

Reutilização Sustentável da Água no Setor Têxtil: limitações e estratégias para a aplicação da digestão anaeróbia

Sónia G. Barbosa ^{a, b}, Ana Nicolau ^{a, b}, Ana R. Silva ^{a, b}, Andreia F. Salvador ^{a, b}, Olívia S.G.P. Soares ^{c, d}, Manuel F.R. Pereira ^{c, d}, Ana L. Gonçalves ^e, Maria A. Pereira ^{a, b}, Luciana Pereira ^{a, b, *}

^a CEB, Centro de Engenharia Biológica, Universidade do Minho, Braga, Portugal

^b LABBELS, Laboratório Associado, Braga/Guimarães, Portugal

^c LSRE-LCM, Laboratório de Engenharia de Separação e Reação - Laboratório de Catálise e Materiais, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal

^d ALiCE, Laboratório Associado em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal

^e CITEVE, Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal, Vila Nova de Famalicão, Portugal

RESUMO

A indústria têxtil, das maiores consumidoras de água a nível global, é responsável por 20 % das águas residuais produzidas, evidenciando a urgência de implementar uma gestão eficiente da água, com soluções inovadoras e sustentáveis. Os processos de tratamento devem ser projetados para lidar com a complexidade e variabilidade dos efluentes gerados, assegurando a qualidade da água tratada e viabilizando a sua reutilização, contribuindo para enfrentar o desafio global da escassez de água. Este estudo avaliou o potencial da digestão anaeróbia (DA) para o tratamento de águas residuais têxteis e produção simultânea de biogás. Devido à elevada toxicidade dos três efluentes têxteis testados, que apresentavam cor intensa e elevada presença de compostos químicos, incluindo sal, a DA revelou-se ineficaz, mesmo com adição de mediadores redox (materiais de carbono). Dado a eficácia provada da DA com efluentes corados modelo, é crucial implementar estratégias para diminuir a toxicidade, tais como a adaptação gradual do inóculo, visando obter um inóculo enriquecido com microrganismos tolerantes e eficientes no tratamento de efluentes têxteis reais, de modo a viabilizar a sua aplicação em ambiente industrial, permitindo reutilizar a água, menor custo de tratamento e conformidade ambiental.

Palavras-Chave: Biogás, carga orgânica, digestão anaeróbia, efluentes têxteis, toxicidade

doi: 10.22181/aer.2025.0306

* Autor para correspondência

E-mail: lucianapereira@ceb.uminho.pt

Sustainable Water Reuse in the Textile Sector: limitations and strategies for the application of anaerobic digestion

*Sónia G. Barbosa^{a, b}, Ana Nicolau^{a, b}, Ana R. Silva^{a, b}, Andreia F. Salvador^{a, b}, Olívia S.G.P. Soares^{c, d}, Manuel F.R. Pereira^{c, d}, Ana L. Gonçalves^e, Maria A. Pereira^{a, b}, Luciana Pereira^{a, b, *}*

^a CEB, Centro de Engenharia Biológica, Universidade do Minho, Braga, Portugal

^b LABBELS, Laboratório Associado, Braga/Guimarães, Portugal

^c LSRE-LCM, Laboratório de Engenharia de Separação e Reação - Laboratório de Catálise e Materiais, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal

^d ALiCE, Laboratório Associado em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal

^e CITEVE, Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal, Vila Nova de Famalicão, Portugal

ABSTRACT

The textile industry, one of the largest water consumers worldwide, generates 20 % of global wastewater, highlighting the urgency for implementing efficient water management strategies based on innovative and sustainable solutions adapted to the complex generated effluents. So, treatment processes must be designed to handle the complexity and variability of textile effluents, ensuring treated water quality and enabling its reuse, thus addressing global water scarcity. This study evaluated the potential of anaerobic digestion (AD) for textile wastewater with simultaneous biogas production. However, due to the high toxicity towards the anaerobic microorganisms of the three effluents tested, characterized by intense colour and a high level of chemical compounds, including salt, AD proved ineffective, even with redox mediators (carbon materials). Given AD's proven effectiveness in treating model dye effluents, it is crucial to implement strategies to reduce effluent toxicity, such as the gradual adaptation of the inoculum aiming to enrich it with tolerant and efficient microorganisms for real textile effluent treatment, thus enabling its industrial application, water reuse, reduced treatment costs, and environmental compliance.

