

Análise de um protótipo de wetlands construídos no tratamento de efluentes industriais de laticínios

Analysis of a prototype of constructed wetlands in the treatment of industrial dairy effluents

Análisis de un prototipo de humedales construido en el tratamiento de efluentes industriales derivados de productos lácteos

Recebido: 17/05/2022 | Revisado: 09/06/2022 | Aceito: 10/06/2022 | Publicado: 12/06/2022

Gislene da Conceição Marcelino

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0843-8114>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: d2021102955@unifei.edu.br

Anderson de Assis Moraes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4269-7072>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: andersondeassis@unifei.edu.br

Resumo

Atualmente, utilizam-se diversos mecanismos para tratamento de águas residuárias, dentre estes o sistema de wetlands. Wetlands são sistemas filtrantes compostos de macrófitas aquáticas aderidas a um maciço, por onde o efluente escoar. Esse sistema de tecnologia emergente e baixo custo apresenta resultados significativos no tratamento de efluentes industriais de laticínios em escala experimental. Os sistemas experimentais (protótipos) foram construídos por bombonas plásticas, sendo o primeiro estágio de fluxo subsuperficial vertical e o segundo de fluxo subsuperficial horizontal. O efluente foi armazenado num reservatório e distribuído por gravidade, seguido por zonas de raízes preenchidas com o material filtrante (camadas de brita e areia grossa). As espécies utilizadas foram *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes* e *Vetiveria zizanioides*, porém a primeira espécie não se adaptou ao sistema, que apresentou resultados satisfatórios em relação à eficiência de remoção de DQO de 62,13% \pm 14,70, sólidos totais 87,18% \pm 2,26, turbidez 96,43% \pm 3,37, fósforo total 97,53% \pm 2,15 e nitrogênio total 32,08% \pm 3,98. Porém, a remoção de DBO foi inferior, atingindo eficiências entre 9 e 10% \pm 5. Já os parâmetros pH e sólidos sedimentáveis atingiram os padrões de lançamento estabelecidos na legislação vigente.

Palavras-chave: Macrófitas aquáticas; Águas residuárias; Sistemas filtrantes.

Abstract

Nowadays, several mechanisms are used to treat wastewater, including wetland systems. This low-cost, emerging technology system shows significant results in the treatment of industrial dairy effluents on an experimental scale. The experimental systems (prototype) were built by plastic bombs, with the first stage of vertical subsurface flow and the second of horizontal subsurface flow. The effluent was stored in a reservoir and distributed by gravity, followed by root zones filled with the filter material (layers of gravel and coarse sand). The species used were *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes* and *Vetiveria zizanioides*, however the first species did not adapt to the system. The system showed satisfactory results regarding the COD removal efficiency of 62.13% \pm 14.70, total solids 87.18% \pm 2.26, turbidity 96.43% \pm 3.37, total phosphorus 97.53% \pm 2.15 and total nitrogen 32.08% \pm 3.98. However, BOD removal was less, reaching efficiencies between 9 and 10% \pm 5. The parameters of pH and sedimentable solids, on the other hand, reached the release standards established in the current legislation.

Keywords: Aquatic macrophytes; Wastewater; Filter systems.

Resumen

Actualmente, se utilizan varios mecanismos para tratar las aguas residuales, incluido el sistema de humedales. El sistema de humedales construidos son sistemas filtrantes compuestos por macrófitas acuáticas adheridos a un macizo, a través del cual discurren los efluentes. Este sistema de tecnología emergente y de bajo costo presenta resultados significativos en el tratamiento de efluentes industriales de productos lácteos a escala experimental. Los sistemas experimentales (prototipos) se construyeron utilizando bidones de plástico, siendo la primera etapa un flujo subsuperficial vertical y la segunda un flujo subsuperficial horizontal. El efluente se almacenó en un reservorio y se distribuyó por gravedad, seguido de zonas de raíces rellenas con material filtrante (capas de grava y arena gruesa). Las especies utilizadas fueron *Pistia stratiotes*, *Eichhornia crassipes* y *Vetiveria zizanioides*, pero la primera especie no se adaptó al sistema. El sistema mostró resultados satisfactorios en relación a la eficiencia de remoción de DQO de 62,13% \pm 14,70, sólidos totales 87,18% \pm 2,26, turbidez 96,43% \pm 3,37, fósforo total 97,53% \pm 2,15 y nitrógeno total 32,08% \pm 3,98. Sin embargo, la

remoción de DBO fue menor, alcanzando eficiencias entre 9 y 10% \pm 5. Los parámetros de pH y sólidos sedimentables alcanzaron los estándares de liberación establecidos en la legislación vigente.

Palabras clave: Macrófitos acuáticos; Aguas residuales; Sistemas de filtrado.

1. Introdução

O uso inadequado dos recursos hídricos e o desenvolvimento econômico de atividades agrícolas e industriais atrelados ao crescimento populacional e à ocupação desordenada, tem causado a poluição de mananciais superficiais, resultando na degradação da qualidade da água.

