



***Limnospira Platensis* como Plataforma Multifuncional: Produção de Ficocianina e Biossorção de Contaminante de Preocupação Emergente**

Alenne Prince Junqueira de Moraes¹; Cláudia Maria Luz Lapa Teixeira¹; André Luís de Sá Salomão²

alenne.junqueira@int.gov.br

Laboratório de Biotecnologia de Microalgas, Divisão de Química e Biotecnologia, Instituto Nacional de Tecnologia (INT).

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Maracanã, Rio de Janeiro – Brasil.

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: Outubro de 2025

ACEITO EM: Novembro de 2025

Publicado em: Dezembro de 2025

Resumo: Os contaminantes de preocupação emergente presentes em ecossistemas aquáticos constituem um desafio global para o tratamento de águas residuais e a preservação da qualidade ambiental. Entre esses compostos, o hormônio sintético 17 α -ethinilestradiol (EE2) destaca-se por sua elevada persistência e pela baixa remoção em processos convencionais de tratamento, representando risco potencial à biota e à saúde humana. Nesse contexto, as microalgas têm despertado crescente interesse devido à sua versatilidade biotecnológica, que combina benefícios ambientais e econômicos. Para explorar este potencial, este estudo avaliou a influência de diferentes métodos de secagem da biomassa (lioofilização e estufa) sobre o rendimento de ficocianina, um pigmento proteico de alto valor comercial, produzido pela cianobactéria *Limnospira platensis* e investigou a reutilização do meio de cultivo em dois ciclos sucessivos de produção em escala piloto (fotobioreator 250 L). A liofilização preservou cerca de 35% mais ficocianinas em comparação à secagem em estufa. O meio reciclado sem adição de nutrientes, resultou em maior produtividade e concentração final em biomassa seca, demonstrando a viabilidade do reaproveitamento de recursos para reduzir custos operacionais. A biomassa produzida em meio reciclado apresentou elevada eficiência na remoção do desregulador endócrino 17 α -ethinilestradiol (EE2), evidenciando seu potencial como biossorvente alternativo. Os resultados integram os conceitos de biorrefinaria e economia circular, destacando *L. platensis* como plataforma multifuncional para a produção sustentável de bioproductos e mitigação de contaminantes emergentes.

Palavras-chave: Microalgas, Método de Secagem da Biomassa, Biossorção, Hormônio, Tratamento Terciário de Efluente.

***Limnospira platensis* as a Multifunctional Platform: Phycocyanin Production and Biosorption of an Emerging Contaminant of Concern**

Abstract: Emerging contaminants in aquatic ecosystems represent a global challenge for wastewater treatment and environmental quality preservation. Among these compounds, the synthetic hormone 17 α -ethinylestradiol (EE2) stands out due to its high persistence and low removal efficiency in conventional treatment processes, posing potential risks to aquatic biota and human health. In this context, microalgae have attracted increasing attention for their biotechnological versatility, combining environmental and economic benefits. This study evaluated the influence of different biomass drying methods (freeze-drying and oven-drying) on the yield of phycocyanin, a high-value protein pigment produced by the cyanobacterium *Limnospira platensis* and investigated the reuse of the culture medium in two successive pilot-scale production cycles (250 L photobioreactor). Freeze-drying preserved approximately 35% more phycocyanin compared to oven-drying. The recycled medium without nutrient supplementation resulted in higher productivity and final dry biomass concentration, demonstrating the feasibility of resource recycling to reduce operational costs. The biomass produced in recycled medium also showed high efficiency in removing the endocrine-disrupting compound 17 α -ethinylestradiol (EE2), highlighting its potential as an alternative biosorbent. The results integrate the concepts of biorefinery and circular economy, positioning *L. platensis* as a multifunctional platform for sustainable bioproduct production and the mitigation of emerging contaminants.

Keywords: Biomass drying method, *Limnospira platensis*, Biosorption, 17 α -ethinylestradiol hormone, Tertiary wastewater treatment.

Limnospira Platensis como Plataforma Multifuncional: Producción de Ficocianina y Biosorción de Contaminantes Emergentes de Preocupación

Resumen: Los contaminantes de preocupación emergente presentes en los ecosistemas acuáticos constituyen un desafío global para el tratamiento de aguas residuales y la preservación de la calidad ambiental. Entre estos compuestos, la hormona sintética 17α -etinilestradiol (EE2) se destaca por su alta persistencia y baja eliminación en los procesos de tratamiento convencionales, representando un riesgo potencial para la biota y la salud humana. En este contexto, las microalgas han despertado un creciente interés debido a su versatilidad biotecnológica, que combina beneficios ambientales y económicos. Este estudio evaluó la influencia de diferentes métodos de secado de la biomasa (liofilización y secado en estufa) sobre el rendimiento de ficocianina, un pigmento proteico de alto valor comercial producido por la cianobacteria *Limnospira platensis*, y examinó la reutilización del medio de cultivo en dos ciclos sucesivos de producción a escala piloto (fotobioreactor de 250 L). La liofilización conservó aproximadamente un 35 % más de ficocianina que el secado en estufa. El medio reciclado, sin nutrientes añadidos, resultó en una mayor productividad y concentración final de biomasa seca, lo que demuestra la viabilidad de reutilizar recursos para reducir los costos operativos. La biomasa producida en medio reciclado mostró además una alta eficiencia en la eliminación del disruptor endocrino 17α -etinilestradiol (EE2), evidenciando su potencial como biosorbente alternativo. Los resultados integran los conceptos de biorrefinería y economía circular, destacando a *L. platensis* como una plataforma multifuncional para la producción sostenible de bioproductos y la mitigación de contaminantes emergentes.

