



Estudo comparativo da análise termogravimétrica entre quatro espécies de microalgas: Caracterização térmica para aplicações em bioenergia
Comparative study of thermogravimetric analysis among four microalgae species: Thermal characterization for bioenergy applications

Nícolas Alexandre Berger Bento^{1,*}, Lyon Lopes Cosme², Marcelo Silveira Bachelos³,
Paulo Sérgio da Silva Porto³

¹ Aluno de Doutorado Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

² Aluno de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

³ Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: nicholas.berger@hotmail.com

Resumo: O aproveitamento energético de microalgas tem atraído crescente interesse devido ao seu rápido crescimento, elevado teor lipídico e potencial de captura de CO₂, configurando-se como uma alternativa sustentável às fontes fósseis. Entretanto, variações nas proporções de lipídios, proteínas, carboidratos e cinzas nas microalgas podem influenciar a produção de bio-óleo, gás de síntese e biocarvão. Para destacar aplicações promissoras de espécie específica, análises termogravimétricas têm um papel fundamental. Portanto, esta pesquisa realiza uma comparação da degradação térmica de quatro espécies de microalgas (*Nannochloropsis oculata*, *Tetraselmis chuii*, *Phaeodactylum tricornutum* e *Isochrysis galbana*) por meio de análise termogravimétrica. As amostras secas foram submetidas a ensaios em atmosfera inerte de nitrogênio, em cadinhos de platina, com massa inicial aproximada de 15 mg, aquecimento de 25 a 800 °C e taxa de 10 °C/min. A partir das curvas TGA e DTG, determinaram-se as temperaturas de início (Tonset), máxima taxa de degradação (Tmax), final da principal etapa de decomposição (Toffset) e resíduo final. Os resultados indicaram perfis semelhantes, com três etapas de degradação, mas diferenças relevantes entre espécies. A *Nannochloropsis oculata* apresentou o pico DTG mais intenso, indicando maior liberação de voláteis, enquanto a *Phaeodactylum tricornutum* exibiu menor intensidade de degradação e maior resíduo final (45,7%), sugerindo maior teor de cinzas. As espécies *Tetraselmis chuii* e *Isochrysis galbana* mostraram comportamento intermediário. Apesar das semelhanças no padrão de decomposição, as variações nos parâmetros térmicos indicam diferenças composicionais significativas, que podem impactar diretamente o potencial de conversão termoquímica. Isso reforça a importância da TGA/DTG como ferramenta para a seleção de espécies microalgais em aplicações energéticas sustentáveis.

Palavras-chave: pirólise; degradação térmica; teor de cinzas; caracterização de biomassa; conversão de energia.

Abstract: Energy harvesting from microalgae has attracted growing interest due to their rapid growth, high lipid content, and CO₂ capture potential, constituting a sustainable alternative to fossil fuels. However, variations in the proportions of lipids, proteins, carbohydrates, and ash in microalgae can influence the production of bio-oil, syngas, and biochar. Thermogravimetric analysis plays a key role in highlighting promising species-specific applications. Therefore, this study compares the thermal degradation of four microalgae species (*Nannochloropsis oculata*, *Tetraselmis chuii*, *Phaeodactylum tricornutum*, and *Isochrysis galbana*) using thermogravimetric analysis. The dried samples were subjected to tests in an inert

nitrogen atmosphere in platinum crucibles, with an initial mass of approximately 15 mg, heated from 25 to 800 °C, and at a rate of 10 °C/min. From the TGA and DTG curves, the onset temperatures (*Tonset*), maximum degradation rate (*Tmax*), end of the main decomposition stage (*Toffset*), and final residue were determined. The results indicated similar profiles, with three degradation stages, but significant differences between species. *Nannochloropsis oculata* presented the most intense DTG peak, indicating greater volatile release, while *Phaeodactylum tricornutum* exhibited lower degradation intensity and a higher final residue (45.7%), suggesting higher ash content. The species *Tetraselmis chuii* and *Isochrysis galbana* showed intermediate behavior. Despite the similarities in decomposition patterns, variations in thermal parameters indicate significant compositional differences, which can directly impact the thermochemical conversion potential. This reinforces the importance of TGA/DTG as a tool for selecting microalgal species for sustainable energy applications.

Keywords: pyrolysis; thermal degradation; ash content; biomass characterization; energy.

