



Cultivo de microalgas para tratamento de águas residuais: revisão de literatura *Cultivation of microalgae for wastewater treatment: literature review*

Aline Antonia Castro¹, Odorico Konrad¹, Munique Marder¹, Marildo Guerini Filho¹

¹ Universidade do Vale do Taquari, Lajedo, Rio Grande do Sul, Brasil.

Contato: alineantoniacaastro@yahoo.com.br

Palavras-Chave

águas residuais
microalgas
tratamento

RESUMO

O cultivo de microalgas em efluentes é considerado uma ferramenta eficaz, por ser natural e de baixo custo, para assimilação de nutrientes e outros compostos contaminantes do meio, como metais pesados e fármacos, podendo assim ser utilizado como alternativa para o tratamento terciário. Este artigo teve como objetivo apresentar o panorama atual da produção científica sobre o cultivo de microalgas para tratamento de águas residuais, por meio de revisão da literatura. A base de dados usada foi o ScienceDirect. A busca foi realizada no período de julho a setembro de 2019, na presença de termos de pesquisa em palavras-chave de artigos científicos. Foram identificados 623 artigos, dos quais 84 atendiam aos critérios de exclusão e inclusão estabelecidos. Os resultados revelaram que as culturas de microalgas em efluentes mostram-se eficientes na remoção ou diminuição de nutrientes, como o nitrogênio e o fósforo, promovendo redução da DBO, na inibição de coliformes fecais e na remoção de metais pesados. Um grande desafio apontado na produção de microalgas está relacionado com os processos de colheitas. Ainda existem aspectos técnicos que precisam ser desenvolvidos, como o aprimoramento dos métodos de colheita e secagem das microalgas para aproveitamento da biomassa de forma eficiente e rentável. O investimento em pesquisas para a solução desses desafios aumentará a potencialidade do cultivo de microalgas em sistemas de tratamento de águas residuais.

Key-word

waste water
microalgae
treatment

ABSTRACT

The cultivation of microalgae in effluents is considered an effective tool, since it is natural and of low cost, for assimilation of nutrients and other contaminating compounds in the environment, such as heavy metals and drugs, and can thus be used as an alternative for tertiary treatment. This article aimed to present the current panorama of scientific production on the cultivation of microalgae for wastewater treatment, through a literature review. The database used was ScienceDirect. The search was carried out from July to September 2019, in the presence of search terms in keywords of research and review articles. 623 articles were identified, of which 84 met the established exclusion and inclusion criteria. The results revealed that the microalgae cultures in effluents are efficient in the removal or reduction of nutrients, such as nitrogen and phosphorus, promoting a reduction in BOD, in the inhibition of fecal coliforms and in the removal of heavy metals. A major challenge pointed out in the production of microalgae is related to the harvesting processes. There are still technical aspects that need to be developed, such as improving the methods of harvesting and drying microalgae to use biomass efficiently and profitably. Investing in research to solve these challenges will increase the potential of microalgae cultivation in wastewater treatment systems.

Informações do artigo

Recebido: 09 de abril, 2020

Aceito: 19 de agosto, 2020

Publicado: 29 de agosto, 2020

Introdução

Frente ao avanço do crescimento global, surgem preocupações relacionadas com a indisponibilidade de recursos naturais para suprir as emergentes necessidades das sociedades (KUMAR et al., 2018).

A escassez de água é uma realidade em quase todos os países do mundo, mesmo aqueles que possuem um bom potencial hídrico, acabam enfrentando o problema devido à poluição dos mananciais, em virtude do lançamento inadequado e excessivo de águas residuais em corpos hídricos, reduzindo a sua qualidade e danificando os ecossistemas aquáticos (ABDEL-RAOUF; AL-HOMAIDAN; IBRAHEEM, 2012). Rajasulochana e Preethy (2016) relataram que uma das principais causas de mortalidade humana em todo o mundo está relacionada com as doenças infecciosas transmitidas pela água imprópria.

Diante da preocupação com a preservação do meio ambiente e com a saúde pública, surgiram os sistemas de tratamento de água residuárias. Os processos convencionais estão presentes desde os tempos mais antigos, porém, verifica-se que eles são ineficientes ou caros quando se trata de remoção de nitrogênio (N), fósforo (P), metais tóxicos, metais pesados (RAJASULOCHANA e PREETHY, 2016; LAM et al., 2018), e estes elementos acabam sendo lançados nos corpos receptores, cuja capacidade de autodepuração é inferior ao volume depositado (VAN DEN HEND et al., 2011; KUMAR et al., 2018). Assim, estes efluentes, antes do lançamento, necessitam de um tratamento complementar, como, por exemplo, a microfiltração por membrana, adsorção, etc. Estes processos são denominados de tratamento terciário e elevam o custo das instalações, muitas vezes inviabilizando a sua implantação (WALLS et al., 2019).

O cultivo de microalgas em efluentes é considerado uma ferramenta eficaz, por ser natural e de baixo custo, para assimilação de nutrientes e outros compostos contaminantes do meio, como metais pesados e fármacos, podendo assim ser utilizado como alternativa viável para o tratamento terciário (SINGH; PAVANKUMAR; LAKSHMANAN, 2012; TIWARI et al., 2017; RUAN et al., 2019). O potencial de assimilação dá-se por meio do processo de fotossíntese realizado pelas microalgas, que necessitam de compostos presentes nas águas residuais para o seu crescimento (HENKANATTE-GEDERA et al., 2015; RAJASULOCHANA e PREETHY, 2016).

Para Lam et al. (2018), o cultivo de microalgas em águas residuárias tem-se destacado muito no meio científico porque apresenta elevada eficácia na remoção de nutrientes e produção de biomassa para geração de biocombustíveis de terceira geração. As microalgas possuem um elevado potencial para substituir o uso de combustíveis fósseis e, ao mesmo tempo, mitigar o efeito estufa, pela sua capacidade fotossintética de absorver o gás carbônico presente no ar (ZHOU et al., 2012; LAM e LEE, 2012; CHEAH et al., 2018).

Neste contexto, a cultura de microalgas em efluentes vem sendo apontada como uma das formas mais promissoras para o tratamento de efluentes, e geração de produtos, como a produção de biomassa para

biocombustíveis, aliando os aspectos técnicos, econômicos e ambientais (PITTMAN; DEAN; OSUNDEKO, 2011; ZHOU et al., 2014; ROGERS et al., 2014; ROOSTAEI e ZHANG, 2017 HAN et al., 2019).

Este artigo teve como objetivo apresentar o panorama atual da produção científica sobre o cultivo de microalgas para tratamento de águas residuais. Por meio de revisão da literatura, foram abordados temas como o potencial de remoção de poluentes, bem como os métodos de cultivo e colheita, e ainda, os principais desafios e lacunas de conhecimento existentes, para orientação de investigações científicas futuras.

Material e Métodos

Uma revisão da literatura foi realizada por meio de busca eletrônica de artigos científicos, no do Portal Capes/MEC, usando o acesso através da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe). A base de dados usada foi o ScienceDirect (www.sciencedirect.com), na presença de termos de pesquisa em palavras-chave de artigos.

A busca foi realizada no período de julho a setembro de 2019, utilizando como estratégia o operador booleano AND, com a finalidade de aumentar a qualidade dos resultados. Os termos usados para a pesquisa foram “microalgas AND sewage treatment”, resultando em 623 artigos recuperados até o ano de 2019.

