
Sinergia entre microalgas, biochar e fotocatalise: uma revolução no tratamento de águas residuais

Luis Guillermo Ramírez Mérida

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-21-3.c5>

Resumo

A produção de biochar a partir de microalgas representa uma inovação promissora no campo da sustentabilidade ambiental e do tratamento de águas residuais. Ao cultivar microalgas em água contaminada, uma função dupla é alcançada: a água é purificada pela remoção do excesso de nutrientes e uma biomassa rica em carbono é produzida. Essa biomassa, quando submetida a um processo de pirólise, é transformada em biochar, um material carbonáceo com propriedades adsorventes e fertilizantes. O biochar resultante pode ser aplicado ao solo, melhorando sua fertilidade e retenção de água, e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas por meio do sequestro de carbono. Além disso, a capacidade do biochar de adsorver contaminantes o torna uma ferramenta valiosa para a remediação de solos e águas contaminados. A integração da fotocatalise neste processo aumenta ainda mais a capacidade de degradação de contaminantes, criando um sistema de tratamento de águas residuais altamente eficiente e sustentável. Essa estratégia não apenas contribui para a purificação da água e a melhoria da qualidade do solo, mas também promove uma economia circular ao aproveitar um recurso renovável e gerar produtos de alto valor agregado. Em resumo, a produção de biochar a partir de microalgas oferece uma solução inovadora e multifuncional para os desafios ambientais atuais, contribuindo para a sustentabilidade e o desenvolvimento de um futuro mais limpo e saudável.

Palavras-chave: Sustentabilidade ambiental, Bioeconomia, Recuperação ambiental, Inovação tecnológica, Microrganismos fotossintéticos.

1. INTRODUÇÃO

A crise global da água estimulou a busca por soluções inovadoras e sustentáveis para o tratamento de águas residuais. Poluentes emergentes são compostos que sofrem degradação complicada e podem causar vários efeitos adversos tanto na saúde humana quanto no meio ambiente (WANG et al., 2024). Na literatura científica, foram documentados diversos métodos para o tratamento de águas residuais contendo esses contaminantes; entretanto, o desenvolvimento de técnicas mais eficazes e viáveis continua sendo um desafio considerável. Entre as estratégias investigadas estão oxidação química, osmose reversa, adsorção, eletrocoagulação, filtração, separação por membrana, tratamentos biológicos e processos oxidativos avançados (DEY et al., 2024; SARKAR et al., 2024; LEICHTWEIS et al., 2023). Uma estratégia promissora combina a capacidade das microalgas de bioacumular poluentes e produzir biomassa com o poder da fotocatalise, potencializado pela alta capacidade adsorvente do biochar.

A integração de microalgas, biochar e fotocatalise em um sistema de tratamento de águas residuais representa uma estratégia inovadora e holística que busca maximizar a eficiência na purificação da água. Essa abordagem sinérgica combina as capacidades únicas de cada componente para criar um sistema coeso que não apenas remove poluentes, mas também promove a sustentabilidade e a recuperação de recursos (Khan et al., 2022).

As microalgas, organismos fotossintéticos que prosperam em ambientes aquáticos, desempenham um papel fundamental nesse sistema. Sua capacidade de absorver nutrientes como nitrogênio e fósforo os torna aliados essenciais na luta contra a eutrofização, um problema comum em corpos d'água poluídos. À medida que as microalgas metabolizam esses compostos, elas produzem oxigênio, melhorando as condições aeróbicas do ambiente e promovendo a degradação de poluentes orgânicos (Liberti et al., 2024). No entanto, seu potencial é maximizado quando combinado com biochar, um material carbonáceo obtido da pirólise de biomassa. O biochar não atua apenas como um meio adsorvente que retém metais pesados e compostos orgânicos, mas também fornece uma estrutura física que estimula o crescimento de

microalgas e serve como habitat para microrganismos benéficos (Law et al., 2022).

A fotocatálise, um processo que usa luz para ativar um catalisador e gerar espécies reativas, está efetivamente integrada a este sistema. Ao aplicar a fotocatálise, compostos orgânicos recalcitrantes que são difíceis de remover por métodos convencionais podem ser decompostos. A luz usada na fotocatálise não apenas ativa o biochar, mas também estimula o crescimento de microalgas, criando um ciclo virtuoso onde cada componente potencializa a ação do outro. Este processo integrado permite que as microalgas absorvam os contaminantes, enquanto o biochar adsorve os restantes e a fotocatálise é responsável por decompor aqueles que são mais resistentes (Subramaniam, 2023).

