



ISSN: 2525-815X

Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: www.jeap.ufrpe.br/

10.24221/JEAP.4.4.2019.2590.228-238



Uso sustentável de macrófitas no tratamento de efluentes: uma revisão sistemática

Sustainable use of macrophytes in wastewater treatment: a systemic review

Larissa Albuquerque Marques Silva^a, Thais Tainan Santos da Silva^b, Elizabeth Amaral Pastich Gonçalves^c, Simone Machado Santos^d

^aUniversidade Federal de Pernambuco-UFPE, Centro Acadêmico do Agreste, Laboratório de Engenharia Ambiental. Av. Campina Grande, s/n, Km 59, Nova Caruaru, Caruaru-PE. CEP: 55014-900. E-mail: bethpastich@yahoo.com.br.

ARTICLE INFO

Recebido 17 Jul 2019
Aceito 06 Ago 2019
Publicado 06 Ago 2019

ABSTRACT

The water bodies pollution, as a consequence of effluents discharge, leads to a search for alternative treatments with lower costs, environmentally sustainable and that respect standard limits. The present article aims to conduct a mini systematic review of the use of aquatic macrophytes in wastewater treatment, analyzing the parameters of the treated effluent and studying the biomass generated. In this sense, national and international studies were evaluated in Google Scholar platform. Removal of nutrients and heavy metals was the most frequently addressed topic in the articles. The results showed the technical viability of the use of macrophytes in wastewater treatment. However, new studies should better address the costs of bio-mass management in the whole system.

Keywords: Biomass, heavy metals, nutrient removal.

RESUMO

A poluição de corpos hídricos por efluentes leva à busca de alternativas de tratamento de baixos custos, sustentáveis e que sejam capazes de adequar os efluentes às exigências legais. Nesse contexto, o objetivo da pesquisa foi realizar uma mini revisão sistemática sobre o uso de macrófitas aquáticas no tratamento de efluentes, abordando aspectos da eficiência de remoção e manejo da biomassa gerada. Para tanto, foram avaliadas publicações nacionais e internacionais na plataforma Google Scholar. O tema mais abordado nos artigos foi a remoção de nutrientes e metais pesados. Os resultados mostraram que a utilização de macrófitas no tratamento de efluentes é tecnicamente viável e promissora no que concerne à remoção de poluentes. O fator limitante ao uso da tecnologia é a elevada quantidade de biomassa gerada. Entretanto, novos estudos devem mostrar, com maior clareza, a influência dos custos do aproveitamento, tratamento e destino final da biomassa.

Palavras-Chave: Biomassa, metais pesados, remoção de nutrientes.

Introdução

A poluição dos recursos hídricos está intimamente relacionada à falta de saneamento adequado, onde efluentes são lançados diretamente em corpos hídricos, ocasionando não só problemas ambientais como também de saúde pública. Dentre os problemas ambientais, a redução dos níveis de oxigênio decorrentes da concentração de poluição por carga orgânica, assim como a proliferação de algas e plantas aquáticas (eutrofização) por conta da presença de nutrientes, são os mais comuns.

Deste modo, é necessário estudar alternativas ambientalmente adequadas para o tratamento de esgotos sanitários, visando a remoção de poluentes e a preservação dos corpos d'água existentes.

Na literatura acadêmica, dada a importância das macrófitas no meio ambiente, diversos estudos têm sido publicados sobre os diferentes papéis ecológicos que elas exercem, tais como a importância na ciclagem de nutrientes (Lu et al., 2018), na manutenção da funcionalidade de ambientes alagados (Agnieszka et al., 2018) e rios

(Tena et al., 2017) e servindo como nicho para abrigo e fonte alimentar de peixes (Grzybkowska et al., 2018). Também são objetos de pesquisa, temas que abordam as estratégias e taxas de captação de carbono pelas macrófitas (Yin et al., 2017), a importância do biofilme natural que se estabelece em suas folhas, caules e raízes e que possuem função no ciclo de nutrientes em ambiente aquático (Pang et al., 2016), entre tantos outros assuntos.

Nesse contexto, o estudo do uso sustentável (cultivo e manejo) de macrófitas aquáticas para o tratamento de águas residuárias vem adquirindo importância crescente e apresentando resultados satisfatórios. A introdução dessas plantas aquáticas auxilia na remoção de nutrientes, tais como N e P, metais pesados, além de outras substâncias, apresentando boa eficiência na remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) (Timm, 2015).

O tratamento de águas residuárias utilizando macrófitas é bastante atrativo devido aos baixos custos operacionais (Lemes et al., 2008). Porém, devido à capacidade fertilizante do N e do P, as macrófitas utilizadas terão o crescimento acelerado, gerando um novo volume de resíduo (biomassa) a ser tratado.

A solução mais simples para o destino final dessa biomassa é a disposição em aterros sanitários. No entanto, em determinadas regiões, essa alternativa pode apresentar um custo bastante elevado, tornando o sistema economicamente desinteressante. Por essa razão, alguns estudos avaliam formas sustentáveis de reaproveitamento da biomassa resultante, tais como: (i) utilização para geração de biogás; (ii) utilização na composição de rações animais; e (iii) tratamento por compostagem para produção de fertilizantes.

Diante do exposto, o estudo visa realizar um estudo sistemático sobre o uso de macrófitas aquáticas no tratamento de esgotos, abordando não somente aspectos de qualidade do efluente tratado, como também o descarte da biomassa gerada, considerando que esse último aspecto é um dos principais limitantes à implantação do processo em escala plena.

Material e Métodos

Na realização da presente revisão sistemática, foram considerados somente os estudos que trataram do uso de macrófitas aquáticas no tratamento de efluentes, considerando a análise dos parâmetros de remoção de poluição e àqueles que apontavam alguma forma de manejo (tratamento, reaproveitamento e destino final) da biomassa resultante.

A pesquisa foi realizada usando o Portal Periódicos-CAPES. Os termos utilizados, em português, foram “tratamento de efluentes” e “macrófitas”. Os termos utilizados, em inglês, foram “wastewater treatment” e “macrophytes”. Somente foram considerados os 100 estudos apontados como mais relevantes pela plataforma Google Scholar, publicados até 2017.

A metodologia aplicada foi a descrita por Khan et al. (2003), que sugerem cinco passos para o direcionamento de uma revisão sistemática. O passo-a-passo consiste em desenvolver os questionamentos que devem guiar a revisão, identificar pesquisas relevantes sobre o tema, avaliar a qualidade das pesquisas identificadas, resumir os dados e, por fim, interpretar os resultados. Os autores afirmam que, antes de iniciar a revisão, devem ser formulados questionamentos claros e estruturados, a fim de guiar o estudo a ser realizado, os quais devem conter uma intervenção, uma população e uma consequência.