1 Introdução

O uso de microalgas para produção de biocombustíveis é amplamente reconhecido como uma alternativa sustentável devido ao seu alto potencial de fixação de CO₂, elevada produtividade de biomassa e não competição com áreas agrícolas. Microalgas destacam-se por sua capacidade de acumular lipídios, carboidratos e proteínas, tornando-se matéria-prima eficiente para biodiesel, bioetanol, biogás e outros biocombustíveis. Ainda apresentam taxas de crescimento e produtividade de lipídios superiores às culturas oleaginosas tradicionais, como a soja, resultando em maior rendimento de óleo por hectare e menor uso de solo fértil (dos Santos et al., 2021; Choix et al., 2018).

Dessa forma, a análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica essencial para estudar o comportamento térmico de microalgas, permitindo avaliar a decomposição, combustão e pirólise desses organismos. O que a faz fundamental para otimizar processos de conversão termoquímica, como produção de biocombustíveis, e para entender a cinética das reações envolvidas (Cano-Pleite et al., 2020; Bach e Chen, 2017).

Diversos estudos têm explorado rotas termoquímicas, como pirólise, gaseificação e combustão, para a conversão energética da biomassa microalgal, destacando-se o papel da análise termogravimétrica (TGA) como ferramenta fundamental para avaliar a estabilidade térmica, os estágios de decomposição e o potencial energético desses materiais (Miao e Wu, 2004; Vassilev et al., 2013). Pesquisas recentes demonstram que diferentes espécies apresentam perfis de degradação distintos, relacionados à composição bioquímica e ao teor de cinzas, fatores decisivos para a eficiência e a escolha da rota de conversão (Jamilla Vilar De Brito et al., 2020). Ceylan et al. realizaram TGA das microalgas *Nannochloropsis oculata* e *Tetraselmis Chuii* indicou diferentes perfis de decomposição para as duas espécies, principalmente devido às diferenças em seus componentes químicos (proteínas, lipídios e carboidratos) (Ceylan e Kazan, 2015).

Apesar dos avanços, poucos trabalhos comparam sistematicamente o comportamento térmico de diferentes espécies de microalgas sob condições idênticas de aquecimento. Essa ausência de informações detalhadas limita a compreensão comparativa sobre quais espécies apresentam maior estabilidade térmica, menor resíduo de cinzas ou maior liberação de voláteis, informações essenciais para orientar aplicações em processos de bioenergia.

Neste trabalho, avaliou-se o comportamento térmico de quatro espécies de microalgas (*Nannochloropsis oculata*, *Tetraselmis chuii*, *Phaeodactylum tricornutum* e *Isochrysis galbana*) por meio de análises termogravimétricas (TGA/DTG) a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min até 800 °C.

Este estudo possibilita uma comparação direta entre espécies com composições distintas, obtendo parâmetros como temperaturas características (*Tonset*, *Tmax*, *Toffset*) e rendimento de cinzas. Assim, fornecendo subsídios técnicos para a seleção de microalgas mais adequadas a rotas termoquímicas específicas, contribuindo para o avanço do uso de microalgas na matriz energética sustentável.

2 Metodologia

As quatro espécies de microalgas: *Nannochloropsis oculata*, *Tetraselmis chuii*, *Phaeodactylum tricornutum* e *Isochrysis galbana*, foram adquiridas do Banco de Microrganismos Aidar & Kutner, do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Essas foram cultivadas em condições controladas de laboratório (22 °C, aeração constante de 1,5 L/min e 3000 lumens). Em seguida, foram colhidas por centrifugação (6000 rpm por 4 min) e submetidas à secagem em estufa com convecção forçada a 40 °C, até massa constante. As amostras secas foram raspadas e acondicionadas para posterior caracterização térmica.

As análises termogravimétricas (TGA) foram realizadas em atmosfera inerte de nitrogênio, utilizando cadinhos de platina, com massa inicial aproximada de 15 mg de biomassa. Os ensaios foram conduzidos em equipamento termogravimétrico (modelo DTG-60, fabricante SHIMADZU), disponível no Laboratório de Eficiência Energética II, no prédio do Programa de Pós-graduação em Energia (PPGEN/CEUNES/UFES), como consta em Figura 1. A faixa de temperatura utilizada foi de 25 a 800 °C, com taxa de aquecimento constante de 10 °C/min.