Um dos fatores de degradação da qualidade da água é a poluição ocasionada pelo lançamento de esgotos oriundos dos mais diversos meios em corpos receptores (Beltrame *et al.*, 2016). Os impactos do descarte ilegal incluem: redução da disponibilidade hídrica, aumento do custo de tratamento, danos à flora e à fauna e danos à saúde da população.

Segundo o Portal de Tratamento de Água (2015), o descarte de efluente industrial ilegal é estimado em $2,72 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e são equivalentes a $18,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de esgoto doméstico, valor este equivalente ao esgoto gerado por uma cidade de 19,1 mil habitantes, ou seja, o efeito poluente dos resíduos industriais é sete vezes maior que os resíduos domésticos. Isso equivale a 26 piscinas olímpicas cheias de esgoto por hora.

Atualmente, utilizam-se diversos mecanismos para tratamento de águas residuárias, dentre estes tem-se a aplicação de espécies vegetais que representam uma tecnologia emergente que está se revelando como uma alternativa eficiente e de baixo custo aos sistemas convencionais (Pereira Junior *et al.*, 2016). Um exemplo disso é o sistema de *wetlands* construído (SWC), que possui flexibilidade de configuração e operação, menores custos de implantação, instalação e operação, e simplicidade operacional.

Segundo Von Sperling (2014), *wetlands* construídos são sistemas filtrantes compostos de macrófitas aquáticas aderidas a um maciço, por onde o efluente escoar. Geralmente está impermeabilizado com materiais do tipo argila ou geomembrana ao fundo. As plantas podem ser de espécies aquáticas ou estarem fixadas no solo alagado ou, ainda, estarem aderidas a um maciço de pedras e areia para o suporte de seu crescimento (Von Sperling, 2014). Trata-se de um sistema que utiliza mecanismos biológicos das plantas e microrganismos, além dos mecanismos químicos e físicos para tratamento de efluentes líquidos, que ficam retidos por certo tempo nesse maciço (Kadlec & Wallace, 2009; Hoffmann, 2011; Von Sperling, 2014).

O município de João Monlevade, local de estudo desta pesquisa, possui uma diversidade de indústrias, onde cerca de 2.500 pequenas indústrias e prestadores de serviços vêm contribuindo para o crescimento e desenvolvimento da cidade (IBGE, 2008). Grande parte dessas indústrias geram efluentes passíveis de tratamentos específicos e proporcionam possibilidade de estudos para o reuso do efluente, como no caso das indústrias de laticínios da cidade.

Diante da relevância dos laticínios no Brasil e conhecendo o grau de poluição dos seus efluentes, é de grande importância que se encontrem técnicas alternativas para realizar o tratamento desses efluentes e assim devolver para o curso d'água um efluente tratado mais limpo e que cause o mínimo de degradação ao meio ambiente (Simpliciano & Carneiro, 2017).

Objetivou-se com este estudo a construção e verificação da eficiência de um protótipo de sistema de *wetlands* construídos no tratamento de efluentes industriais de laticínios no município de João Monlevade – MG. Assim, analisar o efluente gerado pela indústria, abordar sobre a tecnologia do *wetlands*, avaliar a eficiência do sistema, investigar a utilização de espécies de macrófitas aquáticas, bem como o potencial de remoção de matéria orgânica e sólidos concentrados e a possibilidade de reuso do efluente tratado para usos não potáveis na indústria. E, por fim, propor à indústria estudada a implantação do tratamento do efluente gerado por meio da tecnologia de *wetlands* construídos.

2. Metodologia

A área de estudo trata-se de uma indústria de laticínios localizada no município de João Monlevade – MG (Figura 1), microempresa especializada na fabricação de pães de queijo, com produção mensal de cerca de 2,5 toneladas (Costa & Borges, 2018).

Figura 1. Localização da indústria de laticínios, João Monlevade, Minas Gerais.