Como passo inicial, como orientação para a revisão sistemática, utilizou-se a questão “É viável a utilização de macrófitas no tratamento de efluentes?”. Para selecionar os estudos, estes deveriam envolver pesquisas que analisassem a utilização de macrófitas no tratamento de efluentes, e que apontassem ou considerassem alguma forma de tratamento/disposição para a biomassa produzida. O segundo passo foi a identificação das pesquisas relevantes ao desenvolvimento da revisão. Em uma terceira etapa, a qualidade das pesquisas foi avaliada por meio da formulação de critérios de inclusão e exclusão, com base em questões relevantes para o presente estudo. As questões (Q) a serem analisadas em cada um dos estudos foram as seguintes:

- Q1: Os objetivos do estudo estão claramente expostos?
- Q2: O processo de tratamento com macrófitas é descrito?
- Q3: Os parâmetros de tratamento são apresentados e analisados?
- Q4: Outros métodos de tratamento de efluentes são apresentados?
- Q5: Há discussão sobre o manejo da biomassa?
- Q6: Há estimativas de custos de tratamento?
- Q7: A eficiência de remoção de nutrientes é apresentada?
- Q8: As problemáticas do estudo são apresentadas?

Nas questões acima para “sim”, foi atribuído o valor “1” e, para “não”, foi atribuído o valor “0”. Cada pesquisa teve então um percentual agregado às respostas, onde estudos com o resultado entre 60% - 100% foram considerados e aqueles que obtiveram percentuais abaixo de 60%

foram descartados. De um total de 100 estudos ordenados como mais relevantes (maior número de citações) pela plataforma de pesquisa, 14 estudos nacionais e 47 internacionais foram selecionados e conduzidos para a análise crítica.

A maior parte das pesquisas realizadas, nacionais e internacionais, obteve pontuação percentual maior que 60% e aquelas que não alcançaram este valor foram descartadas. Dos 14 estudos nacionais (no idioma português), 10 foram selecionados para a revisão e, dentre esses, apenas um foi um artigo científico, os demais foram teses e dissertações. Dentre os 47 estudos internacionais, todos artigos de periódicos, 34 foram selecionados para a revisão.

O quarto passo da metodologia foi analisar, criticamente, os estudos selecionados, apontando as diferentes problemáticas encontradas pelos autores e também os dados qualitativos apresentados. O último passo consistiu em avaliar os temas mais estudados, além identificar quais as lacunas a serem preenchidas com novos estudos.

Resultados e Discussão

Características gerais dos estudos

Em relação ao efluente tratado com o uso de macrófitas aquáticas, a maior parte dos estudos teve como foco o tratamento de efluente doméstico real ou de efluente sintético com características semelhantes aos domésticos. Em menor quantidade, foram encontrados estudos sobre o tratamento de efluentes industriais ou de efluentes sintéticos com características semelhantes aos industriais.

A Tabela 1 apresenta um resumo das informações e características dos estudos selecionados para a revisão. É importante destacar que, de 34 estudos, apenas 15 indicaram as possibilidades de manejo das macrófitas após o tratamento, quando este é um dos mais principais fatores limitantes da tecnologia. Entre os estudos com mais de 100 citações, um dos pioneiros foi a revisão bibliográfica de Reddy & Sutto (1984), onde os autores enfatizaram a boa remoção de nitrogênio (70 a 80%) e fósforo (40 a 50%) pela espécie *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, (1883). Adicionalmente, apresentaram dados promissores sobre a possibilidade de manejo da biomassa para ração animal, composto orgânico na

agricultura, produção de papel e fibra, e conversão à biogás por meio de biodigestores.

Oron (1994) realizou experimentos com a macrófita *Lemna gibba* L. (1753), em lagoas rasas (20 a 30 cm de profundidade), para avaliar a eficiência de remoção de nutrientes de efluente doméstico. O tratamento possibilitou o enquadramento do efluente para a agricultura, segundo critérios israelenses, tais como: Sólidos em Suspensão (SS) até 10 mg.L⁻¹, Demanda Química de Oxigênio (DQO) até 100 mg.L⁻¹, Nitrogênio Total (NT) até 25 mg.L⁻¹ e Fósforo Total até 5 mg.L⁻¹. O rendimento anual (matéria seca) de *L. gibba* correspondeu a cerca de 55 ton.ha⁻¹, com um teor de proteína de 30%. O autor afirmou que em termos econômicos e de acordo com o rendimento e teor de proteína, as Lemnas poderiam ser comparadas com a soja.

Na última década, as pesquisas vêm sendo direcionadas ao manejo da biomassa de macrófitas, uma vez que a eficiência em termos de remoção de nutrientes e metais pesados ficou bem comprovada. O estudo Singhal & Rai (2003) abordou a capacidade de fitorremediação das macrófitas *E. crassipes* com relação à lignina e celulose, rica em metais de fábrica de papel e de efluentes altamente ácido oriundos de destilaria. O foco do artigo foi estudar a capacidade de produção de biogás a partir da biomassa residual, após a fitoremediação. A macrófita cultivada com efluentes residuais produziu mais biogás que a cultivada com água, mostrando que o processo poderia ser promissor.

O estudo mais citado neste levantamento foi o de Cheng & Stomp (2009). Os autores afirmaram que as lemnas se configuram em boa fonte de proteínas e amido e, por isso, podem ser utilizadas para a produção de produtos com valor agregado, como ração animal e etanol combustível. A biomassa, nas condições do estudo, apresentou um teor de amido de 45,8% da massa seca. A hidrólise enzimática da biomassa com amilase produziu um hidrolisado com um teor de açúcar redutor correspondente a 50,9% da biomassa da massa seca original. Posteriormente, foi analisado que a fermentação do hidrolisado usando levedura promoveu um rendimento de etanol de 25,8% da biomassa seca. Estes resultados indicam que a biomassa de lemnas pode produzir quantidade significativa de amido que pode ser convertido em etanol.

Tabela 1. Artigos em periódicos selecionados para a revisão sistemática. Fonte: Autores (2019).