Keywords: Anaerobic digestion, biogas, organic load, textile wastewater, toxicity

doi: 10.22181/aer.2025.0306

** Corresponding author*

E-mail: lucianapereira@ceb.uminho.pt

1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil figura como uma das maiores consumidoras de água e a segunda maior fonte de poluição hídrica a nível mundial (Mikucioniene et al. 2024). Estima-se que os processos de tingimento e acabamento têxtil sejam responsáveis por cerca de 20 % da produção global de águas residuais (Bailey et al. 2022). Estas águas residuais, caracterizadas por uma composição química complexa e bastante variável devido à diversidade das fibras processadas, tecnologias de enobrecimento e substâncias químicas utilizadas (ex.: detergentes, surfactantes, corantes, etc.), apresentam valores variáveis de carência química de oxigénio (CQO) e de carência bioquímica de oxigénio (CBO), e elevadas concentrações de sal e condutividade (Pereira e Alves 2012, Wang et al. 2022). Geralmente, são muito coradas mesmo que a concentração de corantes não seja muito alta (Pereira e Alves 2012). Até recentemente, o principal foco das indústrias têxteis no que se refere ao tratamento das suas águas residuais era a sua descarga segura no meio hídrico. Um estudo de 2018 mostrou que 90 % das empresas do Norte de Portugal descarregavam as suas águas residuais em coletores municipais, enquanto apenas 10 % possuíam uma estação de tratamento de águas residuais (ETAR) própria (Soto 2018). No entanto, face à transição para um modelo de economia circular que privilegia as energias renováveis e a reutilização da água, tornou-se imperativo desenvolver soluções inovadoras e economicamente viáveis, que promovam a poupança de água nas indústrias e contribuam para mitigar o crescente problema da escassez hídrica (Karthik and Rathinamoorthy 2015, Silva et al. 2018).

Embora os tratamentos convencionais de águas residuais têxteis, maioritariamente baseados em processos físico-químicos, sejam amplamente aplicados, apresentam alguns inconvenientes, sobretudo em países em desenvolvimento devido aos elevados gastos energéticos e à necessidade de uso de reagentes muitas vezes dispendiosos, e ao seu potencial contributo para a poluição química (Gupta e Suhas 2009). A digestão anaeróbia (DA) surge como uma alternativa sustentável e promissora, alinhada com iniciativas da União Europeia, como o REPowerEU, para o tratamento de águas residuais com elevada carga orgânica, ao mesmo tempo que permite gerar biogás, uma fonte de energia renovável composta tipicamente por 50-70 % de metano (CH_4) e 30-50 % de dióxido de carbono (CO_2). Durante a DA de efluentes têxteis, os corantes presentes podem funcionar como aceitadores finais de eletrões libertados durante a degradação da matéria orgânica presente nos efluentes, sendo reduzidos a aminas aromáticas, incolores (Silva et al. 2020). Contudo, a presença de outros compostos nos efluentes têxteis, de natureza recalcitrante, tem sido associada à baixa produtividade de biogás e a elevados tempos de retenção hidráulica devido à inibição (Spagni et al. 2012). Para ultrapassar estas limitações, têm sido aplicados diversos materiais de carbono (MC) que atuam como mediadores redox, promovendo a transferência dos eletrões resultantes da oxidação da matéria orgânica para os aceitadores finais, acelerando o processo e reduzindo o consumo de tempo e energia (Abbas et al. 2021). Estudos anteriores demonstraram que a suplementação da DA com pequenas quantidades (0,1 – 0,5 g/L) de diversos MC, como o carvão ativado (CA) e os nanotubos de carbono (NTC), acelera a redução/degradação de corantes em efluentes sintéticos e reais (Pereira et al. 2010, Pereira et al. 2014, Pereira et al. 2016, Pereira et al. 2017, Silva et al. 2020). Para além de serem efetivos com baixas concentrações, pelo facto de serem regenerados durante o processo de oxidação-redução, são insolúveis, o que permite mantê-los nos reatores e separá-los dos efluentes tratados (Pereira et al. 2010). No entanto, os estudos aplicados a efluentes têxteis reais permanecem limitados, sendo que a maioria se foca na utilização de corantes individuais. Neste trabalho, avaliou-se o potencial da DA no tratamento de três efluentes têxteis reais (E1, E2 e E3), recolhidos em empresas com tecnologias de processamento distintas. Paralelamente, avaliou-se o efeito da adição de dois MC com diferentes características texturais, um microporoso (CA) e um mesoporoso (NTC), no desempenho do processo de DA destes efluentes. Este estudo

