



## AVANÇOS CIENTÍFICOS SOBRE A CARBONIZAÇÃO HIDROTÉRMICA DE LODOS DE ESGOTO

### **Matheus Cavali<sup>(1)</sup>**

Doutorando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); Mestre em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia pela Universidade Federal do Paraná (UFPR)

### **Armando Borges de Castilhos Junior<sup>(1)</sup>**

Professor Titular da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); Pós-Doutorado na University of California, Davis; Doutorado em Gestão e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos e Industriais no Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, França.

### **Nelson Libardi Junior<sup>(1)</sup>**

Professor Adjunto da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); Pós-doutorado pela UFSC; Doutorado em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia pela Universidade Federal do Paraná (UFPR).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Campus Universitário Trindade - Florianópolis – Santa Catarina – CEP: 88.040-970 – Brasil – Tel: +55 48 37217738 – e-mail: nelson.libardi@ufsc.br

## **RESUMO**

A carbonização hidrotérmica (CHT) de lodo de esgoto se apresenta como uma alternativa para a valorização e destinação deste resíduo, que é gerado em grandes quantidades nas Estações de Tratamento de Efluente sanitário (ETE). O material resultante da CHT de lodo é o hidrocarvão, um material que possui características desejáveis para sua utilização como adsorvente. Como esta temática ainda é incipiente na literatura, este trabalho apresenta uma revisão e os recentes avanços da CHT de lodo de esgoto. Este estudo revelou que as pesquisas acerca do tema são recentes. Além disso, a combinação do lodo de esgoto com outros resíduos (Co-CHT) vem se destacando como estratégia para melhorar as características do hidrocarvão como material adsorvente de poluentes e/ou nutrientes. A aplicação ambiental do hidrocarvão se alinha aos conceitos de bioeconomia, tornando este processo interessante para tornar mais sustentável as operações unitárias em uma ETE.

**PALAVRAS-CHAVE:** Carbonização hidrotérmica, hidrocarvão, lodo de esgoto, adsorvente.

## **INTRODUÇÃO**

A crescente geração de resíduos tem pressionado o desenvolvimento de alternativas para valorizar estes materiais como insumos de outros processos. Esta abordagem procura estabelecer a criação de novos mercados, assim como fomentar o avanço de uma economia circular (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

A elevada geração de lodo em estações de tratamento de esgoto (ETE) é uma resposta ao avanço deste serviço imprescindível à sociedade. No Brasil, conforme os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, a população atendida pela coleta de esgoto passou de 46,2% em 2010 para 55,0% em 2020. Em relação ao tratamento do esgoto gerado, 37,8% era tratado em 2010 e 50,8% em 2020 (Brasil, 2020). Este aumento é um avanço para o saneamento no país, mas também implica uma maior geração de lodo que demanda uma destinação final adequada. Isto, porém, configura um alto custo para a ETE devido à necessidade de desidratar e adensar o lodo (Sperling et al., 2007). Assim, é importante a busca de novos processos que possam auxiliar as ETE no gerenciamento do lodo e ainda agregar valor a este resíduo.

Uma alternativa para o tratamento e a valorização do lodo de esgoto é a carbonização hidrotérmica (CHT). Comparada a outros processos termoquímicos, a CHT seria o processo termoquímico mais adequado

para o tratamento resíduos com elevada umidade. Portanto, este processo pode ser uma solução viável para tratar e estabilizar lodos de esgoto, minimizando a produção de gases de efeito estufa. Na CHT, a biomassa é misturada com água e aquecida sob condições de pressão autógena em um recipiente hermeticamente fechado (Parshetti et al., 2014). A água entre 100 e 374 °C torna-se subcrítica, atuando como catalisador (Zhao et al., 2018). Através da CHT é obtido um produto sólido denominado hidrocarvão: um combustível sólido e homogêneo, rico em carbono e, no caso de lodos, biologicamente esterilizado devido ao tratamento térmico (Langone and Basso, 2020).

Os hidrocarvões têm sido avaliados quanto às suas capacidades para adsorver poluentes (metais pesados, corantes e contaminantes emergentes) e nutrientes (fósforo e nitrogênio) de ambientes aquáticos, bem como para a geração de energia e melhoramento de solos (Cavali et al., 2023). Neste sentido, o processamento do lodo de esgoto pela CHT não somente auxiliaria no tratamento de um resíduo úmido gerado em grandes quantidades, mas também produziria um material (hidrocarvão) para potenciais aplicações ambientais.

Considerando a incipiência do tema na literatura, o objetivo deste trabalho é verificar o avanço das pesquisas em relação à CHT de lodo de esgoto como uma alternativa de valorização deste resíduo.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para o levantamento de estudos que abordaram o tema de interesse deste trabalho foi utilizado a base de dados *Scopus*. A busca utilizou os termos “*hydrothermal carbonization*”, “*hydrochar*” e “*sewage sludge*”, limitando a presença deles no título, resumo e palavras-chave dos documentos (*TITLE-ABS-KEY(("hydrothermal carbonization" OR "hydrochar") AND "sewage sludge")*). Para verificar o avanço nos últimos cinco anos, o período da busca foi dividido em dois intervalos: antes de 31/12/2017 e após 01/01/2018. O software Bibliometrix (Aria and Cuccurullo, 2017) foi utilizado para elaborar os mapas temáticos de palavras-chave.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca na base de dados *Scopus* reportou 362 documentos (artigos e capítulos), dos quais apenas 71 foram publicados antes de 31/12/2017. Isto mostra o avanço científico sobre a CHT de lodo de esgoto nos últimos cinco anos. Do total de documentos reportados até a atualidade, 80,39% foram publicados a partir de 01/01/2018, enfatizando o recente interesse pela possibilidade de valorizar o resíduo das ETE através da CHT.