ID	Cit.	Referências	Espécies	Manejo (produção)
1	143	Reddy & Sutto (1984)	<i>Eichhornia crassipes</i>	Energia
2	84	Oron et al. (1987)	<i>Lemna gibba</i>	Proteína
3	125	Oron (1994)	<i>L. gibba</i>	Fertilizante e ração

4	200	Singhal e Rai (2003)	<i>E. crassipes</i>	Biogás
5	96	Polomski et al. (2009)	<i>E. crassipes</i> , <i>Pistia stratiotes</i> L. (1753)	-
6	83	Galletti et al. (2010)	<i>Phragmites australis</i>	-
7	205	Cheng & Stomp (2009)	<i>Lemna</i> sp., <i>Spirodella</i> sp., <i>Wolffia</i> sp., <i>Wolffiella</i> sp.	Bioetanol e ração animal
8	21	Mohan et al. (2009)	<i>E. crassipes</i>	-
9	47	Pietrobelli et al. (2009)	<i>Egeria densa</i> Planch. (1849)	-
10	49	Perbangkhem & Polprasert (2009)	<i>Cyperus papyrus</i>	Fibras, culturas energéticas, alimento
11	25	Wu et al. (2010)	<i>Alternanthera philoxeroides</i> (Mart.) Griseb. (1879), <i>S. polyrhiza</i>	Fertilizante
12	24	Bindu et al. (2009)	<i>Colocasia esculenta</i>	-
13	36	Malecki-Brown et al (2010)	<i>Typha domingensis</i> , <i>Najas guadalupensis</i> , <i>Schoenoplectus coliformicus</i>	-
14	49	Di Luca et al. (2011)	<i>T. domingensis</i>	-
15	16	Caselles-Osorio et al. (2011)	<i>Eriochloa aristata</i> , <i>Eleocharis mutata</i>	-
16	27	Idris et al. (2012)	<i>Arundo donax</i> , <i>P. australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud (1841)	Fonte de energia
17	15	Yan et al. (2011)	<i>Canna indica</i> , <i>Juncus minimus</i> , <i>C. alternifolius</i>	-
18	14	Yilmaz & Akbulut (2011)	<i>L. gibba</i> , <i>L. minor</i>	Fertilizante
19	72	Abou-Elela (2012)	<i>Canna</i> , <i>P. australis</i> , <i>C. papyrus</i> L. (1753)	-
20	77	Leto et al. (2013)	<i>C.alternifolius</i> , <i>T. latifolia</i>	-
21	46	Rai et al. (2013)	<i>T. latifolia</i> , <i>P. australis</i> , <i>Colocasia esculenta</i> , <i>Polygonum hydropiper</i> , <i>A. sessilis</i> , <i>P. stratiotes</i>	-
22	12	Brezinová & Vymazal (2014)	<i>Phalaris arundinacea</i> , <i>P. australis</i>	-
23	40	Muradov et al. (2014)	<i>Landoltia punctata</i> , <i>Azolla filiculoides</i>	Petroquímicos
24	3	Tereshchenko et al. (2014)	<i>E. crassipes</i>	Vermicompostagem
25	18	Miranda et al. (2014)	<i>Landoltia punctata</i> , <i>Elodea canadensis</i> , <i>Marsilea quadrifolia</i>	Produção de petroquímicos
26	10	Maroneze et al. (2014)	<i>Lemna</i> sp., <i>E. crassipes</i>	-
27	23	Shah et al. (2015)	<i>E. crassipes</i> , <i>Lemna</i> sp., <i>Pistia</i> sp.	Fertilizante, papel, ração, compostagem, biogás
28	34	Valipour et al. (2015)	<i>E. crassipes</i>	-
29	4	Badejo et al. (2015)	<i>P. karka</i> , <i>Veteveria nigritana</i>	-
30	2	Kouki et al. (2015)	<i>Arundo donax</i> , <i>P. communis</i> , <i>T. latifolia</i>	-
31	4	Maucieri et al. (2016)	<i>P. australis</i>	Produção de energia
32	12	Sarmento et al. (2011)	<i>Cyperus</i> sp.	-
33	2	Rehman et al. (2017)	<i>T. latifolia</i> , <i>P. australis</i>	-
34	1	Kinidi & Salleh (2017)	<i>E. crassipes</i> , <i>L. minor</i> , <i>Ipomea aquatica</i> , <i>P. stratiotes</i> , <i>E. canadensis</i> , <i>Leptodictyum riparium</i> , <i>L. riparium</i>	Biogás, vermicompostagem, papel

Nota: - = ausência da informação no artigo; ID = identificador; Cit. = número de citações.

Entre os nove estudos acadêmicos brasileiros levantados em formato de dissertações de mestrado e teses de doutorado (Tabela 2), apenas quatro foram publicados em periódicos. Entre estes, apenas um dos pesquisadores, o Biudes (2007), continuou a pesquisar sobre a temática de macrófitas, tendo publicado até o momento, sete

artigos em revista científica. Esse resultado, de baixa produtividade em publicações em periódicos, contrasta com a relevância do tema, sobretudo quando se consideram os baixos índices de tratamento terciário de efluentes no Brasil, com um clima bastante favorável à aplicação desta tecnologia.

Tabela 2. Teses e dissertações brasileiras selecionadas para a revisão sistemática. Fonte: Silva, L.A.M. (2019).

ID	Tipo de publicação	Referência	Espécie	Manejo (produção)
1	Dissertação	Tavares (2004)	<i>Lemna</i> sp.	Ração animal
2	Tese	Polisel (2005)	<i>E. crassipes</i> , <i>Lemna</i> sp.	Ração de animais, compostagem
3	Tese	Biudes (2007)	<i>E. crassipes</i>	Valor nutritivo
4	Tese	Curia (2010)	<i>Scirpus</i> sp., <i>Typha</i> sp.	Fertilizante
5	Dissertação	Penariol (2015)	<i>E. crassipes</i>	Ração animal
6	Dissertação	Garcia (2015)	<i>Landoltia punctata</i>	Ração animal, bioetanol

7	Dissertação	Affonseca (2016)	<i>L. minor</i>	Compostagem
8	Dissertação	Smaniotto (2016)	<i>Landoltia punctata</i>	Ração animal, bioetanol
9	Tese	Medeiros (2017)	<i>E. crassipes</i> , <i>L. minor</i>	Ração animal, bioetanol

Nota: ID = identificador.

A Figura 1 mostra o número de artigos publicados por ano, no período de 1984 a 2017. No ano de 2011 houve o maior número de publicações sobre o tema. O artigo brasileiro mais citado foi o de número 9, de autoria de Pietrobelli et al. (2009),

com 47 citações, enquanto o artigo internacional mais citado foi o de número 7 de autoria de Cheng & Stomp (2009), com 205 citações. A numeração dos artigos está indicada na Tabela 1.