insere-se no âmbito do projeto GIATEX (Gestão Inteligente da Água na Indústria Têxtil e do Vestuário), cujo principal objetivo é desenvolver um sistema eficaz e inovador para a redução do consumo de água nos processos de enobrecimento têxtil (preparação, tinturaria, estamparia e acabamentos), combinando técnicas de redução de consumo de água e tecnologias de tratamento dos efluentes que promovam a sua reutilização.

2 Materiais e Métodos

2.1 Caracterização dos efluentes têxteis

Os efluentes em estudo foram recolhidos do tanque de homogeneização de duas empresas têxteis sediadas no Norte de Portugal (E1, E2), e uma no Centro de Portugal (E3). Estes, foram posteriormente caracterizados em termos de sólidos suspensos totais (SST), conforme descrito no *Standard Methods* (APHA et al. 1998), pH, condutividade e salinidade com um medidor C3010 (Consort, Turnhout, Bélgica), e carência química de oxigénio (CQO) através de kits específicos (Hach, Düsseldorf, Alemanha).

2.2 Testes de biodegradabilidade anaeróbia

A avaliação do potencial de biodegradação anaeróbia dos três efluentes têxteis (E1, E2 e E3) foi realizada através de ensaios de BMP (do inglês *Biochemical Methane Potential*), que definem a quantidade máxima de CH₄ que pode ser produzida a partir de um resíduo ou de uma água residual durante o processo de DA. Os ensaios foram realizados em reatores fechados de 600 mL, com um volume de trabalho de 100 mL e *headspace* de 500 mL, sob condições anaeróbias, sem agitação e a temperatura controlada (~37 °C). Os efluentes, utilizados como substrato, fonte de carbono e energia, foram incubados na presença de inóculo anaeróbio (60 % (v/v)), com suplementação de macro e micronutrientes necessários ao processo biológico (Angelidaki et al. 2009, Holliger et al. 2016). O inóculo consistiu numa mistura de 50 % de lamas granulares e 50 % de lamas suspensas, o qual foi previamente caracterizado em termos de atividade metanogénica específica (AME) como descrito em Coates et al. (1996). O pH inicial dos efluentes foi ajustado a 7,0 ± 0,2, valor ideal para a atividade biológica do consórcio microbiano. Paralelamente aos ensaios com os efluentes, efetuou-se um ensaio sem efluente (ensaio branco) que representa a produção de CH₄ a partir do substrato residual presente no inóculo, a qual foi posteriormente subtraída à produção total de CH₄ nos ensaios com os efluentes. Foi também realizado um ensaio com celulose microcristalina, substrato de fácil oxidação, como ensaio controlo para aferir a atividade biológica do inóculo utilizado. Como estratégia para acelerar o tratamento anaeróbio, testou-se a adição de 0,5 g/L de CA e NTC, concentração previamente estabelecida com base em estudos anteriores (Pereira et al. 2016). O CA, de carácter microporoso, apresenta dimensões médias de 5 mm de comprimento e 0,8 mm de diâmetro, enquanto os NTC, com carácter mesoporoso, têm em média 1,5 µm de comprimento e 9,5 nm de diâmetro. As propriedades texturais dos materiais, área de superfície específica (S_{BET}), volume de poros total (V_p), e volume de microporos (V_{p, micro}), e o pH no ponto de carga zero (pH_{PZC}), encontram-se no Quadro 1.

