

ECONOMIA CIRCULAR: USO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NA SÍNTESE DE PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO

Pedro Antonio Galacci Reinert (PIBIC/CNPq/FA/UEM), Bruna G. de Souza (Co-orientadora), Mara H. N. O. Scaliante (Orientadora). E-mail: mhnoscaliante2@uem.br.

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Maringá, PR.

Área e subárea do conhecimento: Engenharias/Tecnologia Química.

Palavras-chave: ODS 12; Agroindústria; Nanotecnologia.

RESUMO

A valorização de resíduos sob a ótica da economia circular motivou a obtenção de pontos quânticos de carbono (CQDs) a partir de rúmen bovino por rota verde, com o objetivo de demonstrar a viabilidade do processo e comparar duas programações de micro-ondas (5 min/800 W; 20 min/180 W) e duas purificações (com centrifugação; apenas filtração) quanto à estabilidade, funcionalização e eficiência de emissão. A caracterização consistiu em: FTIR-ATR e TGA do precursor; triagem inicial (fluorescência sob UV e DLS); e, de forma robusta, ζ , FTIR-ATR, UV-Vis, PL e QY. O melhor desempenho foi observado em 5 min/800 W com centrifugação, que apresentou emissão azul bem definida e QY de 56 %, já as demais condições exibiram emissões menos seletivas e QY inferiores. Dessa forma, a coerência constatada evidencia que a eficiência óptica é governada pela química de superfície, e não apenas pelo tamanho de partícula dos nanomateriais. Então, conclui-se que a rota proposta converte um resíduo regional em CQDs com desempenho competitivo, sendo o perfil de 5 min/800 W com centrifugação é o mais indicado quando se busca aplicação em sensores devido à estabilidade e ao canal emissivo único.

INTRODUÇÃO

A economia ainda opera majoritariamente no paradigma linear produzir-utilizar-descartar, cuja solução reside na economia circular, que, alinhada ao ODS 12, orienta retenção de valor e reaproveitamento de subprodutos (BERG *et al.*, 2018). Nesse sentido, resíduos agroindustriais podem ser convertidos em materiais inovadores, dos quais se destacam os pontos quânticos de carbono (CQDs), grupo de nanopartículas com propriedades únicas, a citar estabilidade química e, especialmente, fluorescência (GARCÍA-SALCEDO *et al.*, 2024). Dessa forma, o presente estudo propõe valorizar resíduos regionais na síntese verde de CQDs por micro-ondas, e organiza a análise sob a lógica processo-estrutura-propriedade, demonstrando a viabilidade da rota, ao comparar o impacto da configuração do micro-ondas e da etapa de purificação na estabilidade e resposta óptica, integrando

uma série de caracterizações ao rendimento quântico (QY) para orientar futuras aplicações.

MATERIAIS E MÉTODOS

O precursor dos CQDs foi o resíduo ruminal bovino, e a síntese consistiu na carbonização assistida por micro-ondas, seguida de extração alcoólica e filtração à vácuo. Adotou-se duas configurações, 5 min a 800 W e 20 min a 180 W, com duas opções de purificação, com centrifugação ou apenas filtração, originando quatro amostras: R@CQD-5M800W-C, 5M800W-F, 20M180W-C e 20M180W-F. Isso possibilita a comparação direta entre tempo e potência de micro-ondas e estratégia de purificação quanto às propriedades coloidais e ópticas. Já as caracterizações foram planejadas para sustentar as discussões em uma sequência contínua. Primeiro, a diferenciação da biomassa por FTIR-ATR e TGA. Depois, a análise preliminar dos CQDs com evidência qualitativa de fluorescência sob UV e tamanho de partícula por Espalhamento Dinâmico da Luz (DLS). Em seguida, a caracterização robusta, reunindo potencial zeta (ζ), FTIR-ATR, absorção molecular no UV-Vis, fotoluminescência (PL) e determinação do rendimento quântico (QY) pela metodologia de BROUWER (2011). Por fim, foi realizado o direcionamento dos CQDs sintetizados para futuras aplicações a partir da visão sistêmica proporcionada pelo conjunto de análises empregadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O FTIR-ATR do rúmen revelou uma superfície ligninocelulósica, com bandas em 3310 (O-H/N-H), 2920 (C-H alifático), 1651 (C=O), 1510 a 1243 (aromático/lignina) e 1034 cm^{-1} (C-O), indicando a presença de grupos funcionais doadores e aceptores, propícios à formação de estados de superfície (GARCÍA-SALCEDO *et al.*, 2024). Em complemento, a TGA evidencia baixa perda inicial de massa, atribuída a umidade e compostos voláteis, até 200 °C, já a etapa principal de degradação ocorre em faixas mais altas, com picos de DTG em torno de 310 e 760 °C, coerentes com degradações hemicelulósicas. Esse enquadramento sustenta que o precursor dispõe de química de superfície e robustez térmica compatíveis com a síntese por micro-ondas. Quanto à análise preliminar dos CQDs, todas as rotas apresentaram não só o aspecto visual da fluorescência sob UV, Figura 1 a), como também populações de partículas inferiores a 100 nm, isto é, em escala nanométrica, o que foi verificado por DLS, exemplificado na Figura 1 b) pelo comparativo para as programações de 5 min a 800 W, cuja rota centrifugada se destacou pela emissão azulada mais intensa e com a maior distribuição abaixo de 100 nm.

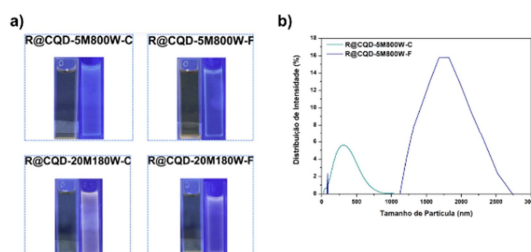


Figura 1 – a) Fluorescência sob UV, b) Comparativo da distribuição de partículas.