Em um sistema de tratamento de águas residuais que integra esses elementos, é possível visualizar um processo de vários estágios que flui harmoniosamente. Inicialmente, as microalgas são responsáveis pela absorção de nutrientes e poluentes, reduzindo a carga poluente da água (Li et al., 2019). À medida que a água flui pelo sistema, o biochar atua como um filtro que retém metais pesados e compostos orgânicos, enquanto simultaneamente as microalgas continuam seu processo de metabolização (Leong e Chang 2020). Na fase final, a fotocatálise é ativada, usando a luz para quebrar os poluentes que sobreviveram aos estágios anteriores. Essa abordagem não apenas melhora a qualidade da água tratada, mas também permite a recuperação de recursos valiosos, como a biomassa de microalgas, que pode ser usada na produção de biocombustíveis ou como fertilizante (Liu e Hong, 2021).

2. VANTAGENS DE OBTER BIOCHAR A PARTIR DE MICROALGAS

A produção de biochar a partir de microalgas se apresenta como uma alternativa inovadora e sustentável para o gerenciamento de resíduos orgânicos e melhoria da qualidade do solo. Este processo não apenas fornece material valioso para a agricultura e o tratamento de água, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental e a mitigação de problemas ecológicos. As principais vantagens de obter biochar a partir de microalgas são detalhadas abaixo.

2.1. Rico em nutrientes

Microalgas são organismos altamente eficientes na captura de nutrientes do ambiente aquático. Durante o seu crescimento, eles absorvem compostos como nitrogênio, fósforo e potássio, que são essenciais para o seu desenvolvimento. Quando submetidos à pirólise para produzir biochar, esses nutrientes são preservados até certo ponto, resultando em um biochar com alto teor de carbono e nutrientes (Yu et al., 2024).

Este biochar enriquecido pode ser usado como corretivo do solo, melhorando a fertilidade do solo e fornecendo às plantas os nutrientes necessários para seu crescimento. Além disso, a aplicação de biochar em solos agrícolas pode ajudar a melhorar a retenção de água e a estrutura do solo, o que é crucial em áreas propensas à seca. A riqueza de nutrientes do biochar derivado de microalgas o torna um recurso valioso para a agricultura sustentável, pois reduz a necessidade de fertilizantes químicos, que podem ser caros e prejudiciais ao meio ambiente (Ayaz et al., 2021).

2.2. Sustentabilidade

Usar microalgas para produção de biochar é uma abordagem sustentável que aproveita recursos renováveis. Microalgas podem ser cultivadas em águas residuais ou em ambientes onde outras culturas não seriam capazes de crescer, o que as torna uma opção viável para a produção de biomassa. Este cultivo não só ajuda a limpar a água absorvendo o excesso de nutrientes, como também contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que as microalgas capturam dióxido de carbono durante o seu crescimento (Costa et al., 2024).

Além disso, a produção de biochar a partir de microalgas pode contribuir para a mitigação da poluição da água. Ao remover nutrientes como nitrogênio e fósforo das águas residuais, o risco de eutrofização em corpos d'água é reduzido, um fenômeno que pode levar à proliferação de algas nocivas e à morte de organismos aquáticos. Dessa forma, a produção de biochar não é apenas benéfica para o solo, mas também tem um impacto positivo na qualidade da água e na saúde dos ecossistemas aquáticos (González-Hourcade et al., 2022).

2.3. Propriedades adsorventes

Uma das características mais marcantes do biochar derivado de microalgas é sua capacidade adsorvente. Graças à sua estrutura porosa e alta área de superfície específica, o biochar pode reter contaminantes no solo e na água. Isso o torna um material eficaz para remediação de solos contaminados e tratamento de águas residuais (Kamali et al., 2021).

O biochar pode adsorver metais pesados, pesticidas e outros contaminantes orgânicos, reduzindo assim sua disponibilidade para plantas e organismos do solo. Essa propriedade é especialmente valiosa em locais contaminados, onde a remoção de contaminantes é crucial para restaurar a saúde do ecossistema. Além disso, o uso de biochar em sistemas de tratamento de água pode melhorar a qualidade da água ao remover toxinas e outros compostos nocivos, contribuindo para um ambiente mais limpo e saudável (Zhao et al., 2024).