Quadro 1. Caracterização dos materiais de carbono (Pereira et al. 2010, Pereira et al. 2014)

Material	S _{BET} (±10 m ² /g)	V _{p, micro} (±0,005 cm ³ /g)	V _p (±0,005 cm ³ /g)	pH _{PZC} (±0,2)
CA	1032	0,382	0,525	8,4
NTC	331	0	0,416	6,6

Com o objetivo de avaliar o eventual efeito inibitório dos efluentes em estudo sobre a atividade da comunidade metanogénica acetoclástica, realizou-se um ensaio de toxicidade anaeróbia conforme descrito em Colleran and Pistilli (1994). Este grupo microbiano, é

responsável pela etapa de conversão de acetato a CH_4 , uma etapa crítica no processo de DA, sendo o grupo mais sensível a condições ambientais adversas. Para o ensaio, adicionou-se como fonte de carbono 30 mmol/L de acetato, e monitorizou-se a produção de CH_4 ao longo do tempo, na ausência (controle) e na presença dos diferentes efluentes (E1, E2 e E3). Para cada efluente, foram testadas duas concentrações correspondentes a aproximadamente 50 % e 100 % da carga orgânica original (Quadro 2). Para cada efluente, foram determinadas as concentrações de CQO correspondentes à inibição de 50 % da atividade acetoclástica (*inhibitory concentration*, IC50).

Quadro 2. Concentrações de cada efluente utilizadas no ensaio de toxicidade

Efluente	Concentração 1 (g _{CQO} /L)	Concentração 2 (g _{CQO} /L)
E1	0,578	1,157
E2	0,475	0,950
E3	0,585	1,170

O teor de CH_4 no biogás acumulado no *headspace* de todos os reatores foi medido por cromatografia gasosa, utilizando um cromatógrafo equipado com um detetor FID (*Flame Ionization Detector*), como descrito em Silva et al. (2022).

3 Resultados e discussão

Os dados da caracterização dos efluentes têxteis em estudo encontram-se no Quadro 3. A CQO varia entre cerca de 1100 mg/L e 1350 mg/L. O E3 apresenta pH ligeiramente ácido (6,5), enquanto os efluentes E1 e E2 apresentam um carácter alcalino (pH = 11,3 e 10,2, respetivamente). Em termos de SST, os efluentes E1 e E2 contêm maior quantidade, na ordem dos 500 mg/L, ao passo que o E3 possui cerca de 150 mg/L. Os efluentes E1 e E2 exibem condutividade e teor de sal ~5 vezes superiores aos do E3.

Quadro 3. Caracterização dos efluentes têxteis E1, E2 e E3

Parâmetro	E1	E2	E3
CQO (mg/L)	1098 ± 72	1337 ± 48	1352 ± 87
pH	11,3	10,2	6,52
SST (mg/L)	522 ± 103	495 ± 210	156 ± 16
Condutividade (mS/cm)	5,3	5,9	1,2
Salinidade (g/L)	2,7	3,0	0,6

A Figura 1 apresenta a produção cumulativa de CH_4 obtida durante o ensaio de biodegradabilidade para cada efluente, e para os ensaios branco e de controlo. No controlo, verificou-se uma conversão de aproximadamente 80 % da celulose em CH_4 , o que indica uma boa atividade metanogénica do inóculo selecionado. Contudo, com os efluentes reais E1 e E3, a produção de CH_4 ($8,13 \pm 0,41$ mmol e $6,53 \pm 0,23$ mmol, respetivamente) foi semelhante à obtida no respetivo ensaio branco (sem efluente), indicando baixa biodegradabilidade dos compostos presentes nos efluentes. Por outro lado, o E2, resultou numa produção de CH_4 inferior ($4,44 \pm 0,10$ mmol) à do ensaio branco ($6,97 \pm 0,15$ mmol), sugerindo um efeito tóxico do E2 sobre a comunidade microbiana. De forma semelhante, Spagni et al. (2012) reportaram a inibição da produção de CH_4 na presença do corante Reativo Laranja 16. No entanto, foi observada a acumulação de ácidos gordos voláteis (AGV) no sistema, sugerindo que apenas a última etapa do processo de DA, metanogénese, foi afetada. Apesar disso, foi observada uma descoloração do efluente superior a 99 %, demonstrando a eficiência da remoção do corante. É importante salientar que nos processos anaeróbios a descoloração dos efluentes têxteis ocorre pela redução dos corantes, que atuam como aceitadores de eletrões gerados durante a oxidação do substrato orgânico presente no efluente (Pereira, et al. 2015).

