências dos órgãos ambientais e a maioria dos corpos receptores. As lagoas de polimento rasas se apresentam como uma opção de tratamento para receberem o efluente dos reatores UASB. Dependendo do tempo de permanência e do tipo de escoamento na lagoa de polimento, pode-se obter um efluente corrigido quanto alguns dos aspectos não desejáveis do efluente do UASB como material orgânico biodegradável, sólidos em suspensão, nitrogênio e fósforo e organismos patogênicos. Este trabalho teve por objetivo estudar o comportamento da matéria orgânica em termos de DQO, DBO<sub>5</sub> e remoção de sólidos em suspensão em uma lagoa de polimento em escala-piloto provida por chicanas, observando-se a influência das principais variáveis operacionais sobre o desempenho da lagoa: (1) tempo de permanência na lagoa e (2) profundidade. O aspecto mais importante da investigação experimental foi demonstrar a viabilidade de se usar uma única lagoa de polimento para o pós tratamento de esgoto digerido num reator UASB sem que ocorressem problemas de maus odores. Em um tempo de aproximadamente 3 dias, em uma lagoa com 0,65 m de profundidade, estabeleceram-se valores quase constantes de DBO<sub>5</sub> e STS embora relativamente altos devido à presença de algas.

### **PALAVRAS CHAVE**

Lagoa de polimento; matéria orgânica; pré-tratamento anaeróbio; qualidade do efluente final; tempo de permanência

### **INTRODUÇÃO**

A utilização ecologicamente correta dos recursos hídricos impõe a disposição final adequada de águas servidas (esgoto doméstico) que pode ser num corpo d'água receptor, sem prejuízo para a qualidade deste, ou na reutilização na agricultura, por exemplos. Para reutilização na agricultura, os critérios de qualidade higiênica adotados para esgoto doméstico tratado se referem às recomendações da Organização Mundial de Saúde (WHO (OMS), 1998):  $\leq 103\text{CF}/100\text{ mL}$  e  $< 1$  ovo de helminto/100 mL.

Vários pesquisadores, no Brasil, demonstraram que reatores anaeróbios de alta taxa, notadamente reatores UASB, são também bastante eficientes no tratamento de esgoto doméstico, quando operados em regiões de clima quente, apresentando eficiência de remoção de sólidos suspensos (SS) e DBO geralmente superior a 70%, (VAN HAANDEL e LETTINGA (1993); BEZERRA *et al* (1999), AISSE *et al* (2000); SANCHES *et al* (2000)). No entanto, por serem operados com tempos de detenção permanência entre 8 a 12 horas, estes reatores apresentam baixa eficiência na remoção de coliformes fecais.

Para corrigir as deficiências do tratamento anaeróbio as lagoas de polimento se apresentam como solução tecnicamente viável. Num trabalho anterior (CAVALCANTI *et al*, 2000) ficou estabelecido que, em apenas três dias de tempo de permanência, em lagoas de polimento rasas (0,60 m de profundidade) é possível reduzir significativamente a DBO e os sólidos suspensos totais (SST) remanescentes de reatores anaeróbios tipo UASB. Estes autores mostram que, tratando-se de lagoas de polimento de efluentes anaeróbios, não há necessidade e nem vantagens de se construir um sistema de lagoas em série, a exemplo de sistemas de lagoas de estabilização convencionais que tratam esgoto bruto.

Não havendo dificuldades para a remoção de DBO e de SST e uma vez que a remoção dos ovos de helmintos se dá paralela à remoção de SST o projeto de lagoas de polimento deve ser otimizado para maximizar a remoção de coliformes fecais. As considerações teóricas que devem nortear o dimensionamento de lagoas eficientes na remoção de CF partem de que o decaimento de CF se dá segundo um processo de 1ª. ordem (Equação (1); MARAIS, 1974):

$$dN/dt = -k_b N \quad (1)$$

A solução da equação diferencial (Equação (1)) depende das condições de contorno e especialmente do grau de mistura. Quando não se tem mistura (batelada ou fluxo tubular), a eficiência do processo é máxima (LEVENSPIEL, 1979) e a solução da Equação (1) é dada por (Equação (2)):

$$N_e / N_a = \exp(-k_b t_p) \quad (2)$$

Para mistura completa (LEVENSPIEL, 1979; Equação (3)):

$$N_e / N_a = 1 / (1 + k_b t_p) \quad (3)$$

Para o caso de reatores parcialmente misturados, determina-se o número de dispersão para se expressar o grau de mistura. O número de dispersão  $D$  é determinado através da adição semi instantânea de um traçador ao efluente e, posteriormente, da observação do perfil da concentração deste traçador no efluente, em função do tempo. O valor de  $D$  é determinado através de cálculos padronizados (LEVENSPIEL, 1979). WEHNER e WILHELM (1956) desenvolveram uma expressão para reatores parcialmente misturados (Equação (4)):

$$N_e / N_a = 4a \cdot \exp^{[1/(2D)]} / \left\{ (1+a)^2 \exp^{[a/(2D)]} - (1-a)^2 \exp^{[-a/(2D)]} \right\} \quad (4)$$

onde:

