

## II-243 - ACUMULAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO LODO EM UM SISTEMA DE LAGOAS DE POLIMENTO EM SÉRIE

### **Thiago Emanuel Possmoser Figueiredo Nascimento**

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Rondônia e Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais.

### **Valéria Antônia Justino Rodrigues**

Engenheira Ambiental, Engenheira de Segurança do Trabalho, Mestre em Ciência Florestal pela Universidade Federal de Viçosa e Doutoranda em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais.

### **Marcos von Sperling<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil e Mestre em Engenharia Sanitária pela Universidade Federal de Minas Gerais, Doutor em Engenharia Ambiental pelo Imperial College (Universidade de Londres) e Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Av. Antônio Carlos, 6627 – Escola de Engenharia - Bloco 1, 4º andar, sala 4622 – CEP 31270-901 - Belo Horizonte – MG - Tel: (31) 3409-1935; Fax: (31) 3409-1879; e-mail: marcos@desa.ufmg.br

### **RESUMO**

Lagoas de polimento são sistemas naturais utilizados como pós-tratamento de efluentes de reatores UASB. O funcionamento destas lagoas é semelhante às lagoas de maturação, em que a função principal é a remoção de patógenos e nutrientes, além da carga orgânica residual do reator UASB. Parte da carga orgânica é digerida no compartimento líquido e parte se deposita no fundo da lagoa. Usualmente o gerenciamento do lodo prevê um tempo de 20 anos para retirada do material depositado (lodo), mas em alguns casos pode ocorrer em menor tempo. O acúmulo de lodo pode interferir no desempenho do sistema, pois reduz o tempo de detenção hidráulica e o volume útil das lagoas. Normalmente a primeira lagoa da série recebe maior carga orgânica que as lagoas subsequentes, necessitando de um gerenciamento do lodo diferenciado. O objetivo do estudo foi avaliar o acúmulo e a distribuição dos sólidos em três lagoas de polimento em operação no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS) UFMG/Copasa, em Belo Horizonte. Para avaliar o lodo acumulado foram realizadas análises batimétricas utilizando hastes milimétricas e um disco perfurado nas três lagoas de polimento (doravante denominadas LP1, LP2 e LP3). As lagoas estão em operação por 11 anos e têm carga orgânica (DBO) superficial mediana de 96 kg.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>, 72 kg.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> e 95 kg.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>, e, carga de sólidos em suspensão mediana aplicada de 112 kg.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>, 135 kg.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> e 186 kg.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> para LP1, LP2 e LP3, respectivamente. O estudo foi realizado em duas etapas, a primeira após 10 anos de operação das lagoas e a segunda um ano depois. Com este estudo verificou-se que a distribuição do lodo foi heterogênea e o maior percentual de lodo acumulado ocorreu na entrada e saída de cada unidade do sistema, sendo mais expressivas na primeira unidade, como esperado. O acúmulo na (LP1) foi de 2,3-2,4 cm.ano<sup>-1</sup>, a contribuição per capita de 0,017-0,018 m<sup>3</sup>.hab<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> foi inferior ao acúmulo retratado na literatura para lagoas anaeróbias e facultativas. Esse acúmulo ainda foi bem menos expressivo na LP2 (0,4-0,5 cm.ano<sup>-1</sup> e contribuição per capita de 0,003-0,004 m<sup>3</sup>.hab<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>) e na LP3 (1,5 cm.ano<sup>-1</sup> e contribuição per capita 0,004 m<sup>3</sup>.hab<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>). O percentual do volume útil preenchido foi de 52%, 11% e 23% na LP1, LP2 e LP3, respectivamente. Apesar dos resultados apontarem para uma remoção do lodo em um horizonte maior que 20 anos do início da operação, essa conclusão deve ser ponderada pelo fato da distribuição do lodo não ser homogênea, podendo ocasionar surgimento do lodo, principalmente na entrada da primeira lagoa, além de interferir no comportamento hidrodinâmico do sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Acúmulo de lodo, distribuição do lodo, batimetria, lagoas de polimento.

### **INTRODUÇÃO**

Sistemas naturais de tratamento de esgotos, como os baseados nas variantes de lagoas de estabilização, são considerados uma ótima opção para países de clima tropical como o Brasil, devido à sua simplicidade e baixo custo operacional. Além do clima favorável, em várias localidades há suficiente área disponível para a

implantação desses sistemas. Porém, é importante salientar que menores requisitos de área são importantes como uma forma de viabilizar ainda mais sua utilização.

Nos últimos anos no Brasil tem sido empregada a combinação de reatores anaeróbios tipo UASB com lagoas de estabilização. De acordo com von Sperling (2002), Chernicharo (2007), Oliveira e von Sperling (2011), apesar da boa remoção de matéria orgânica obtida nos reatores UASB, seus efluentes usualmente não atendem aos padrões estabelecidos pela legislação ambiental, trazendo a necessidade de sistemas complementares para remoção da matéria orgânica remanescente, nutrientes e organismos patogênicos.