O sinal de derivada térmica ($-\text{dm}/\text{dt}$, DTG) foi obtido diretamente a partir do percentual de perda de massa calculado a partir dos dados brutos de TGA. Inicialmente definimos o percentual de perda de massa em função da temperatura como Eq. 1:

$$L(t) = 100 * \frac{m_0 - m_t}{m_0} = 100 - W(t), \quad (1)$$

onde m_0 é a massa inicial e $m(t)$ é a massa no tempo t .

Em seguida, a derivada temporal foi calculada numericamente, utilizando o método das diferenças centrais, conforme a Eq. 2:

$$\frac{dL}{dt} \approx - \frac{L_{i+1} - L_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}}, \quad (2)$$

A partir das curvas TGA e DTG ($-\text{dm}/\text{dt}$), foram determinados os parâmetros característicos de degradação térmica: temperatura de início da decomposição (Tonset), temperatura de máxima taxa de degradação (Tmax), temperatura final da principal etapa de degradação (Toffset) e o teor de resíduo (cinzas) a 800 °C. Esses resultados foram comparados entre as espécies para avaliação do potencial termoquímico.

3 Resultados e discussões

As curvas termogravimétricas (TGA) das quatro microalgas mostraram perfis semelhantes, com diferenças importantes em termos de estabilidade térmica e rendimento de resíduos, como pode ser observado na Figura 1. Em todas as amostras, observou-se uma primeira perda de massa até ~150 °C, atribuída à remoção de água e compostos voláteis leves. A principal etapa de decomposição ocorreu entre 170 e 500 °C, associada à degradação de carboidratos, proteínas e lipídios, seguida por uma região de estabilização acima de 600 °C, relacionada ao resíduo inorgânico (cinzas).

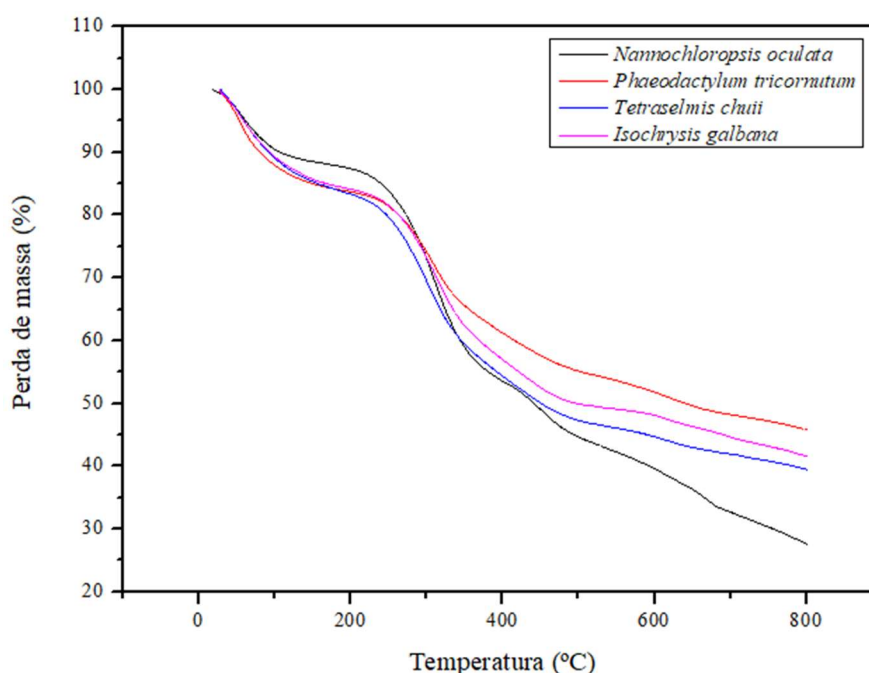


Figura 1. Gráfico comparativo da perda de massa em função da temperatura das quatro espécies de microalgas.

A principal faixa de decomposição ocorreu entre aproximadamente 170 e 500 °C, correspondente à degradação dos principais constituintes orgânicos da biomassa: carboidratos, proteínas e lipídios. Essa

região foi marcada por variações na intensidade e no posicionamento dos picos observados no gráfico da Figura 2 de $-dm/dt$, que indicam diferenças na taxa de degradação entre as espécies. A *Nannochloropsis oculata* destacou-se por apresentar o pico DTG mais intenso, evidenciando uma taxa de decomposição mais acelerada, possivelmente relacionada ao seu elevado teor lipídico, amplamente reportado na literatura, frequentemente superando 17–40% da biomassa seca, dependendo das condições de cultivo e métodos de extração (Krishnamoorthy et al. 2023; He et al. 2020). Esse comportamento indica que a espécie libera rapidamente compostos voláteis em um curto intervalo de temperatura, característica desejável em processos como pirólise rápida.