$N$  é a concentração de CF (no. CF/100 mL);

$N_a, N_e$  correspondem a concentração de CF no afluente e no efluente, respectivamente;

$k_b$  é a constante de decaimento;

$t_p$  é o tempo de permanência;

$a = (1 + 4k_b t_p D)^{1/2}$ ;

$D$  é o número de dispersão.

A Figura 1 é uma representação gráfica das Equações 2, 3 e 4, tendo-se a proporção  $N_e/N_a$  em função do grupo adimensional  $k_b t_p$  para diferentes valores do número de dispersão:  $D = 0$  (fluxo tubular, sem mistura);  $D = 0,01$  (pouca mistura);  $D = 0,1$  (mistura moderada);  $D = 1$  (mistura intensa) e  $D = \infty$  (mistura completa). Observa-se claramente que o aumento da intensidade de mistura afeta a eficiência de remoção dos CF, especialmente quando a eficiência de remoção que se deseja é alta. Por exemplo, para uma eficiência de 99,99 % (redução de 4 unidades logarítmicas) o valor necessário de  $k_b t_p$  é 9,2 para  $D = 0$ , sendo de 17 para  $D = 0,1$ , o que significa que, mesmo se tendo uma mistura moderada, o tempo de permanência necessário e, portanto, a área da lagoa praticamente são duplicados.

O estudo do regime de fluxo com traçadores permite determinar, também, o tempo de permanência real ( $t_{p,real}$ ) que pode não ser o tempo de permanência teórico ( $t_p$ ). A diferença entre os dois tempos se deve a zonas estagnadas ou volume morto no reator. A fração de volume morto é determinada como:

$$f_d = (V_t - V_r)/V_t = 1 - t_{p,real}/t_p \quad (5)$$

onde:

$f_d$  é a fração de volume morto e,

$V_t$  e  $V_r$  correspondem ao volume teórico ( $V_t = Q \cdot t_p$ ) e ao volume real ou atual.

Para minimizar a mistura em lagoas, estas devem ser rasas e possuir uma razão comprimento largura elevada VON SPERLING (1996). YANEZ (1993) e AGUNWAMBA *et al* (1992) derivaram expressões (Equações 6 e 7) que permitem estimar o número de dispersão  $D$  em função das dimensões da lagoa.

Equação de YANEZ (1993):

$$D = (L/B) / \left[ -0,261 + 0,254x(L/B) + 1,014x(L/B)^2 \right] \quad (6)$$

Equação de AGUNWAMBA *et al* (1992), simplificada por VON SPERLING (1996):

$$D = 0,102 \cdot \left[ 3 \cdot ((B + 2H) \cdot t_v / 4 \cdot L \cdot B \cdot H)^{-0,410} \cdot (H/L) \cdot (H/B)^{(-0,981 + 1,385 \cdot H/B)} \right] \quad (7)$$

Com base nestas considerações teóricas foi realizada uma investigação experimental sobre o pós tratamento de efluentes de reatores UASB em uma única lagoa de polimento. O objetivo principal do experimento era verificar o tempo de permanência necessário para se obter um efluente com qualidade compatível com as recomendações da WHO (OMS), para uso na irrigação sem restrições. A descrição desta investigação, discussão dos resultados obtidos e as principais conclusões estão apresentadas no decorrer deste trabalho.