A combinação de reatores UASB e lagoas de polimento melhora o desempenho global e reduz o requisito de área, comparado com sistemas naturais como lagoas facultativas primárias. Tal sistema pode conduzir a uma redução no custo de implantação das lagoas facultativas e trazer um aumento da eficiência de remoção global.

Nas lagoas de polimento a matéria orgânica remanescente será parte oxidada na coluna de água e parte irá depositar-se no fundo da lagoa, formando bancos de sedimentos. O acúmulo de lodo se dá principalmente pela deposição de sólidos que saem no efluente advindo do reator anaeróbio e pelas algas e bactérias produzidas no sistema, que podem sofrer floculação e subsequente sedimentação.

Quando se tem lagoas em série, a altura e as características da camada de lodo variam ao longo das lagoas, dependendo de sua geometria e do posicionamento das estruturas de entrada e saída (von SPERLING, 2002). Reatores UASB com tratamento eficiente reduzem a concentração de material particulado lançado na lagoa de polimento e, portanto, o acúmulo de lodo ocorre lentamente, com prazo para remoção da ordem de 20 anos (von SPERLING *et al.*, 2003).

A sedimentação de algas, por outro lado, é menos comum na entrada da lagoa, porque as condições de turbidez e carga orgânica desfavorecem o seu desenvolvimento. À medida que se afasta da entrada da lagoa ou se dirige para as outras lagoas da série, a sedimentação de sólidos provenientes do reator anaeróbio diminui, predominando a sedimentação de algas (CATUNDA *et al.*, 2000).

São escassas, no meio acadêmico, as informações relativas ao acúmulo de lodo em lagoas de polimento em série, principalmente após períodos mais longos de operação. Além disso, o gerenciamento do lodo é uma medida importante para manter o bom desempenho do sistema, pois o acúmulo gradual pode afetar o volume útil e o TDH. Desta forma, o presente estudo visa avaliar e correlacionar o acúmulo de lodo obtido por batimetria e por monitoramento – período de dez anos – de sólidos de três lagoas de polimento operadas em série.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **ÁREA DE ESTUDO**

O experimento foi realizado em escala real no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS) que é uma unidade experimental com parceria entre a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a COPASA. O CePTS encontra-se localizado no limite entre os municípios de Belo Horizonte e Sabará/MG. A unidade experimental recebe esgoto após tratamento preliminar em grades mecanizadas para remoção de sólidos com dimensões acima de 15 mm e também por desarenadores. Na Figura 1 é mostrada uma imagem do sistema (reator UASB e as lagoas de Polimento 1, 2 e 3).

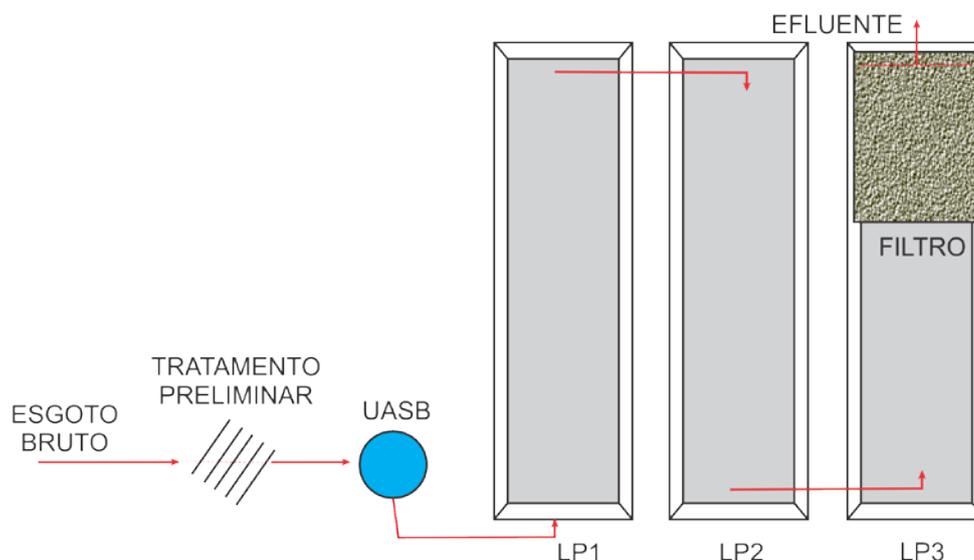


**Figura 1: Reator UASB e lagoas de polimento 1, 2 e 3.**

### APARATO EXPERIMENTAL

O esgoto a ser tratado é direcionado para um reator UASB, e posteriormente encaminhado para o sistema de lagoas de polimento em série denominadas por (LP1, LP2 e LP3) e também por um filtro grosso. O reator UASB e as lagoas de polimento foram projetados para atender a uma população contribuinte de 250 habitantes (cerca de  $40 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ ). A configuração é apresentada na Figura 2.

Em uma das pesquisas realizadas no centro experimental foi pesquisada a utilização de macrófitas *Wolffiella* e *Lemma* na LP3 com o objetivo de avaliar o seu potencial na diminuição da concentração de algas no efluente. Esta pesquisa foi realizada no ano de 2002, mas sua floração eventualmente ocorre também na LP2. Algumas medidas de controle, como a limpeza manual das lagoas, têm sido realizadas, porém, sem muito sucesso.