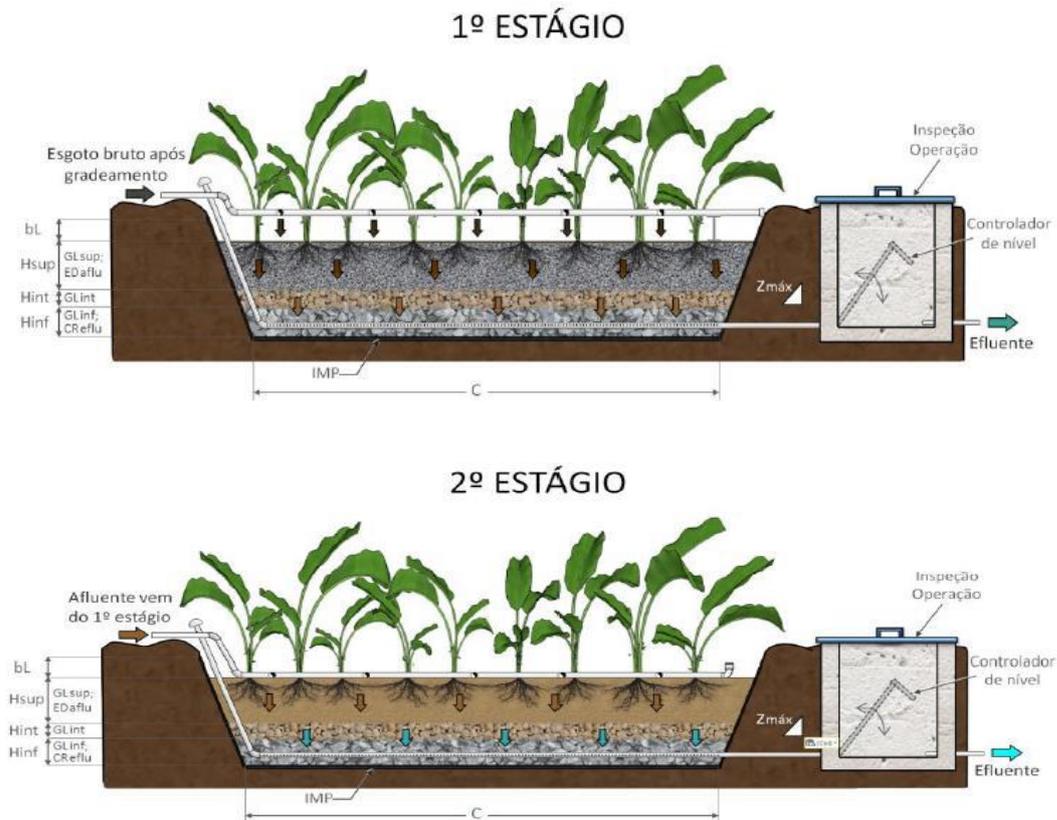


Fonte: Adaptado de *Google Earth Pro*.

Após revisão bibliográfica foi realizado o desenvolvimento do protótipo em três etapas, como recomendado por Von Sperling & Sezerino (2018). As duas unidades experimentais foram delineadas em escala reduzida de modo que pudessem ser transportadas, montadas e instaladas facilmente junto à indústria de laticínios. Elas foram constituídas por bombonas plásticas cilíndricas de 50 l, altura de 0,70 m, largura de 0,30 m e comprimento de 0,34 m. A escolha desse tipo de material foi em função do seu custo e da sua capacidade de resistência ao peso do meio suporte saturado.

A construção do protótipo foi baseada no sistema francês recomendado por Von Sperling & Sezerino (2018), que se caracteriza por uma sequência de dois estágios, sendo o primeiro estágio o que recebe efluente bruto (após gradeamento), e o segundo estágio recebe o efluente tratado no primeiro estágio. Assim, o protótipo deveria ser eficiente a ponto de chegar à realidade do sistema de *wetland* construído. O primeiro estágio de passagem do efluente é denominado fluxo horizontal, seguindo para o segundo fluxo, denominado fluxo vertical (Von Sperling & Sezerino, 2018). Os sistemas pilotos foram compostos por um reservatório em que o efluente foi distribuído por gravidade, seguido por zonas de raízes preenchidas com o material filtrante, que consistiu em camadas de brita (de granulometrias 0, 1 e 2) e areia grossa (Figura 2).

Figura 2. Perfil longitudinal de *wetland* construído de 1º e 2º estágios, segundo a concepção francesa.



Legenda:

Hsup - altura da camada superior do meio suporte (camada principal, de filtração);	GLsup - granulometria do leito na camada superior do meio filtrante;
Hint - altura da camada intermediária, de transição;	GLint - granulometria do leito na camada intermediária;
Hinf - altura da camada inferior, de drenagem;	GLinf - granulometria do leito na camada inferior, de drenagem;
bL - borda livre;	ED afl - zona de entrada e distribuição do afluente;
C - comprimento;	CR efl - zona de coleta e retirada do efluente.
Zmáx - declividade máxima do talude (quando necessário);	
IMP - impermeabilização (fundo e laterais);	

Fonte: Von Sperling e Sezerino (2018).

Para o desenvolvimento inicial do projeto, foram utilizadas as espécies *Eichhornia crassipes* (aguapé) e *Pistia stratiotes* (alface d'água). A escolha dessas espécies se deu pela disponibilidade na região, pois sua aquisição junto às floriculturas se apresentou inviável, visto que não havia mudas para pronta entrega e o prazo para o fornecimento sob encomenda era longo.

Inicialmente foram inseridas 9 mudas de cada espécie de macrófita. A espécie denominada *Pistia stratiotes* não obteve condições para a sobrevivência, apresentando já nos primeiros dias, sinais de ressecamento das folhas, o que indica que essas plantas não se adaptaram ao tipo de efluente. Sendo assim, a espécie *Pistia stratiotes* foi retirada e submetida à análise de determinação de massa seca, e então a espécie *Eichhornia crassipes* foi inserida em substituição no sistema. A partir da terceira semana de implantação do protótipo, a espécie de nome popular capim vetiver, *Vetiveria zizanioides*, foi inserida no sistema de fluxo vertical, que apresentou condições de adaptação ao sistema até o final do experimento, que durou cerca de 45 dias, assim como a *Eichhornia crassipes* (Figura 3).