No presente trabalho, foram testados dois MC com diferentes características texturais, CA (microporoso) e NTC (mesoporoso), dado o comprovado potencial da sua adição em

digestores anaeróbios para intensificar a remoção de poluentes e a produção de CH_4 , promovendo a transferência de elétrons e acelerando as reações (Pereira et al. 2010; Salvador et al. 2017; Cavaleiro et al. 2020; Silva et al. 2022; Braga et al. 2024; Braga et al. 2025). A incorporação de MC constitui uma estratégia promissora, dado que estes materiais, pelas suas propriedades únicas como elevada área superficial, capacidade de adsorção e características catalíticas, atuam como mediadores redox eficazes, aumentando significativamente a eficiência global do processo sem necessidade de adição contínua (Silva et al. 2022). Num estudo anterior com dois efluentes têxteis reais, num deles verificou-se uma descoloração de 63 %, a uma velocidade de $0,59 \text{ d}^{-1}$, e a presença de $0,1 \text{ g/L}$ de NTC aumentou a velocidade de descoloração para $0,72 \text{ d}^{-1}$. No caso do segundo efluente testado, só se verificou descoloração na presença dos NTC, embora com uma eficiência menor, 32 % (Pereira et al. 2014). Importa referir que nesses ensaios foi adicionada uma mistura de AGV como fonte de elétrons, o que difere das condições adotadas no presente estudo, em que a matéria orgânica oxidável provém apenas do efluente. Neste estudo, além da ausência de produção de CH_4 , ao contrário do que foi observado por Spagni et al. (2012), não foi observada a acumulação de AGV no sistema, o que indica que não houve oxidação da carga orgânica dos efluentes, sugerindo que também não tenha ocorrido redução dos corantes e, conseqüentemente, a não remoção de cor. Estes resultados foram consistentes tanto na ausência quanto na presença dos materiais, para todos os efluentes. Outros estudos indicam que compostos presentes nos efluentes têxteis, como detergentes, dispersantes, tensoativos, corantes azo e antraquinônicos, podem reduzir a degradação biológica e inibir significativamente a metanogénese, afetando a eficiência dos processos de tratamento de águas residuais anaeróbios (Fontenot et al. 2002, Dai et al. 2016).

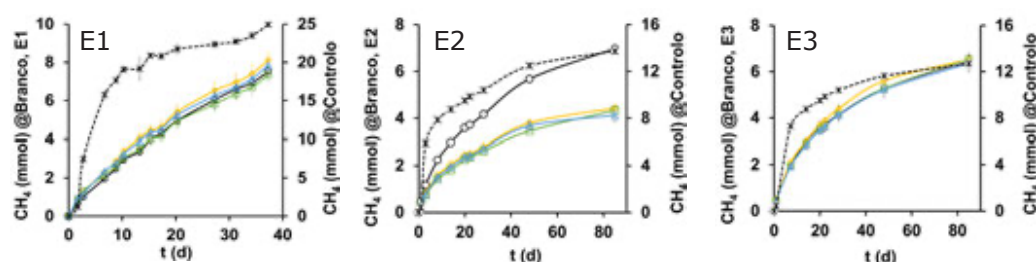


Figura 1. Produção cumulativa de CH_4 (mmol) ao longo do tempo (d) a partir dos efluentes E1, E2 e E3 nos ensaios (*) Controle, (o) Branco, (◇) Efluente, (□) Efluente+CA, (△) Efluente+NTC

O potencial efeito tóxico dos efluentes foi avaliado através de ensaios de toxicidade anaeróbia baseados na atividade acetoclástica. A Figura 2 apresenta a relação entre a concentração de CQO de cada efluente e a redução da atividade acetoclástica.

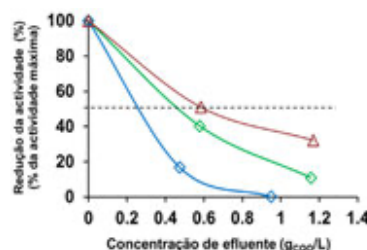


Figura 2. Variação da redução da atividade metanogénica acetoclástica (%) com o aumento da concentração de CQO (g/L) do efluente (◇) E1, (○) E2 e (△) E3.

