

## II-287- DESEMPENHO DE UMA CONCEPÇÃO INOVADORA DE UM FILTRO BIOLÓGICO PERCOLADOR (TIPO ABERTO) NO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE REATOR UASB

**Paulo de Castro Vieira** <sup>(1)</sup>

Engenheiro Sanitarista e Ambiental, Doutorando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos / SMARH – UFMG.

**Marcos von Sperling**

Engenheiro Civil, Doutor em Engenharia Ambiental pelo Imperial College, Universidade de Londres. Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

**Vitor Paixão Amaral**

Técnico em Química pelo CEFET.

**Renata Côrtes de Oliveira**

Graduanda em Ciências Biológicas pela PUC MG.

**Endereço** <sup>(1)</sup>: Rua Mario de Andrade, 587 ap 204, Santa Branca, Belo Horizonte – MG, CEP: 31565-110-Brasil - Tel: (31) 9836-3658 - e-mail: [ambientalvieira@yahoo.com.br](mailto:ambientalvieira@yahoo.com.br)

### RESUMO

Esta pesquisa tem como proposta avaliar o desempenho de uma concepção inovadora de um filtro biológico percolador (FBP), desenvolvida no DESA-UFMG e denominada filtro biológico percolador aberto (FBPA), operando sem paredes laterais e sem decantador secundário, sob condições diferenciadas de altura e carga, no pós-tratamento de esgotos de um reator UASB. O equivalente populacional aproximado no período de teste foi de 250 habitantes. As alturas do meio suporte utilizadas foram de 2,3 m e 3,5 m. Para o sistema de alimentação do FBPA foram testados sistemas constituídos por tubos perfurados e por canaletas com vertedores. O FBPA foi operado com uma taxa de aplicação superficial (TAS) média de 4,1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d, resultando em cargas hidráulicas volumétricas (CHV) médias de 1,9 e 1,2 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.d, e cargas orgânicas volumétricas (COV) médias de 0,17 e 0,08 kg DBO/m<sup>3</sup>.d para cada etapa de operação. O sistema foi monitorado por amostragens compostas e simples duas vezes por semana por meio de parâmetros físico-químicos convencionais (S.Sed, SST, DQO, DBO, NTK e N-amoniaco). Para a avaliação do desempenho do FBPA foram utilizados testes de variância com um nível de significância de 5% aplicados entre as eficiências de remoção obtidas nas duas etapas de operação. As concentrações médias obtidas foram de 1,4 e 0,7 mL/L para os S.Sed, 81 e 48 mg/L para os SST, 135 e 132 mg/L para a DQO e 52 e 51 mg/L para DBO para a primeira (E1) e segunda (E2) etapas de operação, respectivamente. Os resultados dos testes estatísticos de variância aplicados entre as duas etapas de operação não apresentaram uma diferença significativa para as eficiências de remoção. O desempenho do sistema combinado (reator UASB+FBPA) apresentou satisfatórios índices de atendimento quanto aos padrões de lançamento e eficiências de remoção para S.Sed, SST, DQO e DBO para as duas etapas de operação. Os resultados obtidos no efluente do FBPA apresentaram concentrações médias de N-amoniaco de 19 e 16mg/L, abaixo da meta de 20 mg/L de N-amoniaco, e percentis de atendimento à meta de 60 e 85% para as etapas E1 e E2, respectivamente. Os testes de variância aplicados entre as etapas de operação do filtro apresentaram diferenças significativas para as eficiências de remoção. Com o propósito de adoção de tecnologias de tratamento de esgotos que atendam aos requisitos de simplicidade operacional e adequabilidade socioambiental, o sistema combinado por reator UASB e FBPA apresentou-se como alternativa promissora, principalmente para localidades sem muitos recursos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Esgotos domésticos, reator UASB, filtro biológico percolador aberto, desempenho.

### INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas simplificados de tratamento de esgotos, de baixo custo e mecanicamente simples, vem sendo o foco de pesquisas, por estes se apresentarem como alternativa sustentável para o tratamento de esgotos, principalmente em pequenas comunidades, as quais possuem menos recursos financeiros e humanos. No entanto, várias destas tecnologias apresentam limitações significativas quanto à remoção de determinados poluentes, como os nutrientes (N e P). Acredita-se que a associação entre determinados sistemas simplificados possa proporcionar uma melhor eficiência de remoção desses poluentes.

Dentre os principais sistemas de tratamento simplificados, situam-se os reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB), já bastante pesquisados e difundidos no meio técnico. Apesar de suas grandes vantagens, sabe-se que normalmente estes reatores não geram um efluente final que atenda aos padrões de lançamento de diversas legislações estaduais, o que traz a necessidade de uma etapa de pós-tratamento (CHERNICHARO, 2007; VON SPERLING, 2005).

Neste sentido, os filtros biológicos percoladores (FBPs), atuando como pós-tratamento dos efluentes dos reatores anaeróbios, apresentam a função de complementar as eficiências de remoção de matéria orgânica, bem como de proporcionar a remoção de constituintes pouco afetados no tratamento anaeróbio, principalmente o nitrogênio (GONÇALVES *et al.*, 2001). Devido a estas características, as pesquisas com FBP vêm apresentando inovações e diferentes configurações arquitetônicas e operacionais para a otimização do controle do biofilme e da eficiência de tratamento (CHERNICHARO & ALMEIDA, 2010; ALMEIDA *et al.*, 2008; ALMEIDA *et al.*, 2007; SANTOS, 2005; SILVA & GONÇALVES, 2005; FRADE, 2003; MANSUR, 2002). Estas pesquisas vêm demonstrando que os FBPs atuando como pós-tratamento de reatores UASB são eficientes quanto ao atendimento aos padrões de lançamento de efluentes em termos de DBO, DQO e SST e promovem a nitrificação, ainda que parcialmente.

Os FBPs geralmente são dimensionados e classificados em função da carga hidráulica aplicada ou taxa de aplicação superficial (TAS) e da carga orgânica volumétrica (COV) aplicada. As taxas aplicadas (TAS e COV) conjuntamente com fatores ambientais associados ao biofilme aderido ao meio suporte do FBPs são os principais agentes reguladores das eficiências de remoção de matéria orgânica e nitrogênio amoniacal (METCALF & EDDY, 2003; GONÇALVES *et al.*, 2001; USEPA, 2000; WEF, 1992). Dentre os principais aspectos físicos do FBP que influenciam seu desempenho destacam-se a altura e o tipo do meio de enchimento, o sistema de alimentação, os dispositivos de ventilação e a retirada dos decantadores secundários.