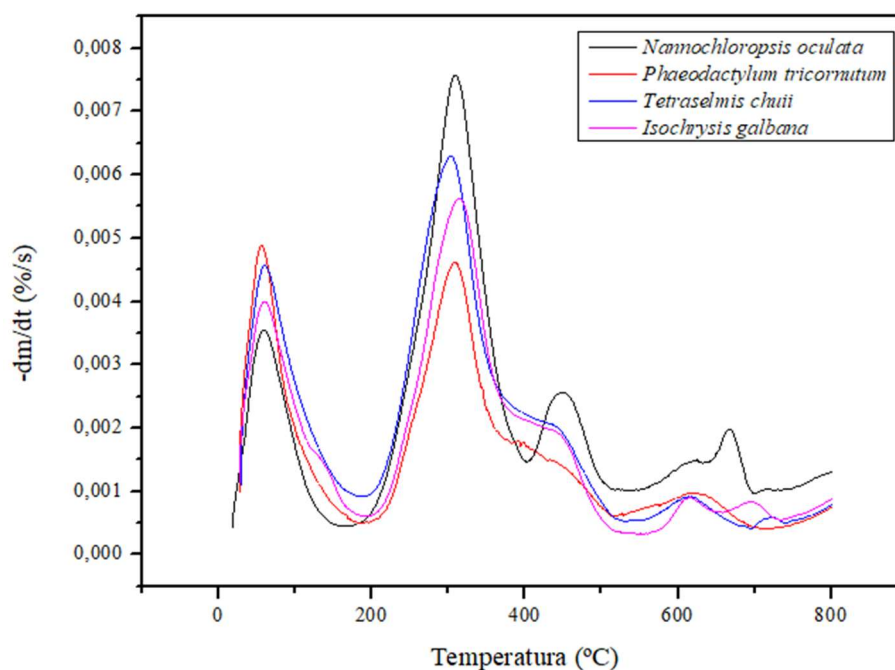


Figura 2. Gráfico comparativo da DTG das quatro espécies de microalgas.

A *Isochrysis galbana* apresentou também um pico DTG expressivo, embora menos intenso que o da *Nannochloropsis*. Essa diferença pode estar associada ao equilíbrio entre a fração lipídica e proteica da biomassa, resultando em uma degradação relativamente rápida, mas com menor intensidade máxima. O teor de lipídeos em *I. galbana* geralmente varia entre 20% e 42% da biomassa seca, podendo chegar a mais de 70% sob condições otimizadas de luz e fotoperíodo, enquanto a fração proteica varia de 8% a 44% do peso seco, dependendo do meio de cultivo, disponibilidade de nitrogênio e fase de crescimento (Wang et al. 2021; Atmanli 2020; Matos et al. 2021). A *Tetraselmis chuii* exibiu comportamento intermediário: sua curva DTG mostrou uma decomposição distribuída ao longo da faixa principal, sem picos tão agudos, o que sugere uma composição mais equilibrada entre os diferentes macronutrientes. Já a *Phaeodactylum tricornutum* apresentou o pico de degradação menos intenso entre as espécies avaliadas, além de maior resíduo final, o que indica que sua biomassa contém menor fração orgânica suscetível à conversão energética e maior teor de cinzas.

Após 600 °C, todas as espécies atingiram uma região de estabilização, associada ao material carbonizado e à presença de compostos minerais inorgânicos, como sais metálicos e sílica. Contudo, a proporção de resíduo final variou consideravelmente entre as amostras. A *Nannochloropsis oculata* apresentou o menor teor de cinzas, evidenciando menor fração inorgânica em sua composição, o que pode impactar positivamente em aplicações de combustão e gaseificação devido ao risco de incrustações e formação de escórias. Em contrapartida, a *Phaeodactylum tricornutum* apresentou o menor resíduo a 800 °C, reforçando sua vantagem como biomassa com maior aproveitamento energético.