Como critérios de inclusão foram considerados o período das publicações de 10 anos (2009 a 2019) e a modalidade de estudos compreendendo artigos de pesquisas e artigos de revisão, resultando em 493 artigos recuperados.

Como critério de exclusão, por meio da leitura do resumo, foi realizada uma triagem para seleção de artigos que abordavam exclusivamente tratamento de efluentes pelo cultivo de microalgas, excluindo aqueles trabalhos que falavam da cultura de microalgas com fins exclusivos para produção de biocombustíveis, resultando então em 84 artigos selecionados.

Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, foi realizada uma leitura integral em todos os documentos selecionados, levantando-se os aspectos relevantes sobre a utilização de culturas de microalgas para tratamento de águas residuárias, bem como os principais resultados revelados nas pesquisas científicas, dentro do universo pesquisado e das restrições devido à própria base de dados, destacando as vantagens, as limitações quanto aos aspectos técnicos e de custo, os processos de produção e ainda as lacunas existentes no meio acadêmico sobre a temática.

Resultados e Discussões

Microalgas

A produção de microalgas atraiu o interesse comercial devido ao seu potencial de ser uma matéria-prima de biocombustível ecologicamente correta, possuindo diversas vantagens em comparação com outras fontes: não competem com outras culturas por terras

produtivas e água doce; podem crescer rapidamente e obter elevado teor de lipídeos (cerca de 20 a 50% em peso seco); possuem a capacidade de fixar dióxido de carbono, reduzindo assim as emissões de gases de efeito estufa e melhorando a qualidade do ar; podem ser usadas como fonte de proteína em ração animal; e podem ser usadas como fertilizante para a agricultura (RUIZ-MARIN; MENDOZA -ESPINOSA; STEPHENSON, 2010; CAI; PARK; LI, 2013).

Para Kumar et al. (2015) e Zhou et al. (2019), o cultivo de microalgas em efluentes residuais apresenta muitos benefícios, dentre os quais pode-se citar a redução de custos extras com remoção de nutrientes e, no caso de produção de biocombustíveis, redução de custos relacionados ao fornecimento de água e nutrientes para o crescimento das culturas microalgais. Segundo Christenson e Sim (2011), os custos da remoção de fósforo em águas residuais por microalgas foram estimados em US \$ 24/ kgP_{removido}, na Flórida. Já os custos de remoção de fósforo pelo processo de precipitação química convencional, foram estimados em aproximadamente US \$ 105 por kg de fósforo removido. No caso de remoção por meio de precipitação utilizando o alumínio, o custo foi estimado em US \$ 87 por kg de fósforo removido.

Ashok et al. (2019) comprovaram a eficiência de remoção de nutrientes de águas residuárias domésticas tratadas secundariamente em fotobiorreatores de microalgas *Chorella vulgaris* e *Chlamydomonas reinhardtii* em diferentes intensidades físico-químicas e de luz. Delanka-Pedige et al. (2019) confirmaram a redução de patógenos com o tratamento de águas residuárias com a microalga *Galdieria sulfuraria*. Os resultados da análise apontaram uma redução de 98% do total de bactérias e remoção completa de *Enterococcus faecalis* e *Escherichia coli*.

Vários estudos verificaram a capacidade de remoção de nutrientes por microalgas em efluentes (ANSARI et al, 2019; LING et al., 2019; HAN et al., 2014; TANG et al., 2018b; NOVOVESKÀ et al., 2016). Três microalgas, *Chlorella sorokiniana*, *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus obliquus*, foram as espécies que mais se destacaram. Resultados apontaram uma eficiência na remoção de nitrogênio e fósforo, respectivamente, de: 98,54% e 97,99% para a *S. obliquus*; 86,93% e 68,24% para a *Chlorella sorokiniana* (GUPTA et al., 2016); e 89,1% e 80,9% para a *Chlorella vulgaris* (LIE et al., 2011).

Métodos de cultivo de microalgas

Segundo Wayne et al. (2018), o êxito no cultivo e produtividade de microalgas, em larga escala e em efluentes sanitários, para produção de biocombustíveis, deve-se a uma variedade de fatores, como taxa de crescimento rápido, tolerância à salinidade, boa capacidade de sedimentação, boas propriedades estruturais, como a resistência ao cisalhamento, além de apresentar características como a elevada concentração de óleos e ácidos graxos saturados.

A seguir estão apresentadas as modalidades aplicadas ao processo de produção de microalgas.

a) Quanto ao sistema de cultura

Quanto ao sistema de cultura, as microalgas podem ser produzidas em culturas suspensas ou culturas imobilizadas. As do tipo suspensas são aquelas formadas por culturas mistas de microalgas que se desenvolvem de forma natural, que ficam em suspensão no meio. A maioria dos processos de produção de microalgas para fins de biocombustíveis utiliza este método (POURKARIM et al., 2019). As culturas suspensas podem desenvolver-se em lagoas abertas ou reatores fechados, denominados de fotobiorreatores.

Galès et al. (2019), estudaram o cultivo de microalgas em condições ao ar livre usando efluentes de águas residuais municipais, em lagoa de alta concentração de algas. Os resultados mostraram que a clarificação da água através do consumo de matéria orgânica por bactérias heterotróficas, nematoides, amebózoos, presentes nos efluentes residuais é um pré-requisito para o rápido crescimento das microalgas. As microalgas em conjunto com as bactérias participaram do esgotamento completo da amônia. A competição resultante pelo amônio (NH₄⁺) aumentaria o nível de eficiência de remoção de carbono orgânico dissolvido (COD) por bactérias e fosfato (PO₄³⁻) por microalgas.

O cultivo de microalgas em suspensão tem sido muito utilizado no tratamento de águas residuais. Porém, existe a necessidade de separação da biomassa, que contribui para a DBO do meio em um percentual de 60 a 90%. A colheita neste tipo de cultivo é considerada como um processo demorado e oneroso devido aos gastos com energia (ZHUANG et al., 2018). Uma alternativa promissora para superar esta situação, são os sistemas de culturas imobilizadas de microalgas (GONÇALVES; PIRES; SIMÕES, 2017; KARAGOZ; BILL; OZKAN, 2019).

As culturas imobilizadas são aquelas onde as microalgas são impedidas de se moverem para todos os lados dentro do sistema, aplicando-se técnicas naturais ou artificiais. Os processos usualmente utilizados são a imobilização por matriz ou imobilização por biofilme de algas. Na imobilização por matriz, as microalgas são confinadas dentro da matriz, normalmente o alginato ou a carragenina, onde ocorre o crescimento das células microalgais através dos poros presentes na matriz (PETER; SCHNURRD; GRANT, 2015).

Os biofilmes de microalgas são estruturas formadas pelo ajuntamento de micro-organismos interligados, principalmente algas, cianobactérias e bactérias heterotróficas, vivendo em simbiose, cujo crescimento dá-se na presença de um substrato sólido (TING et al., 2017; MORENO OSORIO et al., 2019).

Para Tran et al. (2015), os processos que utilizam células imobilizadas são capazes de redução de custos quanto ao cultivo, pois exigem menores volumes de reação, aumentando a produtividade no reator, facilitando a separação da biomassa no meio e as operações de cultivo por um período maior.