Palabras clave: Método de secado de la biomasa, *Limnospira platensis*, Biosorción, Hormona 17α -etinilestradiol, Tratamiento terciario de efluentes.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por corantes naturais em diversos setores industriais, como alimentos e cosméticos, torna a exploração de pigmentos de fontes microbianas altamente relevante (Aman Mohammadi *et al.*, 2022). Esse interesse é impulsionado pela crescente conscientização dos consumidores quanto ao uso de ingredientes naturais e seguros, além das restrições a corantes sintéticos devido a impactos ambientais e riscos à saúde (Islam *et al.*, 2025). Algumas espécies de cianobactérias constituem uma fonte sustentável de pigmentos bioativos, alinhando-se aos esforços globais voltados ao desenvolvimento de economias baseadas em recursos biológicos e à redução da dependência de alternativas sintéticas.

A cianobactéria *Limnospira platensis* (anteriormente conhecida como *Arthrosphaera* ou *Spirulina*) destaca-se por apresentar uma ampla variedade de compostos com propriedades nutricionais, farmacológicas e biotecnológicas (Spínola, *et al.*, 2024). Sua biomassa é composta por cerca de 60 a 70% de proteínas, constituindo uma importante fonte de aminoácidos, ácidos graxos essenciais, lipídios, minerais, vitaminas e pigmentos, como β -caroteno e ficobiliproteínas. Essa composição diversificada desperta grande interesse para aplicações em processos de biorrefinaria (Araújo *et al.*, 2021; Vigani, 2020).

Dentre os bioativos produzidos por *L. platensis*, a ficocianina destaca-se como o composto de maior relevância comercial. Trata-se de um pigmento proteico com ampla aplicabilidade industrial, podendo ser empregado como corante natural em cosméticos e



alimentos (Chwil et al., 2024). Além disso, apresenta propriedades terapêuticas associadas às suas ações antioxidante e anti-inflamatória, despertando crescente interesse também por parte da indústria farmacêutica (Zhao et al., 2025). Estima-se que o mercado global de ficocianina apresente um crescimento superior a 9,4% entre 2021 e 2029, ultrapassando US\$ 400 milhões ao final desse período; em 2020, esse mercado já havia atingido a marca de US\$ 140,67 milhões (Exactitude Consultancy, 2022).

A investigação de diferentes métodos de secagem e da reutilização do meio de cultivo contribui para a otimização do uso de recursos, possibilitando processos produtivos mais eficientes e economicamente viáveis, aspectos cruciais para a viabilidade em escala industrial. Além disso, a avaliação da biomassa cultivada em meio reciclado como bioassorvente alternativo reforça o potencial de integração em um sistema de biorrefinaria de microalgas, no qual múltiplos bioproductos de alto valor agregado pode ser obtidos de forma circular e sustentável (Moraes et al., 2025).

Nesse contexto, a utilização de biomassa de microalgas, particularmente de espécies como *L. platensis*, tem se mostrado uma estratégia promissora para aliar a produção de biocompostos de alto valor agregado com a mitigação de contaminantes de preocupação emergente (CEs). O aproveitamento da biomassa proveniente de cultivos realizados em meios de baixo custo, como aqueles obtidos por reciclagem do meio, amplia a aplicabilidade desses microrganismos dentro do conceito de biorrefinaria de microalgas, promovendo uma abordagem alinhada aos princípios da economia circular (Marra et al., 2024). Além de agregar valor aos subprodutos do cultivo, o uso dessa biomassa como bioassorvente alternativo representa uma solução sustentável e de baixo custo para a remoção de CEs, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente responsáveis (Rabello et al., 2019).

Assim, o presente estudo teve como objetivos: (i) avaliar o reciclo do meio de cultura como estratégia para redução dos custos de produção; (ii) comparar diferentes métodos de secagem da biomassa (estufa e liofilização) e seus efeitos sobre a eficiência de extração da ficocianina; e (iii) investigar o potencial da biomassa cultivada em meio reciclado como bioassorvente alternativo para a remoção do desregulador endócrino 17 α -etinilestradiol (EE2). O EE2 é um desregulador endócrino frequentemente detectado em ecossistemas aquáticos, resistente aos processos convencionais de tratamento de águas residuais, e representa riscos significativos à saúde ecológica e humana (Sabino et al., 2021; Salomão et al., 2014).