Para um melhor desempenho do FBP é essencial que ocorra o controle da espessura do biofilme, possibilitando que sua formação se dê com a maior quantidade de zonas aeróbias, e ao mesmo tempo, reduzindo os riscos de sua predação por macroinvertebrados. Para que isto ocorra é fundamental que a carga orgânica seja aplicada de forma contínua e uniforme no meio de enchimento do filtro (METCALF & EDDY, 2003; WEF, 1992). Desta forma, o sistema de alimentação do FBP deve ser dimensionado e operado de maneira a promover as melhores condições de distribuição do afluente e umedecimento do meio de enchimento do FBP. Os dispositivos de alimentação do FBP geralmente são por distribuidores fixos (tubulações perfuradas e canaletas com vertedores) ou móveis (braços rotatórios).

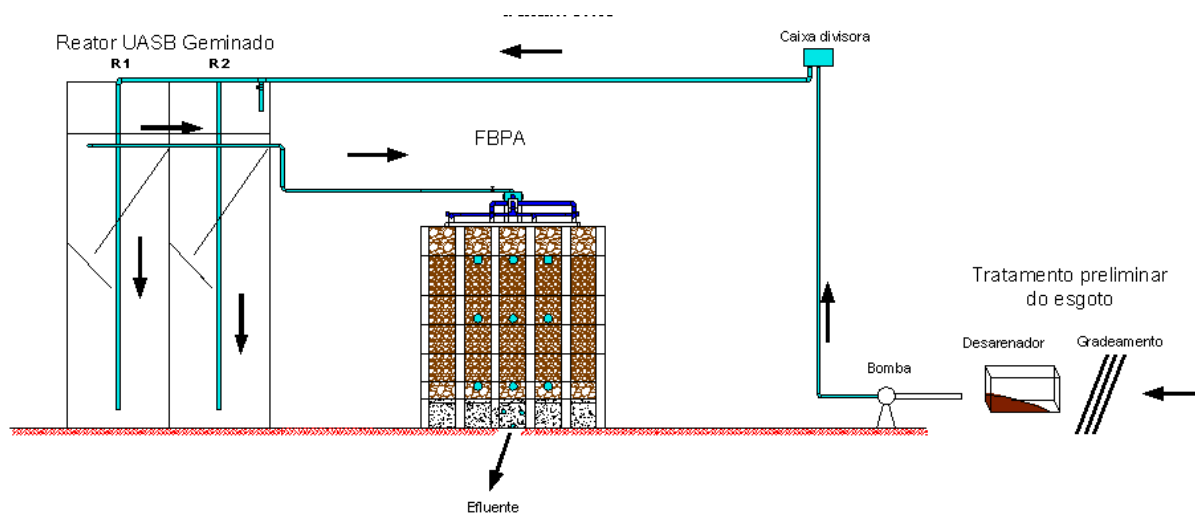
A aeração é fundamental para manter as condições aeróbias nos FBPs, promovendo melhores eficiências no tratamento e prevenindo maus odores. Na aeração é fornecido oxigênio para as bactérias aeróbias (oxidadoras de matéria orgânica e nitrogênio). Gonçalves *et al.*, 2001 comentam que em muitos sistemas aeróbios, a velocidade de transferência de oxigênio para as células é o fator limitante, o qual determinará a velocidade de conversão biológica. Desta forma, a eficiência no fornecimento de oxigênio dissolvido (OD) para as bactérias nitrificantes se torna um fator preponderante. Neste sentido, Florencio *et al.* (2009) destacam o papel da ventilação natural, que tem sido uma alternativa suficiente para o fornecimento de oxigênio para a manutenção das condições aeróbias do biofilme em FBPs.

Sabe-se que a aeração do esgoto em FBP depende da intensidade de ventilação da unidade, que por sua vez é controlada pela diferença de temperatura do ar entre as partes externa e interna do FBP. Segundo WEF (2000), quando esta diferença de temperatura é superior a 2°C ocorre um fluxo de ar descendente e quando a diferença é inferior a 2°C ocorre um fluxo de ar ascendente. Sabe-se também que a intensidade da ventilação é diminuída à medida que a diferença de temperatura se aproxima de 2°C. Devido às temperaturas observadas no Brasil, a ventilação natural tem sido a principal alternativa utilizada para o atendimento dos requisitos de oxigênio de FBPs implantados no país (CHERNICHARO e ALMEIDA, 2009).

Com o propósito de adoção de tecnologias de tratamento de esgotos que atendam aos requisitos de simplicidade operacional e adequabilidade socioambiental, o sistema combinado por reator UASB e uma nova modalidade de filtro biológico percolador (FBP) simplificado, sem paredes laterais (FBP aberto, ou FBPA) apresenta-se como alternativa promissora, principalmente para localidades sem muitos recursos. Neste sentido, esta pesquisa tem como proposta avaliar o desempenho do FBPA, operando sob condições diferenciadas de altura e alimentação, no pós-tratamento de esgotos de um reator UASB.