Figura 3. Sistema experimental em operação.



3-a e 3-b: *Eichhornia crassipes* (aguapé)
3-c: *Vetiveria zizanioides* (capim vetiver)
3-d: Protótipo em funcionamento com as macrófitas
Fonte: Autores.

O protótipo entrou em operação no dia 17 de agosto de 2019, sendo que o período de 12 a 17 de agosto de 2019 foi de adaptação do sistema. A amostra de efluente bruto foi coletada no dia 12 de agosto e encaminhada para o laboratório para fins de caracterização. Para avaliar a eficiência do protótipo, amostras simples foram coletadas na saída do sistema para controle e avaliação, sendo 01(uma) amostra por coleta, perfazendo um total de 7 (sete) amostras, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4. Apresentação das amostras de efluente bruto e tratado.



Fonte: Autores.

O efluente tratado foi coletado na saída do segundo estágio de tratamento, ou seja, após passar pelo fluxo de sistema vertical e em seguida pelo fluxo horizontal. O volume coletado para cada amostra foi de aproximadamente 1 l, sendo suficiente

para análise de todos os parâmetros. Já o efluente bruto foi coletado dentro da indústria, no setor de produção, devido à alta concentração de matéria orgânica naquele local, e inserido no sistema manualmente. Foram utilizados cerca de 65 l de efluente bruto para o tratamento no sistema, durante todo o período de operação.

Após a coleta, as amostras foram armazenadas em frascos específicos, encaminhadas ao Laboratório de Química e Águas, da Universidade do Estado de Minas Gerais – Unidade João Monlevade e submetidas à análise de parâmetros físico-químicos sendo: pH, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), turbidez, sólidos totais, sólidos sedimentáveis, nitrogênio total, fósforo total e demanda química de oxigênio (DQO). Os ensaios foram realizados seguindo as diretrizes do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2019), conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Relação de parâmetros, frascaria, conservantes e métodos de análise.

Parâmetro	Frascaria	Preservação	Método
DBO	Plástico	Refrigeração	SM 23ª Edição, Método 5210 B
DQO	Plástico	Refrigeração, H ₂ SO ₄	SM 23ª Edição, Método 5220 C
Nitrogênio Total	Plástico	Refrigeração, H ₂ SO ₄	SM 23ª Edição, Método 4500 C. Kjeldahl Method.
pH	Plástico	Refrigeração	SM 23ª Edição, Método 4500 B
Sólidos Sedimentáveis	Plástico	Refrigeração	SM 23ª Edição, Método 2540 F
Sólidos Totais	Plástico	Refrigeração	SM 23ª Edição, Método 2540 B
Turbidez	Plástico	Refrigeração	SM 23ª Edição, Método 2130 B
Fósforo Total	Plástico	Refrigeração	SM 23ª Edição, Método 4500 B.5

Fonte: Autores.

Outrossim, foi analisada a adequação dos valores encontrados nas análises químicas e físicas às legislações vigentes para lançamento de efluentes em corpos hídricos de Minas Gerais (Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/2008), Resolução CONAMA nº 357/2005 e Resolução CONAMA nº 430/2011.

Além disso, as macrófitas foram submetidas a análises biológicas: determinação de biomassa e medição de comprimento da raiz, área foliar e massa fresca, seguindo o procedimento adotado por Zeist *et al.* (2014), em que a medição do comprimento (C) e largura (L) das folhas foi realizada por meio do produto do comprimento e largura da folha ($AF = C \times L$). O comprimento e a largura corresponderam à maior distância (cm) e para a medição das raízes foi adotado o maior comprimento (cm). Portanto, após o preparo, foram medidas *in loco*, massa fresca, área foliar e raiz inicial, sendo que para medição da massa fresca, foi utilizada uma balança digital de precisão eletrônica, com capacidade de pesagem entre 1 g a 10 kg. Já as medições de área foliar e raiz, foram feitas com o auxílio de uma régua graduada em milímetros. Os resultados foram analisados no software PAST: *statistics*, versão 2.17c. A análise estatística utilizou o método de análise de variância (ANOVA) pelo *software* Microsoft Excel 2016, seguido pelo Teste de Tukey com 5% ($p < 0,05$) para verificar as diferenças estatísticas significativas (Vieira, 2015).