2.4. Recuperação de Recursos

A produção de biochar a partir de microalgas também permite fechar o ciclo de nutrientes em sistemas agrícolas. Ao usar microalgas, nutrientes que de outra forma seriam perdidos podem ser recuperados e reciclados. O biochar resultante pode ser aplicado ao solo como um aditivo, fornecendo nutrientes essenciais às plantas e melhorando a produtividade agrícola. Este ciclo de recuperação é especialmente importante em um contexto de crescente demanda por alimentos e recursos. O uso de biochar não apenas promove a sustentabilidade na agricultura, mas também ajuda a reduzir o uso de fertilizantes sintéticos, que podem ter efeitos negativos no meio ambiente. Ao fechar o ciclo dos nutrientes, promove-se uma agricultura mais circular e responsável, onde os recursos são utilizados de forma mais eficiente (Rahim et al., 2024).

3. Processo de Obtenção de Biochar a partir de Microalgas

A produção de biochar a partir de microalgas segue um processo bem definido que abrange desde o cultivo das microalgas até a caracterização do

biochar obtido. Esse processo não é apenas crucial para maximizar a qualidade do biochar, mas também garante que as propriedades únicas das microalgas sejam totalmente utilizadas. Cada etapa do processo é detalhada abaixo.

3.1. Cultivo de microalgas

O primeiro passo para obter biochar é o cultivo de microalgas. Este processo é realizado em condições controladas que permitem maximizar o crescimento e a produção de biomassa. As microalgas podem ser cultivadas em diferentes tipos de sistemas, como fotobiorreatores ou lagoas abertas, e são alimentadas principalmente com águas residuais ou meios ricos em nutrientes.

O uso de águas residuais é particularmente vantajoso, pois não só fornece um meio rico em nutrientes, como nitrogênio e fósforo, mas também ajuda a purificar a água absorvendo quaisquer contaminantes presentes. Essa abordagem de “cultivo em águas residuais” não apenas otimiza o crescimento de microalgas, mas também contribui para a sustentabilidade ao reduzir a carga poluente nos corpos d’água (You et al., 2022).

As condições de cultivo devem ser cuidadosamente controladas para garantir o crescimento ideal. Isso inclui a regulação de fatores como temperatura, luz, pH e concentração de nutrientes. As microalgas precisam de luz para realizar a fotossíntese, por isso é essencial fornecer uma fonte adequada de luz, seja natural ou artificial. Além disso, a temperatura do meio deve ser mantida dentro de uma faixa específica para promover o crescimento de microalgas (Yu et al., 2022).

Durante o cultivo, é essencial monitorar o crescimento das microalgas. Isso pode ser feito por meio de medições de biomassa, concentração de clorofila e outros indicadores de saúde. O monitoramento constante permite que sejam feitos ajustes nas condições de cultivo para maximizar a produção de biomassa (Jorge et al., 2024).

3.2. Colheita e Secagem

Quando as microalgas atingem seu potencial máximo de crescimento, elas são colhidas. Esta etapa é crucial, pois a qualidade do biochar obtido depende em grande parte da qualidade das microalgas coletadas.

Existem vários métodos de coleta de microalgas, sendo os mais comuns a centrifugação, a filtração e a floculação. A centrifugação é um método eficiente que utiliza força centrífuga para separar microalgas do meio de cultura. A filtração, por outro lado, envolve o uso de membranas ou filtros para capturar microalgas, enquanto a floculação usa agentes químicos para aglomerar microalgas, tornando-as mais fáceis de coletar (Zhu et al., 2024).

Após a colheita, as microalgas devem ser secas para reduzir seu teor de umidade. Esta etapa é essencial, pois o alto teor de umidade pode afetar negativamente o processo de pirólise. A secagem pode ser feita por métodos naturais, como exposição ao sol, ou por técnicas artificiais, como o uso de secadores de ar quente. A escolha do método de secagem dependerá da escala de produção e dos recursos disponíveis (Koyande e Show, 2024).

3.3. Pirólise

Depois que as microalgas estão secas, é realizada a pirólise, um processo térmico que decompõe a biomassa na ausência de oxigênio. Esta etapa é fundamental para converter microalgas em biochar.

A pirólise é realizada em temperaturas geralmente variando de 300 °C a 700 °C. A temperatura exata e o tempo de residência no forno de pirólise influenciam as propriedades finais do biochar. Em temperaturas mais baixas, é produzido biochar com maior teor de nutrientes, enquanto em temperaturas mais altas, é obtido biochar com maior estabilidade e capacidade adsorvente (Nawaz et al., 2024).

É essencial que a pirólise seja realizada em um ambiente anaeróbico para evitar a combustão. Isso é obtido por meio do uso de fornos projetados especificamente para pirólise, que permitem controlar o fluxo de gases e manter um ambiente livre de oxigênio. Durante esse processo, também são gerados subprodutos como gases e bio-óleos, que podem ser capturados e utilizados como fontes de energia renováveis (Guo et al., 2024).