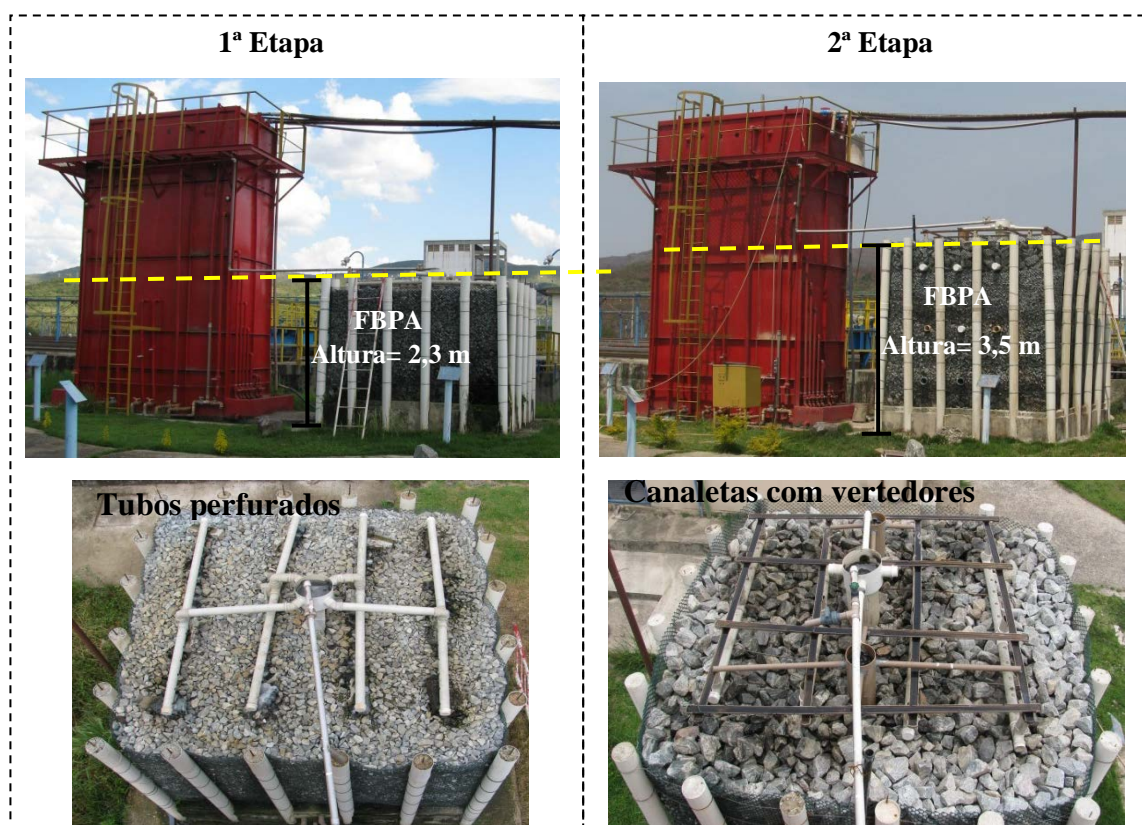
## MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa está sendo desenvolvida no sistema em escala de demonstração localizado no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS), ETE Experimental UFMG/COPASA. O sistema combinado em avaliação (reator UASB seguido por FBPA sem etapa de decantação secundária) recebe esgoto sanitário da cidade de Belo Horizonte, tratado preliminarmente pelas unidades de gradeamento e desarenação. O fluxograma do sistema é apresentado a seguir (Fig. 1).



**Figura 1. Fluxograma do sistema de tratamento combinado (reator UASB + FBPA).**

O FBPA foi avaliado em duas etapas diferenciadas pela altura e pelo sistema de alimentação (Fig. 2). A altura total do meio suporte ou de enchimento foi de 2,3 m na 1ª etapa e 3,5 m na 2ª etapa. O sistema de distribuição (alimentação) do afluente no FBPA na 1ª etapa foi constituído por tubos perfurados e na 2ª etapa por canaletas com vertedores triangulares.



**Figura 2. Altura e sistema de alimentação do FBPA nas etapas avaliadas.**

O esgoto após a passagem pelo tratamento preliminar (gradeamento e desarenação) é recalcado para um reator UASB do tipo geminado, com duas unidades dispostas uma do lado da outra. O fato de o reator UASB ser geminado se deve a outra pesquisa acerca da influência da configuração dos seus dispositivos internos, e não afeta a presente investigação. As unidades do reator são constituídas em aço carbono, e cada uma possui altura de 5,0 m e volume útil de 7,2 m<sup>3</sup>. Os reatores foram operados com vazões médias de 34 m<sup>3</sup>/d para cada unidade, resultando em uma população atendida de cerca de 260 habitantes. O tempo de detenção hidráulica médio (TDH) e a velocidade ascensional (Va) operadas em cada reator foram de 5,0 h e 1,0 m/h, respectivamente.

O efluente de uma das unidades dos reatores UASB geminados é distribuído na parte superior do FBPA, onde o fluxo de esgoto passa a ter uma trajetória descendente através de um meio suporte. Dentre as características do FBPA destacam-se a não utilização de paredes laterais e de laje de fundo falso, tratando-se de uma concepção inovadora, econômica em termos de redução do concreto, e que permite ainda ampla ventilação pelas laterais, devido à inexistência de paredes.

As alturas do meio suporte adotadas para a primeira (E1) e segunda (E2) etapas de operação foram de 2,3 m e 3,5 m, respectivamente. A configuração do meio de enchimento no FBPA para a primeira etapa foi com uma camada de 0,8 m de pedra de mão no fundo e acima uma camada de 1,5 m de brita nº 4. A pedra de mão no fundo substitui a laje perfurada de fundo falso, usual nos FBP convencionais. Para a segunda etapa da pesquisa foi adotada uma camada de 2,2 m de brita nº 4 no interior do FBPA, e duas camadas de pedra de mão com 0,8 m e 0,5 m no fundo e no topo do FBPA, respectivamente. A camada superior, de pedra de mão, objetivou auxiliar na distribuição homogênea do líquido na superfície do leito constituído pela brita nº 4.

O sistema de distribuição (alimentação) do FBPA na primeira etapa foi constituído por tubos perfurados e na segunda etapa por meio de canaletas com vertedores triangulares, com o intuito de melhorar as condições de distribuição do líquido e umedecimento do meio de enchimento. Esta forma de alimentação evitou os frequentes entupimentos que ocorriam com os tubos perfurados e permanece até hoje. Com as duas formas de alimentação o esgoto não era aplicado próximo às laterais, para evitar que houvesse escorrimento na área lateral exposta.

As principais características dimensionais do FBPA em cada etapa são apresentadas na tabela 1.

**Tabela 1- Características dimensionais do FBPA nas etapas da pesquisa.**

Unidades	Parâmetro	Etapas 1	Etapas 2
FBPA	Altura total (m)	2,30	3,50
	Altura da camada de topo (pedra de mão)	-	0,50
	Altura da camada de brita 4	1,50	2,20
	Altura da camada de fundo (pedra de mão)	0,80	0,80
	Largura total (m)	3,20	3,20
	Largura útil <sup>1</sup> (m)	2,80	2,80
	Área superficial útil (m <sup>2</sup> )	7,84	7,84
Sistema de alimentação	Volume útil (m <sup>3</sup> )	17,94	27,3
	Tubos perfurados	Comprimento (m)	2,20
		Diâmetro (mm)	75
		Quantidade	4
	Calhas vertedoras	Comprimento (m)	-
		Diâmetro (mm)	60
		Quantidade	8
Coleta do efluente	Canaleta de fundo	Comprimento (m)	-
		Largura (m)	0,30
		Altura (m)	0,20

<sup>1</sup> Excluindo o afastamento às paredes laterais.

Nota: O filtro é quadrado, e a largura é igual ao comprimento. Volume útil = Altura total x área útil



O monitoramento do esgoto bruto (EB) – após tratamento preliminar por gradeamento e desarenação – e dos efluentes dos reatores (UASB e FBPA) foi realizado com amostragens simples e compostas, com a frequência de duas vezes por semana. Os parâmetros físico-químicos discutidos neste trabalho, determinados segundo metodologia proposta por APHA/AWWA/WEF (2005) são: Sólidos Sedimentáveis (S.Sed.), Sólidos Suspensos Totais (SST), DBO, DQO, NTK e N-amoniacoal ( $\text{N-NH}_4^+$ ).