Os parâmetros característicos obtidos a partir das curvas TGA e DTG estão resumidos na Tabela 1. Observa-se que a temperatura de início da degradação (Tonset) variou entre 170 e 200 °C, sendo mais baixa para *Nannochloropsis oculata*, o que sugere menor estabilidade térmica inicial. Já a *Isochrysis galbana* apresentou a maior Tonset (200 °C), indicando maior resistência à degradação nos estágios iniciais e pode estar associada ao seu maior teor proteico, que aumenta a estabilidade térmica da biomassa.

As temperaturas de máxima taxa de degradação (Tmax) situaram-se em torno de 303 a 314 °C, com destaque para *Isochrysis galbana*, que apresentou o maior valor (314 °C). Essa diferença, ainda que

pequena, pode estar relacionada ao equilíbrio entre lipídios e proteínas em sua composição. A *Tetraselmis chuii* mostrou o menor Tmax (303 °C), sugerindo uma decomposição mais precoce dos seus constituintes orgânicos.

Tabela 1. Parâmetros característicos de degradação térmica das microalgas obtidos por TGA/DTG a 10 °C/min.

Espécie de Microalga	Tonset (°C)	Tmax (°C)	Toffset (°C)	Resíduo Final (%)
<i>Nannochloropsis oculata</i>	170	309	521	27,5
<i>Phaeodactylum Tricornutum</i>	191	308	518	45,7
<i>Tetraselmis chuii</i>	192	303	537	39,4
<i>Isochrysis galbana</i>	200	314	535	41,5

Quanto à temperatura final da principal etapa de degradação (Toffset), os valores oscilaram entre 518 e 537 °C. A *Tetraselmis chuii* apresentou o maior Toffset (537 °C), evidenciando decomposição mais prolongada, enquanto a *Phaeodactylum tricornutum* exibiu o menor valor (518 °C).

O teor de resíduo final foi o parâmetro que apresentou as diferenças mais marcantes entre as espécies. A *Nannochloropsis oculata* apresentou o menor resíduo (27,5%), reforçando seu maior potencial de conversão em produtos energéticos. Em contrapartida, a *Phaeodactylum tricornutum* apresentou o maior teor de cinzas (45,7%), indicando maior fração inorgânica em sua biomassa. As espécies *Tetraselmis chuii* (39,4%) e *Isochrysis galbana* (41,5%) apresentaram valores intermediários. As diferenças nos resíduos finais indicam que espécies com menor teor de cinzas, como *N. oculata*, são mais promissoras para processos de gaseificação, reduzindo riscos de incrustação e perda de eficiência térmica (Elshobary et al. 2025).

Esses resultados demonstram que, embora os perfis gerais de degradação sejam semelhantes, os parâmetros obtidos por TGA/DTG revelam diferenças significativas na estabilidade térmica e no rendimento energético potencial de cada espécie.

4 Conclusões

A análise termogravimétrica das quatro espécies de microalgas evidenciou diferenças significativas nos parâmetros térmicos e na composição residual, reforçando o potencial diferenciado de cada uma para aplicações em bioenergia. A *Nannochloropsis oculata* apresentou o menor resíduo final (27,5%) e a menor temperatura inicial de degradação (Tonset = 170 °C), indicando alta liberação de voláteis e melhor desempenho para pirólise rápida e gaseificação. Em contraste, *Phaeodactylum tricornutum* apresentou o maior resíduo (45,7%), evidenciando maior teor de cinzas e menor potencial energético direto, mas destacando-se pela possível utilização do resíduo inorgânico em processos de adsorção.

A *Isochrysis galbana* demonstrou maior estabilidade térmica (Tonset = 200 °C e Tmax = 314 °C), sugerindo resistência térmica inicial e elevado potencial energético intermediário. Já *Tetraselmis chuii* apresentou a maior temperatura final de degradação (Toffset = 537 °C), o que a torna promissora para processos de conversão controlada, como a produção de biocarvão. De modo geral, a faixa principal de degradação (170–500 °C) correspondeu à decomposição dos compostos orgânicos majoritários, especialmente lipídios e proteínas, cuja proporção varia entre 17–70% e 8–44% do peso seco, respectivamente, conforme a espécie, e de acordo com a literatura.

Esses resultados quantitativos demonstram que o comportamento térmico está diretamente correlacionado à composição bioquímica das microalgas, e que ajustes no cultivo e na rota termoquímica podem maximizar a eficiência energética de cada biomassa. Assim, o estudo contribui para o avanço da bioengenharia aplicada à produção de biocombustíveis de segunda geração e à diversificação sustentável da matriz energética brasileira.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Ao Banco de Microrganismos Aidar & Kutner, do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo pelo fornecimento das espécies de microalgas.