MATERIAL E MÉTODOS

Condições de Cultivo

A cianobactéria *Limnospira platensis* (Gomont) K.R.S. Santos & Hentschke foi gentilmente cedida pelo Departamento de Biologia Marinha da Universidade Federal Fluminense (UFF). Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Biotecnologia de Microalgas (LABIM), do Instituto Nacional de Tecnologia (INT), onde a cepa foi mantida em meio Zarrouk modificado, conforme descrito por George (1976). O preparo do inóculo para os cultivos em garrafas de 5 L foi realizado em frascos Erlenmeyer de 500 mL contendo 300 mL de cultura. As culturas foram mantidas por sete dias em mesa agitadora orbital a 150 rpm, sob intensidade luminosa de 600 $\mu\text{mol fôtons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ e temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$. Posteriormente, as suspensões celulares das garrafas foram utilizadas como inóculo para o cultivo em fotobioreator com capacidade de 250 L. Foram realizados dois ciclos de cultivo em batelada simples, mantidos sob iluminação e aeração constantes até atingirem a fase estacionária (Figura 1). O segundo ciclo foi conduzido com o objetivo de avaliar a viabilidade da reutilização do meio de cultivo, visando à redução dos custos operacionais.

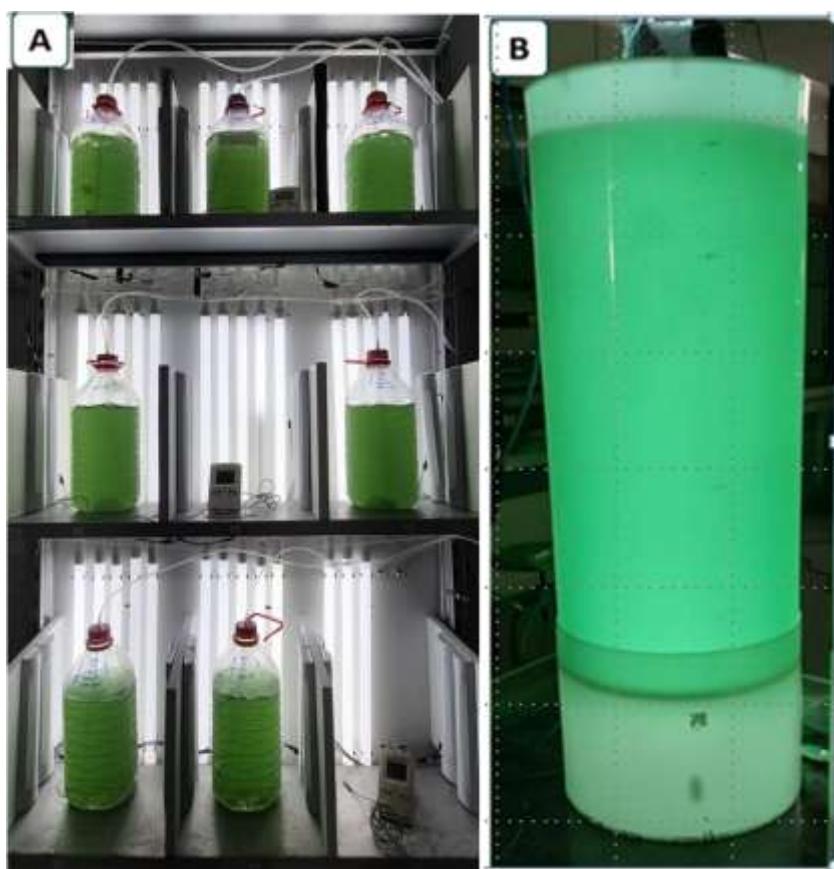


Figura 1: Cultivo de *Limnospira platensis* em garrafas de 5 L (A) e em fotobioreator de 250 L (B).
Fonte: Elaboração própria

Acompanhamento do Crescimento Celular

O crescimento celular foi acompanhado por medidas de densidade óptica (D0730nm), determinado por espectrofotômetro Spectrum (SP-1105). Foi efetuada leitura de absorbância em 730 nm, comprimento de onda que permite uma correspondência entre a densidade óptica e a densidade celular.

Para determinar a concentração em massa seca ao final do cultivo foi realizada a filtração a vácuo de 30 mL de suspensão celular, utilizando-se membrana de fibra de vidro (poro 0,7 – 1,4 µm, GF/P, Sartourius ®), pesada previamente em balança analítica de precisão (Shimadzu – AY220). As membranas com as células filtradas foram lavadas com 30 mL de água destilada para remoção de sais e secas em uma balança determinadora de umidade (MB 45, OHAUS), a 105 °C, e após seu resfriamento foram pesadas novamente em balança analítica de precisão. A massa seca foi obtida a partir da subtração da massa da membrana com a biomassa seca pela massa da membrana. A partir da massa seca, foi calculada a concentração em biomassa seca (C) da cultura, de acordo com a Equação (1):

$$\text{Equação 1: } C = \frac{(M_f - M_i) \times 1000}{V}$$

Onde, M_f corresponde à massa final da membrana seca (g) após a filtração, M_i é a massa inicial da membrana (g) e V é o volume de cultura utilizado na filtração (mL), sendo o resultado expresso em g·L⁻¹.