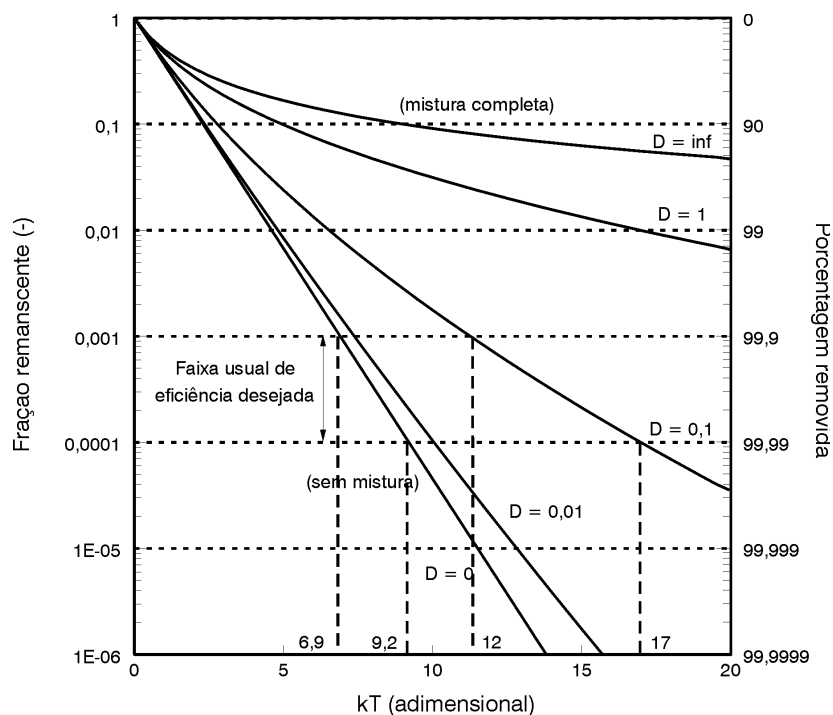


Figura 1 - Eficiência de remoção de coliformes fecais em função do grupo adimensional  $k_b t_p$  (no gráfico representado por  $kT$ ) para reatores sem mistura (fluxo tubular), com mistura parcial ou completa

## METODOLOGIA

### Descrição do sistema

As unidades experimentais foram instaladas num terreno cedido pela CAGEPA (Cia de Água e Esgotos da Paraíba) no bairro do Catolé em Campina Grande (PB), por onde passa o emissário principal que conduz o esgoto municipal para a ETE da Caatingueira. O esgoto era recalcado de um poço úmido para uma caixa de  $1\text{m}^3$  equipada com uma bóia elétrica, de modo que se tinha um fornecimento semi contínuo de esgoto bruto, com composição idêntica ao material no próprio emissário. O poço e a caixa eram limpos semanalmente (ou com maior frequência quando chovia) para evitar a acumulação de sólidos.

A investigação experimental foi desenvolvida numa planta em escala piloto, composta por um reator UASB e vários sistemas de lagoas de polimento. O reator UASB, com um volume de útil de 5000 litros, era alimentado com esgoto bruto a uma vazão de 1667 L/h, o que correspondia a um tempo de permanência de 3 horas. Parte do efluente do reator UASB era utilizada para alimentar a lagoa de polimento de fluxo contínuo (Figuras 1). Esta unidade, feita em alvenaria rebocada, tinha dimensões úteis de 10 m de comprimento, 5 m de largura e 0,65 m de profundidade. A lagoa era subdividida em 5 raia, cada uma com 10 m de comprimento e 1m de largura. Operadas em série, a passagem do efluente de uma raia para outra era no sentido topo-fundo, através de um cap de 100 mm de diâmetro, ligado a um tubo de PVC de 20 mm, ver detalhe na Figura 1.

### Operação do sistema

A lagoa de polimento foi operada por um período de 16 meses, aplicando-se tempos de permanência de 5, 7,5 e 15 dias, usando-se sempre o efluente do reator UASB como afluente da

lagoa. Para cada tempo de permanência, a vazão era mantida constante, através de uma bomba dosadora, cuja vazão era aferida diariamente.

Amostras do esgoto bruto, do efluente do reator UASB e efluentes de cada raia da lagoa de polimento eram coletadas às 8 horas da manhã, com frequência semanal. As leituras de oxigênio dissolvido, pH e temperatura eram realizadas, na própria lagoa, às 8 e 12 horas, duas vezes por semana.

Com exceção de Clorofila *a*, que foi determinada pelo método da extração com metanol à quente (JONES, 1979), as demais análises seguiram as técnicas recomendadas por APHA *et al.* (1995). Os valores de Clorofila *a* foram obtidos de amostras da coluna líquida em cada raia. A fim de que os valores medidos em amostras pontuais (tomadas às 8 horas da manhã) representassem o valor médio diário, nas três fases do experimento foram observadas as variações qualitativas do esgoto quanto ao teor de matéria orgânica e sólidos suspensos, através de amostra coletadas de 2 em 2 horas, durante 24 horas (perfil de 24 horas). Através desses perfis foram determinados, para cada parâmetro analisado, o valor médio diário e um fator para correção dos valores das amostras pontuais.