Para a avaliação do comportamento do FBPA em cada etapa operacional utilizou-se análise estatística descritiva tradicional e testes de variância entre as eficiências de remoção de S.Sed, SST, DQO, DBO e N-amoniacoal entre as etapas de operação. Os testes estatísticos variância de Mann-Whitney (CONOVER, 1999) e Kolmogorov-Smirnov (CONOVER, 1999) foram aplicados com nível de confiança de 95% ( $p < 0,05$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho referem-se aos períodos de 07/04/2010 a 04/08/2010 (quatro meses) e de 29/09/2010 a 12/05/2011 (sete meses e meio), correspondentes à primeira (E1) e segunda (E2) etapas de operação do FBPA. No período de 05/08/2010 a 28/09/2010 foi interrompido o monitoramento do FBPA para a obra de elevação do meio de enchimento e a troca do sistema de distribuição.

As principais condições impostas ao FBPA (Tabela 2), estabelecidas pelas vazões aplicadas, características do esgoto e condições de operação do reator UASB, resultaram em cargas orgânicas volumétricas (COV) médias de 0,17 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>.d e 0,08 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>.d para a primeira e segunda etapa de operação do FBPA, respectivamente. A taxa de aplicação hidráulica superficial média (4,1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d), classificada como intermediária (METCAF & EDDY, 2003), foi a mesma em ambas as etapas, uma vez que em ambos os casos a vazão e a área superficial foram as mesmas. A relação DBO/NTK afluente ao FBPA, importante para a avaliação da nitrificação em filtro biológico percolador, resultou nos valores de 2,7 para a primeira etapa e 2,2 para a segunda etapa de operação. A vazão média aplicada em ambas as fases (33 m<sup>3</sup>/d) correspondeu a um equivalente populacional de cerca de 250 habitantes (0,04 m<sup>2</sup> de área superficial útil por habitante e 0,07 m<sup>3</sup> de volume útil por habitante).

**Tabela 2 – Resultados médios das condições impostas ao FBPA nas duas etapas de operação.**

<b>Etapas de operação</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/d)</b>	<b>TAS (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d)</b>	<b>CHV (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.d)</b>	<b>COV (kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>.d)</b>	<b>DQO/DBO<sub>5</sub></b>	<b>DBO<sub>5</sub>/NTK</b>
<b>Etapas 1</b>	33 (8)	4,1 (1,0)	1,9 (0,3)	0,17 (0,6)	2,4 (1,0)	2,7 (2,2)
<b>Etapas 2</b>	33 (7)	4,1 (0,8)	1,2 (0,2)	0,08 (0,03)	2,2 (0,6)	2,3 (1,1)

( ): desvio padrão.

Os resultados médios (média aritmética) das concentrações dos parâmetros monitorados em cada etapa de operação do FBPA são apresentados na Tabela 3 e discutidos a seguir.

**Tabela 3 – Resultados médios das concentrações obtidas nas etapas de operação.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Operação</b>	<b>Esgoto bruto</b>			<b>UASB</b>			<b>FBPA</b>		
		<b>n</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>n</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>n</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>
<b>S.Sed</b> (mL/L)	<b>E1</b>	15	<b>5,9</b>	1,9	21	<b>2,1</b>	1,8	24	<b>1,4</b>	2,1
	<b>E2</b>	43	<b>5,3</b>	3,4	45	<b>0,9</b>	1,1	42	<b>0,7</b>	0,5
<b>SST</b> (mg/L)	<b>E1</b>	22	<b>307</b>	89	25	<b>72</b>	43	23	<b>81</b>	64
	<b>E2</b>	57	<b>232</b>	104	56	<b>68</b>	57	56	<b>48</b>	23
<b>DQO</b> (mg/L)	<b>E1</b>	30	<b>482</b>	143	31	<b>207</b>	92	28	<b>135</b>	5
	<b>E2</b>	49	<b>457</b>	142	55	<b>189</b>	87	54	<b>132</b>	84
<b>DBO</b> (mg/L)	<b>E1</b>	30	<b>244</b>	73	32	<b>86</b>	36	30	<b>52</b>	25
	<b>E2</b>	38	<b>238</b>	71	44	<b>68</b>	29	41	<b>51</b>	32
<b>NTK</b> (mg/L)	<b>E1</b>	8	<b>27</b>	8	8	<b>32</b>	14	8	<b>31</b>	6
	<b>E2</b>	60	<b>26</b>	7	60	<b>29</b>	6	60	<b>19</b>	7
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b> (mg/L)	<b>E1</b>	10	<b>22</b>	5	9	<b>27</b>	7	8	<b>19</b>	5
	<b>E2</b>	56	<b>23</b>	5	63	<b>26</b>	5	62	<b>16</b>	5

Esgoto bruto: após tratamento preliminar; n = número de amostras; Média = média aritmética; DP = desvio padrão

A Tabela 4 apresenta os resultados estatísticos das eficiências de remoção do FBPA e dos níveis de significância (p) dos testes não paramétricos usados para comparar as eficiências de ambas as etapas.

**Tabela 4 – Resultados das eficiências de remoção do FBPA e dos níveis de significância (p) dos testes de variância aplicados entre as eficiências de remoção para as etapas de operação.**

Parâmetros	Etapas de operação	Eficiências de remoção (%)			Testes de variância entre as etapas		
		Percentil 25%	Mediana	Percentil 75%	Mann-Whitney	Kolmogorov-Smirnov	Diferença significativa
<b>S.Sed</b>	E1	4	<b>53</b>	72	0,06	>0,10	Não
	E2	-100	<b>26</b>	50			
<b>SST</b>	E1	-36	<b>5</b>	41	0,29	>0,10	Não
	E2	-17	<b>24</b>	49			
<b>DQO</b>	E1	3	<b>30</b>	47	0,25	>0,10	Não
	E2	25	<b>44</b>	54			
<b>DBO</b>	E1	27	<b>36</b>	48	0,15	>0,10	Não
	E2	-21	<b>31</b>	45			
<b>N-amoniaco</b>	E1	23	<b>28</b>	30	0,008	<0,05	Sim
	E2	33	<b>42</b>	54			

Eficiência calculada apenas para o FBPA, sem considerar a eficiência do reator UASB