Coleta e Secagem da Biomassa

A coleta da biomassa ao final do cultivo foi realizada por filtração em tela de nylon (Tegape) com poros de 5 µm. Em seguida, a biomassa retida foi lavada com água destilada para remoção de sais residuais. Com o objetivo de comparar diferentes métodos de secagem quanto à preservação da integridade da biomassa e do pigmento proteico (ficocianina), uma fração da biomassa foi congelada para posterior liofilização, enquanto outra foi distribuída em placas de Petri, em volumes correspondentes a 500 mL de suspensão filtrada, e seca em estufa com circulação de ar a 45 °C por 6 horas.

Extração de Ficocianina

A determinação da concentração de ficocianina foi realizada na biomassa seca, obtida por liofilização e por secagem em estufa do primeiro ciclo de cultivo, utilizando o método de congelação/descongelamento (CD). O tampão fosfato (0,01 M), empregado como solvente na



Limnospira Platensis como Plataforma Multifuncional: Produção de Ficocianina e Biossorção de Contaminante de Preocupação Emergente

extração, foi preparado com água destilada e os sais de grau analítico fosfato dissódico dihidratado ($\text{Na}_2\text{HPo}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e fosfato monossódico monohidratado ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Os sais foram dissolvidos sob agitação magnética, e o pH foi ajustado para 7,4 com HCl 1,0 M ou NaOH 1,0 M. A extração foi conduzida na razão sólido-líquido de $25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ($n = 3$). A mistura foi agitada em vortex, mantida em congelador por 24 h e, em seguida, incubada em banho-maria a 27°C por 2 horas. Posteriormente, as amostras foram centrifugadas a 2607 g por 20 min a 4°C . O sobrenadante foi coletado e sua absorbância determinada em espectrofotômetro Genesys 10S UV-Vis (Thermo Scientific), no modo varredura entre 470 a 750 nm. Foram realizados dois ciclos de congelamento/descongelamento (CD).

O cálculo da concentração de ficocianina foi realizado considerando os seguintes parâmetros: concentração de ficocianina no extrato ($C - PCe$; $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$), concentração na biomassa ($C - PC$; $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) e produtividade de ficocianina ($C - PCp$; $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), obtidas por meio das Equações 2–4, conforme Bennett e Bogorad (1973).

$$\text{Equação 2: } C - PCe = \frac{(A_{615} - 0.474 * A_{652})}{5.34}$$

$$\text{Equação 3: } C - PC = \frac{(C - PCe * V)}{m}$$

$$\text{Equação 4: } C - PCp = \frac{(C - PC * X)}{t}$$

A soma dos valores de concentração da ficocianina na biomassa ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), obtidos nos ciclos de extração, foi calculada para considerar a concentração total de ficocianina na biomassa. A_{615} e A_{652} correspondem às absorbâncias em 615 e 652 nm, respectivamente; V o volume usado na extração (mL); X a concentração final de biomassa ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) e t o tempo de cultivo (d). As análises estatísticas foram realizadas usando ANOVA bidirecional seguido pelo teste post-hoc de Bonferroni ($p < 0,05$).

Ensaios da Avaliação da Capacidade Sortiva da Biomassa

O padrão analítico do hormônio 17α -etinilestradiol (EE2) ($\geq 99,0\%$, CAS 57-63-6) foi fornecido pela Sigma-Aldrich. A solução padrão foi preparada por dissolução em metanol e armazenada a 10°C para posterior utilização nos ensaios de biossorção, nas diluições apropriadas.

Os ensaios para avaliação do potencial biossortivo da biomassa seca de *L. platensis* foram conduzidos com biomassa obtida do segundo ciclo de cultivo (meio de cultura reutilizado).



Os experimentos foram realizados em triplicata, em frascos Erlenmeyer de 125 mL contendo 50 mL de água Milli-Q, nos quais o contaminante foi avaliado em concentrações baseadas em valores reportados para sua ocorrência em matrizes aquáticas e em efluentes (tratados ou não) (Floripes et al., 2018).

Os parâmetros experimentais adotados foram: concentração de biomassa de 0,6 g·L⁻¹, pH 7, agitação a 200 rpm, temperatura de 27 °C e concentração do contaminante-alvo (EE2) variando de 10 a 200 µg·L⁻¹ (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 100 e 200 µg·L⁻¹), totalizando 10 pontos, além de dois controles experimentais: um sem adição de biomassa de microalga (atenuação natural) e outro sem adição do contaminante.

Após 20 h de contato, as amostras foram filtradas com filtros de seringa de 0,20 µm (Millex®-LG, Merck), e o filtrado foi armazenado em frascos (vials) para análise cromatográfica. Devido à elevada turbidez das amostras, foi necessária uma etapa adicional de centrifugação da suspensão a 2607 g por 10 min. A identificação e quantificação do EE2 foram realizadas por meio de cromatografia líquida de ultra-performance (Waters ACQUITY®), acoplada à espectrometria de massas in tandem (Xevo TQD®) e triplo quadrupolo (UPLCMS/MS Waters).

Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A avaliação dos aspectos morfológicos da biomassa obtida do primeiro e segundo ciclo de cultivo foi realizada por micrografias com o auxílio de microscópio eletrônico de varredura (MEV). As análises foram conduzidas no Centro de Caracterização em Nanotecnologia para Materiais e Catálise do Instituto Nacional de Tecnologia (CENANO/INT).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Crescimento Celular e Produção de Biomassa

O cultivo de *L. platensis* foi monitorado por 18 dias, dividido em dois ciclos, ambos acompanhados até a fase estacionária. O primeiro ciclo teve duração de 10 dias, enquanto o segundo ciclo se estendeu por 8 dias e foi realizado utilizando o meio residual do primeiro ciclo, por recirculação, sem adição de nutrientes e sem procedimentos de desinfecção ou esterilização. Ambos os ciclos iniciaram com densidade óptica a 730 nm de 0,14 ± 0,013. Foi observado um aumento na produtividade durante o segundo ciclo, resultando em uma concentração final em massa seca superior à do primeiro ciclo ($p < 0,05$), alcançada em menor tempo de cultivo. A produtividade diária em biomassa foi de 0,056 g·L⁻¹·d⁻¹ no primeiro ciclo e de 0,074 g·L⁻¹·d⁻¹ no segundo ciclo.



Limnospira Platensis como Plataforma Multifuncional: Produção de Ficocianina e Biossorção de Contaminante de Preocupação Emergente

A estratégia de reciclagem do meio combina a diluição da cultura com a reutilização do mesmo, permitindo o aproveitamento de nutrientes não consumidos e promovendo uma economia significativa de água (Veiga, 2016). Entretanto, a maioria dos estudos concentra-se em escalas laboratoriais e utiliza inóculo fresco em meios reciclados, sem investigar a viabilidade de estratégias que dispensem a inoculação contínua, gerando incertezas quanto à escalabilidade para cultivos contínuos ou semicontínuos (Marra *et al.*, 2024).

Nesse contexto, o presente estudo avaliou a reutilização do meio de cultura sem a adição de novo inóculo, considerando apenas as células remanescentes após a coleta por filtração. Essa abordagem provocou alterações na estrutura populacional, favorecendo a predominância de filamentos mais curtos, em concordância com Depraetere *et al.* (2015). No entanto, tais alterações morfológicas não impactaram negativamente a taxa de crescimento; ao contrário, a predominância de filamentos mais curtos pode ter favorecido a penetração de luz e a absorção de nutrientes, aumentando a produtividade. Esses resultados indicam que a reutilização do meio constitui uma estratégia viável para otimizar o cultivo sem comprometer o rendimento celular.

Método de Secagem e Extração de Ficocianina

Este estudo avaliou a influência dos métodos de secagem sobre o rendimento de ficocianina, com o objetivo de aplicação de estratégias de produção mais eficientes e economicamente viáveis. Para tanto, a biomassa foi submetida a dois métodos de secagem: por liofilização e por secagem em estufa com circulação de ar. A extração de ficocianina por ciclos de congelamento e descongelamento (CD) mostrou-se eficiente, permitindo a recuperação dos pigmentos de interesse de forma econômica e sem a necessidade de aditivos químicos. Foi observado que a concentração de ficocianina foi maior no segundo ciclo de CD. Além disso, o método de secagem influenciou significativamente o teor do pigmento, sendo que a biomassa seca em estufa apresentou uma redução de aproximadamente 35% em comparação com as amostras liofilizadas (Figura 2).



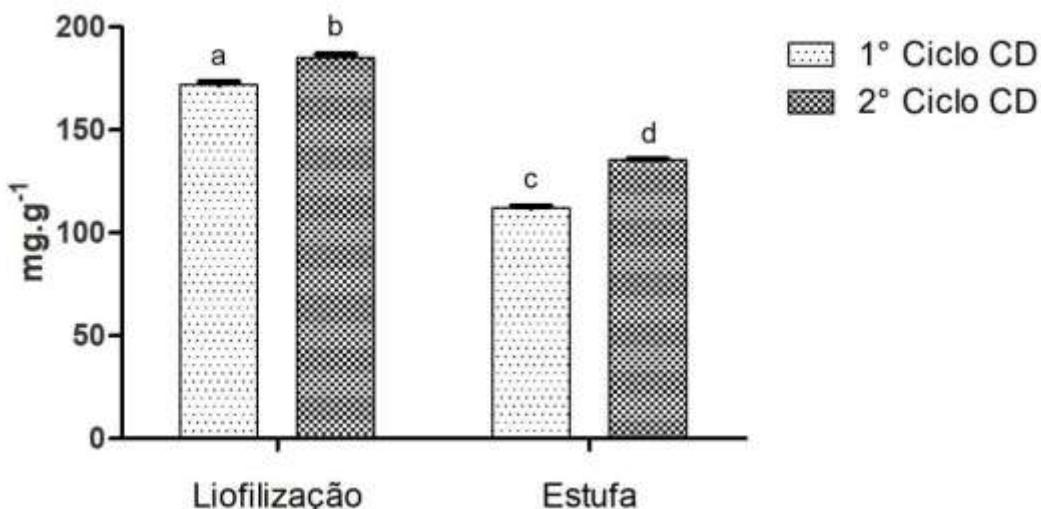


Figura 2: Representação gráfica da extração de ficocianina das biomassas de *Limnospira platensis* obtidas de dois ciclos de congelamento/descongelamento (CD), secas por liofilização e em estufa.