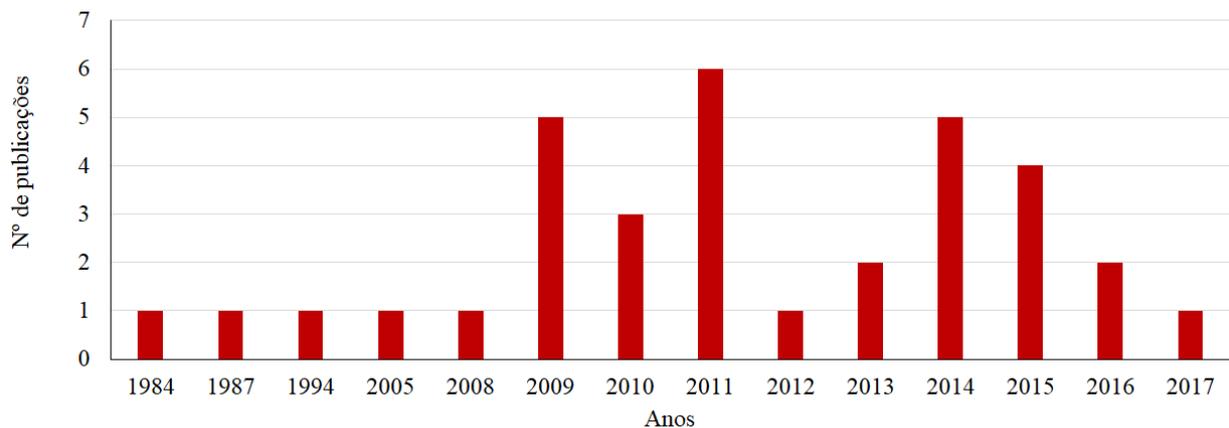


Figura 1. Número de publicações em periódicos por ano (nacionais e internacionais). Fonte: Silva, L.A.M. (2019).

A Figura 2 mostra a distribuição geográfica dos 34 artigos do estudo, com destaque para o continente Asiático, que representou cerca de 44% dos estudos realizados. Dentre os países asiáticos, a maioria dos estudos foram realizados por pesquisadores da China (9%) e Índia (15%),

aproximadamente. As macrófitas aquáticas, se adaptam facilmente às diversas condições climáticas, por isso estão amplamente distribuídas no mundo, o que justifica a ampla distribuição de estudos pesquisando seu potencial de fitorremediação e aproveitamento de biomassa.

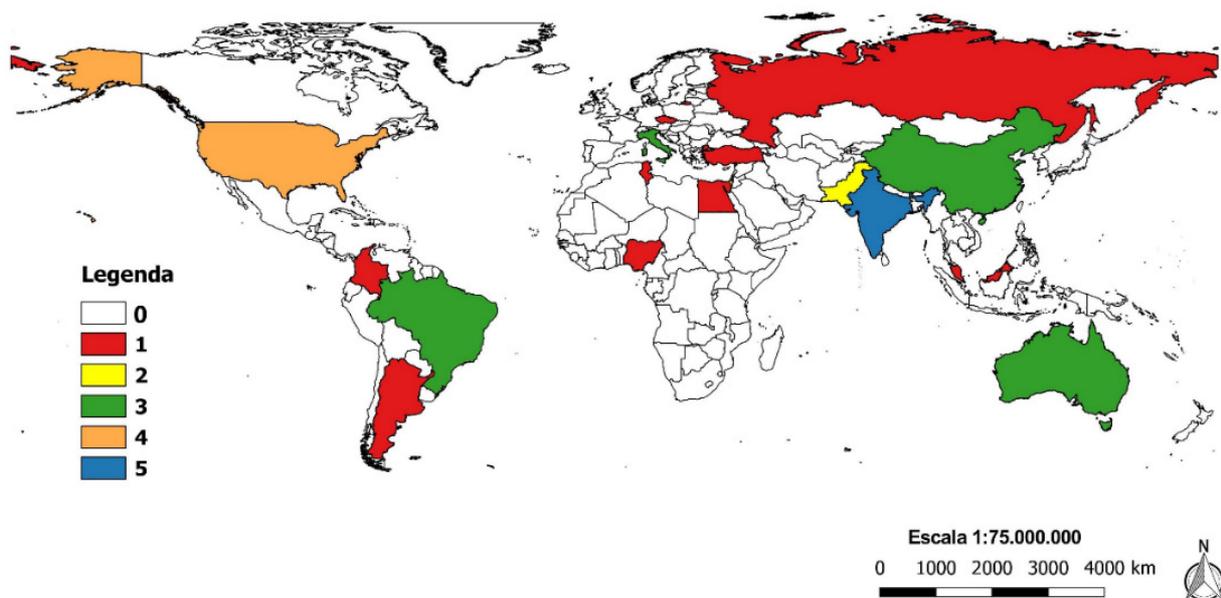


Figura 2. Distribuição geográfica dos artigos produzidos. Fonte: Silva, L.A.M. (2019).

Espécies utilizadas no tratamento

Um total de 42 espécies de macrófitas foram estudadas (Tabela 1 e 2), considerando o

banco de dados selecionado nesta revisão. Destas 42 espécies, foram selecionadas, para a elaboração da Figura 3, apenas aquelas estudadas em dois ou

mais estudos, indicando que a espécie mais estudada foi a *E. crassipes*.

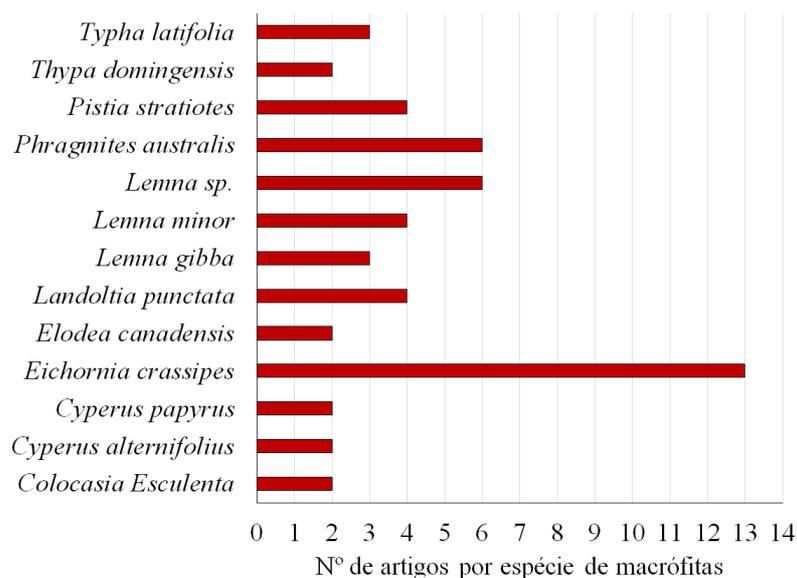


Figura 3. Espécies de macrófitas comumente utilizadas para o tratamento de efluentes. Fonte: Silva, L.A.M. (2019).