O protótipo foi operado com taxas de aplicação constante diária e alimentação intermitente, durante 45 dias, tendo início em 12/08/2019 e término em 24/09/2019. Foram coletadas um total de 7 (sete) amostras, sendo 1 (uma) por semana, as quais foram submetidas à análise laboratorial em triplicata, gerando a média e desvio padrão de cada parâmetro analisado. O volume de efluente foi aplicado aos sábados alternados, respeitando uma semana em período de descanso. A vazão máxima de aplicação (5,7 l/dia) foi estabelecida considerando a área útil da bombona de 0,15 m² e volume útil de 0,0375 m³. A carga orgânica foi determinada utilizando a vazão média diária de efluente (m³.d⁻¹) e a concentração do efluente em DBO₅ (mg.l⁻¹). A DBO₅ do efluente bruto obteve média de 198,73 mg.l⁻¹ e a vazão média diária foi de 2,4 m³.d⁻¹. Assim, a carga orgânica aplicada ao sistema foi de 0,477 kg.d⁻¹. O TDH (Tempo de Detenção Hidráulica) foi calculado com base no volume útil do sistema e pela vazão

média de efluente calculada, sendo 6,58 dias.

3. Resultados e Discussão

Os resultados médios dos parâmetros biológicos das macrófitas estão apresentados na Tabela 2. Os valores médios de massa fresca (g), comprimento da raiz (cm) e área foliar (cm²) das mudas de *Eichhornia crassipes* não apresentaram diferenças significativas para o Teste de Tukey ($p > 0,05$). Esse procedimento foi realizado em três períodos (24/08, 31/08 e 24/09) apenas para a espécie *Eichhornia crassipes* utilizando dados de 6 (seis) mudas. Não foi possível avaliar esses parâmetros para a *Pistia stratiotes*, pois esta não se adaptou ao tipo de efluente e a espécie *Vetiveria zizanioides* continuou inserida no sistema.

Tabela 2. Resultados médios e desvio padrão da análise biológica das macrófitas (massa fresca).

<i>Eichhornia crassipes</i>	24/08/2019	31/08/2019	24/09/2019
massa fresca (g)	29,25 ± 18,82	54,50 ± 30,03	30,00 ± 17,11
comprimento da raiz (cm)	16,63 ± 7,82	15,63 ± 5,44	19,25 ± 1,71
área foliar (cm ²)	139,13 ± 67,70	230,44 ± 105,80	83,63 ± 30,16

Fonte: Autores.

Os resultados dos parâmetros físico-químicos de análises do efluente bruto e tratado estão demonstrados na Tabela 2. Os dados estão expressos em média e desvio padrão. As médias não diferiram entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey ($p > 0,05$).

Tabela 2. Resultados médios e desvio padrão de análises dos parâmetros químicos e físicos.

Parâmetros	Efluente bruto	Efluente tratado	Eficiência global (%)	Limite estipulado	Conformidade
Temperatura (°C)	24,60 ± 0,10	24,67 ± 0,33	-	< 40° C	C
pH	4,25 ± 0,05	6,39 ± 0,08	-	6 a 9	C
DBO (mg/l)	181,33	191,52 ± 52,67	5,17 ± 5,01	< 60 mg/l	NC
DQO (mg/l)	3014,33 ± 37,86	1248,22 ± 26,83	62,13 ± 14,70	< 180 mg/l	NC
Sólidos Totais (mg/l)	14,28 ± 1,58	1,83 ± 0,04	87,18 ± 2,26	500 mg/l	C
Sólidos Sedimentáveis (ml/l)	26	0	100	até 1 ml/l	C
Turbidez (UNT)	920,33 ± 56,50	32,90 ± 0,64	96,43 ± 3,37	< 100 UNT	C
Fósforo Total (mg/l)	1,94 ± 0,17	0,011 ± 0,07	97,53 ± 2,15	0,05	C
Nitrogênio Total (mg/l)	1376,88	935,24 ± 44,60	32,08 ± 3,98	-	-

C – conforme; NC – não conforme – CONAMA nº 357/2005, 430/2011, DN COPAM/ CERH-MG nº 01/2008. Fonte: Autores.

A espécie denominada *Pistia stratiotes* (alface d'água) não obteve condições para a sobrevivência, apresentando já nos primeiros dias, sinais de ressecamento das folhas, o que indica que esta espécie não está adaptada ao tipo de efluente. De acordo com Suzuki (2011), o pH ideal para essa espécie é entre 6,0 e 8,0. Ao analisar as características do efluente na primeira semana, a média do pH era de 4,25, ou seja, meio ácido, que pode ser explicado pela composição do efluente de laticínio e soluções ácidas utilizadas para limpeza. O pH ácido torna-se tóxico para o crescimento de organismos e, portanto, não ocorre a decomposição da matéria orgânica. Sendo assim, a espécie *Pistia stratiotes* foi retirada e então a espécie *Eichhornia crassipes* (aguapé) foi inserida em substituição no sistema.