Nota: Diferenças significativas entre as médias dos tratamentos ($p < 0,05$) são indicadas por letras distintas.

Fonte: Elaboração própria

Esses resultados corroboram estudos anteriores que indicam que a liofilização preserva melhor a integridade das ficobiliproteínas, enquanto métodos térmicos, como a secagem em estufa, podem induzir degradação dos pigmentos proteicos (Demarco, 2020). A maior preservação do pigmento em biomassa liofilizada é particularmente relevante para aplicações industriais que exigem alto grau de pureza e estabilidade, como na produção de corantes naturais para alimentos, cosméticos e produtos farmacêuticos.

Portanto, a escolha do método de secagem não apenas influencia o rendimento de ficocianina, mas também afeta a viabilidade econômica e a sustentabilidade do processo. A liofilização, embora apresente custos operacionais mais elevados, pode ser recomendada em cenários nos quais a qualidade e a estabilidade do pigmento sejam prioritárias. Por outro lado, métodos mais simples, como a secagem em estufa, podem ser empregados em aplicações menos exigentes, como o uso da biomassa produzida em meio reciclado como bioabsorvente no tratamento terciário de efluentes, sempre considerando o equilíbrio entre rendimento, custo e valor agregado do produto final.

Capacidade de biossorção da biomassa seca de *L. platensis* para remoção de 17α -etinilestradiol (EE2)

Análises de microscopia eletrônica foram conduzidas para avaliar as diferenças entre as biomassas produzidas nos dois ciclos de cultivo (Figura 3). A alteração na morfologia populacional, com a predominância de filamentos menores no segundo ciclo, pode ser relevante devido ao aumento proporcional da área de superfície celular. Essa característica pode representar uma vantagem para aplicações biotecnológicas, especialmente em processos de biossorção. A análise morfológica das biomassas revelou a heterogeneidade da superfície e a presença de estruturas, poros, canais ou cavidades em ambos os ciclos, os quais poderiam favorecer os processos de adsorção de contaminantes.