**Figura 2: Aparato experimental.**

Na Tabela 1 são mostrados os valores das características físicas e operacionais do sistema estudado.

**Tabela 1: Características físicas e operacionais das lagoas de polimento 1, 2 e 3.**

Condição	Lagoa 1		Lagoa 2		Lagoa 3	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Altura da lâmina d'água (m)	0,65	0,90	0,55	0,80	0,40	0,60
Área superficial (m <sup>2</sup> )	151	159	148	156	96	144
TAH (m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> )	0,12	0,36	0,12	0,36	0,10	0,55
TDH (d)	2,2	6,2	2,0	6,6	1,1	3,8
Vazão (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )	19	56	19	56	19	56
Características	Absoluta		Absoluta		Variável	
Comprimento no fundo (m)	25		25		16,5	25
Inclinação dos taludes (°)	45		45		45	
Largura no fundo (m)	5,25		5,25		5,25	

### LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

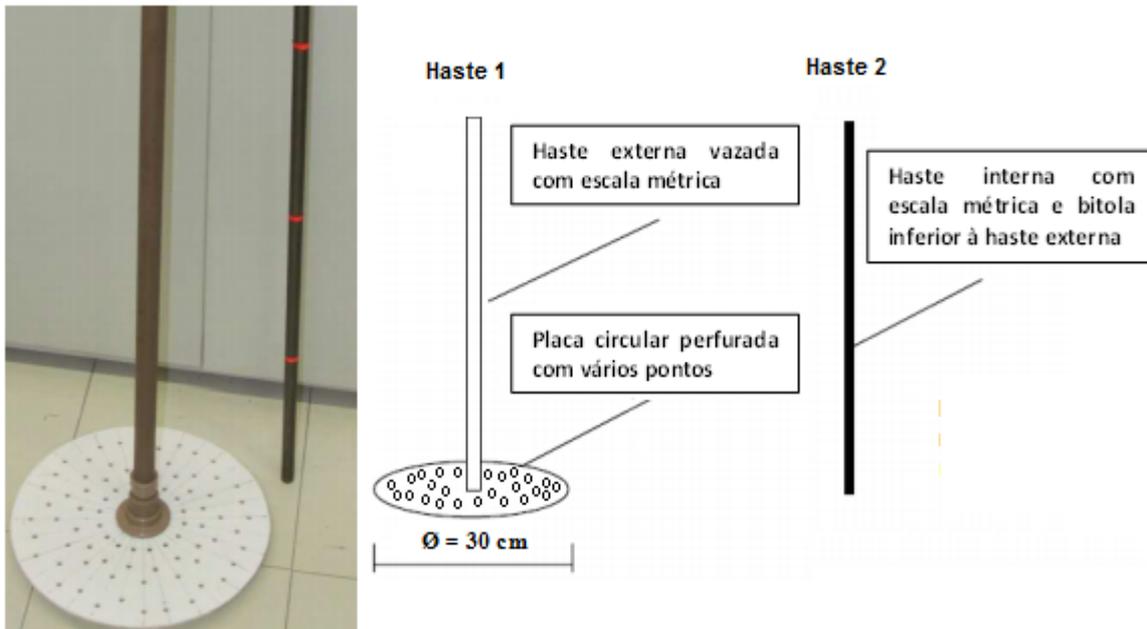
Foram realizados dois levantamentos batimétricos. O primeiro ocorreu no mês de maio de 2012, logo após 10 anos de operação das lagoas de polimento LP1 e LP2 e aproximadamente 8 anos após o início da operação da LP3 com o filtro grosseiro, que por ter passado por mudanças de projeto teve o lodo reduzido após aproximadamente 2 anos do início de operação. O segundo levantamento batimétrico ocorreu no mês de fevereiro de 2013, aproximadamente 11 anos após o início de operação do sistema. Para a localização geográfica de cada ponto, utilizou-se o método de piqueteamento proposto por Gonçalves *et al.* (1999).

No primeiro ensaio batimétrico os pontos foram demarcados ao longo do comprimento das lagoas, distanciados de 1 em 1 metro, e ao longo da largura foram marcados 10 pontos com variação de 0,5 m. Desta forma, nas lagoas de polimento LP1 e LP2, foram realizadas 23 seções batimétricas, totalizando 230 pontos para cada lagoa, e na lagoa de polimento LP3 foram amostrados 150 pontos. Assim, no total foram amostrados 610 pontos no sistema, com uma média de 1 ponto para cada 0,7 m<sup>2</sup>.

No segundo ensaio batimétrico adotou-se um espaçamento maior entre os pontos amostrados, conduzindo a uma amostragem menor, totalizando 126 (1,3 pontos m<sup>2</sup>) na LP1 e 107 (1,5 pontos por m<sup>2</sup>) na LP2, sendo que não foram amostrados pontos na LP3. O maior espaçamento entre pontos foi devido à semelhança com os dados obtidos no primeiro monitoramento.