Os rendimentos de biomassa fresca e seca totais do aguapé foram superiores aos rendimentos da alface d'água,

apresentando resultados de 504,98 g e 36,56 g de biomassa fresca e seca, respectivamente. Já a alface d'água apresentou 106,22 g e 96,26 g. Essa diferença se deve ao fato de que o aguapé é uma planta com raízes longas (até um metro), enquanto a alface d'água apresenta raízes mais curtas, com aproximadamente 20 a 30 cm de comprimento. Outro ponto em questão é a grande diferença encontrada nos valores de massa fresca e seca do aguapé. Manfrinato (1991) citado por Lima *et al.* (2018), descreve que essa diferença se deve ao fato do aguapé ser uma planta suculenta, composta por cerca de 950 g água/kg matéria fresca e mesmo após secagem, apresenta grande volume. E ainda absorve da água elementos químicos, como fósforo e nitrogênio. No entanto neste experimento não foi possível avaliar a retenção de nutrientes.

De acordo com o art. 16 da Resolução CONAMA nº 430/2011 (Brasil, 2011) e a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG, nº 01/2008 (Minas Gerais, 2008), em seu artigo 29, para o lançamento direto ou indireto de efluentes em corpos hídricos, o pH deve estar entre 6,0 e 9,0. Já para temperatura, a mesma Resolução estabelece que a temperatura precisa ser inferior a 40° C. Portanto, os parâmetros em questão atenderam à legislação, visto que os valores obtidos ficaram dentro do limite permitido e apresentaram expressivo significado na avaliação do bom desempenho de um reator e pode-se inferir que os processos biológicos ocorreram satisfatoriamente.

Como observado, os resultados de eficiência de remoção de DBO não alcançaram o percentual mínimo de 60%, como delimitado pela Resolução CONAMA nº 430/2011. Apresentou eficiência média de 5,17% e ficou acima do limite máximo permissível de concentração (60 mg/l) estipulado pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/2008. Esses resultados indicam que o tratamento não foi eficiente na remoção do material biodegradável. Ta-oun *et al.* (2003) citados por Quege *et al.* (2013), alcançaram resultados de aproximadamente 98% de remoção de DBO na Tailândia, utilizando alagados construídos cultivados com *Vetiveria zizanioides* (capim vetiver). Porém, é importante ressaltar que houve uma redução na concentração de DBO, embora não tenha atendido aos padrões de lançamento.

De acordo com o artigo 16 da Resolução CONAMA nº 430/2011, para o lançamento direto ou indireto de efluentes em corpos hídricos, a concentração de DQO deve ser de até 180 mg.l⁻¹ ou o tratamento deve atingir eficiência de redução em no mínimo 70%. A concentração não atingiu o limite máximo, porém a eficiência média global de remoção atingiu 62,13%, sendo importante destacar que ao final do tratamento, a eficiência média atingiu o percentual de 78,74%. Embora, tenha alcançado eficiência satisfatória de remoção, ainda assim, o valor da concentração ao final do experimento ficou acima do máximo permitido pela Resolução CONAMA nº 430/2011 (menor que 180 m.l⁻¹).

Quege *et al.* (2013) atingiram o percentual de 97,1% de remoção de DQO, no tratamento de esgoto sanitário através de alagados construídos utilizando *Typha angustifolia*. A redução de DQO encontrada nesta pesquisa é similar ao encontrado por Abrantes (2009) citado por Quege *et al.* (2013), pois obteve uma média percentual de remoção de 72,7%, utilizando um fluxo sub-superficial vertical ascendente seguido de um descendente, com utilização das plantas *Thypha domingensis* (taboa) e *Phragmites australis* (caniço). Tais remoções podem ser explicadas em decorrência da comunidade microbiana diversificada nos sistemas de zonas de raízes e aderidas às raízes das macrófitas e ao material filtrante que melhoram a eficiência da degradação da matéria orgânica.

Quanto aos resultados de sólidos totais, a remoção do sistema mostrou-se bastante satisfatória, sua performance pode ser explicada devido à baixa velocidade de escoamento e grande área específica do meio suporte (Freitas, 2006). De acordo com Metcalf & Eddy (2003) citados por Soela (2017), os sistemas alagados construídos são eficientes na remoção de ST em decorrência da sedimentação nos interstícios, retenção por restrição ao escoamento (filtração) e adesão aos grânulos do material suporte (em razão da força de *Van der Waals*). Tal resultado pode ser considerado satisfatório quando comparados com os resultados obtidos por Soela (2017), utilizando sistemas alagados construídos cultivados com *Heliconia* e *Hedychium coronarium* (lírio-do-brejo) proporcionaram eficiência em torno de 80%, resultado inferior ao obtido neste estudo. Portanto, o sistema apresentou alta eficiência com relação à remoção de sólidos totais. Já os resultados de sólidos sedimentáveis atingiram

eficiência de 100% e atenderam satisfatoriamente aos padrões de lançamento.

Quanto à turbidez, a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008, estabelece o limite de até 100 UNT para águas doces de classe 2. Portanto, o parâmetro em questão atendeu à legislação. De acordo com Gonçalves & Jesus (2015), citados por Almeida & Lima (2017), o resultado da eficiência média referente à turbidez é de 95,47%, resultado semelhante ao valor obtido nesse estudo.

A Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece um valor máximo de 0,1 mg/l de fósforo total em ambientes classificados como Classe 2. Portanto, o parâmetro em questão atendeu à legislação. Kadlec & Knight (1996) descrevem que nos sistemas de tratamento de *wetlands* construídos, a remoção de fósforo de águas residuárias se dá pela adsorção no meio suporte, precipitação e assimilação pelas plantas e microrganismos.

Ucker (2012) conseguiu reduzir os níveis de fósforo total em 90,5%, porcentagem considerada muito boa nos tratamentos de efluentes, utilizando *Vetiveria zizanioides* Stapf (capim vetiver) em águas residuárias. Por outro lado, Almeida (2007) conseguiu redução de 72% em seu sistema de tratamento utilizando *Typha domingensis* (taboa), *Hedychium coronarium* (lírio do brejo) e *Heliconia rostrata* (heliconia). Parolin (2012) alcançou eficiência de 77,5% em sua pesquisa. Zanella (2008) encontrou valor médio de eficiência de remoção de fósforo total de 27,7% num sistema de tratamento de esgoto doméstico cultivado com *Cyperus papyrus* (papiro). Esse mesmo estudo demonstrou que a presença de macrófita ao tratamento eleva a eficiência em até 12 pontos percentuais, se comparado a sistemas de tratamento não plantados. A eficiência de remoção obtida nesse estudo foi de aproximadamente 99% \pm 2,84, o que demonstra que a aplicação de estações de tratamento de esgoto por zona de raízes se destaca na remoção desse nutriente.

Os resultados de nitrogênio total não alcançaram resultados satisfatórios, conforme estabelecidos pelas legislações vigentes. De acordo com Almeida e Lima (2017), os reatores biológicos no geral removem em média 20% de nitrogênio e a oscilação nos valores de eficiência pode ser em decorrência do crescimento e assimilação do nitrogênio pelas plantas, que no caso do aguapé, apresentou crescimento de novos brotos.

Keffala & Ghrabi (2005) citados por Andrade (2012) escreveram um estudo onde compararam a eficiência na remoção de nitrogênio em sistemas de tratamento de esgotos domésticos por zona de raízes plantadas e não plantadas, sendo que a primeira obteve 26% de remoção e a última apenas 9%, resultado parecido com o obtido neste estudo, indicando o efeito positivo das macrófitas no sistema, tanto pela assimilação de formas nitrogenadas, quanto pela comunidade microbiana aderida a rizosfera.

4. Considerações Finais

De acordo com os resultados obtidos neste estudo, verificou-se que o protótipo proporcionou resultados satisfatórios quanto à remoção de sólidos totais e sólidos sedimentáveis no tratamento de efluentes industriais de laticínios. Com exceção da DBO e DQO os demais parâmetros analisados alcançaram os limites estabelecidos pela legislação vigente.

Com vistas à eficiência na remoção de sólidos totais, sedimentáveis, turbidez e resultados satisfatórios para pH e temperatura, o sistema proposto apresentou desempenho favorável, indicando assim, a potencialidade de aplicação em escala real.

Ressalta-se que o efluente em estudo não passou por nenhum tipo de tratamento primário, passando apenas pelo pré-tratamento de remoção de sólidos grosseiros, tais como resíduos de embalagens, pequenos fragmentos de pedras e coágulos de leite.

Sugere-se, para estudos futuros, o dimensionamento de nova configuração, sendo tratamento primário para garantir a eficiência de remoção de gordura, haja vista que altos níveis de gordura causam vários problemas nos sistemas de tratamento biológico. Dentre as opções empregadas na indústria de laticínios, têm-se os filtros anaeróbios e os reatores UASB, que possuem alto grau de estabilização do efluente, baixo consumo de energia e tolerância a altas cargas orgânicas. Seguido de *wetlands*

construídos, cultivado com espécies do tipo emersas (taboa, capim tifton 85 e capim vetiver) e o monitoramento por um período maior, pois certas espécies de macrófitas demandam tempo para se adaptarem ao sistema de tratamento.

Recomenda-se que mais estudos sejam realizados visando atingir uma maior remoção de DQO e DBO, por exemplo, variando as condições hidráulicas ou as espécies de macrófitas utilizadas.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade João Monlevade-MG. Agradecimento também à Universidade Federal de Itajubá, especialmente ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - Prof. Água, Projeto CAPES/ANA AUXPE N°. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Referências