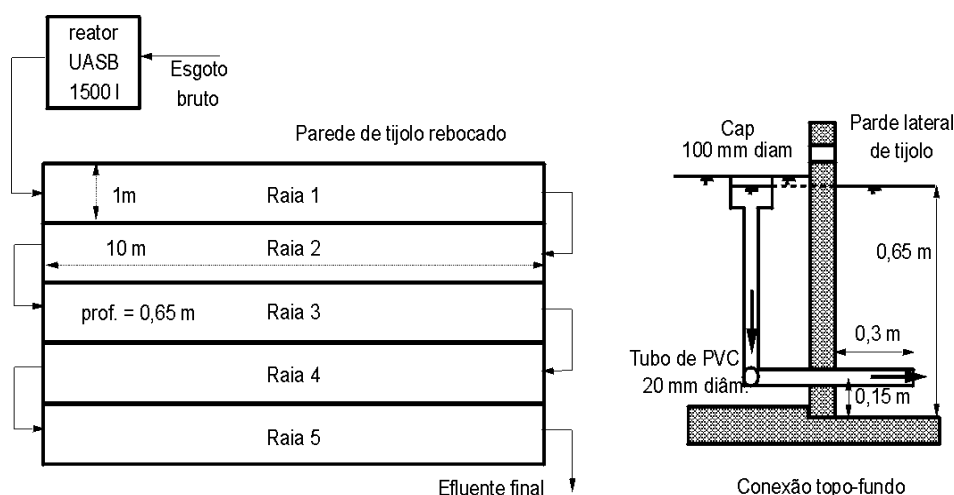


Figura 1 - Esquema do sistema formado por um reator UASB, tratando esgoto bruto, seguido de uma lagoa de polimento compartimentada, detalhe da conexão entre as raia e foto da lagoa de polimento em operação

## APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### Remoção de SST e Matéria Orgânica

Como pode ser observado nas Tabelas 2 e 3, após um  $t_p$  de somente 3 dias, os valores médios da concentração de SST não variaram muito, sendo a concentração final, respectivamente as Tabelas 2 e 3, de 68 e 48 mgSST/L, valores estes ainda altos segundo as normas ambientais. Da mesma forma, os valores da DBO, após um  $t_p$  de 3 dias na lagoa, também não apresentaram variações significativa, 55 mg/L na 1ª. Fase e 57 mg/L na 2ª. Observa-se que os valores da DBO filtrada representam praticamente metade da DBO total, podendo a diferença entre os dois valores ser atribuída à presença de algas. Também podem ser atribuídos às algas os altos valores de DQO, sendo estas responsáveis por mais que metade da DQO, para tempos de permanência de menos que 7 dias na lagoa de polimento. Nos dados de Tabela 3 observa-se que, ao longo da lagoa, houve uma diminuição notável da concentração de SST, DBO e DQO totais,

aproximando-se essas concentrações às das amostras filtradas. Paralelamente havia uma diminuição visível da concentração de algas (que aliás também ficou evidenciada pela diminuição da concentração de Clorofila *a*).

Tabela 2 - Desempenho da lagoa de polimento para uma vazão constante de 270 L/h ( $t_p = 5$  dias), tratando esgoto efluente de um reator UASB, operado com  $t_p$  de 3 horas. Período: fevereiro a junho de 2000. Temperatura da lagoa:  $25 \pm 1$  °C

Parâmetro	Unidade	Esgoto Bruto	Esgoto Digerido	Raia da lagoa				
				1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
OD mín	mg/L	-	-	<1	<1	<1	<1	<1
OD máx.	mg/L	-	-	1,5	2,5	>20	>20	>20
SST	mg/L	422	190	120	102	68	52	68
DBO	mg/L	396	169	87	71	55	54	59
DBO <sub>f</sub>	mg/L	-	105	64	36	40	32	35
DQO	mg/L	712	254	187	223	256	212	188
DQO <sub>f</sub>	mg/L	-	145	112	87	78	88	102
pH	-	7,4	6,9	7,1	7,3	7,7	8,1	8,3
Alcalinidade	mgCaCO <sub>3</sub> /L	384	432	436	413	397	391	397
Clorofila <i>a</i>	µg/L	-	-	123	464	916	1466	1702
Ovos de Helminthos	No./L	214	82	8	5	0	-	-
Coliformes Fecais	UFC/100 mL	7,4E7	2,3E7	4,7E6	2,9E6	1,1E6	3,3E5	7,5E4