Referências bibliográficas

- Atmanli A (2020) ‘Experimental comparison of biodiesel production performance of two different microalgae’, *Fuel*, 278:118311, <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.118311>.
- Bach QV and Chen WH (2017) ‘Pyrolysis characteristics and kinetics of microalgae via thermogravimetric analysis (TGA): A state-of-the-art review’, *Bioresource Technology*, 246:88–100, <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.06.087>.
- Cano-Pleite E, Rubio-Rubio M, García-Hernando N and Soria-Verdugo A (2020) ‘Microalgae pyrolysis under isothermal and non-isothermal conditions’, *Algal Research*, 51:102031, <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2020.102031>.
- Ceylan S and Kazan D (2015) ‘Pyrolysis kinetics and thermal characteristics of microalgae *Nannochloropsis oculata* and *Tetraselmis* sp.’, *Bioresource Technology*, 187:1–5, <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2015.03.081>.
- Choix FJ, López-Cisneros CG and Méndez-Acosta HO (2018) ‘Azospirillum brasilense Increases CO₂ Fixation on Microalgae *Scenedesmus obliquus*, *Chlorella vulgaris*, and *Chlamydomonas reinhardtii* Cultured on High CO₂ Concentrations’, *Microbial Ecology*, 76(2):430–442, <https://doi.org/10.1007/S00248-017-1139-Z>.
- Elshobary ME, Ebaid R, Alquraishi M and Ende SSW (2025) ‘Synergistic microalgal cocultivation: Boosting flocculation, biomass production, and fatty acids profile of *Nannochloropsis oculata* and *Phaeodactylum tricornutum*’, *Biomass and Bioenergy*, 193:107595, <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2025.107595>.
- He Y, Zhang B, Guo S, Guo Z, Chen B and Wang M (2020) ‘Sustainable biodiesel production from the green microalgae *Nannochloropsis*: Novel integrated processes from cultivation to enzyme-assisted extraction and ethanolysis of lipids’, *Energy Conversion and Management*, 209:112618, <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.112618>.
- Jamilla Vilar De Brito Y, Santos De Almeida Lopes T, Brito W, Santos D, Torquato AL, Lúcia Antunes De Lima V and Ferreira WB (2020) ‘The *Scenedesmus acuminatus* microalgae in culture media aiming at the production of biodiesel’, *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 15(2):202–207, <https://doi.org/10.18378/RVADS.V15I2.6484>.
- Krishnamoorthy A, Rodriguez C and Durrant A (2023) ‘Optimisation of ultrasonication pretreatment on microalgae *Chlorella Vulgaris* & *Nannochloropsis Oculata* for lipid extraction in biodiesel production’, *Energy*, 278:128026, <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.128026>.
- Matos J, Afonso C, Cardoso C, Serralheiro ML and Bandarra NM (2021) ‘Yogurt Enriched with *Isochrysis galbana*: An Innovative Functional Food’, *Foods* 2021, Vol. 10, Page 1458, 10(7):1458, <https://doi.org/10.3390/FOODS10071458>.
- Miao X and Wu Q (2004) ‘High yield bio-oil production from fast pyrolysis by metabolic controlling of *Chlorella protothecoides*’, *Journal of Biotechnology*, 110(1):85–93, <https://doi.org/10.1016/J.JBIOTEC.2004.01.013>.
- dos Santos MGB, Duarte RL, Maciel AM, Abreu M, Reis A and de Mendonça HV (2021) ‘Microalgae Biomass Production for Biofuels in Brazilian Scenario: A Critical Review’, *Bioenergy Research*, 14(1):23–42, <https://doi.org/10.1007/S12155-020-10180-1>.
- Vassilev S V., Baxter D, Andersen LK and Vassileva CG (2013) ‘An overview of the composition and application of biomass ash.: Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges’, *Fuel*, 105:19–39, <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2012.10.001>.
- Wang H, Qi M, Bo Y, Zhou C, Yan X, Wang G and Cheng P (2021) ‘Treatment of fishery wastewater by co-culture of *Thalassiosira pseudonana* with *Isochrysis galbana* and evaluation of their active components’, *Algal Research*, 60:102498, <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2021.102498>.