3.4. Caracterización del Biochar

Após a pirólise, o biochar obtido deve ser caracterizado para avaliar suas propriedades físicas e químicas. Esta etapa é fundamental para determinar seu potencial em aplicações agrícolas e de tratamento de água.

A caracterização física do biochar inclui a avaliação de sua textura, densidade, porosidade e área superficial específica. Essas propriedades são cruciais para entender como o biochar interage com o solo e os contaminantes. Um biochar com alta porosidade e área de superfície específica é mais eficaz na adsorção de nutrientes e contaminantes, o que aumenta sua utilidade em aplicações agrícolas. As propriedades químicas do biochar, como seu pH, teor de carbono e presença de nutrientes e metais pesados, também devem ser avaliadas. O pH adequado é essencial para garantir que o biochar seja benéfico ao solo, pois pH muito ácido ou muito alcalino pode ser prejudicial às plantas. Além disso, o conteúdo de nutrientes determinará sua eficácia como corretivo do solo (Dayoub et al., 2024). Por fim, a caracterização do biochar permite determinar seu potencial para aplicações específicas, seja como corretivo de solo, fertilizante ou em processos de remediação de água. Essas informações são cruciais para agricultores e pesquisadores que buscam usar o biochar de forma eficaz em suas práticas (Zanutel et al., 2024).

4. CONCLUSÃO

A obtenção de biochar a partir de microalgas oferece múltiplas vantagens que contribuem para a sustentabilidade e a melhoria da qualidade ambiental. A riqueza de nutrientes do biochar, sua capacidade de adsorver contaminantes, seu papel na mitigação da poluição da água e seu potencial para fechar o ciclo de nutrientes são aspectos que destacam sua importância na agricultura e na gestão ambiental.

À medida que a pesquisa e a tecnologia avançam, métodos mais eficientes para produzir biochar a partir de microalgas provavelmente serão desenvolvidos, potencialmente abrindo novas oportunidades na gestão de resíduos e melhorando a produtividade agrícola. Essa abordagem não apenas representa uma solução inovadora para os desafios ambientais atuais, mas

também promove um futuro mais sustentável e resiliente. A integração de microalgas na produção de biochar é, sem dúvida, um passo em direção a uma gestão mais responsável dos nossos recursos naturais e uma forma eficaz de abordar problemas críticos como a poluição da água e a degradação do solo.

5. REFERÊNCIAS

- Ayaz, M., Feizienė, D., Tilvikienė, V., Akhtar, K., Stulpinaitė, U., & Iqbal, R. (2021). Biochar role in the sustainability of agriculture and environment. *Sustainability*, 13(3), 1330.
- Costa, J. A. V., Zapparoli, M., Cassuriaga, A. P. A., Cardias, B. B., da Silva Vaz, B., de Moraes, M. G., & Moreira, J. B. (2023). Biochar production from microalgae: a new sustainable approach to wastewater treatment based on a circular economy. *Enzyme and Microbial Technology*, 110281.
- Dayoub, E. B., Tóth, Z., Soós, G., & Anda, A. (2024). Chemical and Physical Properties of Selected Biochar Types and a Few Application Methods in Agriculture. *Agronomy*, 14(11), 2540.
- DEY, S. et al. Removal of chlorides and hardness from contaminated water by using various biosorbents: A comprehensive review. *Water-Energy Nexus*, v. 7, p. 39–76, 1 dez. 2024.
- González-Hourcade, M., dos Reis, G. S., Grimm, A., Lima, E. C., Larsson, S. H., & Gentili, F. G. (2022). Microalgae biomass as a sustainable precursor to produce nitrogen-doped biochar for efficient removal of emerging pollutants from aqueous media. *Journal of Cleaner Production*, 348, 131280.
- Guo, K., Chang, H., Nie, Y., Zhu, L., Tan, L., Sheng, B., ... & Ho, S. H. (2024). Distinct Mechanisms on Accelerating Electron Transfer to Facilitate Two-Stage Anaerobic Digestion Modulated by Various Microalgae Biochar. *ACS ES&T Engineering*, 4(4), 966-977.
- Jorge, A. M., Pedroso, P. R., & Pereira, J. F. (2024). Sustainable extraction and utilization of chlorophyll from microalgae for eco-friendly wool dyeing. *Journal of Cleaner Production*, 451, 142009.
- Kamali, M., Appels, L., Kwon, E. E., Aminabhavi, T. M., & Dewil, R. (2021). Biochar in water and wastewater treatment-a sustainability assessment. *Chemical Engineering Journal*, 420, 129946.
- Khan, A. A., Gul, J., Naqvi, S. R., Ali, I., Farooq, W., Liaqat, R., ... & Juchelková, D. (2022). Recent progress in microalgae-derived biochar for the treatment of textile industry wastewater. *Chemosphere*, 306, 135565.