Tabela 3 - Desempenho da lagoa de polimento para uma vazão constante de 180 L/h ( $t_p = 7,5$  dias), tratando esgoto efluente de um reator UASB, operado com  $t_p$  de 3 horas. Período: junho a dezembro de 1999. Temperatura da lagoa:  $25 \pm 1$  °C

Parâmetro	Unidade	Esgoto Bruto	Esgoto Digerido	Raia da lagoa				
				1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
OD mín	mg/L	-	-	<1	<1	<1	<1	<1
OD máx.	mg/L	-	-	<1	2,8	>6,8	>20	>16
SST	mg/L	536	177	101	93	68	57	48
DBO	mg/L	408	142	73	57	66	62	44
DBO <sub>f</sub>	mg/L	-	-	58	36	47	34	32
DQO	mg/L	683	329	306	346	285	287	221
DQO <sub>f</sub>	mg/L	-	-	124	156	177	142	93
pH	-	7,2	6,7	7,0	7,4	7,7	7,9	8,0
Alcalinidade	mgCaCO <sub>3</sub> /L	285	310	352	348	346	341	333
Clorofila <i>a</i>	µg/L	-	-	1149	2157	2154	2680	1282
Ovos de Helminthos	No./L	209	76	4	0	-	-	-
Coliformes Fecais	UFC/100 mL	7,3E7	1,4E7	4,5E6	8,7E5	2,2E5	3,4E4	6,9E3

Tabela 4 - Desempenho da lagoa de polimento para uma vazão constante de 90 L/h ( $t_p = 15$  dias), tratando esgoto efluente de um reator UASB, operado com  $t_p$  de 6 horas. Período: janeiro a maio de 2000. Temperatura da lagoa:  $25 \pm 1$  °C

Parâmetro	Unidade	Esgoto Bruto	Esgoto Digerido	Raia da lagoa				
				1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
OD mín	mg/L	-	-	2,6	3,1	1,6	1,5	1,4
OD máx	mg/L	-	-	8,1	9,5	3,4	4,1	4,6
SST	mg/L	438	99	78	75	44	28	18
DBO	mg/L	312	150	70	64	27	32	24
DBO <sub>f</sub>	mg/L	177	63	48	36	15	22	18
DQO	mg/L	522	192	227	187	127	137	108
DQO <sub>f</sub>	mg/L	194	144	155	119	69	66	53
pH		7,4	6,9	8,1	8,6	8,3	8,3	8,5
Alcalinidade	mgCaCO <sub>3</sub> /L	371	395	357	327	319	294	304
Clorofila a	µg/L	-	-	984	939	291	238	249
Ovos de Helmintos	No./L		52	<1	-	-	-	-
Coliformes Fecais	UFC/100 mL	3,1E7	2,4E6	4,3E5	8,0E4	7,7E3	5,0E2	5,8E2

Tabela 5 - Valores da constante de decaimento ( $k_d$ ), do número de dispersão ( $D$ ) e da fração de volume morto ( $f_d$ ) na lagoa de polimento, para valores diferentes de  $t_p$  (razão volume/vazão) e valores experimentais e teóricos da eficiência de remoção de CF

Parâmetro	5 dias <sup>(*)</sup>	7,5 dias <sup>(*)</sup>	12 dias <sup>(*)</sup>
Número de dispersão (-)	0,14	0,18	0,16
Fração de volume morto (-)	0,12	0,18	0,15
Tempo real de permanência (d)	4,4	6,5	10,2
Constante experimental de decaimento (dia <sup>-1</sup> )	2,2	2,3	2,0
Fração remanescente de CF experimental	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
Fração remanescente de CF teórica (Wehner-Wilhelm)	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Fração remanescente de CF teórica (fluxo pistão)	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$
Fração remanescente de CF teórica (mistura completa)	$9,3 \cdot 10^{-2}$	$6,3 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$

<sup>(\*)</sup>  $t_p$  nas quatro raia.

É interessante observar que uma população pequena mas estável de algas (concentração da Clorofila *a* de 123 µg/L) se estabeleceu já na primeira raia da lagoa de polimento, embora o tempo de permanência nesta fosse de tão somente 1 dia. Enquanto a concentração de algas aumentava ao longo das raia até um  $t_p$  de 5 dias, observou-se que esta concentração diminuía quando o tempo de permanência era maior que 6 ou 7 dias, como pode ser observado nas Tabelas 2 e 3. Esta forte redução influenciou outros parâmetros: não somente havia uma redução considerável da concentrações de SST, DQO e DBO mas também houve uma redução da concentração de OD e o pH teve o seu valor reduzido (Tabela 3). Vale observar que durante a fase 3 foram observadas densas concentrações de Dáfnias, pequeno crustáceo predadores de algas. A concentração de Dáfnias variava severamente sem que houvesse uma razão clara para tanto, uma vez que não se aplicava variações grandes nas condições operacionais.