Suparmaniam et al. (2019) relatam como vantagens para sistema de microalgas imobilizadas em matriz: remoção eficiente de nutrientes em aplicações de águas residuais; maior produção de hidrocarbonetos, além de aumento do pigmento celular, conteúdo lipídico e

variedade lipídica; e como limitação, relataram o alto custo da matriz de imobilização e projetos ainda em escala laboratorial.

Sukacová; Trtílek; Rataj (2015) estudaram um biofilme de microalgas durante diferentes intensidades de luz, em um fotobiorreator, nove meses por ano, por dois anos, sem interrupção e inoculação. O objetivo do estudo foi avaliar a capacidade de remoção de fósforo. O biofilme de algas foi capaz de remover $97 \pm 1\%$ do fósforo total das águas residuais durante 24 horas de iluminação artificial contínua.

b) Quanto ao modo de crescimento

Quanto ao modo de crescimento, as microalgas podem assumir diferentes tipos de metabolismos e são capazes de uma mudança metabólica como resposta a alterações nas condições ambientais. As principais formas de crescimento são o fotoautotrófico, heterotrófico, mixotrófico e o foto-heterotrófico (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010; ZHAN; RONG; WANG, 2017).

No crescimento fotoautotrófico, as culturas utilizam a luz como a única fonte de energia, que é convertida em energia química através de reações fotossintéticas (CESÁRIO et al., 2018). No cultivo heterotrófico, as microalgas utilizam apenas compostos orgânicos como fonte de carbono e energia. No modo mixotrófico, tem-se a fotossíntese como principal fonte de energia, porém os compostos orgânicos e CO_2 são essenciais para o crescimento. Por fim, no modo foto-heterotrófico, a luz é necessária para usar compostos orgânicos como fonte de carbono (CHEN; ZHAO; QI, 2015; SUPARMANIAM et al., 2019).

Kumar et al. (2018) estudaram o cultivo da *Chlorella vulgaris* utilizando esgoto e gás de combustão. Os resultados mostraram que os nutrientes e poluentes foram removidos até 80%, e que a densidade celular no cultivo em batelada mixotrófica foi maior do que no modo fotoautotrófico. Henkanatte-Gedera et al. (2015) apresentaram resultados que confirmam que o sistema mixotrófico pode reduzir os custos de energia associados ao suprimento de oxigênio nos atuais sistemas de tratamento, e tem o potencial de gerar biomassa com composição mais adequada para a produção de bioenergia.

c) Quanto ao regime de cultura

Os tipos de regimes de crescimento mais utilizados em culturas de microalgas são os cultivos em batelada e o contínuo. No cultivo em batelada, no início do processo de crescimento das microalgas, os nutrientes são depositados no ambiente, e não ocorrem adições posteriores ao cultivo. Neste regime, as microalgas permanecem no meio até o final do processo, até que haja o esgotamento dos nutrientes (GEADA et al., 2017).

No regime contínuo de crescimento, é necessário que se faça a substituição contínua do meio de cultura ao biorreator, igualando à vazão de retirada com a de adição, de forma que o volume se mantenha constante. Nesse tipo de cultivo, as microalgas teoricamente permanecem no estado exponencial de crescimento, se bem operado.

No modo de regime contínuo, a produtividade é de 2,3 a 5 vezes maior que no regime de batelada.

Porém, devido a fatores técnicos e econômicos, o regime em batelada ainda é o mais usado para produção de microalgas em larga escala (WAYNE et al., 2018).

d) Quanto ao método de cultivo

Com relação ao método de cultivo, as microalgas são normalmente cultivadas em sistemas abertos, fechados, escuros e offshore (CHENG et al., 2013; LIU et al., 2013).

As lagoas abertas são o tipo de produção em larga escala mais comumente utilizado na prática. As lagoas de pistas possuem uma roda de pás para permitir a circulação das microalgas e nutrientes em diferentes profundidades. Sua principal vantagem é o baixo custo e a facilidade de construção e operação. Como desvantagens, podem apresentar baixa produtividade devido à mistura ineficiente, zonas escuras, deficiência na assimilação de gás carbônico (CO_2), além de contaminação por outras espécies de microalgas ou bactérias (FARIED et al., 2017).

Os principais benefícios dos sistemas abertos são o baixo investimento, baixa necessidade de energia para a mistura, e uso de energia solar (BALDEV et al., 2018). Segundo Lam et al. (2018), os principais problemas relacionados aos sistemas abertos, é a falta de controle da temperatura, baixa produtividade de biomassa, necessidade de grandes áreas para implantação e a competição das microalgas com outras espécies ou parasitas. Em sistemas abertos, existem basicamente três tipos de processos, que são as lagoas rasas sem agitação, as lagoas circulares e as lagoas de pista de corrida, e sua escolha dependerá do tipo de espécie a ser cultivada, do clima e do custo de terras e água necessárias para o desenvolvimento das culturas (OZKAN et al., 2012).

No sistema fechado os tipos de fotobiorreatores mais usuais são os de tubo vertical, de tubo horizontal ou de tela plana. Os fotobiorreatores apresentam muitas vantagens em relação aos sistemas abertos, como a melhoria no controle de pH, de temperatura, da circulação do efluente, além de propiciar uma melhoria na proteção de contaminação da cultura e aumentar a densidade das células das microalgas (LING et al., 2019). Suas desvantagens estão relacionadas com a acumulação tóxica de oxigênio (O_2), valores impróprios do pH e CO_2 , aquecimento elevado, incrustação biológica nas paredes, além dos custos elevados do equipamento e da operação (TAN et al., 2018; FULBRIGHT et al., 2018).

Para o sistema escuro de crescimento de microalgas, alguns requisitos devem ser requeridos: ausência total de luz; mistura constante a uma taxa de 200 a 480 rotações por minuto; adição de glicose ou acetato; adição de carbono e nutrientes (fósforo e nitrogênio); pH variando de 6,1 a 6,5. Este tipo de cultivo dá-se por metabolismo heterotrófico e possui a vantagem de obter-se maior massa celular de microalgas, devido ao constante fornecimento de carbono em comparação ao CO_2 atmosférico (WAYNE et al., 2015).

Para o sistema de cultivo offshore, usa-se um fotobiorreator flutuante, que é implantado em meio marinho, para onde os efluentes residuais da terra são encaminhados. Os fotobiorreatores flutuantes são ancorados no mar por meio de baias.

O movimento das ondas melhora a turbulência do meio e à exposição à luz. Este método elimina a necessidade de terra e água para o cultivo das microalgas. Uma limitação seria a ocorrência de biocomponentes encrustados nas paredes do fotobiorreator (NOVOVESKÁ et al., 2016).

Métodos de colheita de microalgas

A colheita de microalgas envolve o processo de remoção da biomassa do meio de cultura e representa um custo de 20 a 30% do total de produção. Quando se trata de grandes volumes de biomassas, várias etapas são empregadas e são usados métodos físicos, químicos ou biológicos para proceder com a separação das microalgas da fase líquida (KURNIAWATI; ISMADJI; LIU, 2014)

Dentre os modos de colheitas mais utilizados, têm-se os que incluem a sedimentação, a centrifugação, a filtração, a ultrafiltração, e ainda, caso haja necessidade, etapas adicionais de floculação ou a floculação-flotação.