Para a realização da batimetria, o nível d'água nas lagoas foi rebaixado até uma altura que permitiu o acesso interno para as medições dentro das lagoas. As medições foram realizadas percorrendo a área interna da lagoa a pé, pois as dimensões do sistema não permitiam que se utilizasse barco ou equipamento semelhante.

O equipamento utilizado para realizar o levantamento batimétrico consistiu de duas hastes milimétricas, uma externa e outra interna, e dois disco de vinil colados e perfurado em toda sua extensão e com diâmetro de 30 cm, semelhante ao utilizado por Passos *et al.* (2011) durante o levantamento batimétrico das lagoas facultativas no aeroporto de Confins em Belo Horizonte, seguindo recomendações de Gonçalves *et al.* (1999), conforme ilustrado na Figura 3.



**Figura 3: Equipamento para a medição da altura do lodo e esquema representativo das hastes milimetradas e do disco perfurado.**

**Fonte: Adaptado de Gonçalves *et al.* (1999) e Passos *et al.* (2011)**

Com os pontos amostrados em cada lagoa foram realizadas interpolações utilizando o software Golden Surfer 10 versão de demonstração, através do modelo da função de base radial. O volume do lodo acumulado foi calculado por esse mesmo programa segundo o modelo da regra de trapézio.

Para o cálculo do volume útil da lagoa considerou-se que o volume útil estaria preenchido quando atingisse 50% do volume total da lagoa, ou seja, no estudo em questão quando atingir 50% de 162,5 m<sup>3</sup>.

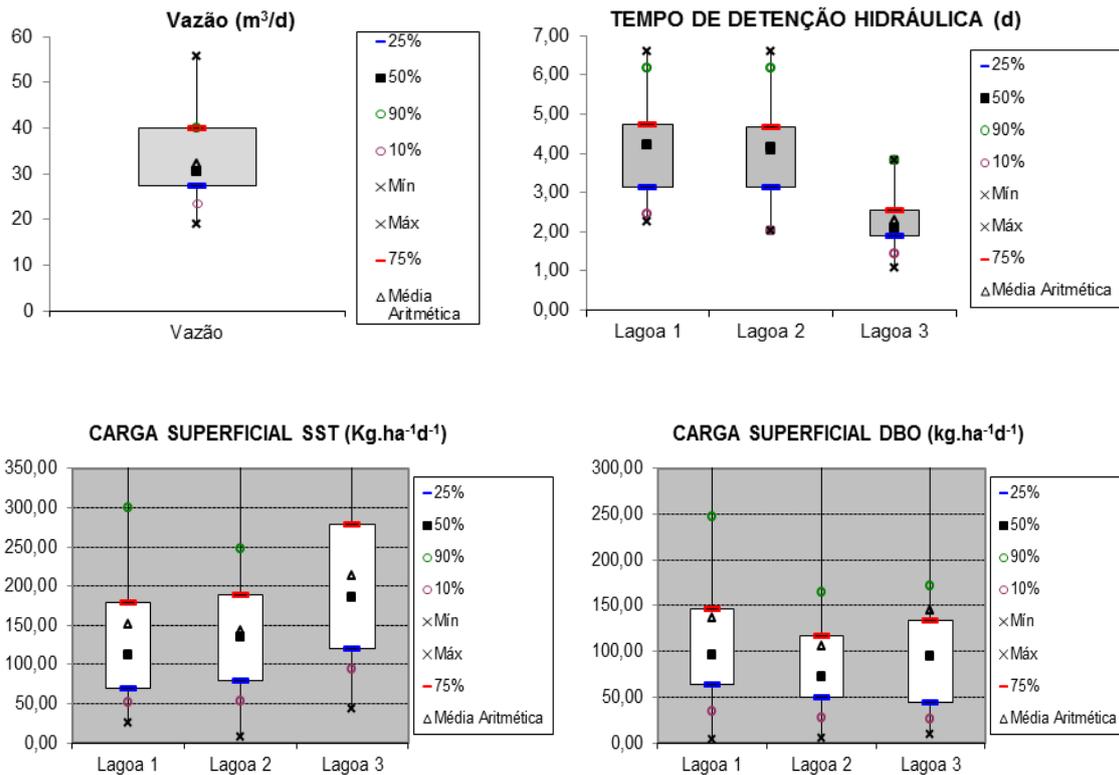
## PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Foram coletadas amostras de lodo para análise de sólidos totais. Os dados de sólidos suspensos totais (SST) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO<sub>5</sub>) do efluente das lagoas foram obtidos no banco de dados do monitoramento do sistema ao longo de 10 anos. Os dados de DBO são referentes ao período de julho de 2002 até o mês de fevereiro de 2013 e os dados de sólidos suspensos tiveram o período de início em novembro de 2004. Os procedimentos utilizados para avaliação dos parâmetros físico-químicos foram de acordo com o Standard Methods (APHA, AWWA, WPCF, 2005).