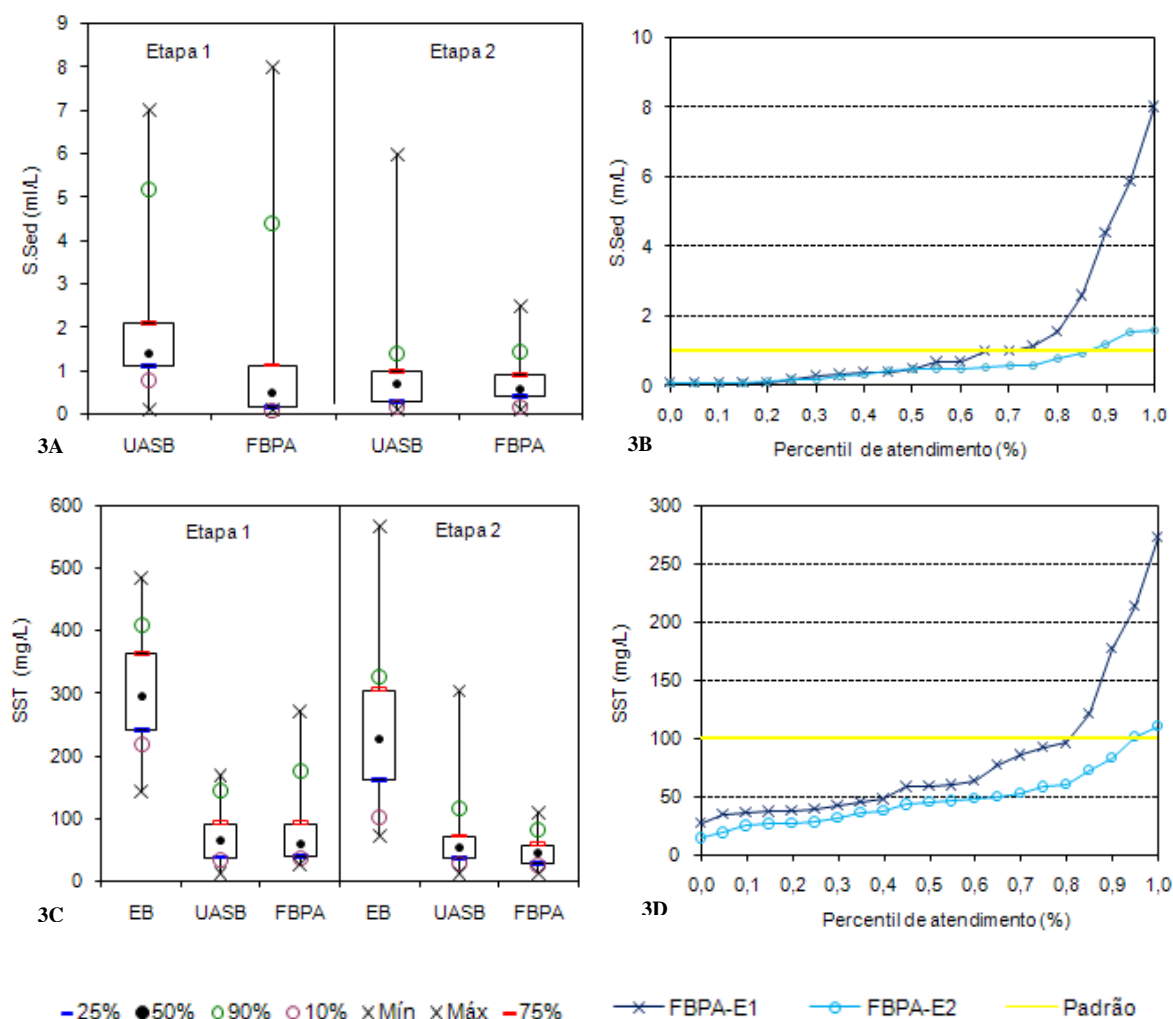
Em termos de sólidos no efluente do FBPA, as concentrações de S.Sed para a primeira (E1) e segunda (E2) etapas de operação apresentaram medianas de 0,5 e 0,6 mL/L, percentil<sub>10</sub> de 0,1 e 0,2 mL/L e percentil<sub>90</sub> de 4,4 e 1,5 mL/L (Figura 3A), respectivamente. Estes resultados representaram percentuais de atendimento de 80% para E1 e 90% para E2 (Figura 3B) em relação ao padrão de lançamento de 1mL/L determinado pela legislação estadual (DN CERH-COPAM 01/2008 de Minas Gerais).

As eficiências de remoção dos S.Sed observadas no efluente do FBPA apresentaram medianas de 53 e 26% para as etapas de operação E1 e E2, respectivamente. Estas eficiências entre as etapas de operação não apresentaram diferenças significativas para um nível de significância de 5% (Tabela 4). As eficiências globais do sistema (UASB + FBPA) apresentaram para as etapas E1 e E2 médias de 80 e 70%. Acredita-se que a melhora do desempenho do reator UASB, gerando um efluente com menor variabilidade e mais eficiente entre as etapas E1 (72%) e E2 (86%), associado à maior formação do biofilme ajudando na retenção de sólidos e menor perda, possa ter influenciado nas eficiências globais.

Para os SST, as concentrações observadas para a primeira e segunda etapas de operação apresentaram medianas de 59 e 45 mg/L, percentil<sub>10</sub> de 37 e 25 mg/L e percentil<sub>90</sub> de 177 e 84 mg/L (Figura 3C), respectivamente. Os percentuais de atendimento dos SST ao padrão de lançamento (100 mg/L) foram de 80 e 95% (Figura 3D) para as etapas E1 e E2, respectivamente.

As maiores concentrações de sólidos em suspensão na segunda etapa de operação do FBPA ocorreram no primeiro mês de operação (outubro/2010) e nos meses mais chuvosos (dezembro/2010, janeiro e fevereiro/2011). Acredita-se que as maiores concentrações ou os picos de concentrações possam estar associados ao arraste de sólidos e biofilme que se encontrava em formação, prejudicando assim o desempenho do FBPA na etapa E2.

As eficiências de remoção de SST no FBPA apresentaram valores medianos de 5 e 24% para as etapas E1 e E2, respectivamente. Mesmo que tenha ocorrido uma melhoria das eficiências de remoção de SST entre as duas etapas, no entanto, esta não foi suficiente para apontar uma significativa variabilidade conforme os testes de variância (Tabela 4). Observa-se que as eficiências globais do sistema (UASB+FBPA) apresentaram para as etapas E1 e E2 médias de 78 e 72%.