A finalidade da floculação é a de juntar as células e agregá-las, de forma a facilitar a sedimentação, a centrifugação e a filtração (GERARDO et al., 2015; MUBARAK; SHAIJA; SUCHITHRA, 2019).

A técnica de colheita adequada depende de características de microalgas, como densidade de cultura, tamanho da célula e finalidade da produção. No entanto, nenhum deles foi caracterizado como econômico e apropriado para a produção de microalgas em larga escala (ZHUANG et al., 2016; MANTZOROU; VERVERIDIS, 2019).

Segundo Christenson e Sims (2011), as operações químicas, mecânicas e elétricas, e suas combinações, são os métodos de colheita atualmente mais utilizados. Estão sendo pesquisados métodos biológicos, com a finalidade de redução de custos (KUMAR et al., 2015). Existem polímeros naturais, como a quitosana e o amido catiônico, que podem ser usados como floculantes, com a vantagem de não causar poluição secundária (KURNIAWATI; ISMADJI; LIU, 2014). O Quadro 1 apresenta os principais métodos de colheita, o processo utilizado e as vantagens e desvantagens para cada tipo.

Quadro 1. Método de colheita de microalgas

Método	Tipo	Processo	Vantagens	Desvantagens
Base Química	Floculação e Coagulação Química	Aplicação de Sulfato de alumínio e/ ou Cloreto férrico	Confiabilidade	Inibição da atividade metanogênica específica de bactérias metanogênicas e acetogênicas alimentadas com lodo de águas residuais. Aumento da captação de metais pesados e podendo causar deficiências de fósforo nas plantas.
Base Mecânica	Centrifugação	Centrífugas de disco do tipo bico	Rápido, Confiável, com alto teor de sólidos.	Intensivo em energia, alto custo de investimento e operação (proibitivo em custos para qualquer uso em larga escala).
	Filtração Tangencial	Filtragem por membranas de fluxo tangencial	Confiável, com alto teor de sólidos.	Incrustação de membrana levando a alto custo; requisitos de energia são altos.
	Sedimentação por gravidade		Baixo custo	Lento (grande parte da biomassa pode se deteriorar durante o tempo de decantação).
	Flotação por ar dissolvido	Incremento de ar dissolvido	Comprovado em larga escala	Floculantes geralmente necessários, causando problemas na fase de produção/ crescimento da biomassa(<i>upstream</i>).
Base Elétrica	Eletroforese	As células de algas podem ser concentradas pelo movimento em um campo elétrico.	Nenhuma adição química é necessária	Os altos requisitos de energia e os custos dos eletrodos; não indicado para larga escala.
Base Biológica	Autofloculação	Ocorre em altos níveis de pH	Não causa poluição secundária	Pode não ser possível sua aplicação em todas as águas.
	Biofloculação	Floculação causada por biopolímeros secretados	Não causa poluição secundária	Condições de luz e temperatura também afetem a biofloculação.
	Floculação microbiana	Adição de micróbios floculantes	Não causa poluição secundária	Condições de cultivo (culturas imobilizadas).

Fonte: Adaptado por Christenson; Sim (2011)

As microalgas podem flocular-se espontaneamente sem que haja adições químicas. Estes processos são denominados de autofloculação ou biofloculação. Neste sentido, surge um campo de pesquisas para suprir esta lacuna, uma vez que este processo ajuda a reduzir os custos de colheita. A autofloculação ocorre pelo aumento do pH (8,5 a 9), devido ao consumo de dióxido de carbono dissolvido no meio. A biofloculação é causada por biopolímeros secretados, sendo que as condições de luz e temperatura também podem influenciá-la (SUPARMANIAM, 2019).

Um grande desafio na produção de microalgas está relacionado com os métodos de colheitas (ZHUANG et al., 2016). Como as células das microalgas apresentam um tamanho muito reduzido, a sua recuperação torne-se difícil e onerosa. Por isso, as técnicas de colheita são consideradas como um fato relevante para a determinação dos custos envolvidos no processo de produção

Para evitar que a fotossíntese seja limitada, tendo em vista o rápido crescimento da biomassa, recomenda-se que a colheita seja realizada de forma repetida, em intervalos de tempo menores (ZHOU et al., 2014). Para Shuba e Kifle (2018), encontrar um método de colheita ideal para a recuperação altamente concentrada de biomassa, aliado a custos operacionais moderados, especialmente ligados à energia e manutenção, seria o caminho mais promissor.

Neste sentido, segundo afirmam Barros et al. (2015), o uso de microalgas torna-se não sustentável economicamente devido ao elevado custo associado à colheita. Apesar dos grandes esforços em pesquisa, para Salana et al. (2016), isso se dá pela existência de barreiras na etapa de escolha do método de cultivo e de colheita da biomassa adequadas para cada espécie. Deconinck et al. (2018) relatam que até o momento não foi descrito nenhum processo de colheita que fosse possível sua utilização em larga escala comercial. Para os autores, tal fato é resultado da relevância adotada pelos diferentes aparatos tecnológicos, financeiros e ambientais dispendidos por cada tipo de método, referente à cada uso destinado à biomassa como produto final.

Potencial de remoção de poluentes das águas residuais por microalgas

Nos últimos 30 anos, vários estudos foram desenvolvidos com a finalidade de obter informações envolvendo o cultivo eficiente de microalgas em efluentes, com muitos resultados positivos (CHEN et al., 2011).

O Quadro 2 elenca resultados de pesquisas desenvolvidas que demonstram que as microalgas são capazes de promover a degradação de poluentes ambientais. No tratamento convencional, o fósforo não é removido e isso o torna um método pouco sustentável (BASHAN; BASHAN, 2010).

Mas, no caso do tratamento com microalgas, o fósforo fica incorporado à estrutura da biomassa e totalmente removido dos efluentes residuais (LAM e LEE, 2011; HUANG et al., 2012; LEITE; ABDELAZIZ; HALLENBECK, 2013).

Outra vantagem das microalgas é que o processo não gera lodo, que muitas vezes se torna um desafio a sua disposição (CHEN; ZHAO; QI, 2015).

As culturas de microalgas também são capazes de remover de forma eficiente os metais pesados existentes nos efluentes residuais.

A acumulação de metais nas estruturas das células das microalgas está sendo apontada como um método viável para biorremediação de águas residuais contaminadas. Segundo Abdel-Raouf; Al-Homaidan; Ibraheem (2012), várias espécies de microalgas são eficientes na remoção de quantidades expressivas de íons de metais pesados tóxicos. Vários estudos apontaram a remoção de cobalto, molibdênio, cálcio, magnésio, cobre, zinco, cromo, chumbo e selênio (YUCE; NAZIR; DONMEZ, 2010; TUZEN; SARI, 2010; SINGH; PAVANKUMAR; LAKSHMANAN, 2012).

Os produtos farmacêuticos descartados em esgotos sanitários acabam indo para as estações de tratamento municipais, e os tratamentos convencionais são ineficazes em remover este tipo de poluente, apresentando taxa de remoção na ordem de 5 a 40% (RIGOBELLO et al., 2013; TIWARI et al., 2017).