A coleta do lodo das lagoas LP1 e LP2 ocorreu no mês de fevereiro de 2013. Na lagoa LP1 foram amostrados 3 pontos na entrada, 2 pontos no meio e 3 pontos na saída, totalizando 8 pontos. Na lagoa de polimento LP2 foram coletados 3 pontos na entrada, no meio e na saída, totalizando 9 pontos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 são apresentados os gráficos box-plots com as variações dos dados amostrados para a vazão afluente ao sistema, o tempo de detenção hidráulica (TDH) de cada unidade e as cargas volumétricas e de sólidos ao qual o sistema foi submetido ao longo do período operacional.

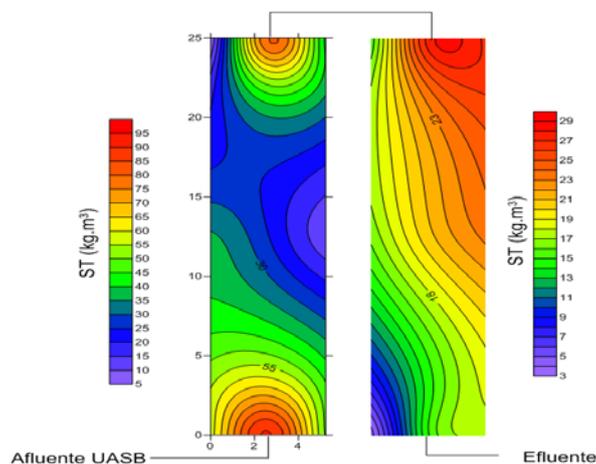


**Figura 4: Gráficos Box-plot da vazão, TDH, carga superficial de DBO e de sólidos.**

A vazão média afluyente ao sistema foi de  $32 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  e o TDH médio foi de 4,2 d, 4,1 d e 2,3 d, para LP1, LP2 e LP3, respectivamente. Considerando uma produção média per capita de esgotos de  $160 \text{ L} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , a população contribuinte pode ser estimada em 212 habitantes.

A carga orgânica superficial mediana aplicada, expressa em termos de DBO, foi de  $95,6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $71,8 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  e  $94,7 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  e os valores médios de  $137,0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $105,6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  e  $145,3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  nas lagoas LP1, LP2 e LP3, respectivamente. A carga mediana aplicada de sólidos em suspensão foi de  $112,1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $134,9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  e  $186,3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  e os valores médios de  $151,8 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $143,6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  e  $213,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  para a LP1, LP2 e LP3, respectivamente.

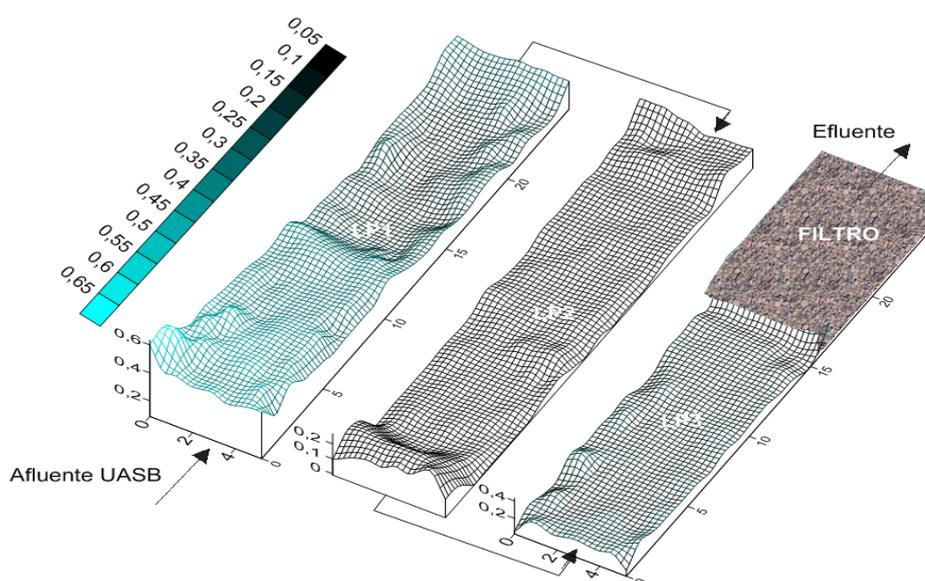
Na Figura 5 é demonstrada a variação espacial da concentração dos sólidos totais no lodo das lagoas de polimento LP1 e LP2.



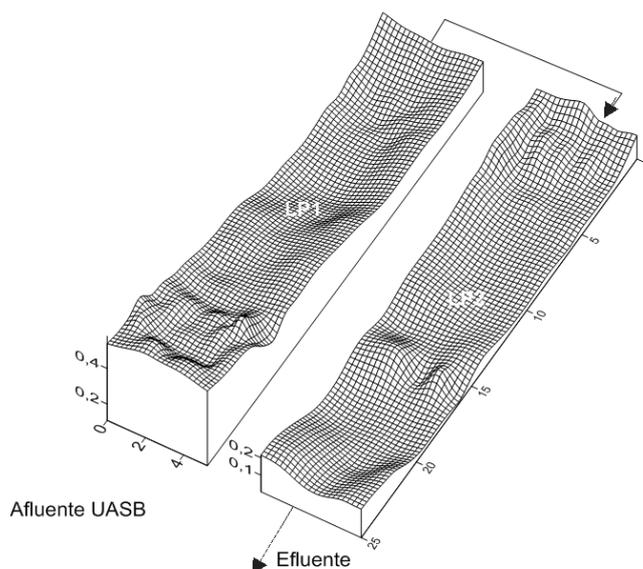
**Figura 5: Concentração e distribuição dos sólidos totais no lodo das lagoas de polimento LP1 e LP2.**