**Figura 3. Estatísticas e distribuição de frequência das concentrações de S. Sed. e SST.**

As etapas de operação do FBPA resultaram em concentrações efluentes de DQO medianas de 140 e 99 mg/L, percentil<sub>10</sub> de 65 e 70 mg/L e percentil<sub>90</sub> de 200 e 272 mg/L (Figura 4A) para as etapas E1 e E2, respectivamente. Os percentuais de atendimento foram de 90 e 81 % (Figura 4B) em relação ao padrão de lançamento de 180 mg/L determinado pela legislação estadual. Mesmo que as concentrações não tenham estado abaixo do padrão de lançamento em todas as amostras, as eficiências globais médias no tratamento de 66% para E1 e 70 % para E2 foram superiores ao índice de redução médio de 65% exigido pela legislação local.

As concentrações de DBO efluente observadas nas etapas E1 e E2 apresentaram medianas de 49 e 39 mg/L, percentil<sub>10</sub> de 25 e 28 mg/L e percentil<sub>90</sub> de 75 e 78 mg/L (Figura 4C), respectivamente. Os resultados das concentrações de DBO resultaram nos atendimentos de 80% para E1 e 76 % para E2 (Figura 4D) em relação ao padrão de lançamento (60 mg DBO/L). As eficiências globais médias de 73% (E1) e 72% (E2) das etapas de operação foram superiores à eficiência média de 70% exigida pela legislação local.

As eficiências de remoção de DQO no FBPA apresentaram valores medianos de 30 e 44% para as etapas E1 e E2, respectivamente. Para a DBO, as eficiências de remoção no FBPA apresentaram medianas de 36% (E1) e 31% (E2). Mesmo que tenha ocorrido uma variação entre as duas etapas, no entanto, esta não foi suficiente para apontar uma significativa variabilidade para um nível de significância de 5% (Tabela 4), conforme os testes estatísticos de variância aplicados. Observa-se que os testes estatísticos de variância utilizados propõem uma avaliação não somente com relação à diferença e a dispersão entre as medianas, mas também com relação à forma geral da distribuição de toda a amostra. Acredita-se que a menor eficiência de remoção de DBO na etapa E2, quando ocorreram menores concentrações, possa estar associada à melhor eficiência de remoção da parcela mais facilmente biodegradável ocorrida no UASB.

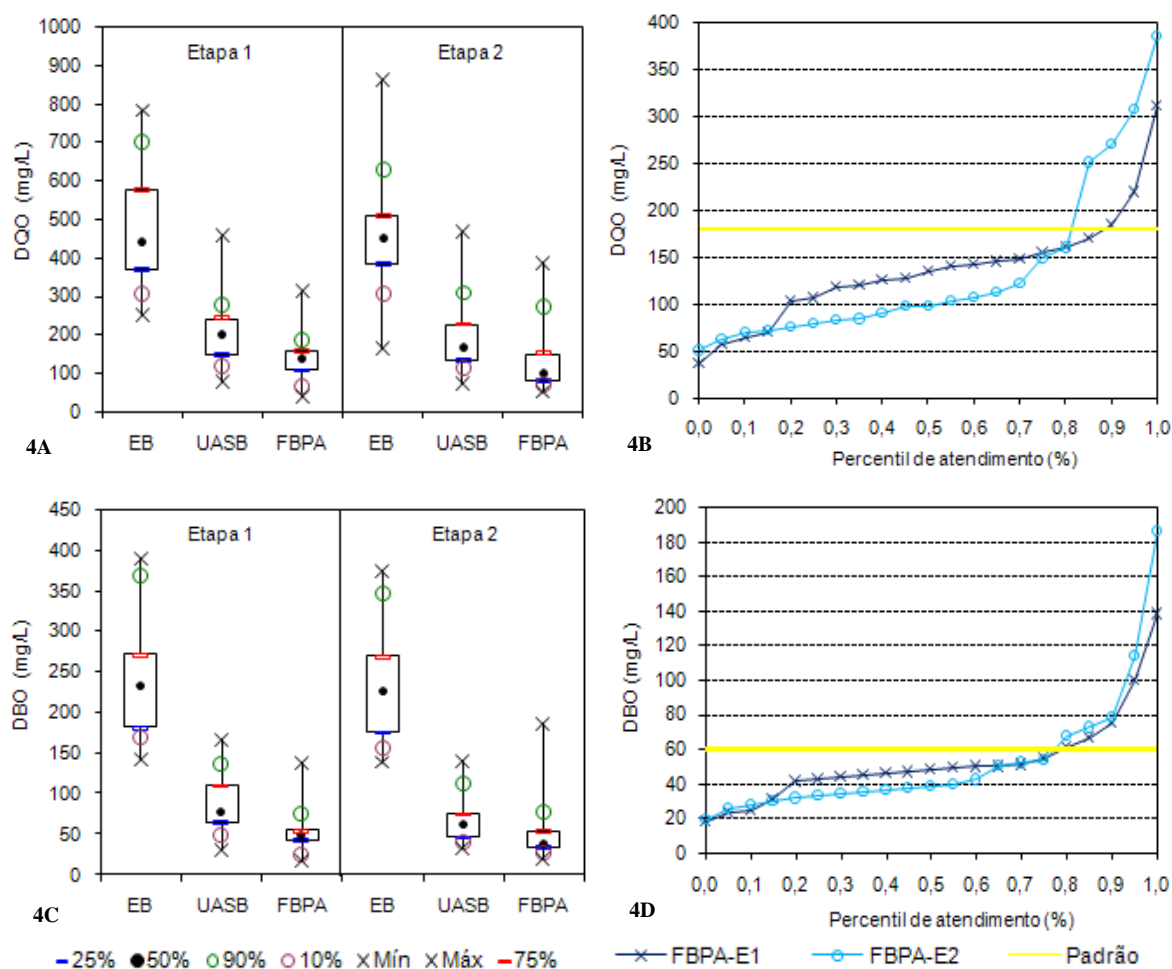


Figura 4. Estatísticas e distribuição de frequência das concentrações de DQO e DBO.

Com relação às formas de nitrogênio apresentadas neste trabalho, o NTK apresentou concentrações medianas de 21 e 17 mg/L, percentil<sub>10</sub> de 13 e 13 mg/L e percentil<sub>90</sub> de 29 e 26 mg/L para as etapas E1 e E2 (Figura 5), respectivamente. Para o N-amoniaco as concentrações observadas nas etapas E1 e E2 (Figura 6A) apresentaram valores medianos de 19 e 15 mg/L, percentil<sub>10</sub> de 13 e 11 mg/L e percentil<sub>90</sub> de 24 e 22 mg/L. Os resultados das concentrações de N-amoniaco no efluente do FBPA apresentaram os índices médios de atendimento de 60% (E1) e 85% (E2) em relação à meta de 20 mg N-amoniaco/L (Figura 6B).