## Remoção dos Patógenos

Tendo como finalidade produzir um efluente final que atendesse aos requisitos sanitários para a irrigação irrestrita, os dois parâmetros investigados foram ovos de helmintos e coliformes totais. Na 1<sup>a</sup>. Fase do experimento não foram encontrados ovos de helmintos na 3<sup>a</sup>. raia que correspondia a um tempo de permanência de três dias. Estudos relatados por SILVA *et al* (1996), sobre o desempenho de uma série convencional de lagoas de estabilização mostraram que após 12,3 dias (sendo 6,8 dias numa lagoa anaeróbia e 5,5 numa facultativa) a remoção foi total em relação a ovos de *Ancilostoma spp.* e *Ascaris lumbricoides* e larvas deste último, não sendo encontradas larvas de *Ancilostoma spp.* apenas após 17,8 dias. FEACHEM *et al* (1983), *apud* LAKSHMINARAYANA e ABDULAPPA (1969), relatam que num sistema de três lagoas, todas com apenas 6 dias de tempo de permanência, todos os ovos de *Ancilostoma spp.* sedimentaram na 2<sup>a</sup>. lagoa (4 dias), mas que algumas larvas estavam ainda presentes no efluente final. Estas observações levam a um questionamento quanto a validade de se estabelecer como não infectiva uma água onde se tem menos que 1 ovo de helminto por litro. Ovos de *Ancylostomatidae* podem eclodir, sob condições favoráveis, 1 dia após ter sido expelido com as fezes, transformando-se em larvas infectivas (filariídeos) após 3 a 4 dia.

Com relação aos coliformes totais, o tempo de permanência de 5 dias não foi suficiente para a sua remoção completa, ficando a eficiência de remoção muito menor que a prevista no início do trabalho. O limite de 1000 CF por 100 ml somente foi atingido quando se aplicou um tempo de permanência de 9 a 12 dias (Tabelas 3 e 4), o que é mais que o dobro do valor calculado preliminarmente e a partir do decaimento exponencial. As causas desse desvio estavam relacionadas ao regime de escoamento da lagoa, já que o valor determinado experimentalmente da constante de decaimento  $k_b = 2,3 \text{ dia}^{-1}$ , tinha sido bem próximo do valor adotado de  $2,0 \text{ dia}^{-1}$  (valor normalmente encontrado para  $T = 25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Os testes com traçadores evidenciaram valores altos do número de dispersão e da fração de volume morto: o número de dispersão, determinado nas três fases do experimento, correspondeu a um valor médio de 0,16 ao invés de 0,02 como calculado com auxílio da Equação (7).

Mesmo tendo uma relação comprimento/largura de 50/1, o número de dispersão foi bastante elevado. Von Sperling (1996), analisando dados de um grande número de lagoas no Brasil, concluiu que somente poucas dessas tinham um número de dispersão menor que 0,1 (o que equivale a uma mistura moderada) mesmo tendo sido projetadas especificamente para um escoamento tubular. Conclui-se que há fatores incontornáveis que induzem tanta mistura e turbulência que, na prática, não é factível operar uma lagoa de fluxo contínuo com regime de escoamento semelhante ao fluxo tubular. Entre estes fatores estão a ação do vento, a convecção térmica, a subida de bolhas de biogás da fundo e de oxigênio quando supersaturada, bem como a turbulência provocada pelos macroorganismos que se desenvolvem na lagoa, todos contribuindo à mistura. Assim sendo, um número de dispersão de 0,1, ou mais, é praticamente inevitável e isto significa que o tempo de permanência necessário para se ter uma eficiência de remoção das CF na faixa de 99,99 % é, no mínimo, 2 vezes o tempo que seria necessário se o escoamento fosse tubular e, portanto, o decaimento fosse exponencial.