Na Figura 5 é possível observar que a concentração de sólidos totais (ST) é máxima na entrada e saída, com valores próximos ao máximo de  $90,7 \text{ kg.m}^{-3}$  (9,0%). Na zona intermediária atingem-se os valores mínimos próximos a  $5,3 \text{ kg.m}^{-3}$  (0,5%). Na segunda lagoa da série o comportamento é bem distinto, ocorrendo um decaimento da entrada para a saída da lagoa em um sentido da diagonal direita para a diagonal esquerda, com valores máximos de  $27,5 \text{ kg.m}^{-3}$  (2,8%) a valores mínimos de  $3,5 \text{ kg.m}^{-3}$  (0,4%).

Com os dados batimétricos foi possível determinar a quantidade e distribuição do lodo acumulado nas lagoas para a primeira batimetria (Figura 6) e segunda batimetria (Figura 7).



**Figura 6: Levantamento batimétrico 1 e a distribuição do lodo ao longo das 3 lagoas.**



**Figura 7: Levantamento batimétrico 2 e a distribuição do lodo ao longo das 2 lagoas.**

De maneira geral, a distribuição heterogênea do lodo na primeira batimetria foi semelhante ao que foi medido também através do segundo estudo batimétrico, uma vez que o tempo entre uma batimetria e a outra foi curto para se observar grandes variações na acumulação de lodo. O que se pode perceber é a ocorrência de um pequeno acréscimo de lodo acumulado junto à entrada do sistema.

Em ambas as batimetrias foram observadas uma maior distribuição do lodo próximo aos dispositivos de entrada e saída de cada lagoa. Nelson *et al.* (2004), estudando três lagoas facultativas, perceberam que a distribuição era muito irregular e a espessura máxima ocorreu perto da entrada, composta por um único dispositivo, e também próximo aos cantos. Filho *et al.* (2005) atribuíram a maior sedimentação na zona da entrada devido às características do dispositivo de entrada e saída e, também à grande concentração de sólidos sedimentáveis presentes no afluente. Passos *et al.* (2012), investigando a distribuição de lodo em uma lagoa facultativa, observou a grande influência da má distribuição do afluente pelas duas tubulações de entrada, com a maior parte do lodo se acumulando na lateral que recebia uma maior fração dos esgotos.

Os dados da contribuição per capita do lodo sedimentado, a altura média do lodo e o volume ocupado pelo lodo nas lagoas de polimento podem ser observados na Tabela 2.

**Tabela 2: Dados da acumulação do lodo nas lagoas de polimento.**

Parâmetros	Batimetria 1			Batimetria 2	
	LP1	LP2	LP3	LP1	LP2
Altura média do Lodo (m)	0,27	0,06	0,14	0,34	0,08
Tempo de operação (ano)	10,1	10,1	7,7	10,9	10,9
Volume do lodo (m <sup>3</sup> )	37,5	6,9	12,2	42,6	8,9
Volume útil ocupado (%)	46,2	8,5	23,3	52,43	10,9
Acúmulo (cm/ano)	2,28	0,42	1,50	2,40	0,50
Contribuição per capita (L/hab.d)	0,049	0,009	0,021	0,056	0,012
Contribuição per capita (m <sup>3</sup> /hab.ano)	0,017	0,003	0,02	0,018	0,004

O valor encontrado para contribuição per capita na primeira lagoa do sistema foi de 0,049 L.hab<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> ou 0,017 m<sup>3</sup>.hab<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> e 0,056 L.hab<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> ou 0,012 m<sup>3</sup>.hab<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> com 10 e 11 anos de operação, respectivamente. Este valor foi abaixo da faixa referenciada na literatura para lagoas anaeróbias e facultativas, que corresponde a 0,08 a 0,22 L.hab<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> (GONÇALVES, 1999) e também por outros trabalhos da literatura (Tabela 3). No entanto, observaram-se também estudos em lagoas de polimento com valores semelhantes, porém com menor tempo de operação. Filho *et al.* (2005) encontraram um valor de 0,05 L.hab<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> para uma lagoa de polimento em operação há sete anos e Brito *et al.* (1999) encontrou 0,11 L.hab<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> para uma lagoa de polimento experimental chicaneada, após dois anos de operação.

No estudo das lagoas do CePTS verificou-se que a contribuição per capita na segunda lagoa foi 0,009 L.hab<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> com 10 anos de operação e 0,010 L.hab<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> para aproximadamente 11 anos de operação. Na terceira lagoa o acúmulo foi de 0,021 L.hab<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>, todos eles abaixo da faixa referenciada na literatura para lagoas anaeróbias e facultativas.