As concentrações de CQO correspondentes à IC_{50} da atividade acetoclástica específica foram de aproximadamente 450 mg/L para o E1, 250 mg/L para o E2 e 600 mg/L para o E3. Os resultados evidenciaram o efeito inibitório dos efluentes sobre os microrganismos metanogénicos, com o E2 a apresentar maior toxicidade, o que corrobora os resultados

obtidos nos ensaios de biodegradabilidade anaeróbia e a ineficácia dos tratamentos anaeróbios aplicados para tratar estes efluentes. Este comportamento está em consonância com outros estudos que demonstraram a inibição da atividade metanogénica específica na presença de corantes (Chaudhari and Sanjeev 2002; da Silva, et al. 2022). No entanto, uma vez que estudos anteriores já demonstraram que a DA, especialmente na presença de MC, pode ser eficaz na descoloração de vários corantes, é plausível que a complexidade dos efluentes têxteis, que contêm diversas outras substâncias, contribua significativamente para o efeito inibitório observado. Uma limitação importante neste contexto é a dificuldade em conhecer a composição exata dos efluentes provenientes da indústria têxtil. As diferenças de comportamento entre os três efluentes testados, embora apresentem um padrão semelhante, devem-se provavelmente a variações na sua composição específica.

4 Conclusões

Os resultados obtidos demonstram que, nas condições testadas, a DA não foi eficaz no tratamento dos efluentes em estudo, devido à inibição da atividade metanogénica pelos compostos presentes nos efluentes. A adição de MC não se traduziu em melhorias na remoção de cor, CQO ou produção de CH₄. No entanto, os resultados sugerem que a implementação de estratégias de diminuição do efeito tóxico dos efluentes, tais como a adaptação gradual de inóculos microbianos para o tratamento destes efluentes tem o potencial de aumentar a eficiência do processo de DA. A adaptação gradual do consórcio microbiano, se replicada em escala industrial, apresenta elevado potencial para o setor têxtil ao fornecer uma estratégia mais eficiente e sustentável para o tratamento dos seus efluentes, possibilitando a reutilização da água e a valorização energética através da produção de biogás, com benefícios ambientais associados à redução da carga poluente e benefícios económicos resultantes da economia circular e da redução de custos de tratamento. A utilização dos MC para auxiliar no tratamento deste tipo de efluentes também deverá ser explorada para potenciar o desempenho do processo.

Agradecimentos

Estudo desenvolvido no âmbito da Agenda Mobilizadora GIATEX - Gestão Inteligente da Água na ITV, projeto apoiado pelo PRR - Plano de Recuperação e Resiliência e pelos Fundos Europeus NextGeneration EU (<https://recuperarportugal.gov.pt/>). Agradecimento também à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito dos projetos estratégicos UIDB/04469/2020 e UIDP/50020/2020. Agradecimento ao LABBELS (LA/P/0029/2020) e ao ALiCE (LA/P/0045/2020).

Referências

- Abbas, Y., S. Yun, Z. Wang, Y. Zhang, X. Zhang, and K. Wang. 2021. "Recent Advances in Bio-Based Carbon Materials for Anaerobic Digestion: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135: 110378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110378>.
- Angelidaki, I., M.M. Alves, D. Bolzonella, L. Borzacconi, J.L. Campos, A.J. Guwy, S. Kalyuzhnyi, P. Jenicek, and J.B. Van Lier. 2009. "Defining the Biomethane Potential (BMP) of Solid Organic Wastes and Energy Crops: A Proposed Protocol for Batch Assays." *Water Science and Technology* 59 (5): 927–34. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>.
- APHA, AWWA, and WPCF. 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Edited by American Public Health Association. 17th ed. Washington, D.C.
- Bailey, K., A. Basu, and S. Sharma. 2022. "The Environmental Impacts of Fast Fashion on Water Quality: A Systematic Review." *Water* 14: 1073. <https://doi.org/10.3390/w14071073>.