Eichhornia crassipes é uma espécie aquática flutuante livre, nativa da América do Sul, distribuída nas regiões tropicais e subtropicais, podem se reproduzir sexuadamente por sementes, que permanecem viáveis durante anos no sedimento de mananciais, ou também se reproduzem de forma assexuada por meio de estolões (Reddy & Sutto, 1984). Essas macrófitas apresentam elevado nível de reprodução, podendo aumentar sua área de cobertura em 15% ao dia, e podendo dobrar a cada seis ou sete dias (Hoyer et al., 1996). Por este motivo, são utilizadas em tratamento de efluentes pois captam nutrientes e outras substâncias da massa líquida de forma bastante eficiente (Singhal & Rai, 2003).

Apesar de muitos estudos indicarem resultados promissores com o emprego das espécies *E. crassipes* e *Lemna minor* no tratamento de efluentes, Polisel (2005) afirma que existem muitos problemas operacionais durante o uso, o que pode aumentar os custos do processo. Segundo Oron (1994), a espécie *L. gibba* seria mais apropriada ao tratamento de esgoto doméstico, em comparação com as espécies *Wolffia arrhiza* e *Spirodela polyrrhiza*, considerando alguns parâmetros, como taxa de crescimento de plantas e eficiência de remoção de nitrogênio.

Parâmetros avaliados nos efluentes

Os parâmetros avaliados no efluente final possuem uma estreita relação com o tipo/origem de efluente tratado. Os estudos que abordaram o tratamento de efluentes industriais, na maioria das vezes, tiveram como objetivo a remoção de metais

pesados. Os estudos sobre o tratamento de efluentes domésticos abordaram a análise de parâmetros físico-químico, tais como pH, turbidez e sólidos suspensos, mas com foco na remoção de carga orgânica (DBO e DQO) e nutrientes.

O estudo onde se obteve maior eficiência na remoção de carga orgânica e nutrientes de esgotos domésticos foi realizado por Idris et al. (2012). O estudo apresentou um sistema de tratamento para efluentes de aquicultura, onde foram utilizadas as espécies *Arundo donax* e *Phragmites australis*. A eficiência de remoção de DBO, sólidos suspensos totais, fósforo total, nitrogênio total foram, respectivamente: (i) 94%, 67%, 96% e 97% (para *A. donax*) e (ii) 95%, 87%, 95% e 98% (para *P. australis*).

O estudo onde se obteve a maior eficiência na remoção de cromo foi realizado por Badejo et al. (2015), tendo apresentado também resultados satisfatórios na remoção de outros metais pesados. O sistema piloto tratou efluentes industriais, utilizando em consórcio as espécies *Phragmites karka*, *Vetiveria nigriflora* e *Canna lilies*. As eficiências de remoção de magnésio e cromo foram 79,7% e 97,9%, respectivamente.

Yilmaz & Akbulut (2011) trataram efluente sanitário utilizando as espécies *L. gibba* e *Lemna minor*, de forma individual e em conjunto. Em conjunto, as espécies se mostraram mais eficientes na remoção de matéria orgânica. Quanto à remoção de metais pesados, a espécie *L. gibba* apresentou as seguintes eficiências: 57%, 60%, 60% e 62%, para cobre, chumbo, níquel e manganês, respectivamente.

A Figura 4 apresenta o número de artigos por parâmetro avaliado, onde é possível constatar que de fato o uso de macrófitas é, em sua maioria, empregado para a remoção de nutrientes. Em segundo lugar, a remoção de metais pesados, seguida da remoção de matéria orgânica.

O mecanismo de remoção de nutrientes em lagoas de macrófitas flutuantes ocorre da seguinte forma: quando existe a presença de elevadas concentrações de nitrogênio e fósforo nos efluentes, as macrófitas os assimilam por meio de

seu sistema radicular. Elas utilizam esses nutrientes para apoiar seu crescimento, além de armazená-los em seus tecidos. Quando o N e o P são completamente removidos da água residual, as macrófitas podem usar a reserva interna para manter seu crescimento por um período de tempo significativo (Cheng & Stomp, 2009). Adicionalmente, um biofilme é formado em seu sistema de radicular, o que viabiliza a remoção de matéria orgânica residual.

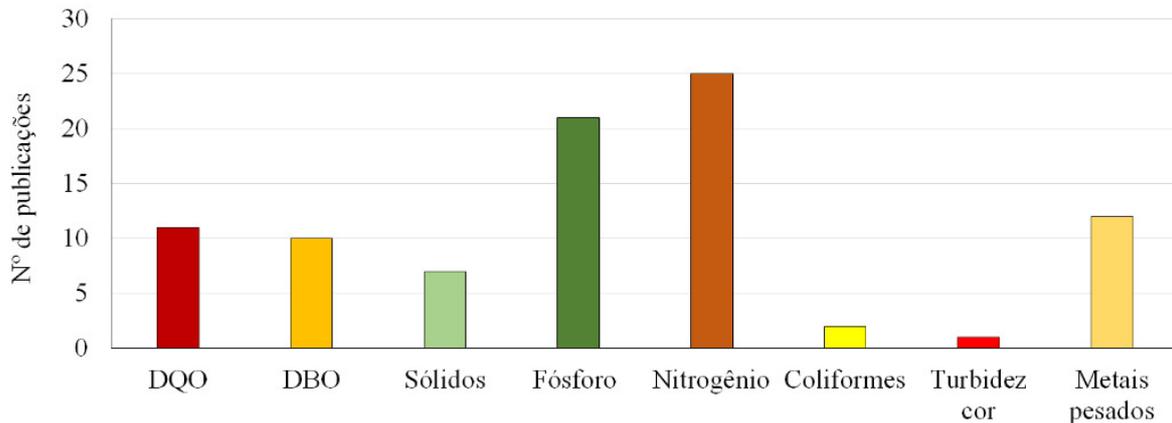


Figura 4. Parâmetros com eficiência de remoção avaliada. Fonte: Silva, L.A.M. (2019).

Manejo da biomassa

Um dos grandes problemas no uso de macrófitas no tratamento de efluentes consiste no elevado crescimento e reprodução das espécies, que geram grandes volumes de biomassa a serem tratados de forma adequada. A Figura 5 apresenta a quantidade de estudos que citam ou avaliam formas de manejo da biomassa. Dentre a amostra total de 34 artigos, 15 apontaram alguma

alternativa para o manejo da biomassa resultante, o que corresponde a, aproximadamente, 44,1%.

As pesquisas nacionais destacaram a utilização da biomassa em produtos agrícolas como fertilizantes ou na composição de rações animais. Nas pesquisas internacionais, o foco foi o aproveitamento do potencial energético da biomassa; uma grande parte dos estudos concentraram-se no reaproveitamento para a produção de etanol e geração de biogás.