- Almeida, N. C. de S. & Lima, P. O. de S. (2017). *Sistemas alagados construídos: tratamento de baixo custo para esgoto sanitário em áreas rurais*. 79 f.
- Almeida, R. de A.; Oliveira, L. F. C. de & Kliemam H. J. (2007). *Deformação em inflorescência de Taboa (Typha angustifoli L.) submetida a esgoto sanitário*. Pesquisa Agropecuária, Goiânia – GO, p. 125-129.
- Andrade, H. H. B. de. (2012). *Avaliação do desempenho de sistemas de zona de raízes (wetlands construídas) em escala piloto aplicados ao tratamento de efluente sintético*. 100 f.
- Beltrame, T. F.; Lhamby, A. R. & Beltrame, A. (2016). *Efluentes, resíduos sólidos e educação ambiental: Uma discussão sobre o tema*. 2016. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria, p. 351–362.
- Brasil. (2005). *Resolução CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente n° 357/2005*. Dispõe sobre classificação de corpos d'água e estabelece as condições e padrões para lançamento de efluentes, e dá outras providências.
- Brasil. (2011). *Resolução CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente n° 430/2011*. Dispõe sobre classificação de corpos d'água e estabelece as condições e padrões para lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA.
- Brasil. Portal de Tratamento de Água. (2015). *Efluentes industriais são 7 vezes mais poluentes que o esgoto doméstico*. <https://www.tratamentodeagua.com.br/efluentes-industriais-sao-7-vezes-mais-poluente-que-o-esgoto-domestico/>.
- Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2008). *Pesquisa de Saneamento Básico*. <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45351.pdf>.
- Costa, R. M. & Borges, T. N. (2018). *Caracterização do efluente de uma indústria de pão de queijo: proposta de tratamento*. 68 f.
- Freitas, W. da S. (2006). *Desempenho de sistemas alagados construídos, cultivados com diferentes espécies vegetais, no tratamento de águas residuárias da suinocultura*. 169 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. <http://locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/683/texto%20completo.pdf?sequenc e=1&isAllowed=y>.
- Kadlec, R. H., and R. L. Knight (1996). *Treatment wetlands*. Lewis Publishers, New York, NY, USA.
- Lima, M.R; Taffarel, A.D; Reissmann, C.B; Cruz, A.C.L. da & Depiné, H. (2018). *Avaliação do crescimento e retenção de nutrientes provenientes da eutrofização, em três macrófitas aquáticas*. Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Paraná.
- Minas Gerais. (2008). *Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n° 01, de 05 de maio de 2008*.
- Parolin, M.; Crispim, J. Q. & Kaick, T. S. V. (2012). *Tratamento de esgoto por zona de raízes: Análise e Eficiência*. Rev. GEOMAE. Campo Mourão – PR, p. 45-57.
- Pereira Junior, A.; Teixeira, D. de S.; Tavares, F. B. & Oliveira, G. P. (2016). *Projeto de tratamento de esgoto doméstico (TED)*. VII Semana Acadêmica da UEPA Marabá Ambiente, Saúde e Sustentabilidade na Amazônia Oriental: desafios e perspectivas.
- Quege, K. E.; Almeida, R. de A. & Ucker, F. E. (2013). *Utilização de plantas de bambu no tratamento de esgoto sanitário pelo sistema de alagados construídos*. Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, p. 2069-2080.
- Soela, D. M. (2017). *Tratamento de água residuária de suinocultura em sistemas alagados construídos cultivados com lírio-do-brejo e helicônia papagaio* – Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Santa Tereza.
- Ucker, F. E.; Almeida, R. A. & Kemerich, P. D. da C. (2012). *Remoção de nitrogênio e fósforo do esgoto sanitário em um sistema de alagados construídos utilizando o capim vetiver*. Revista Ambientes & Água. Goiânia – GO.
- Simpliciano, A. C. & Carneiro, R. L. F. (2017). *Utilização de filtro biológico com diferentes meios de suporte para tratamento de águas residuárias de laticínios*. 71 f.

Suzuki, R. (2011). *Guia de plantas aquáticas*. Londrina, Aquamazon.

Vieira, G. T. (2015). *Avaliação do efeito cicatrizante de inga subnuda e pseudoptadenia contorta em feridas cirúrgicas em coelhos*. 123 f.

Von Sperling, M. (2018). *Princípios básicos do tratamento de esgotos (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias)*. DESA-UFMG, 472p. (4a ed.).

Von Sperling, M. (2014). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias)*. DESA-UFMG, 452p. (4a ed.).

Von Sperling, M. & Sezerino, P. H. (2018). *Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil. Documento de consenso entre pesquisadores e praticantes*. [S. l.]: Wetlands Brasil. <https://gesad.ufsc.br/files/2018/12/Boletim-Wetlands-Brasil-Edi%C3%A7%C3%A3o-Especial-Dimensionamento-de-Wetlands-Constru%C3%ADdos-no-Brasil-von-Sperling-Sezerino-2018-2.pdf>.

Zanella, L. (2008). *Plantas ornamentais no pós-tratamento de efluentes sanitários: wetlands construídos utilizando brita e bambu como suporte*. 219 f.

Zeist, A. R.; Oliveira, J. R. F. de; Lima Filho, R. B. de; Silva, M. L. de S. & Resende, J. T. V. de. (2014). *Comparação de métodos de estimativa de área foliar em morangueiro*. http://www.fepagro.rs.gov.br/upload/1434658791_04.pdf.