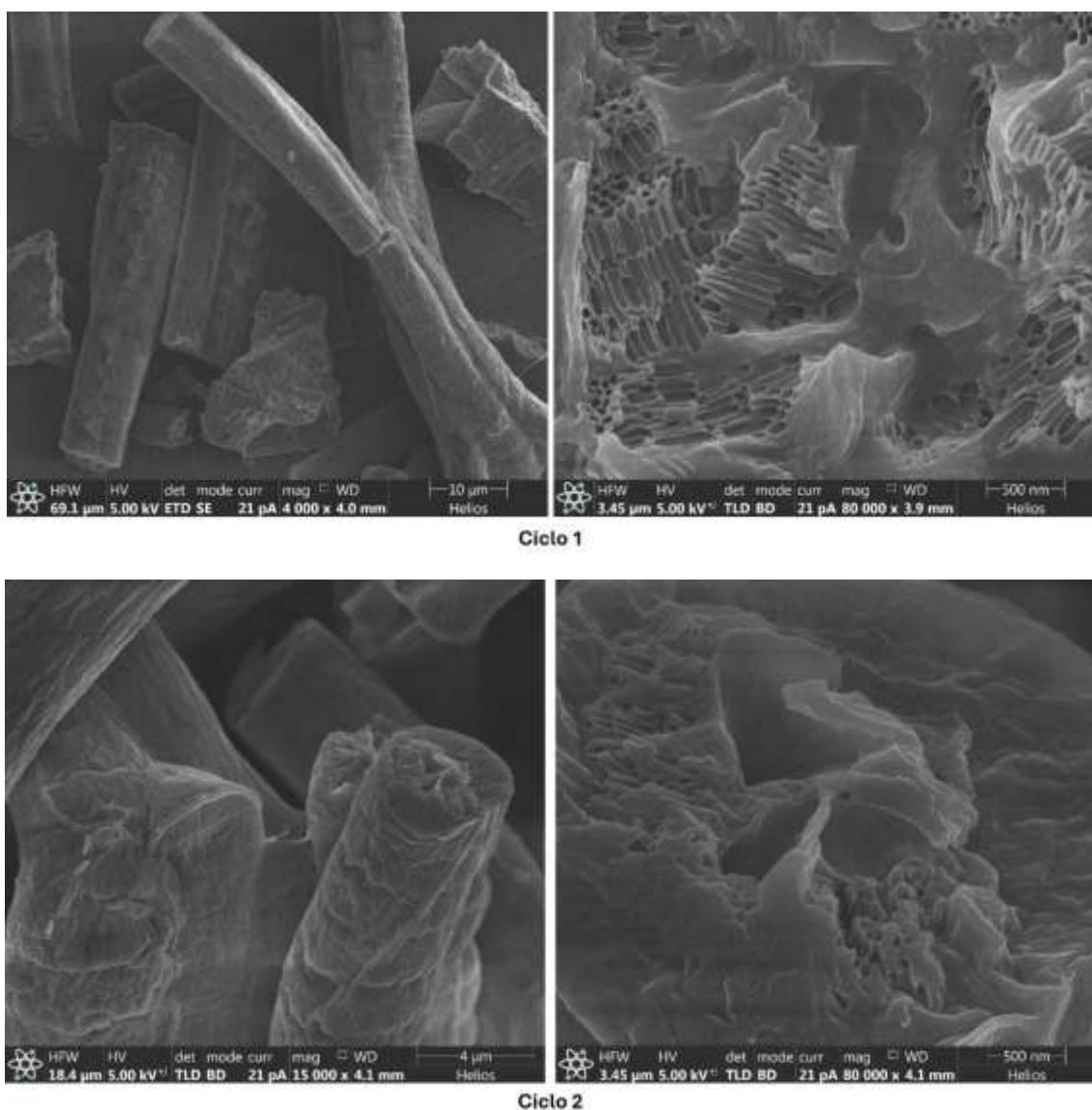


Figura 3: Imagens de microscopia eletrônica de varredura das amostras de *Limnospira platensis* obtidas do Ciclo 1 e Ciclo 2.

Fonte: Elaboração própria

A avaliação da biomassa como bioassorvente demonstrou que a produção em meio reciclado, possui capacidade significativa de remover CEs, como o desregulador endócrino 17α -etinilestradiol (EE2). Sua capacidade de remoção do contaminante manteve-se predominantemente próxima a 80%, evidenciando sua eficácia no processo de adsorção do EE2 (Figura 4). Essa abordagem integrada, extração de pigmentos de alto valor agregado seguida do aproveitamento da biomassa para a mitigação de poluentes, reforça o conceito de economia circular e biorrefinaria, oferecendo uma solução ambientalmente responsável para o tratamento de águas residuais.

A atenuação natural (AN) do hormônio EE2 foi de aproximadamente 20%, possivelmente decorrente de perdas por adsorção nas superfícies da vidraria e por fotodegradação. Embora a fotodegradação contribua parcialmente para a redução da concentração de EE2, a adição do bioassorvente resultou em um aumento significativo na eficiência de remoção, evidenciando o papel da adsorção como estratégia complementar para mitigar a presença desse contaminante em matrizes aquosas.

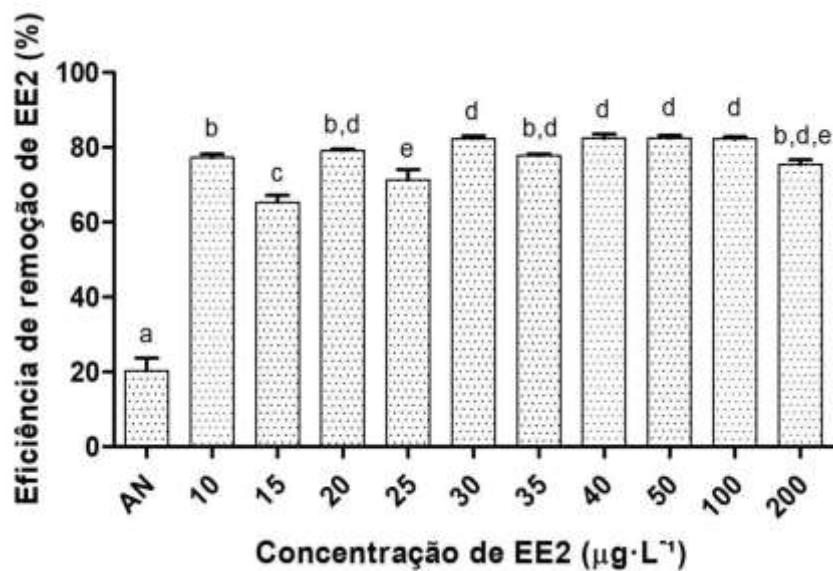


Figura 4: Percentual de eficiência na remoção de 17α -etinilestradiol (EE2) de matriz aquosa pela biomassa de *Limnospira platensis* proveniente do segundo ciclo de cultivo (meio reutilizado). Nota: AN representa a atenuação natural do analito. Diferenças significativas entre as médias dos tratamentos ($p < 0.05$) são indicadas por letras distintas.

Fonte: Elaboração própria

CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo demonstram que a produção de biomassa de *Limnospira platensis* em fotobiorreator, utilizando dois ciclos de cultivo com o segundo realizado em meio reutilizado, permitiu alcançar maior produtividade e concentração final em massa seca em menor tempo, evidenciando o potencial de reutilização do meio como estratégia econômica e sustentável.

A avaliação dos métodos de secagem revelou que a liofilização preserva significativamente melhor o teor de ficocianina em comparação à secagem em estufa, embora esta última possa ser adequada para aplicações de menor valor agregado, como a utilização da biomassa como bioassorvente.

Além disso, os ensaios de bioassorção demonstraram que a biomassa produzida em meio reciclado apresenta capacidade significativa de remoção do desregulador endócrino 17 α -etinilestradiol (EE2) de matrizes aquosas, evidenciando seu potencial para integração em estratégias de biorrefinaria e tratamento ambiental.