As pesquisas sobre a remoção de fármacos em águas residuárias ainda se encontram em fase inicial e carece de estudos para desenvolvimento de soluções sustentáveis. A biotecnologia de microalgas para tratamento de efluentes com presença de medicamento tem surgido como uma alternativa viável (ESCAPA, et al., 2015; MATAMOROS, et al., 2015; RUAN et al., 2019).

Escapa et al. (2016) verificaram que a capacidade de remoção de nutrientes por microalgas foi afetada pela presença de diclofenaco.

Três microalgas, *Chlorella sorokiniana*, *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus obliquus*, foram cultivadas em fotobiorreatores sob as mesmas condições controladas, com adição de diclofenaco como forma de nutriente.

Os resultados apontaram que a *S. obliquus* apresentou uma maior eficiência na remoção do diclofenaco, maior que 79%, apontando para a potencial utilização de microalgas para a remoção de fármacos de água residuárias.

Quadro 2. Resultados de pesquisas baseadas no cultivo de microalgas para remoção de nutrientes de águas residuais

Espécie de Microalgas	Nitrogênio %	Fósforo %	Tipos de efluente	DBO	Referência
<i>Golenkinia</i> sp.- SDEC-16	100	100	Esgoto sanitário do campus		Nie et al., 2018
<i>Scenedesmus obliquus</i>	99,0	99,0	Esgoto tratado secundariamente		Ling et al., 2019
<i>Scenedesmus obliquus</i>	81,9 ± 3,8% NH ₄ ⁺ , 100,0% NO ₃ ⁻	94,1±4,7	Esgoto sanitário	71,2 ± 3,5%	Ansari et al., 2019
<i>Scenedesmus obliquus</i>	NH ₄ ⁺ (86,16%)	100	Águas residuais municipais	87,86	Ansari et al., 2018
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	70,0	100	Esgoto sanitário		Han et al., 2015
<i>Chlorella</i> sp., <i>Chlorella ellipsoidea</i> , <i>Scenedesmus bijuga</i> e <i>Scenedesmus quadricauda</i>	41%, 54%, 36%, 56%, , 28%, 63%, 37%, 65%	100	Esgoto sintético		Han et al., 2014
<i>Chlorella thermophila</i> (MF179624)	Amônia (98,48 ± 1,52%), Nitrato (86,37 ± 3,73%)	Fosfato (73,83 ± 4,28%)	Águas residuais de esgoto com baixo conteúdo em nutrientes		Gebremedhin; Mishra; Mohanty, 2018
Microalgas Mistas e culturas de bactérias	72 % (15°C); 83% (25°C)	100	Águas residuais municipais		Delgadillo-Mirquez et al., 2016
Biofilme de algas		97 ± 1%	Águas residuais terciárias		Sukacová; Trtílek; Rataj, 2015
Sistema algas-bacteriana	65,8%	89,3%	Águas residuais domésticas		Tang et al., 2018a
Sistema algas-bacteriana (<i>Chlorella</i> e <i>Scenedesmus</i> e <i>Flavobacterium</i> , <i>Micropruina</i> e <i>Comamonadaceae</i>)	69,91%	94,78%	Águas residuais domésticas		Tang et al., 2018b
Consórcios de bactérias e algas	88%	89%	Águas residuais municipais		Lee et al., 2015
Flocos de <i>Chlorella</i> sp., <i>Pediastrum</i> sp., <i>Phormidium</i> sp. e <i>Scenedesmus</i> sp	87 ± 5%	99 ± 1%	Tratamento secundário de águas residuais		Van Den Hendt et al., 2011
Comunidades bacterianas, microalgal, protozoária e metazoária	>80%	50%	Águas residuais orgânicas e inorgânicas	> 80%	Galès et al., 2019
<i>Galdieria sulphuraria</i> (<i>G. sulphuraria</i>)	94 a 96%	77 a 98%	Águas residuais urbanas (efluente primário)		Henkanatte-Gedera et al., 2015
<i>Galdieria sulphuraria</i> (<i>G. sulphuraria</i>)	46 a 72%	63-89%	Águas residuais urbanas	71-95%	Herkanatte-Gedera et al., 2017
<i>Galdieria sulphuraria</i>	88,3 a 90,5%	95,5 a 98,1%	Águas residuais primárias		Selvaratnam et al., 2014
<i>Scenedesmus obliquus</i> e <i>Chlorella sorokiniana</i>	98,54 ± 3,30% ; 86,93 ± 3,49%	97,99 ± 3,59% ; 68,24 ± 11,69%	Esgoto doméstico bruto	76,13 ± 1,59; 69,38 ± 1,81%	Gupta et al., 2016
<i>Chlorella</i> , <i>Cryptomonas</i> e <i>Scenedesmus</i> .	75%	93%	Águas residuais municipais	92%	Novoveská et al., 2016
<i>Chlorella</i> sp.	93,9% (amônia), 89,1% (nitrogênio)	80,9%	Águas residuais municipais	90,8%	Li et al., 2011

Fonte: Autores (2020)

Conclusão

O presente estudo fez uma análise, por meio de revisão de literatura, sobre o atual campo de pesquisa científica relacionado à biotecnologia de microalgas, cultivadas em águas residuais. A base de dados usada foi o ScienceDirect (www.sciencedirect.com). Os termos usados para a busca foram “microalgas AND sewage treatment”. Após aplicação de termos de exclusão e inclusão, foram selecionados 84 artigos.

Com base nos resultados de pesquisas científicas publicadas, as culturas de microalgas mostram-se eficientes na remoção ou diminuição de nutrientes, como o nitrogênio e o fósforo, na redução da DBO, na inibição de coliformes fecais e na remoção de metais pesados. Outra vantagem das microalgas é que o processo não gera lodo, que muitas vezes se torna um desafio a sua disposição. Quanto à questão da remoção de fármacos, tem-se mostrado como uma alternativa viável, porém, os estudos ainda se encontram em fase inicial e carecem de pesquisas para desenvolvimento de soluções sustentáveis.

Um grande desafio na produção de microalgas está relacionado com os processos de colheitas. Ainda existem aspectos técnicos que precisam ser desenvolvidos, necessitando de mais pesquisas na área para aprimorar os métodos de colheita e secagem das microalgas para aproveitamento da biomassa de forma eficiente e rentável. O investimento em pesquisas para a solução desse desafio aumentará a potencialidade do cultivo de microalgas em sistemas de tratamento de águas residuais.

Limitações do estudo

Este estudo utilizou apenas uma base de dados (ScienceDirect) para coleta de referências de acordo com as palavras-chave utilizadas e no período pesquisado. Sendo este um limitante do universo possível a ser pesquisado, caso ampliadas as bases de pesquisa.

Referências

ABDEL-RAOUF, N.; AL-HOMAIDAN, A.A.; IBRAHEEM, I.B.M. Microalgae and wastewater treatment. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 19, n. 3, p. 257-275, 2012.