## Observações finais

Os experimentos indicam que uma lagoa de polimento pode ser operada a um tempo de permanência muito curto ( $t_p = 3$  dias), se o objetivo é somente a redução de concentrações residuais de sólidos em suspensão e material orgânico presentes no efluente do reator UASB. Os valores dos SST e da DBO no efluente final da lagoa ainda poderão ser relativamente elevados devido, principalmente, à presença abundante de algas. Nas condições do experimento, o tempo de permanência de 3 dias também foi suficiente para a remoção quantitativa de ovos de helmintos. Contudo devem ser considerados como fatores desfavoráveis, em unidades em escala real, fenômenos mecânicos como mistura induzido pelo vento ou mistura devido a convecção



térmica. A presença de larvas de *Ancylostomatidae* deve também ser investigada no efluente final.

O tempo de permanência necessário para a remoção de coliformes fecais se mostrou bem maior que estimado originalmente ( $t_p = 10$  d). Este tempo de permanência longo é indesejável por várias razões e, em especial, quando se prevê o aproveitamento do efluente para irrigação: (1) a área necessária para implantar o sistema de tratamento aumenta, de maneira que aumentam os investimentos iniciais; (2) a evaporação aumenta de maneira que não somente diminui a disponibilidade de água mas, também, aumenta a salinidade, diminuindo o valor da água para irrigação; (3) o pH da água pode aumentar, o que é indesejável e (4) pode haver remoção parcial de nutrientes.

É factível produzir um efluente com qualidade higiênica adequada à irrigação irrestrita, com um tempo de permanência de somente 5 dias, se a lagoa de polimento for operado sob regime de bateladas sequenciais: em reatores de bateladas, assegura-se o decaimento exponencial (máximo) de CF. A desvantagem deste tipo de lagoa é que o regime não é mais de fluxo contínuo, de modo que há necessidade de se implementar dispositivos de carga e descarga nas lagoas de polimento.

A Tabela 5 também contém valores experimentais da fração remanescente de coliformes fecais e calculados considerando-se o fluxo pistão (Equação 2), mistura completa (Equação 3) e mistura parcial (Equação 4). Observa-se nesta tabela que os valores obtidos com a equação de Wehner e Wilhelm (1956), para lagoas de mistura parcial, são bem próximos àqueles obtidos experimentalmente.

Independente do grau de mistura na lagoa de polimento, um outro fator que afeta a remoção dos CF é o valor de  $k_b$  que depende da profundidade. Na Tabela 1 estão apresentados os valores numéricos da constante decaimento, tendo como variável a profundidade da lagoa. Observa-se que, com boa aproximação, que existe uma relação inversamente proporcional entre a profundidade e a constante de decaimento:  $k_b$  diminui quando a profundidade aumenta. Por outro lado, quando se aumenta a profundidade, mantendo-se a mesma área, o volume aumenta, aumentando, portanto, o tempo de permanência da lagoa. Nas Equações (2, 3 e 4) observa-se que a remoção de CF é proporcional com o produto  $k_b.t_p$ . Como  $k_b$  varia inversamente proporcional com a profundidade e o valor de  $t_p$  diretamente com esta, o produto  $k_b.t_p$  independe da profundidade. O resultado é que, mantendo-se a mesma área, a remoção de CF é independente da profundidade. Por esta razão, pode-se decidir quanto à profundidade por outros critérios, por exemplo custo (escavação e taludes contra área) ou minimização da evaporação.

## CONCLUSÕES

Ao se tratar o efluente de um UASB em uma lagoa de polimento, a remoção de ovos de helmintos por sedimentação é um processo mais rápido do que a remoção de coliformes fecais (CF), de modo que este se torna o parâmetro crítico no projeto de tal lagoa.

Pode-se obter uma remoção muito eficiente de patógenos em esgoto digerido mediante o pós tratamento em lagoas de bateladas sequenciais: o tempo mínimo necessário para se efetuar uma remoção de coliformes fecais (CF) com uma eficiência de 99,99 % é somente 4 a 5 dias sob condições de temperatura na lagoa de 25 °C e profundidade de 0,65 m.

Embora projetada para apresentar fluxo tubular não foi possível evitar mistura na lagoa de polimento de modo que, para compensar a redução na eficiência de remoção de CF, necessitou-se, pelo menos, do dobro do tempo de permanência de lagoas em bateladas sequenciais.

Com boa aproximação a constante de decaimento é inversamente proporcional a profundidade da lagoa. Desta forma, para uma determinada área de uma lagoa a remoção de CF se torna independente da profundidade.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro recebido da FINEP, CNPq e CEF, através do Programa de Saneamento Básico – PROSAB e PRONEX e a Cia de Água e Esgotos da Paraíba – CAGEPA por dispor à UFPb a área onde se realizou o experimento..