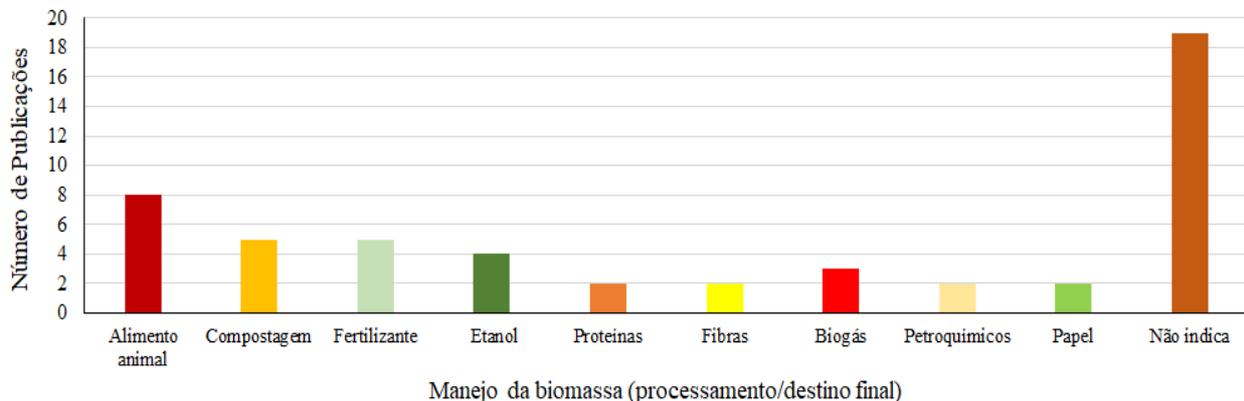


Figura 5. Número de estudo por forma de manejo ou destinação final da biomassa resultante. Fonte: Silva, L.A.M. (2019).

Uma alternativa também promissora está no uso da biomassa para a alimentação de alevinos de tilápias-do-nilo. Tavares (2004) analisou utilização da biomassa de macrófitas do gênero

Lemna sp., em três diferentes condições. A primeira condição utilizou apenas ração comercial na alimentação de alevinos de tilápias-do-nilo, a segunda apenas a biomassa da *Lemna* sp. e a

terceiro utilizou um composto formado por 50% de ração comercial e 50% da biomassa. O autor concluiu que a inclusão da biomassa em um nível de até 50% apresentou bons resultados no ganho de peso dos peixes e uma redução nos custos de produção em até 35%, além de dar destino final adequado à biomassa de macrófitas.

Para Perbangkhem & Polprasert (2009), as vantagens associadas à inclusão de macrófitas aquáticas no tratamento de efluentes, tais como a absorção dos nutrientes e a capacidade de auto depurar o meio por meio do biofilme em suas raízes, podem ser maximizadas com o correto manejo da biomassa. A biomassa gerada tem elevado valor proteico, podendo assim originar novos produtos de valor agregados, como por exemplo, o aproveitamento em ração animal, na produção de combustíveis e na fabricação de papel.

Segundo Cheng & Stomp (2009), as espécies *Spirodela punctata*, *Lemna gibba*, *Lemna minor* apresentam elevado teor protéico, indicando o reuso da biomassa em ração para animais, além de que é considerada uma fonte de matéria-prima para a produção de amido e combustível, como etanol. Miranda et al. (2014) utilizaram as espécies *Landoltia punctata*, *Elodea canadensis* e *Marsilea quadrifolia* em seu estudo e afirmaram que, além de poderem ser utilizadas na produção de biogás e componentes biosólidos, a pirólise dessas plantas gerou inúmeros petroquímicos no estado líquido, incluindo alcanos que podem ser utilizados na produção de diesel ou como um componente do biodiesel.

Muradov et al. (2014) compararam a biomassa resultante de três espécies: *Lemna* sp., *Azolla green* e *Azolla red*. Como resultado da pirólise de cada espécie, *Lemna* sp. mostrou um melhor aproveitamento na conversão para óleos, a *Azolla green* para produtos sólidos, como o biocarvão, e a *Azolla red*, para os componentes gasosos.

Conclusão

Do ponto de vista da eficiência de remoção de nutrientes e metais, a utilização de macrófitas no tratamento de efluentes, domésticos e industriais, é bastante viável. Na otimização do processo, devem ser considerados: a tipologia do efluente a ser tratado, a espécie mais adequada à remoção do poluente-alvo do tratamento e as diferentes taxas de crescimento das espécies. A elevada produção de biomassa em sistemas que utilizam macrófitas é um fator limitante ao processo. Na última década foram intensificados os estudos que avaliaram o potencial da biomassa para produção de biogás, agregando valor ao processo. Muitos estudos, apontam para a utilização da biomassa para ração

animal em fazendas, fazendo assim a ciclagem de nutrientes dentro da mesma propriedade. Outra lacuna a ser preenchida se refere aos custos do tratamento com macrófitas e reaproveitamento da biomassa. Os custos do tratamento e destino final adequados da biomassa resultante devem ser considerados como uma etapa de mesma importância que o próprio tratamento do efluente, pois esses serão determinantes na viabilidade real do uso de macrófitas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco pelo apoio à pesquisa.

Referências

- Abou-elela, S. I.; Hellal, M. S. 2012. Municipal wastewater treatment using vertical flow constructed wetlands planted with *Canna*, *Phragmites* and *Cyprus*. *Ecological Engineering*, v. 47, p. 209-213. doi: 10.1016/j.ecoleng.2012.06.044.
- Affonseca, M. E. P. 2016. Avaliação da viabilidade e aplicabilidade de macrófitas aquáticas para polimento de efluentes de estações de tratamento de esgoto doméstico – Estudo em escala real. Botucatu, Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".
- Agnieszka, E.; Lawniczak, M.; Achtenberg, K. 2018. On the use of macrophytes to maintain functionality of overgrown lowland lakes. *Ecological Engineering*, 113, 52-60. doi: 10.1016/j.ecoleng.2018.02.003.
- Badejo, A. A.; Sridhar, M. K. C.; Coker, A. O.; Ndambuki, J. M.; Kupolati, W. K. 2015. Phytoremediation of Water Using *Phragmites karka* and *Vetiveria nigriflora* in Constructed Wetland. *International Journal of Phytoremediation*, 17, (9), 847-852. doi: 10.1080/15226514.2014.964849.
- Bindu, T.; Sumi, M. M.; Ramasamy, E. V. 2009. Decontamination of water polluted by heavy metals with Taro (*Colocasia esculenta*) cultured in a hydroponic NFT system. *The Environmentalist*, 30, 35–44. doi: 10.1007/s10669-009-9240-6.
- Biudes, J. F. V. 2007. Uso de wetlands construídas no tratamento de efluentes de arcanicultura. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".
- Brezinová, T.; Vymazal, J. 2014. Competition of *Phragmites australis* and *Phalaris arundinacea* in constructed wetlands with