**Tabela 3: Dados da literatura para acúmulo de lodo.**

Localização	Tipo de lagoa	Operação (ano)	ST <sub>médio</sub> (g/L)	Taxa de Acumulação
				(m <sup>3</sup> .hab <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )
Mexicaltzingo	Anaeróbia	5	171	0,022
San Jose	Facultativa	6	-	0,036
Texcoco	Facultativa	10	112	-
Xalostoc	Facultativa	15	166	0,021
Colômbia	Anaeróbia	2,6	-	0,055
		5	-	0,040
Brasil-Sudeste	Anaeróbia	-	172	0,023
			-	0,026
Brasil Nordeste	Facultativa	2,5	39	-
França	-	10	187	-
França	Facultativa	3-10	54-136	0,12
Mississippi	Facultativa	0,5-7	-	-
Utah-USA	Facultativa	7	59	-
		13	77	

Fonte: Adaptado de Nelson *et al.* (2004)

Os valores encontrados para o acúmulo de lodo na LP1 foram de 2,3 – 2,4 cm.ano<sup>-1</sup>, na LP2 de 04-0,5 cm.ano<sup>-1</sup> e na LP3 de 1,5 cm.ano<sup>-1</sup>. Brito *et al.* (1999) encontraram uma camada acumulada de 8 cm.ano<sup>-1</sup>. Esse valor pode ter sido mais elevado devido ao baixo tempo de operação (dois anos) e assim o lodo estava menos digerido e adensado.

Na terceira lagoa do sistema foi observado um maior volume de lodo acumulado em relação a LP2, com 23,3% do seu volume útil preenchido. Nesta unidade, por conseguinte a floração de macrófitas do tipo *Lemna* é mais frequente, essas foram introduzidas para ocasionar um sombreamento na lagoa e contribuírem para o decaimento de algas. No final dessa unidade há um filtro grosseiro que faz a retenção dessas macrófitas, assim após um tempo a morte delas e das algas contribuiu para o maior acúmulo de sedimentos nessas unidades.

O percentual do volume útil ocupado foi de 52%, 11% e 23% na LP1, LP2 e LP3, respectivamente. Apesar da avaliação do volume útil nas três unidades apontar para uma remoção do lodo em um horizonte de projeto de 20 anos para LP1 e um tempo ainda maior para as unidades LP2 e LP3, e estarem em concordância com von Sperling *et al.* (2003), Filho *et al.* (2005) apontaram para uma remoção total em um horizonte de 10 anos para não ultrapassar 1/3 do volume total da lagoa e parcial a cada 5 anos para remover o lodo em pontos críticos (próximo aos dispositivos de entrada e saída), afim de não ocasionar o surgimento do lodo na superfície da lagoa.

Neste estudo, após 11 anos de operação não foram detectadas zonas de afloramentos de lodo, embora haja uma restrição de não se operar a LP1 com uma lâmina inferior a 60 cm, devido ao lodo na entrada já ocupar alturas semelhantes a essa. As implicações do volume de lodo presente no sistema devem ser melhores avaliadas através de um estudo do comportamento hidrodinâmico para verificar as interferências desse no TDH efetivo da lagoa.

No geral, os autores observaram que a maior carga de sólidos foi na entrada da lagoa e ao longo do sistema e a distribuição de sólidos foi heterogênea, formando alguns bancos de lodo. Este resultado foi também verificado por Brito *et al.* (1999), que encontraram maiores alturas de lodo nas primeiras três chicanas, tendendo a se estabilizar ao logo da lagoa. Então, pode-se inferir que a implantação de pré-tratamento e o bom desempenho do reator UASB permitem maiores tempos de espera para a retirada de lodo, principalmente nas primeiras lagoas de polimento da série.

Vale ressaltar que, mesmo tendo esse tempo dilatado para remoção do lodo do sistema, esse deve ser planejado, pois, por mais que esse acúmulo seja postergado, ele implica em gastos muito elevados comparados às manutenções pontuais do sistema.

## CONCLUSÕES

Foi possível constatar um maior aporte de sedimentos na entrada e na saída das lagoas de polimento, sendo mais expressivos na lagoa de polimento LP1 e LP3 da serie de lagoas. Na lagoa de polimento LP1 é evidente que esse maior aporte seja oriundo dos sólidos do reator UASB e na LP3 que sejam relativos à sedimentação das macrófitas e das algas.

Em termo dos sólidos totais, as maiores concentrações foram obtidas na zona de entrada e saída da lagoa de polimento LP1 (90,7 kg.m<sup>-3</sup> ou 9,0%). Na lagoa de polimento LP2 a maior concentração observada foi na diagonal direita da entrada (27,5 kg.m<sup>-3</sup> ou 2,8%) com decaimento até a diagonal esquerda da saída com concentração mínima de 3,5 kg.m<sup>-3</sup> ou 0,4%.

Na lagoa de polimento LP1 mesmo o acúmulo de lodo sendo mais expressivo que as demais unidades da série os resultados encontrados de 0,017-0,018 m<sup>3</sup>.hab<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> são bem inferior ao reportando na literatura para lagoas anaeróbias e facultativas. Nas demais unidades o acúmulo de lodo foi de 0,003-0,004 m<sup>3</sup>.hab<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> e 0,004 m<sup>3</sup>.hab<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> nas lagoas de polimento LP2 e LP3, respectivamente.