Koyande, A. K., & Show, P. L. (2024). Microalgae harvest technology. In *Handbook of Biorefinery Research and Technology: Production of Biofuels and Biochemicals* (pp. 705-730). Singapore: Springer Nature Singapore.

Law, X. N., Cheah, W. Y., Chew, K. W., Ibrahim, M. F., Park, Y. K., Ho, S. H., & Show, P. L. (2022). Microalgal-based biochar in wastewater remediation: Its synthesis, characterization and applications. *Environmental research*, 204, 111966.

LEICHTWEIS, J. et al. NiFe₂O₄/biochar decorated porous polymer membranes for the flow-through photo-Fenton degradation of tetracycline. *Chemical Engineering Journal*, v. 477, p. 147203, 1 dez. 2023.

Leong, Y. K., & Chang, J. S. (2020). Bioremediation of heavy metals using microalgae: recent advances and mechanisms. *Bioresource technology*, 303, 122886.

Li, K., Liu, Q., Fang, F., Luo, R., Lu, Q., Zhou, W., ... & Ruan, R. (2019). Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery: A review. *Bioresource technology*, 291, 121934.

Liberti, D., Pinheiro, F., Simões, B., Varela, J., & Barreira, L. (2024). Beyond bioremediation: the untapped potential of microalgae in wastewater treatment. *Water*, 16(19), 2710.

Liu, X. Y., & Hong, Y. (2021). Microalgae-based wastewater treatment and recovery with biomass and value-added products: a brief review. *Current Pollution Reports*, 7, 227-245.

Nawaz, A., Rohman, G. A. N., Jameel, A. G. A., Ummer, A. C., & Razzak, S. A. (2024). Engineered biochar-based catalytic pyrolysis of *Spirulina plantensis* microalgae for the production of high value compounds in microwave reactor. *Algal Research*, 81, 103583.

Rahim, H. U., Allevato, E., Vaccari, F. P., & Stazi, S. R. (2024). Biochar aged or combined with humic substances: fabrication and implications for sustainable agriculture and environment-a review. *Journal of Soils and Sediments*, 24(1), 139-162.

SARKAR, D. et al. A comprehensive review of production and characterization of biochar for removal of organic pollutants from water and wastewater. *Water-Energy Nexus*, 13 nov. 2024.

Subramaniam, M. N., Wu, Z., Goh, P. S., & Zhou, S. (2023). The state-of-the-art development of biochar based photocatalyst for removal of various organic pollutants in wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 139487.

WANG, F. et al. Emerging contaminants: A One Health perspective. *The Innovation*, v. 5, n. 4, 1 jul. 2024.

You, X., Yang, L., Zhou, X., & Zhang, Y. (2022). Sustainability and carbon neutrality trends for microalgae-based wastewater treatment: A review. *Environmental Research*, 209, 112860.

Yu, D., Yan, L., Shi, J., Liu, Y., Zhang, A., Wang, Y., ... & Xie, T. (2024). Phosphorus Removal and Recovery During Microalgae-Based Wastewater Treatment: A Mini-review. *International Journal of Environmental Research*, 18(3), 34.

Yu, H., Kim, J., Rhee, C., Shin, J., Shin, S. G., & Lee, C. (2022). Effects of different pH control strategies on microalgae cultivation and nutrient removal from anaerobic digestion effluent. *Microorganisms*, 10(2), 357.

Zanutel, M., Garré, S., Sanglier, P., & Bielders, C. (2024). Biochar modifies soil physical properties mostly through changes in soil structure rather than through its internal porosity. *Vadose Zone Journal*, 23(1), e20301.

Zhao, Y., Li, X., Xu, G., & Nan, J. (2024). Multilevel investigation of the ecotoxicological effects of sewage sludge biochar on the earthworm *Eisenia fetida*. *Chemosphere*, 142455.

Zhu, J., Wakisaka, M., Omura, T., Yang, Z., Yin, Y., & Fang, W. (2024). Advances in industrial harvesting techniques for edible microalgae: Recent insights into sustainable, efficient methods and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 140626.

Autores

Luis Guillermo Ramírez Mérida

Profesor Titular, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo, Valencia – Venezuela. Profesor Asociado Ingeniería en Agua y Desarrollo Sostenible, Instituto Tecnológico Regional Centro-Sur, Universidad Tecnológica del Uruguay, Durazno - Uruguay