- horizontal subsurface flow – does it affect BOD₅, COD and TSS removal? *Ecological Engineering*, 73, 53–57. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.022.
- Caselles-Osorio, A.; Villafañe, P.; Caballero, V.; Manzano, Y. 2011. Efficiency of Mesocosm-Scale Constructed Wetland Systems for Treatment of Sanitary Wastewater Under Tropical Conditions. *Water Air Soil Pollution*, 220, 161–171. doi: 10.1007/s11270-011-0743-7.
- Cheng, J. J.; Stomp, A. M. 2009. Growing Duckweed to Recover Nutrients from Wastewaters and for Production of Fuel Ethanol and Animal Feed. *Clean*, 37, (1), 17–26. doi:10.1002/clen.200800210.
- Curia, A. C. 2010. Banhados construídos como sistema terciário para reuso da água industrial em uma empresa metal-mecânica. Tese (Doutorado) -UFRGS.
- Di Luca, G. A.; Maine, M. A.; Mufarrege, M. M.; Hadad, H. R.; Sánchez, G. C.; Bonetto, C. A. 2011. Metal retention and distribution in the sediment of a constructed wetland for industrial wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 37, 1267–1275. doi: 10.1016/j.ecoleng.2011.03.003.
- Galletti, A.; Verlicchi, P.; Ranieri, E. 2010. Removal and accumulation of Cu, Ni and Zn in horizontal subsurface flow constructed wetlands: Contribution of vegetation and filling medium. *Science of the Total Environment*, 408, 5097–5105. doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.07.045.
- Garcia, D. C. O. (2015). Avaliação de lagoas de lemnáceas no polimento de esgoto doméstico e produção de biomassa. Dissertação (mestrado) – UEP.
- Grzybkowska, M.; Dukowska, M.; Leszczyńska, J.; Likb, J.; Szczerkowska, E.; Przybylska, M. M. 2018. The influence of hydrological and land use indicators on macrophyte richness in lakes – A comparison of catchment and landscape buffers across multiple scales. *Ecological Indicators*, 28, 227-239. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.02.021.
- Hoyer, M.V.; Canfield Junior, D.E.; Horsburgh, C.A.; Brown, K. 1996 Florida freshwater plants: a handbook of common aquatic plants in Florida lakes. Gainesville: University of Florida, Institute of Food and Agriculture Sciences, 264p.
- Idris, S. M.; Jones, P. L.; Salzman, S. A.; Croatto, G.; Allinson, G. 2012. Evaluation of the giant reed (*Arundo donax*) in horizontal subsurface flow wetlands for the treatment of recirculating aquaculture system effluent. *Environmental Science and Pollution Research*, 9, 1159–1170. doi: 10.1007/s11356-011-0642-x.
- Khan, K.S.; Kunz, R.; Kleijnen, J.; Antes, G. 2003. Five steps to conducting a systematic review. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 96, (3), 118-121. doi:10.1177/014107680309600304.
- Kinidi, L.; Salleh, S. 2017 Phytoremediation of Nitrogen as Green Chemistry for Wastewater Treatment System. *International Journal of Chemical Engineering*, 2017, ID 1961205, 12p. doi: 10.1155/2017/1961205.
- Kouki, S.; Saidi, N.; M’hiri, F.; Hafiane, A. A. 2015. Comparative Study of Nutrients, Cadmium, and Chromium Bioremoval Efficiencies of Three Emergent Macrophytes From a Metal Contaminated Wastewater. *Clean*, 43, (11), 1531–1537. doi: 10.1002/clen.201500054.
- Lemes, J. L. V. B.; Schirmer, W. N.; Caldeira, M. V. W.; Kaick, T. V.; Bárbara, R. R. 2008. Tratamento de esgoto por meio de zona de raízes em comunidade rural. *Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais*, 6, (2), 169-179.
- Leto, C.; Tuttolomondo, T.; Bella, S. L.; Leone, R.; Licata, M. 2013. Effects of plant species in a horizontal subsurface flow constructed wetland – phytoremediation of treated urban wastewater with *Cyperus alternifolius* L. and *Typha latifolia* L. in the West of Sicily (Italy). *Ecological Engineering*, 61, 282–291. doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.014.
- Lu, J.; Bunn, S. E.; Burford, M. A. 2018. Nutrient release and uptake by littoral macrophytes during water level fluctuations. *Science of The Total Environment*, 622–623: 29-40. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.199.
- Malecki-Brown, L. M.; White, J. R.; Brix, H. 2010. Alum application to improve water quality in a municipal wastewater treatment wetland: Effects on macrophyte growth and nutrient uptake. *Chemosphere*, 79, 186–192. doi: 10.1016/j.chemosphere.2010.02.006.
- Maroneze, M.M; Zepka, L.Q.; Vieira, J.G.; Queiroz M.I.; Jacob-Lopes, E 2014. A tecnologia de remoção de fósforo: gerenciamento do elemento em resíduos industriais. *Revista Ambiente & Água*, v.9, n.3. doi: 10.4136/ambi-agua.1403.
- Maucieri, C.; Cavallaro, V.; Caruso, C.; Borin, M.; Milani, M.; Barbera, A. C. 2016. *Sorghum* Biomass Production for Energy Purpose Using Treated Urban Wastewater and Different Fertilization in a