- Braga, C.S.N., G. Martins, M.S. Duarte, O.S.G.P. Soares, M.F.R. Pereira, I.A.C. Pereira, M.M. Alves, L. Pereira, and A.F. Salvador. 2025. "Microbial Activity of the Inoculum Determines the Impact of Activated Carbon, Magnetite and Zeolite on Methane Production." *Science of the Total Environment* 960: 178340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178340>.
- Braga, C.S.N., G. Martins, O.S.G.P. Soares, M.F.R. Pereira, I.A.C. Pereira, L. Pereira, M.M. Alves, and Andreia F. Salvador. 2024. "Non-Conductive Silicon-Containing Materials Improve Methane Production by Pure Cultures of Methanogens." *Bioresource Technology* 408 (July): 0–2. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131144>.
- Cavaleiro, Ana J., Andreia F. Salvador, Gilberto Martins, Cláudia C. Oliveira, Yuchen Liu, Valdo R. Martins, A. Rita Castro, et al. 2020. "Multi-Walled Carbon Nanotubes Enhance Methanogenesis from Diverse Organic Compounds in Anaerobic Sludge and River Sediments." *Applied Sciences (Switzerland)* 10 (22): 1–13. <https://doi.org/10.3390/app10228184>.
- Chaudhari, B., and M. Sanjeev. 2002. "Anaerobic Decolorisation of Simulated Textile Wastewater Containing Azo Dyes." *Bioresource Technology* 82: 225–31. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1998.463.30>.
- Coates, John D., Michael F. Coughlan, and Emer Colleran. 1996. "Simple Method for the Measurement of the Hydrogenotrophic Methanogenic Activity of Anaerobic Sludges." *Journal of Microbiological Methods* 26 (3): 237–46. [https://doi.org/10.1016/0167-7012\(96\)00915-3](https://doi.org/10.1016/0167-7012(96)00915-3).
- Colleran, E., and A. Pistilli. 1994. "Activity Test System for Determining the Toxicity of Xenobiotic Chemicals to the Methanogenic Process." *Annali Di Microbiologia Ed Enzimologia* 44: 1–20.
- Dai, Ruobin, Xiaoguang Chen, Ying Luo, Puyue Ma, Shengsheng Ni, Xinyi Xiang, and Gang Li. 2016. "Inhibitory Effect and Mechanism of Azo Dyes on Anaerobic Methanogenic Wastewater Treatment: Can Redox Mediator Remediate the Inhibition?" *Water Research* 104: 408–17. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.046>.
- Fontenot, E. J., M. I. Beydilli, Y. H. Lee, and S. G. Pavlostathis. 2002. "Kinetics and Inhibition during the Decolorization of Reactive Anthraquinone Dyes under Methanogenic Conditions." *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research* 45 (10): 105–11. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0302>.
- Gupta, V. K., and Suhas. 2009. "Application of Low-Cost Adsorbents for Dye Removal - A Review." *Journal of Environmental Management* 90 (8): 2313–42. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>.
- Holliger, C., M. Alves, D. Andrade, I. Angelidaki, S. Astals, U. Baier, C. Bougrier, et al. 2016. "Towards a Standardization of Biomethane Potential Tests." *Water Science and Technology* 74 (11): 2515–22. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>.
- Karthik, T., and R. Rathinamoorthy. 2015. *Recycling and Reuse of Textile Effluent Sludge. Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes*. https://doi.org/10.1007/978-981-287-643-0_9.
- Mikucioniene, Daiva, David Mínguez García, Reazuddin Repon, Rimvydas Mila, Georgios Priniotakis, Ioannis Chronis, Kyriaki Kiskira, Rick Hogeboom, Raquel Belda-Anaya, and Pablo Díaz-García. 2024. "Understanding and Addressing the Water Footprint in the Textile Sector: A Review." *AUTEX Research Journal* 24 (1): 20240004. <https://doi.org/10.1515/aut-2024-0004>.
- Pereira, L., and M. Alves. 2012. "Dyes - Environmental Impact and Remediation." In *Environmental Protection Strategies for Sustainable Development*, edited by Abdul Malik and Elisabeth Grohmann, 111–62. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1591-2_4.
- Pereira, L., P. Dias, O. S.G.P. Soares, P. S.F. Ramalho, M. F.R. Pereira, and M. M. Alves. 2017. "Synthesis, Characterization and Application of Magnetic Carbon Materials as Electron