ANSARI, A.; RAVINDRAN, B.; GUPTA, S.K.; NARS, M.; RAWAT, I.; BUX, F. Techno-economic estimation of wastewater phycoremediation and environmental benefits using *Scenedesmus obliquus* microalgae. **Journal of Environmental Management**, v. 240, p. 293-302, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.123>

ANSARI, A.; RAVINDRAN, B.; GUPTA, S.K.; NARS, M.; RAWAT, I.; BUX, F. Evaluation of various cell drying and disruption techniques for sustainable metabolite extractions from microalgae grown in wastewater: A multivariate approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 182, n. 1, p. 634-643, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.098>

ASHOK, V.; SHRIWASTAV, A.; BOSE, P.; GUPTA, S.K. Phycoremediation of wastewater using algal-bacterial photobioreactor: Effect of nutrient load and light intensity. **Bioresource Technology Reports**, v. 7, p. 100-205, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100205>

BALDEV, E.; MUBARAKALI, D.; KUMAR, K. S.; ARUTSELVAN, C.; ALHARBI, N. S.; ALHARBI, S. A. Unveiling algal cultivation using raceway ponds for biodiesel production and its quality assessment. **Renew Energy**, v.123, p. 486-498, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.032>

BARROS, A.I.; GONÇALVES, A.L.; SIMÕES, M.; PIRES, J.C.M. Harvesting techniques applied to microalgae: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 1489-1500, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.037> 1364-0321

BASHAN, L.E.; BASHAN, Y. Immobilized microalgae for removing pollutants: Review of practical aspects. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 6, p. 1611-1627, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.043>

CAI, T.; PARK, S.Y.; LI, Y. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 360-369, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.030>

CESÁRIO, M.T; FONSECA, M. M. R. da, MARQUES, M. M.; ALMEIDA, M. C. M. D. de. Marine algal carbohydrates as carbon sources for the production of biochemicals and biomaterials. **Biotechnol. Adv.**, v. 36, n.3, p. 798-817, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.02.006>

CHEAH, W.Y.; SHOW, P.L.; JUAN, J.C.; CHANG, J.; LING, T.C. Microalgae cultivation in palm oil mill effluent (POME) for lipid production and pollutants removal. **Energy Conversion and Management**, v. 174, n. 15, p. 430-438, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.057>

CHEN, G.; ZHAO, L.; QI, Y. Enhancing the productivity of microalgae cultivated in wastewater toward biofuel production: A critical review. **Applied Energy**, v. 137, p. 282-291, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.032>

CHEN, C.; YEH, K.; AISYAH, R.; LEE, D.; CHANG, J. Photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 71-81, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.159>

CHENG, P.; JI, B.; GAO, L.; ZHANG, W.; WANG, J.; LIU, T. The growth, lipid and hydrocarbon production of *Botryococcus braunii* with attached cultivation. **Bioresour. Technol.**, v.138, p. 95-100, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.150>

CHRISTENSON, L.; SIMS, R. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. **Biotechnology Advances**, v. 26, n. 6, p. 686-702, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.05.015>

DECONINCK, N. ; MUYLAERT, K.; IVENS, W.; VANDAMME, D. Innovative harvesting processes for microalgae biomass production: A perspective from patent literature. **Algal Research**, v. 31, p. 469-477, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.01.016>

- DELANKA-PEDIGE, H.MK; MUNASINGHE-ARACHCHIGE, S.P.; CORNELIUS, J.; HENKANATTE-GEDERA, S.M.; TCHINDA, D.; ZHANG, Y.; NIRMALAKHANDAN, N. Pathogen reduction in an algal-based wastewater treatment system employing *Galdieria sulfuraria*. **Algal Research**, v. 39, p. 1201453, 2019.
- DELGADILLO-MIRQUEZ, L.; LOPES, F.; TAIDI, B.; PAREAU, D. Nitrogen and phosphate removal from wastewater with a mixed microalgae and bacteria culture. **Biotechnology Reports**, v. 11, p. 18-26, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.04.003>
- ESCAPA, C.; COIMBRA, R.N.; PANIAGUA, S.; GARCÍA, A.I.; OTERO, M. Comparative assessment of diclofenac removal from water by different microalgae strains. **Algal Research**, v. 18, p. 127-134, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.06.008>
- ESCAPA, C.; COIMBRA, R.N.; PANIAGUA, S.; GARCÍA, A.I.; OTERO, M. Nutrients and pharmaceuticals removal from wastewater by culture and harvesting of *Chlorella sorokiniana*. **Bioresource Technology**, v. 185, p. 276-284, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.004>
- FARIED, M.; SAMER, M.; ABDELSALAM, E.; YOUSEF, R. S.; ATTIA, Y. A.; ALI, A. S. Biodiesel production from microalgae: Processes, technologies and recent advancements. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 893-913, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.199>
- FULBRIGHT, S.P.; ROBBINS-PIANKA, A.; Berg-Lyons, D.; KNIGHT, R.; REARDON, K.F.; CHISHOLM, S.Y. Bacterial community changes in an industrial algae production system. **Algal Res**, v. 31, p. 147-156, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.09.010>
- GALÈS, A.; BONNAFOUS, A.; CARRÉ C.; JAUZEIN, V.; LA NOUGUÈRE; E.; Le Floch, E.; PINOIT, C.; ROQUES, C.; SIALVE, B.; SIMIER, M.; STEYER, J.; FOUILLAND, E. Importance of ecological interactions during wastewater treatment using High Rate Algal Ponds under different temperate climates. **Algal Research**, v. 40, p. 101-508, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101508>
- GEADA, P.; VASCONCELOS, V.; VICENTE, A.; FERNANDES, B. Chapter 13 - Microalgal biomass cultivation. **Algal Green Chemistry**, p. 257-284, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63784-0.00013-8>
- GEBREMEDHIN, G.; MISHRA, S.; MOHANTY, K. Augmentation of native microalgae based biofuel production through statistical optimization of campus sewage wastewater as low-cost growth media. **Journal Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 5, p. 6623-6632, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.08.061>
- GERARDO, M. L.; VAN DEN HENDE, S.; VERVAEREN, H.; COWAD, T, S.C. Habilidade decolheita de microalgas em uma abordagem de biorrefinaria: uma revisão dos desenvolvimentos e estudos de caso de plantas-piloto. **Algal Res.**, v. 11, p. 248-262, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.06.019>
- GONÇALVES, A.L.; PIRES, J.C.M.; SIMÕES, M. A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment. **Algal Research**, v. 24, p. 403-415, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.11.008>
- GUPTA, S.K.; ANSARI, F.A.; SHRIWASTAV, A.; SAHOO, N.K.; RAWAT, I.; BUX, F. Dual role of *Chlorella sorokiniana* and *Scenedesmus obliquus* for comprehensive wastewater treatment and biomass production for bio-fuels. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 255-264, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.040>
- HAN, B.; GOH, H.; CHYUAN, H.; YEE, M.; CHEN, W.; LING, K. Sustainability of direct biodiesel synthesis from microalgae biomass: a critical review. **Renew Sustain Energy Rev**, v.107, p. 59-74, 2019. <https://doi.org/10.5771/9783828870673-59>
- HAN, L.; PEI, H.; HU, W.; JIANG, L.; HAN, F. Integrated campus sewage treatment and biomass production by *Scenedesmus quadricauda* SDEC-13. **Bioresource Technology**, v. 175, p. 262-268, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.100>
- HAN, L.; PEI, H.; HU, W.; HAN, F. SONG, M.; ZHANG, S. Nutrient removal and lipid accumulation properties of newly isolated microalgal strains. **Bioresource Technology**, v. 165, p. 38-41, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.131>
- HENKANATTE-GEDERA, S.M; SELAVARATNAM, T.; CASKAN, N.; NIRMALAKHANDAN, N.; VAN VOORHIES, W.; LAMMERS, Peter J. Algal-based, single-step treatment of urban wastewaters. **Bioresource Technology**, v. 189, p. 273-278, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.120>
- HENKANATTE-GEDERA, S.M; SELAVARATNAM, T.; KARBAKSHRAVARI, M.; MYINT, M.; NIRMALAKHANDAN, N.; VAN VOORHIES, W.; LAMMERS, Peter J. Removal of dissolved organic carbon and nutrients from urban wastewaters by *Galdieria sulphuraria*: Laboratory to field scale demonstration. **Algal Research**, v. 24, p. 450-456, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.08.001>
- HUANG, C.C.; HUNG, J.J.; PENG, S.H.; CHEN, C.N.N. Cultivation of a thermo-tolerant microalga in an outdoor photobioreactor: influences of CO₂ and nitrogen sources on the accelerated growth. **Bioresour Technol**, v. 112, p. 228-238, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.078>
- KARAGOZ, P.; BILL, R.M.; OZKAN, M. Lignocellulosic ethanol production: Evaluation of new approaches, cell immobilization and reactor configurations. **Renewable Energy**, v.143, p. 741-752, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.045>
- KUMAR, P.K.; KRISHNA, S.V.; VERMA, K.; POOJA, K.; HIMABINDU, V. Phycoremediation of sewage wastewater and industrial flue gases for biomass generation from microalgae. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 25, p. 133-146, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.04.006>
- KUMAR, K.; MISHRA, S.K.; SHRIVASTAV, A.; PARK, M.S.; YANG, J. Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 875-885, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.033>
- KURNIAWATI, HÁ; ISMADJI, S.; LIU, J.C. Microalgas colheita por flotação usando saponina natural e quitosana. **Bioresource Technology**, v. 166, p. 429-434, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.079>