- Mediterranean Environment. Agriculture, 6, (4), 67. doi:10.3390/agriculture6040067.
- Medeiros, M. V. 2017. Policultivo de tambaqui e camarão-da-amazônia: características limnológicas, avaliação do impacto ambiental e tratamento do efluente. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".
- Miranda, A. F.; Muradov, N.; Gujar, A.; Stevenson, T.; Nuggeoda, D.; Ball, A. S.; Mouradov, A. 2014. Application of Aquatic Plants for the Treatment of Selenium-Rich Mining Wastewater and Production of Renewable Fuels and Petrochemicals. Journal of Sustainable Bioenergy Systems, 4, 97-112. doi: 10.4236/jsbs.2014.41010.
- Mohan, S. V.; Mohanakrishna, G.; Chiranjeevi, P.; Peri, D.; Sarma, P. N. 2009. Ecologically engineered system (EES) designed to integrate floating, emergent and submerged macrophytes for the treatment of domestic sewage and acid rich fermented-distillery wastewater: Evaluation of long term performance. Bioresource Technology, 101, 3363–3370. doi:10.1016/j.biortech.2009.12.027.
- Muradov, N.; Taha, M.; Miranda, A. F.; Kadali, K.; Gujar, A.; Rochfort, S.; Stevenson, T.; Ball, A. S.; Mouradov, A. 2014. Dual application of duckweed and azolla plants for wastewater treatment and renewable fuels and petrochemicals production. Biotechnology for Biofuels, 7:30. doi: 10.1186/1754-6834-7-30.
- Oron, G.; Porath, D.; Jansen, H. 1987. Performance of the duckweed species *Lemna gibba* on municipal wastewater for effluent renovation and protein production. Biotechnology and Bioengineering, 29, (2), 258–268.
- Oron, G. 1994. Duckweed culture for wastewater renovation and biomass production. Agricultural Water Management, 26, (1-2), 27–40. doi: 10.1016/0378-3774(94)90022-1.
- Pang, S.; Zhang, S.; Songhe, Lv X. Y.; Han, B.; He, Z. 2016. Characterization of bacterial community in biofilm and sediments of wetlands dominated by aquatic macrophytes. Ecological Engineering, 97, 242-250. doi:10.1016/j.ecoleng.2016.10.011.
- Penariol, I. C. 2015. Parâmetros bióticos e abióticos em tanques de piscicultura tratados com macrófita aquática e perifíton. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".
- Perbangkhem, T.; Polprasert, C. 2009. Biomass production of papyrus (*Cyperus papyrus*) in constructed wetland treating low-strength domestic wastewater. Bioresource Technology, 101, 833–835. doi:10.1016/j.biortech.2009.08.062.
- Pietrobelli, J. M. T. A.; Módenes, A. N.; Fagundes-klen, M. R.; Espinoza-Quiñones, F. R. 2009. Cadmium, Copper and Zinc Biosorption Study by Non-Living *Egeria densa* Biomass. Water, Air, & Soil Pollution. doi:10.1007/s11270-009-9987-x.
- Polisel, K. C. 2005. Desempenho de lagoas de maturação utilizando macrófitas aquáticas e chicaneamento. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo.
- Polomski, R. F.; Taylor, M. D.; Bielenberg, D. G.; Bridges, W. C.; Klaine S. J., Whitwell T. 2009. Nitrogen and Phosphorus Remediation by Three Floating Aquatic Macrophytes in Greenhouse-Based Laboratory-Scale Subsurface Constructed Wetlands. Water Air Soil Pollution, 197, 223-232.
- Rai, U. N.; Tripathi, R. D.; Singh, N. K.; Upadhyay, A.K.; Dwivedi, S.; Shukla, M. K.; Mallick, S.; Singh, S. N.; Nautiyal, C. S. 2013. Constructed wetland as an ecotechnological tool for pollution treatment for conservation of Ganga river. Bioresource Technology, 148, 535–541. doi: 10.1016/j.biortech.2013.09.005.
- Reddy, K. R.; Sutton, D. L. 1984. Water hyacinths for Water Quality Improvement and Biomass Production. Journal of Environmental Quality, 13, (1), 1-7.
- Rehman, F.; Pervez, A.; Mahmood, Q.; Nawab, B. 2017. Wastewater remediation by optimum dissolve oxygen enhanced by macrophytes in constructed wetlands. Ecological Engineering, 102, 112–126. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.01.030.
- Sarmiento A. P., Sarmiento, A. P., Borges, A. C., Matos, A. T. 2011. Evaluation of Vertical-Flow Constructed Wetlands for Swine Wastewater Treatment. Water, Air, & Soil Pollution, 223, (3), 1065–1071.
- Shah, M.; Hashmi, H. N.; Ghumman, A. R.; Zeeshan, M. 2015. Performance assessment of aquatic macrophytes for treatment of municipal wastewater. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 57, (3), 18 - 25. doi: 10.17159/2309-8775/2015/v57n3a3.
- Singhal, V.; Rai, J. P. 2003. Biogas production from water hyacinth and channel grass used for phytoremediation of industrial effluents. Bioresource Technology, 86, (3), 221–225. doi: 10.1016/s0960-8524(02)00178-5.

- Smaniotta, F. 2016. Enriquecimento de amido de biomassa produzida em lagoa de *Lemna* utilizando a espécie *Landoltia punctata*. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".
- Tavares, F. A. 2004. Eficiência da *Lemna* sp. no tratamento de efluentes de suinocultura e sua utilização como fonte alternativa de alimentos de tilápias. Dissertação (Mestrado), UFSC.
- Tena, A.; Vericat, D.; Gonzalo, L. E.; Batalla, R. J. 2017. Spatial and temporal dynamics of macrophyte cover in a large regulated river. *Journal of Environmental Management*, 202, 379-391. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.11.034.
- Tereshchenko, N. N.; Akimova, E. E.; Pisarchuk, A. D.; Yunusova, T. V.; Minaeva, O. M. 2014. Utilizing heavy metal-laden water hyacinth biomass in vermicomposting. *Environment Science Pollution Research*, 22, (9), 7147-7154. doi: 10.1007/s11356-014-3943-z.
- Timm, J. M. 2015. Estudo de casos de wetlands construídos descentralizados na região do Vale do Sinos e Serra Gaúcha. Dissertação (mestrado) – UFRS.
- Valipour, A.; Raman, V. K.; Ahn, Y. H. 2015. Effectiveness of Domestic Wastewater Treatment Using a Bio-Hedge Water Hyacinth Wetland System. *Water*, 7, 329-347. doi:10.3390/w7010329.
- Wu, Y.; Kerr, P. G.; Hu, Z.; Yang, L. 2010. Eco-restoration: Simultaneous nutrient removal from soil and water in a complex residential-cropland area. *Environmental Pollution*, 128, 2472-2477. doi: 10.1016/j.envpol.2010.03.020.
- Yan, R.; Yang, F.; Wu, Y.; Hu, Z.; Nath, B.; Yang, L.; Fang, Y. 2011. Cadmium and mercury removal from non-point source wastewater by a hybrid bioreactor. *Bioresource Technology*, 102, 9927-9932. doi:10.1016/j.biortech.2011.08.049.
- Yilmaz, D. D.; Akbulut, H. 2011. Effect of circulation on wastewater treatment by *Lemna gibba* and *Lemna minor* (floating aquatic macrophytes). *International Journal of Phytoremediation*, 13, 970-984. doi:10.1080/15226514.2010.532242.
- Yin, L.; Li, W.; Madsen, T. V.; Maberly, S. C.; Bowes, G. 2017. Photosynthetic inorganic carbon acquisition in 30 freshwater macrophytes. *Aquatic Botany*, 140, 48-54. doi:10.1016/j.aquabot.2016.05.002.