Portanto, este estudo reforça que a combinação de cultivo em meio reciclado, escolha adequada do método de secagem e aproveitamento da biomassa residual permite não apenas a produção de biocompostos de alto valor agregado, como a ficocianina, mas também contribui para soluções sustentáveis de bioassorção de contaminantes emergentes, promovendo um modelo de biorrefinaria alinhado à economia circular e à sustentabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos laboratórios LABIM/INT, CENANO/INT, LABIFI/UERJ e BIOTEMA/UERJ envolvidos neste estudo pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizados, fundamentais para a realização das análises. Também expressamos nossa gratidão às agências de fomento CNPq, FAPERJ e CAPES pelo financiamento, bolsas e verbas de custeio que possibilitaram a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aman Mohammadi, M., Ahangari, H., Mousazadeh, S., Hosseini, S. M., & Dufossé, L. (2022). Microbial pigments as an alternative to synthetic dyes and food additives: a brief review of recent studies. *Bioprocess and biosystems engineering*, 45(1), 1-12.
- Araújo, R., Vázquez Calderón, F., Sánchez López, J., Azevedo, I. C., Bruhn, A., Fluch, S., ... & Ullmann, J. (2021). Current status of the algae production industry in Europe: an emerging sector of the blue bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*, 7, 626389.



- Bennett, A., & Bogorad, L. (1973). Complementary chromatic adaptation in a filamentous blue-green alga. *The Journal of cell biology*, 58(2), 419-435.
- Chwil, M., Mihelič, R., Matraszek-Gawron, R., Terlecka, P., Skoczylas, M. M., & Terlecki, K. (2024). Comprehensive review of the latest investigations of the health-enhancing effects of selected properties of Arthrospira and Spirulina Microalgae on Skin. *Pharmaceuticals*, 17(10), 1321.
- Demarco, M. (2020). Produção e caracterização de pós de spirulina por diferentes métodos de secagem.
- Depraetere, O., Pierre, G., Noppe, W., Vandamme, D., Foubert, I., Michaud, P., & Murylaert, K. (2015b). Influence of culture medium recycling on the performance of *Limnospira platensis* cultures. *Algal research*, 10, 48-54.
- Exactitude Consultancy, 2022. Relatório Mercado de ficocianina por forma (pó, líquido), grau (grau alimentício, grau farmacêutico, reagente e grau analítico), aplicação (alimentos e bebidas, produtos farmacêuticos, cosméticos, nutracêuticos, outros) e região (América do Norte, Ásia-Pacífico, Europa, Sul América, Oriente Médio e África), Tendências Globais e Previsões de 2020 a 2029.
- Floripes, T. C., Aquino, S. F. D., Quaresma, A. D. V., Afonso, R. J. D. C. F., Chernicharo, C. A. D. L., & Souza, C. L. D. (2018). Ocorrência de fármacos e desreguladores endócrinos em esgoto bruto e tratado na cidade de Belo Horizonte (MG). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 23(06), 1199-1211.
- George, E. A. (1976). Culture centre of algae and protozoa: list of strains 1976.
- Marra, L., Aurino, E., Raganati, F., Pollio, A., & Marzocchella, A. (2024). Improving Microalgae Feasibility Cultivation: Preliminary Results on Exhausted Medium Reuse Strategy. *Processes*, 12(5), 1029.
- Moraes, A. P. J., Salomão, A., Fasciotti, M., Monteiro, T., & Teixeira, C. (2025). Optimization of the marine microalgae *Nannochloropsis oculata* harvesting by flocculation: Effects on biomass quality and residual medium reuse for a new cycle. *Separation Science and Technology*, 60(1), 108-120.
- Rabello, V. M., Teixeira, L. C. R. S., Gonçalves, A. P. V., & de Sá Salomão, A. L. (2019). The efficiency of constructed wetlands and algae tanks for the removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs): a systematic review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230(10), 236.
- Sabino, J. A., de Sá Salomão, A. L., de Oliveira Muniz Cunha, P. M., Coutinho, R., & Marques, M. (2021). Occurrence of organic micropollutants in an urbanized sub-basin and ecological risk assessment. *Ecotoxicology*, 30(1), 130-141.
- Salomão, A. L. D. S., Soroldoni, S., Marques, M., Hogland, W., & Bila, D. M. (2014). Effects of single and mixed estrogens on single and combined cultures of *D. subspicatus* and *P. subcapitata*. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 93(2), 215-221.
- Spínola, M. P., Mendes, A. R., & Prates, J. A. (2024). Chemical composition, bioactivities, and applications of Spirulina (*Limnospira platensis*) in food, feed, and medicine. *Foods*, 13(22), 3656.
- Veiga, N. F. M. (2016). *Recycling of the culture media for pilot scale production of Limnospira platensis (Spirulina)* (Doctoral dissertation, Thesis to obtain the Master of Science Degree in Biological Engineering, TECNICO LISBOA).
- Vigani, M. (2020). The bioeconomy of microalgae-based processes and products. In *Handbook of microalgae-based processes and products* (pp. 799-821). Academic press.
- Zhao, C., Li, F., Yan, S., Zhu, L., Ma, S., Zhang, T., ... & Du, G. (2025). Identification and activity assay in vivo and in vitro of novel antioxidant and anti-aging peptides from C-phycocyanin of *Limnospira platensis*. *Algal Research*, 89, 104042.