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUNWAMBA, J.C., AGBUNIWE, N. and ADEMILUYI, J.O.. Prediction of the dispersion number in water stabilization ponds. *Water Research* **26** (1), p.85-89 (1992).
- AISSE, M.M.; FORTUNATO, C.M.; SCHAFASCHEK, L. E FUGANTI, L.M.. *Tratamento de esgotos sanitários por processos anaeróbios: Monitoramento de reatores tipo RALF*. In: Tratamento de Esgotos Sanitários por Processos Anaeróbios e disposição Controlada no Solo – Coletânea de Trabalhos Técnicos. José R. Campos (coord.) 348p. – Projeto PROSAB. (2000).
- APHA/AWWA/WPCF. *Standard Methods for examination of water and wastewater*. 15<sup>th</sup> ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, 1134p. (1995).
- AYRES, R & MARA, D. *Analysis of wastewater for use in agriculture. A laboratory manual of parasitological and bacteriological techniques*. WHO, Geneva (1996).
- BAILENGER, J. (1979). Mechanisms of parasitological concentration in Coprology and their practical consequences. *Journal of American medical technology*, 41, pp. 65 – 71, *apud* AYRES, R & MARA, D.D.. *Analysis of wastewater for use in agriculture. A laboratory manual of parasitological and bacteriological techniques*. WHO, Geneva (1996).
- BEZERRA, S.M.C., CAVALCANTI, P.F.F. e VAN HAANDEL, A.C. *Influência do tempo de detenção hidráulica sobre a auto-inoculação de um reator UASB tratando esgoto sanitário*. 20<sup>th</sup>. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, Rio de Janeiro RJ. (1999).
- CAVALCANTI, P.F.F., VAN HAANDEL, A.C. and LETTINGA, G.. *Polishing ponds for post treatment of digested sewage – part 1: flow-through ponds*. VI Oficina e Seminário Latino-Americano de digestão anaeróbia. 5-9 de novembro- Recife-Pe. pp.352-358 (2000)
- FEACHEM, R.G.; BRADLEY, D.J.; GAARELICK, H. and MARA, D.D.. *Sanitation and disease health aspects of excreta and wastewater management*. Chichester - John Wiley & Sons. 501 p.(1983)
- LEVENSPIEL, O. *Chemical Reaction Engineering*, (2nd ed.), McGraw Hill, New York, USA. (1972).
- JONES, J.G.. A guide to methods for estimating microbial numbers and biomass in freshwater. Ambleside Freshwater Biological Association Scientific Publication. London. 112p. (1979).
- LAKSHMINARAYANA, J.S.S. and ABDULAPPA, M.K *The effect of sewage stabilization ponds on helminths*. In Low Cost Waste Treatment, Ed. Sastry, C.A., pp290-299. Nagpur, India: Central Public Health Engineering Research Institute. (1969)
- MARAIS G. v. R., Faecal bacterial kinetics in Stabilisation ponds., *Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE*, **100**, EE1-119.(1974).
- SILVA, S.A.; OLIVEIRA, R. and MARA, D.D.. *Performance of waste stabilization ponds in Northeast Brazil*. Research monograph no. 9. Leeds University. 139 p. (1996)
- SANCHES E SOUSA, L.; CHERNICHARO, C.A.L.; VON SPERLING, M. E MARTINS, A.H.M.C. *Avaliação da operação em regime hidráulico transiente de um reator UASB e filtros anaeróbios para o tratamento de esgotos sanitários*. In: Tratamento de Esgotos Sanitários por Processos Anaeróbios e disposição Controlada no Solo – Coletânea de Trabalhos Técnicos. José R.Campos (coord.) 348p. – Projeto PROSAB. (2000).
- VAN HAANDEL, A.C. E LETTINGA, G. *Anaerobic sewage treatment- a practical guide for regions with hot climate*, J. Wiley & Sons, 226 p, Chichester, UK. (1993).
- VON SPERLING, M. *Determinação da taxa de decaimento bacteriano em lagoas de estabilização em função das relações geométricas da lagoa*. In: 3<sup>th</sup>. SIBESA – Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Gramado-RS, 9-12. (1996).
- WEHNER, J.F. and WILHELM, R.H. Boundary conditions of flow reactor. *Chem.Engr.Sci.*, V.6, pp.89-93.(1956)
- WHO. *Health guidelines for the use of waste water in agriculture and aquaculture*. Technical Report Series. No 778. Geneva, Switzerland, World Health Organisation. 72p(1989):
- YANEZ, F. *Lagunes de estabilización*, Ed. CEPIS, Lima, Peru. (1993).