- LAM, T.P.; LEE, T.; CHEN, C.; CHENG, J. Strategies to control biological contaminants during microalgal cultivation in open ponds. **Bioresource Technology**, v. 252, p. 180-187, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.088>
- LAM, M.K.; LEE, K.T. Potential of using organic fertilizer to cultivate *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. **Apple Energy**, v. 94, p. 303-308, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.075>
- LAM, M.K.; LEE, K.T. Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME): Win-win strategies toward better environmental protection. **Biotechnology Advances**, v. 29, n. 1, p. 124-141, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.10.001>
- LAM; LEE, T.M; CHEN, C.Y; CHANG, J.S. Estratégias para controlar contaminantes biológicos durante o cultivo de microalgas em lagoas abertas. **Bioresource Technology**, v. 252, p. 180-187, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.088>
- LEE, C.S.; LEE, S.; KO, S.; OH, H.; AHN, C. Effects of photoperiod on nutrient removal, biomass production, and algal-bacterial population dynamics in lab-scale photobioreactors treating municipal wastewater. **Water Research**, v. 68, n. 1, p. 680-691, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.10.029>
- LEITE, G.B.; ABDELAZIZ, A.E.M.; HALLENBECK, P.C. Algal biofuels: challenges and opportunities. **Bioresource Technology**, v. 145, p. 134-141, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.007>
- LI, Y.; CHEN, U.; CHEN, P.; MIM, M.; ZHOU, W.G.; MARTINEZ, B.; ZHU, J.; RUAN, R. Characterization of a microalga *Chlorella* sp. well adapted to highly concentrated municipal wastewater for nutrient removal and biodiesel production. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 5138-5144, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.091>
- LING, Y.; SUN, L.; WANG, S.; LIN, C.S.K.; ZHOU, Z. Cultivation of oleaginous microalga *Scenedesmus obliquus* coupled with wastewater treatment for enhanced biomass and lipid production. **Biochemical Engineering Journal**, v. 148, p. 162-169, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.05.012>
- LIU, T.; WANG, J.; HU, Q.; CHENG, P.; JI, B.; LIU, J.; CHEN, Y. ZHANG, W.; CHEN, X.; CHEN, L.; GAO, L.; JI, C.; Wang, H. Attached cultivation technology of microalgae for efficient biomass feedstock production. **Bioresource Technology**, v. 127, p. 2016-222, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.100>
- MANTZOROU, A.; VERVERIDIS, F. Microalgal biofilms: A further step over current microalgal cultivation techniques. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 3187-3201, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.355>
- MATA, T.M.; MARTINS, A.A.; CAETANO, N.S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 217-232, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- MATAMOROS, V.; GUTIÉRREZ, R.; FERRER, I.; GARCÍA, J.; BAYONA, J.M. Capability of microalgae-based wastewater treatment systems to remove emerging organic contaminants: a pilot-scale study. **J. Hazard. Mater.**, v. 288, p. 34-42, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.02.002>
- MORENO OSORIO, J.H.; PINTO, G.; A. POLLIO; FRUNZO, L.; LENS, P.N.L.; ESPOSITO, G. Start-up of a nutrient removal system using *Scenedesmus vacuolatus* and *Chlorella vulgaris* biofilms. **Bioresour Bioprocess**, v. 6, p. 27, 2019.
- MUBARAK, M.; SHAIJA, A.; SUCHITHRA, T.V. Flocculation: An effective way to harvest microalgae for biodiesel production. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.7, n. 4, p. 103221, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103221>
- NIE, C.; PEI, H.; JIANG, L.; CHENG, J.; HAN, F. Growth of large-cell and easily-sedimentation microalgae *Golenkinia* SDEC-16 for biofuel production and campus sewage treatment. **Renewable Energy**, v. 122, p. 517-525, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.005>
- NOVOVESKÁ, L.; ZAPATA, A.K.M.; Zabolotney, J.B.; ATWOOD, M.C.; SUNDSTROM, E.R. Optimizing microalgae cultivation and wastewater treatment in large-scale offshore photobioreactors. **Algal Research**, v. 18, p. 86-94, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.05.033>
- OZKAN, A.; KINNEY, K.; KATZ, L.; BERBEROGLU, H. Reduction of water and energy requirement of algae cultivation using an algae biofilm photobioreactor. **Bioresource Technology**, v. 114, p. 542-548, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.055>
- PETER J.; SCHNURR D.; GRANT, A. Factors affecting algae biofilm growth and lipid production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 418-429, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.090>
- PITTMAN, J.K.; DEAN, A.P.; OSUNDEKO, O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 17-25, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.035>
- POURKARIMI, S.; HALLAJISANI, A.; ALIZADEHDAKHEL, A.; NOURALISHAHI, A. Biofuel production through micro- and macroalgae pyrolysis – A review of pyrolysis methods and process parameters. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 142, p. 104599, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.04.015>
- RAJASULOCHANA, P.; PREETHY, V. Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – A comprehensive review. **Resource-Efficient Technologies**, v. 2, n. 4, p. 175-184, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.refit.2016.09.004>
- RIGOBELLO, E.S.; DANTAS, A.; DI BERNARDO, L.; VIEIRA, E.M. Removal of diclofenac by conventional drinking water treatment processes and granular activated carbon filtration. **Chemosphere**, v. 92, p. 184-191, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.03.010>
- ROGERS, J.N.; ROSENBERG, J.N.; GUZMAN, B.J.; OH, V.H.; MIMBELA, L.E.; GHASSEMI, A.; BETENBAUGH, M.J.; OYLER, G.A.; DONOHUE, M.D. A critical analysis of paddlewheel-driven raceway ponds for algal biofuel production at commercial scales. **Algal Research**, v. 4, p. 76-88, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.11.007>
- ROOSTAEI, J.; ZHANG, Y. Spatially Explicit Life Cycle Assessment: Opportunities and challenges of wastewater-based algal biofuels in the United States. **Algal Research**, v. 24, p. 395-402, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.08.008>