Em seguida, a análise coloidal foi consolidada pelo potencial zeta, métrica que é sensível ao ambiente e às espécies presentes, especialmente ao grupos funcionais superficiais dos CQDs, sendo valores maiores de $|\zeta|$ indicativos da estabilidade que a suspensão adquiriu no meio (REN *et al.*, 2019). Com isso, o destaque foi para 5M800W-C, que exibiu a maior magnitude (28,4 mV), o que reitera o papel de determinada rota, especialmente da centrifugação, no refino das propriedades. Já para o FTIR-ATR dos CQDs comparados ao do rúmen, Figura 2, há dois padrões definidos: amostras 5M800W com O-H/N-H e C=N mais evidentes, enquanto em 20M180W prevalecem assinaturas aromáticas/carbonizadas, o que é coerente com a maior magnitude de ζ observada para 5M800W-C.

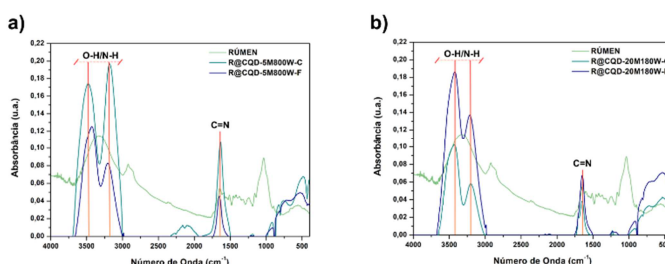


Figura 2 – FTIR-ATR: a) rotas a 800 W por 5 minutos, b) rotas a 180 W por 20 minutos

Nos espectros UV-Vis, Figura 3, observam-se transições $\pi-\pi^*$ (200 nm) e $n-\pi^*$ (280 a 330 nm) para todas as rotas, o que está associado a assinaturas de superfície e centros emissivos (GARCÍA-SALCEDO *et al.*, 2024).

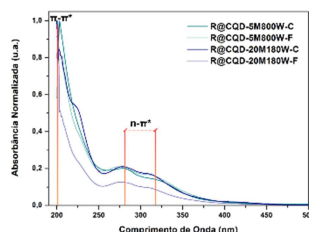


Figura 3 – Espectroscopia de absorção molecular no UV-Vis para as quatro rotas

Além disso, a Tabela 1 reúne os picos de emissão e de excitação da PL, nos quais é possível perceber que R@5M800W-F desloca os máximos da rota centrifugada para regiões menos energéticas, enquanto que as demais apresentaram uma descentralização espectral, isto é, multifuorescência.

Tabela 1 – Propriedades determinadas pela análise de fotoluminescência.

ROTA	PICOS (nm)	
	EMIÇÃO	EXCITAÇÃO
R@CQD-5M800W-C	460	380
R@CQD-5M800W-F	521	442
R@CQD-20M180W-C	474/670	432/612
R@CQD-20M180W-F	479/670	431/611

A eficiência óptica é sintetizada pelo QY, razão entre os fótons emitidos e os absorvidos, sendo obtida a seguinte hierarquia: 56 (5M800W-C) > 55 (5M800W-F) > 42 (20M180W-C) > 40 % (20M180W-F), que acompanha as constatações de ζ de maior magnitude e emissão mais focalizada. Ainda, tem-se que esse encadeamento é consistente com a ideia de que estados de superfície, e não somente o tamanho de partícula, regulam a fluorescência (REN *et al.*, 2019). Então, com base nessa leitura sistêmica e na revisão feita, a aplicação mais promissora é em sensores, que demandam estabilidade, canal emissivo bem definido e elevado QY, com destaque novamente para R@CQD-5M800W-C.

CONCLUSÕES

Confirmou-se a viabilidade de uma rota verde para a obtenção de CQDs a partir de rúmen, cujo destaque foi para a condição de 5 min a 800 W com centrifugação, reunindo $|\zeta|$ de maior magnitude, emissão azul mais definida e QY de 56 %. Dessa forma, o conjunto dos resultados indica que a eficiência óptica decorre da integração de métricas coloidais e espectrométricas, evidenciando o papel dos estados de superfície. Como continuidade, recomendam-se refino de purificação, otimização de parâmetros do micro-ondas e ensaios na aplicação indicada.

AGRADECIMENTOS

À CNPq-Fundação Araucária-UEM pelo apoio financeiro na condição de bolsista.

REFERÊNCIAS

BERG, A. *et al.* Circular economy for sustainable development. **Reports of the Finnish Environment Institute**, n. 26, 2018. Disponível em: https://www.academia.edu/114022461/Circular_Economy_for_Sustainable_Development. Acesso em: 5 set. 2024.

BROUWER, A. M. Standards for photoluminescence quantum yield measurements in solution (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 83, n. 12, p. 2213-2228, 2011. Disponível em: https://www.degruyter.com/document/doi/10.1351/PACREP100931/html?srsIid=AfmBOorwXHn2DuG2KlwA0VIGZAteGB7M9G2CoPUxzmxbegdZ_jU9-28Q. Acesso em: 7 jul. 2025.

GARCÍA-SALCEDO, Á. J. *et al.* Influence of synthesis parameters on the optical properties of carbon dots. **Carbon Trends**, 17, 100403, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266705692400084>. Acesso em: 22 jun. 2025.

REN, J. *et al.* Influence of surface chemistry on optical, chemical and electronic properties of blue luminescent carbon dots. **Nanoscale**, 11(4), 2056–2064, 2019. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/nr/c8nr08595a>. Acesso em: 19 ago. 2025.