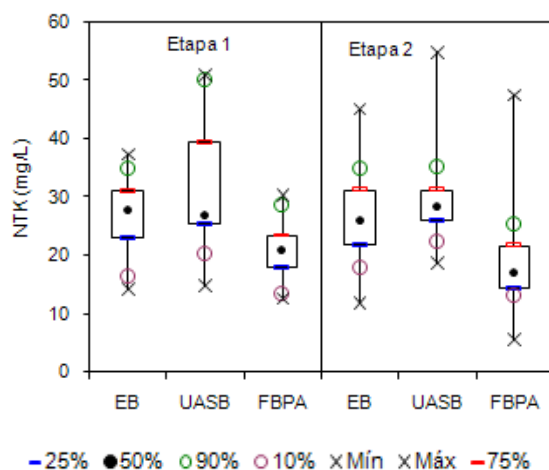
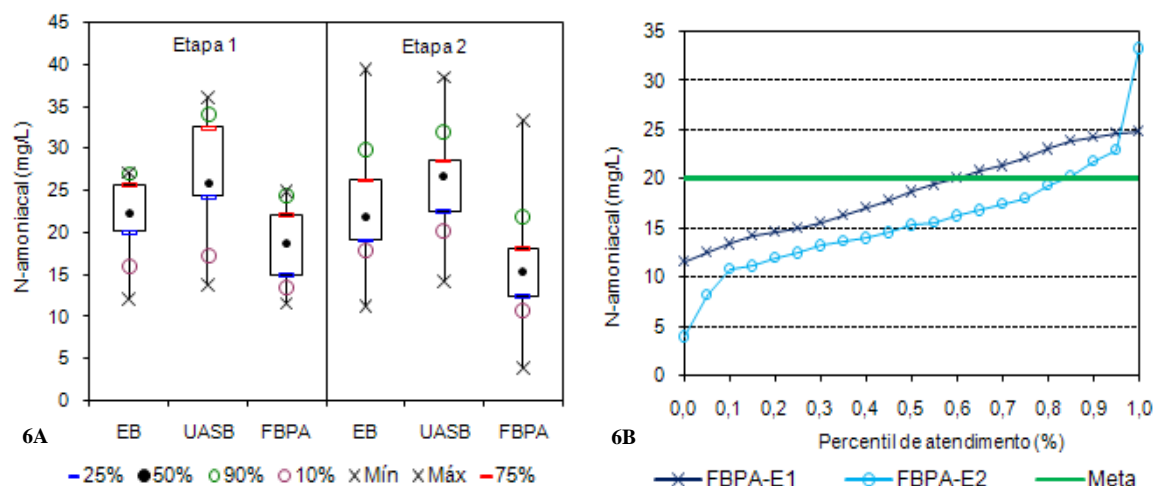


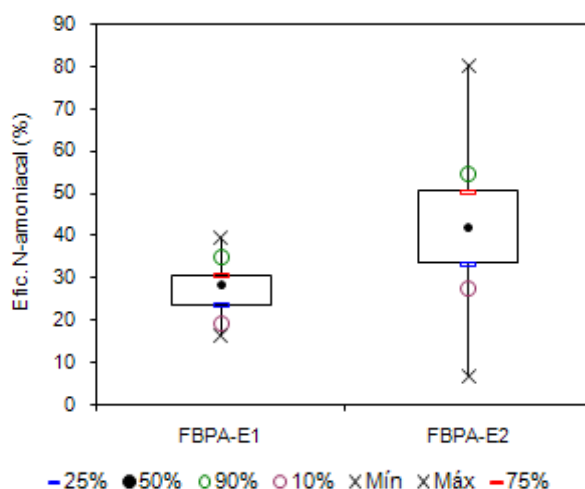
Figura 5. Estatísticas das concentrações de NTK.





**Figura 6. Estatísticas e distribuição de frequência das concentrações de N-amoniaco.**

As eficiências de remoção de N-amoniaco do FBPA nas etapas E1 e E2 (Figura 7) apresentaram medianas de 28 e 42 %, percentil<sub>10</sub> de 19 e 27 % e percentil<sub>90</sub> de 35 e 54 %. Diferentemente dos resultados obtidos para os outros parâmetros, neste caso os testes de variância aplicados entre as duas etapas de operação para as eficiências de remoção de N-amoniaco apresentaram uma significativa variabilidade (Tabela 4), para um nível de significância de 5 % (nível de confiança de 95 %).



**Figura 7. Estatísticas das eficiências de remoção de N-amoniaco.**

As diferenças significativas entre as eficiências de remoção do N-amoniaco possivelmente foram determinadas pelas variações da COV e da relação DBO/NTK aplicadas no filtro. Para a remoção conjunta de DBO e Nitrogênio Amoniaco em FBPs utilizando meio suporte de pedra é recomendada a utilização de COVs de 0,08 a 0,25 kgDBO/m<sup>3</sup>.d (METCALF & EDDY, 2003; WEF, 1992). Acredita-se que as variações das COVs aplicadas no FBPA de 0,17 kgDBO/m<sup>3</sup>.d (E1) para 0,08 kgDBO/m<sup>3</sup>.d (E2) foram influenciadas pela expansão do volume do filtro e pelo melhor desempenho do reator UASB na segunda etapa.

Observa-se que a diminuição da relação DBO/NTK apresentada na segunda etapa de operação do FBPA, devido à melhora na eficiência de remoção de DBO no reator UASB, possa ter conduzido a menores taxas de crescimento de microrganismos heterotróficos, e assim, diminuindo a competição por oxigênio e espaço no meio suporte com os microrganismos autotróficos (bactérias nitrificantes).

## CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

A concepção inovadora do FBPA – filtro biológico do tipo aberto (FBPA) avaliada neste trabalho, operando com diferentes alturas e sistemas de alimentação e sem decantador secundário, apresentou concentrações médias de 1,4 e 0,7 mg/L para S.Sed, 81 e 48 mg/L para SST, 135 e 132 mg/L para DQO e 52 e 51 mg/L para DBO para as etapas de operação E1 (altura de 2,3 m e COV = 0,17 kgDBO/m<sup>3</sup>.d) e E2 (altura de 3,5 m e COV = 0,08 kgDBO/m<sup>3</sup>.d), respectivamente. Observa-se que, mesmo ocorrendo uma diminuição das concentrações entre as duas etapas de operação, as eficiências de remoção do FBPA para estes parâmetros não apresentaram diferença significativa, conforme os testes de variância aplicados.