O acúmulo de lodo foi de 2,3-2,4 cm.ano<sup>-1</sup>, 0,4-0,5 cm.ano<sup>-1</sup> e 1,5 cm.ano<sup>-1</sup> sob uma carga orgânica superficial mediana em termos de DBO de 95,6 kg.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>, 71,8 kg.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> e 94,7 kg.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> e com carga orgânica superficial mediana em termos de sólidos de 112,1 kg.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>, 134,9 kg.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> e 186,3 kg.ha<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup> para as lagoas de polimento LP1, LP2 e LP3, respectivamente.

O percentual do volume útil ocupado foi de 53%, 11% e 23% nas lagoas de polimento LP1, LP2 e LP3, respectivamente. E por mais que esses resultados apontem para uma remoção de lodo em um horizonte de projeto de 20 anos ou mais, essa conclusão deve ser ponderada, pois o acúmulo de lodo não é homogêneo e pode ocasionar surgimentos do lodo na superfície.

Essa heterogeneidade na distribuição do lodo sugere que um estudo do comportamento hidrodinâmico deve ser conduzido para avaliar as implicações do lodo para o desempenho do sistema, com o objetivo de estabelecer critérios mais claros quanto ao prazo de remoção do lodo, não somente em virtude do volume útil e sim em termos de redução do tempo de detenção hidráulica real, através da análise da presença de zonas mortas e ocorrência de curtos circuitos hidráulicos.

A diferença entre o volume acumulado nas unidades integrantes do sistema sugere um planejamento para remoção do lodo diferenciado para cada unidade. Sendo assim, se as lagoas em série forem projetadas com flexibilidade operacional para realizar manobras não será necessária a paralisação total do sistema para remoção do lodo, podendo se paralisar somente uma das unidades para remoção do lodo, enquanto as demais unidades continuam em operação. Esse trabalho se soma aos esforços de outros autores da literatura no intento de fornecer informações importantes para esse gerenciamento do lodo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao seu Raimundo Magela pela ajuda durante a coleta dos dados e aos órgãos de fomento CAPES, CNPq e Fapemig por concederem bolsas e recursos para elaboração da pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. AWWA. WPCF. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, D.C.: American Public Health Association. American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 2005.
2. ARORA, M.L., BARTH, E., UMPHRES, M.B. Technology evaluation of sequencing batch reactors. Journal Water Pollution Control Federation, v.57, n.8, p. 867-875, ago. 1985.
3. BRITO, M. C. de S. O., von SPERLING, M., CHERNICHARO, C. A. de L. (1999). Características do lodo acumulado em uma lagoa chicaneada tratando efluentes de um reator UASB. In: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, 1999. Anais. [S.I.]: ABES. ref. I-161.

4. CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. 2ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG: 2007, 380 p, vol. 5. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias).
5. CATUNDA, P.F.C. et al. (2000). Acumulação de lodo em lagoas de polimento tratando esgoto digerido. In: Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios: coletânea de trabalhos técnicos - volume 1. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (coord.), Projeto PROSAB. Belo Horizonte : [s.n.]. p. 67-74.
6. DATAR, M.T., BHARGAVA, D.S. Effects of environmental factors on nitrification during aerobic digestion of activated sludge. *Journal of the Institution of Engineering (India)*, Part EN: Environmental Engineering Division, v.68, n.2, p.29-35, Feb. 1988.
7. FADINI, P.S. Quantificação de carbono dissolvido em sistemas aquáticos, através da análise por injeção em fluxo. Campinas, 1995. Dissertação de mestrado-Faculdade de Engenharia Civil-Universidade Estadual de Campinas, 1995.
8. GONÇALVES, Ricardo Franci (coord). Gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas. [S.I.]: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 1999.
9. NELSON, K. L. et al. Sludge accumulation, characteristics, and pathogen inactivation in four primary waste stabilization ponds in central Mexico. *Water Research*, v. 38, p. 111-127, 2004.
10. OLIVEIRA, S.M.A.C., VON SPERLING, M. Performance evaluation of different wastewater treatment technologies operating in a developing country. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, **1** (1). pp. 37-56, 2011.
11. PASSOS, R. G.; RIBEIRO, T. B. e von SPERLING, M. Avaliação da acumulação e distribuição espacial de lodo em um sistema composto por lagoa facultativa e lagoa de maturação após 27 anos de operação. In: XV SILUBESA, 2012, Belo Horizonte. XV SILUBESA - Congresso Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2012.
12. VON SPERLING, M. et al. Lagoas de estabilização. In: Desinfecção de efluentes sanitários. Ricardo Franci Gonçalves (coord.). Projeto PROSAB. Rio de Janeiro : ABES. cap. 7, p. 277-336, 2003.
13. VON SPERLING, M. Lagoas de Estabilização. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG: 2002. (Princípio do Tratamento Biológico de Águas Residuárias).