- Shuttles for the Biological and Chemical Reduction of the Azo Dye Acid Orange 10." *Applied Catalysis B: Environmental* 212: 175–84. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.04.060>.
- Pereira, L., P. K. Mondal, and M. M. Alves. 2015. "Aromatic Amines Sources, Environmental Impact and Remediation." In *Pollutants in Buildings, Water and Living Organisms. Environmental Chemistry for a Sustainable World, Vol 7.*, edited by E Lichtfouse, J Schwarzbauer, and D Robert, 297–346. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19276-5_7.
- Pereira, L., R. Pereira, M.F.R. Pereira, F.P. van der Zee, F.J. Cervantes, and M. M. Alves. 2010. "Thermal Modification of Activated Carbon Surface Chemistry Improves Its Capacity as Redox Mediator for Azo Dye Reduction." *Journal of Hazardous Materials* 183 (1–3): 931–39. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.005>.
- Pereira, R. A., M. F. R. Pereira, M. M. Alves, and L. Pereira. 2014. "Carbon Based Materials as Novel Redox Mediators for Dye Wastewater Biodegradation." *Applied Catalysis B: Environmental* 144: 713–20. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.07.009>.
- Pereira, R.A., A.F. Salvador, P. Dias, M.F.R. Pereira, M.M. Alves, and L. Pereira. 2016. "Perspectives on Carbon Materials as Powerful Catalysts in Continuous Anaerobic Bioreactors." *Water Research* 101: 441–47. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.06.004>.
- Salvador, A.F., G. Martins, M. Melle-Franco, R. Serpa, A.J.M. Stams, A.J. Cavaleiro, M.A. Pereira, and M.M. Alves. 2017. "Carbon Nanotubes Accelerate Methane Production in Pure Cultures of Methanogens and in a Syntrophic Coculture." *Environmental Microbiology* 19 (7): 2727–39. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13774>.
- Silva, A. R., M. M. Alves, and L. Pereira. 2022. "Progress and Prospects of Applying Carbon-Based Materials (and Nanomaterials) to Accelerate Anaerobic Bioprocesses for the Removal of Micropollutants." *Microbial Biotechnology* 15 (4): 1073–1100. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13822>.
- Silva, A. R., M. S. Duarte, M. M. Alves, and L. Pereira. 2022. "Bioremediation of Perfluoroalkyl Substances (PFAS) by Anaerobic Digestion: Effect of PFAS on Different Trophic Groups and Methane Production Accelerated by Carbon Materials." *Molecules* 27: 1895. <https://doi.org/10.3390/molecules27061895>.
- Silva, A.R., O.S.G.P. Soares, M.F.R. Pereira, M.M. Alves, and L. Pereira. 2020. "Tailoring Carbon Nanotubes to Enhance Their Efficiency as Electron Shuttle on the Biological Removal of Acid Orange 10 Under Anaerobic Conditions." *Nanomaterials* 10 (12): 2496. <https://doi.org/10.3390/nano10122496>.
- Silva, C.P., S. Gavazza, and S.P. Araújo. 2022. "Tratamento Anaeróbio de Efluente Têxtil: Toxicidade a Organismos Metanogênicos." *Engenharia Sanitária e Ambiental* 27: 1229–37. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220210341>.
- Silva, L.G.M., F.C. Moreira, A.A.U. Souza, S.M.A.G.U. Souza, R.A.R. Boaventura, and V.J.P. Vilar. 2018. "Chemical and Electrochemical Advanced Oxidation Processes as a Polishing Step for Textile Wastewater Treatment: A Study Regarding the Discharge into the Environment and the Reuse in the Textile Industry." *Journal of Cleaner Production* 198: 430–42. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.001>.
- Soto, Diana. 2018. "Caracterização Ambiental Do Setor Têxtil Em Portugal." <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/24855/1/dissertação.pdf>.
- Spagni, A., S. Casu, and S. Grilli. 2012. "Decolourisation of Textile Wastewater in a Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor." *Bioresource Technology* 117: 180–85. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.074>.
- Wang, Xiaoxuan, Jinming Jiang, and Weijun Gao. 2022. "Reviewing Textile Wastewater Produced by Industries: Characteristics, Environmental Impacts, and Treatment Strategies." *Water Science and Technology* 85 (7): 2076–96. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.088>.