O desempenho do sistema combinado (reator UASB+FBPA) apresentou satisfatórios índices de atendimento quanto aos padrões de lançamento e eficiências de remoção para S.Sed (80 e 90%), SST (80 e 95%), DQO (90 e 81%) e DBO (80 e 76%) para as duas etapas de operação. Destaca-se que, mesmo não ocorrendo o atendimento das concentrações de DQO e DBO aos padrões de lançamento em todo o tempo, suas eficiências de remoção médias foram superiores às eficiências estabelecidas pela legislação local.

Acredita-se que as maiores concentrações de S.Sed, SST, DQO e DBO que resultaram em eficiências negativas no FBPA em relação ao reator UASB possam estar relacionadas aos picos de vazão no sistema e às elevadas concentrações de sólidos suspensos totais no efluente do UASB quando próximo do período de descarte, promovendo assim, um maior arraste de sólidos e biofilme no FBPA.

Para a segunda etapa de operação do FBPA foi observado que as maiores concentrações de sólidos ocorreram no primeiro mês de operação (outubro/2010) e nos meses mais chuvosos (dezembro/2010, janeiro e fevereiro/2011). Desta forma, acredita-se que as maiores concentrações possam estar associadas ao arraste de sólidos e biofilme que se encontrava em formação, prejudicando assim o desempenho do FBPA na etapa E2.

O destaque é dado para o desempenho do FBPA quanto à remoção de N-amoniaco. Os resultados obtidos no efluente do FBPA foram de concentrações médias de N-amoniaco de 19 e 16mg/L, abaixo da meta de 20 mg/L de N-amoniaco, e percentis de atendimento à meta de 60 e 85% para as etapas E1 e E2, respectivamente. Considera-se que o percentual de atendimento de 85% seja muito bom, considerando a realidade brasileira, e a dificuldade de se remover amônia em vários outros processos de tratamento de esgotos. Os testes de variância aplicados entre as etapas de operação do filtro apresentaram diferenças significativas para as eficiências de remoção. Acredita-se que o fator fundamental para uma maior eficiência de remoção do N-amoniaco na segunda etapa de operação está relacionado com a elevação da altura do FBPA, conduzindo a um maior volume reacional, e proporcionando menores COVs.

Para uma melhor investigação do desempenho do FBPA será praticadas, em um segundo momento da pesquisa, outras taxas de aplicação superficial e cargas orgânicas volumétricas durante períodos intermediários (meses) e curtos (horas). Quanto à relação entre a ventilação promovida no FBPA e o processo de nitrificação no FBPA (remoção de N-amoniaco) serão realizados testes de transferência de oxigênio dissolvido.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte recebido pelas instituições: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, Fundação Nacional de Saúde – FUNASA e Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA. Os autores ainda agradecem ao sr. Raimundo Magela (operador do CePTS) pelo apoio nos trabalhos de campo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, P.G.S.; CHERNICHARO, C.A.L.; SOUZA, C.L. Development of compact UASB/trickling filter systems for the treatment of domestic wastewater in small communities in Brazil. *Water Science and Technology*, v. 59, nº7, p.1431-1439, 2008.
2. ALMEIDA, P.G.S.; DUTRA, P.R.; MONTEIRO, T.A.S.; OLIVEIRA, J.M.; CHERNICHARO, C.A.L. Filtros biológicos percoladores utilizados no pós-tratamento de efluentes de reatores UASB: efeito de diferentes tipos de meio suporte na remoção de N-amoniaco. In: *Proc. 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental (ABES)*. Belo Horizonte, 2007.
3. APHA; AWWA; WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20. ed.. Washington: APHA, 1998.

4. CHERNICHARO, C.A.L.; ALMEIDA, P.G.S. Feasibility of UASB/trickling filter systems without final clarifiers for the treatment of domestic wastewater in small communities in Brazil. In: International IWA Conference on: Sustainable Solutions For Small Water And Wastewater Treatment Systems. Girona, Espanha, 2010.
5. CHERNICHARO, C. A. L.; ALMEIDA, P.G.S. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por filtros biológicos percoladores. Apostila. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental / Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.
6. CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. V.5. 2 ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental / Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.
7. CONOVER, W.J. Practical Nonparametric Statistics. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1999. 584 p.
8. FLORENCIO, L.; ALMEIDA, P.G.S.; MENDONÇA, N.M.; VOLSHAM. I.J.; NETO, C.O.A.; ROQUE PASSOS PIVELI, R.P.; CHERNICHARO, C.A.L. Nitrificação em Reatores Aeróbios com Biomassa Aderida. Cap. 8. In: Mota, F.S. & von Sperling, M. (coordenadores). Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção. Projeto FINEP/PROSAB – Edital 5. ABES. Rio de Janeiro, 2009. 428 p.
9. FONSECA, M.F.; JUNIOR, I.V.; JORDÃO, E.P. Análise dos fatores ambientais intervenientes na nitrificação em filtros biológicos percoladores. 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES). Recife, 2009.
10. FRADE, E.C. Concepção e avaliação de desempenho de um sistema compacto reator UASB/Filtro Biológico Percolador utilizado para o tratamento de esgotos sanitário. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.
11. GONÇALVES, R.F.; CHERNICHARO, C.A.L.; ANDRADE NETO, C.O.; ALEM SOBRINHO, P.; KATO, M.T.; COSTA, R.H.R., AISSE, M.M.; ZAIAT, M. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por reatores com biofilme. Cap. 4. In: Chernicharo, C.A.L. (coordenador). Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. FINEP/PROSAB, Rio de Janeiro, Brasil, 2001. 544 p.
12. MANSUR, M. A. Tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Tese de doutorado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.
13. METCALF & EDDY. Wastewater engineering: treatment and reuse. New York: Metcalf & Eddy, Inc., 4 th. ed., 2003, 1819p.
14. SANTOS, A.S.P. Avaliação de desempenho de um filtro biológico percolador em diferentes meios suporte plásticos. Dissertação (Mestrado). Mestre em Ciências (M. Sc.). Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005.
15. SILVA, G.M.; GONÇALVES, R. F. Desempenho de um sistema UASB + filtro biológico percolador sem etapa de decantação tratando esgoto sanitário. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES). Campo Grande, 2005.
16. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Wastewater Technology Fact Sheet: Trickling Filters Nitrification. Washington D.C., 2000. 9 p.
17. VON SPERLING, M. Introdução a qualidade das águas. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. V.1. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental / Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.
18. WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). Aerobic Fixed-Growth Reactors: a special publication. 2000. 340 p
19. WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). Design of Municipal Wastewater Treatment Plants. Vol.1, 3ª ed. Manual of Practice nº 8, cap 12. Alexandria, Virginia, 1992. 829 p.