- RUAN, Y.; WU, R.; LAM, J.C.W.; ZHANG, K., LAM, P.K.S. Seasonal occurrence and fate of chiral pharmaceuticals in different sewage treatment systems in Hong Kong: Mass balance, enantiomeric profiling, and risk assessment. **Water Research**, v. 149, p.607-616, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.010>
- RUIZ-MARIN, A.; MENDOZA-ESPINOSA, L.G.; STEPHENSON, T. Growth and nutrient removal in free and immobilized green algae in batch and semi-continuous cultures treating real wastewater. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 1, p. 58-64, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.076>
- SALAMA, E.S.; JEON, B.H.; KURADE, M.B.; ABOU-SHANAB, R.A.I.; GOVINDWAR, S.P.; LEE, S.H. Harvesting of freshwater microalgae *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella vulgaris* using acid mine drainage as a cost effective flocculant for biofuel production. **Energy Convers Manag**, v. 121, p. 105-112, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.020>
- SHUBA, E.S.; KIFLE, D. Microalgae to biofuels: "Promising" alternative and renewable energy, review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. 1, p. 743-755, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.042>
- SINGH, L.; PAVANKUMAR, A.R.; LAKSHMANAN, R.; RAJARAO, G.K. Effective removal of Cu²⁺ ions from aqueous medium using alginate as biosorbent. **Ecol. Eng.**, v. 38, p. 119-124, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.10.007>
- SUKACOVÁ, K.; TRTÍLEK, M.; RATAJ, T. Phosphorus removal using a microalgal biofilm in a new biofilm photobioreactor for tertiary wastewater treatment. **Water Research**, v. 71, p. 55-63, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.12.049>
- SUPARMANIAM, U.; LAM, M.K.; UEMUR, Y.; LIM, J.W.; LEE, K.T.; SHUIT, S.H. Insights into the microalgae cultivation technology and harvesting process for biofuel production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v 115, p. 109361, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109361>
- TANG, C.; TIAN, Y.; LIANG, H.; ZUO, W.; WANG, Z.; ZHANG J.; HE, Z. Enhanced nitrogen and phosphorus removal from domestic wastewater via algae-assisted sequencing batch biofilm reactor. **Bioresource Technology**, v. 250, p. 185-190, 2018a. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.028>
- TANG, C.; TIAN, Y.; HE, Z.; ZUO, W.; ZHANG J. Performance and mechanism of a novel algal-bacterial symbiosis system based on sequencing batch suspended biofilm reactor treating domestic wastewater. **Bioresource Technology**, v. 265, p. 422-431, 2018b. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.033>
- TAN, X.B., LAM, M.K.; UEMURA, Y.; LIM, J.W.; WONG, C.Y.; LEE, K.T. Cultivation of microalgae for biodiesel production: a review on upstream and downstream processing. **Chin J Chem Eng**, v. 26, p. 17-30, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.08.010>
- TING, H.; HAIFENG, L.; SHANSHAN, M.; ZHANG, Y.; ZHIDAN, L.; N., D. Progress in microalgae cultivation photobioreactors and applications in wastewater treatment: a review. **International Journal Agric Biology Energy**, v. 10, p. 1-29, 2017. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20171001.2705>
- TIWARI, B.; SELLAMUTHU, B.; OUARDA, Y.; DROGUI, P.; TYAGI, R.D.; BUELNA, G. **Review on fate and mechanism of removal of pharmaceutical pollutants from wastewater using biological approach**. **Bioresource Technology**, v. 224, p. 1-12, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.042>
- TRAN, C.; NOSWORTHY, N.; BILEK, M.; MCKENZIE, D. Covalent immobilization of enzymes and yeast: towards a continuous simultaneous saccharification and fermentation process for cellulosic ethanol. **Biomass Bioenergy**, v. 81, p. 234-241, 2015.
- TUZEN, M.; SARI, A. Selenium biosorption from aqueous solution by green algae biomass (*Cladophora hutchinsiae*): equilibrium, thermodynamic and kinetic studies. **Chem. Eng. J.**, v. 158, p. 200-206, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.12.041>
- VAN DEN HENDE, S.; VERVAEREN, H.; DESMET, S.; BOON, N. Bioflocculation of microalgae and bacteria combined with flue gas to improve sewage treatment. **New Biotechnology**, v. 29, n. 1, p. 23-31, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2011.04.009>
- WALLS, L.E.; VELASQUEZ-ORTA, S.B.; ROMERO-FRASCA, E.; LEARY, P.; NOGUEZ, I.Y.; LEDESMA, M.T.O. Non-sterile heterotrophic cultivation of native wastewater yeast and microalgae for integrated municipal wastewater treatment and bioethanol production. **Biochemical Engineering Journal**, v. 151, n. 15, p. 107319, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.107319>
- WAYNE, C.K.; REEN, C.S.; SHOW, P.L.; JIUN, Y.Y.; CHUAN, L.T.; CHANG, L. Effects of water culture medium, cultivation systems and growth modes for microalgae cultivation: A review. **Journal of the Tiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 91, p. 332-344, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.05.039>
- YUCE, M.; NAZIR, H.; DONMEZ, G. Advanced research on a new algae sensor determining aqueous media Pb (II) ions. **Biosens Bioelectron.**, v. 26, p. 321-326, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2010.08.022>
- ZHAN; RONG, J.; WANG, Q. Mixotrophic cultivation, a preferable microalgae cultivation mode for biomass/bioenergy production, and bioremediation, advances and prospect. **International Journal Hydrogen Energy**, v. 42, p. 8505-8517, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.021>
- ZHOU, X.; JIN, W.; TU, R.; GUO, Q.; HAN, S.; CHEN, C.; WANG, Q.; LIU, W.; JENSEN, P.D.; WANG, Q. Optimization of microwave assisted lipid extraction from microalga *Scenedesmus obliquus* grown on municipal wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 221, p. 502-508, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.260>
- ZHOU, W.; LI, Y.; MIN, M.; HU, B.; ZHANG, H.; MA, X.; LI, L.; CHENG, Y.; CHEN, P.; RUAN, R. Growing wastewater-born microalga *auxenochlorella protothecoides* UMN280 on concentrated municipal wastewater for simultaneous nutrient removal and energy feedstock production. **Appl Energy**, v. 98, p. 433-440, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.005>

ZHUANG, L.; YU, D.; ZHANG, J.; LIU, F.; WU, Y.; ZHANG, T.; DAO, G.; HU, H. The characteristics and influencing factors of the attached microalgae cultivation: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 1110-1119, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.006>

ZHUANG, L.; AZIMI, Y.; YU, D.; WANG, W.; WU, Y.; DAO, G.; HU, H. Enhanced attached growth of microalgae *Scenedesmus. LX1* through ambient bacterial pre-coating of cotton fiber carriers. **Bioresource Technology**, v. 218, p. 643-649, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.013>