A Figura 1 apresenta os mapas temáticos de palavras-chave para os períodos considerados. O avanço científico acerca da temática de produção de hidrocarvão a partir de lodo de esgoto nos últimos cinco anos pode ser constatado pela presença de novos termos que anteriormente não eram reportados. A título de exemplo, podem ser citados: *kinetics, characterization, nutrient recovery, adsorption, process waters, aqueous phase, biochemical methane potential, energy recovery, co-hydrothermal carbonization, synergistic effect, phytotoxicity, response surface methodology* e *life cycle assessment*.



**Tabela 1. Exemplos de carbonização hidrotérmica (CHT) de lodo de esgoto.**

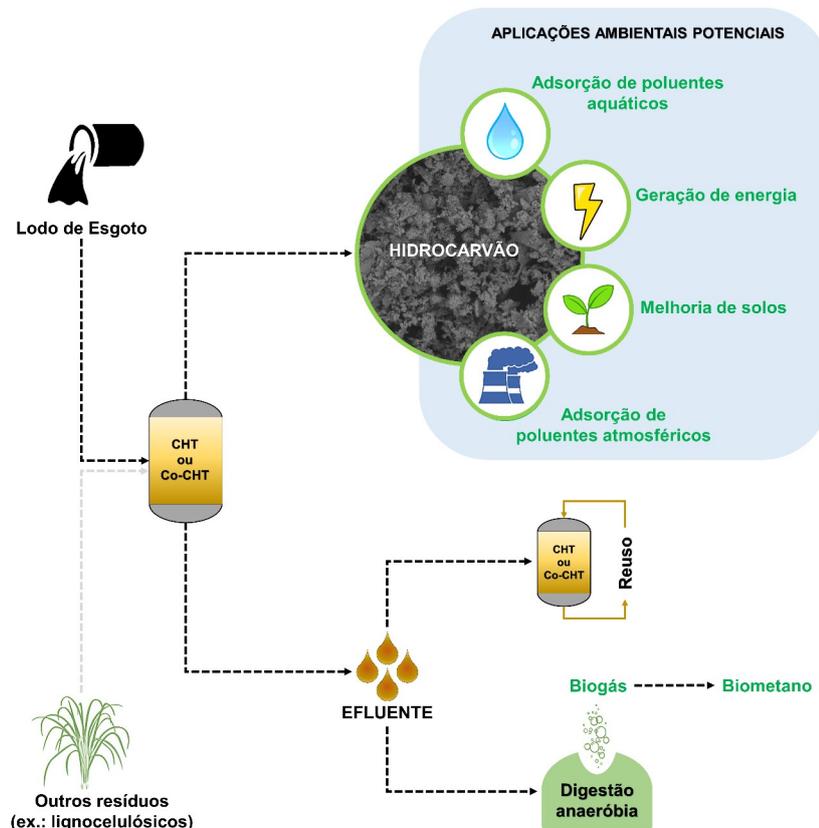
Temperatura (°C)	Tempo (h)	Razão Sólido/Líquido	Rendimento (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	Referência
200	4-12	1/6,14	54-60	45,0-50,6	43,9-46,7	5,4-8,3	32,5-33,3	4,1-4,4	16,9-18,5	2,1-2,2	(He et al., 2013)
170-350	1	1/4	73-88	22,7-39,1	57,6-68,9	3,3-10,0	38,7-44,0	4,4-4,8	46,0-51,0	1,7-3,1	(Wang et al., 2019)
140-200	0,25-4	1/22,3	61-81	55,3-76,0	22,9-39,2	1,0-5,7	37,2-39,2	5,1-5,8	52,1-54,1	2,6-4,6	(Danso-Boateng et al., 2015)
180-260	0,5-8	1/9	53-66	16,8-34,3	59,5-72,0	6,1-13,2	19,6-24,5	3,2-3,9	2,1-10,5	1,1-1,64	(Peng et al., 2016)
190-250	3	1/7,33	63-83	52,4-55,2	44,5-47,5	0,1-0,3	26,9-36,3	4,0-5,1	8,7-20,5	3,0-5,0	(Ferrentino et al., 2020)
180-240	1	1/5,06	52-74	44,0-50,9	42,9-48,1	6,2-7,9	30,8-55,8	4,1-6,0	5,2-16,8	4,1-5,2	(Marin-Batista et al., 2020)
200	1-6	1/3	74-81	37,2-39,8	48,4-50,6	9,3-14,2	56,1-58,1	6,4-6,8	29,6-32,6	3,8-4,5	(Saetea and Tippayawong, 2013)
180-280	0,5	1/1	80-94	47,3-62,3	29,4-40,0	8,4-12,7	40,0-48,5	4,1-5,9	42,5-46,7	4,9-7,2	(Kim et al., 2014)
150-250	0-2	1/33,33-1/4	63-80	20,6	76,9	2,5	12,4	0,83	8,9	0,95	(Y. Wang et al., 2022)
190-220	1,4-4	1/19-1/7,33	53-68	33,7-40,7	55,4-62,4	3,2-5,7	19,7-24,2	3,3-3,9	8,8-14,7	1,8-3,5	(Tasca et al., 2020)
180-250	0,5-10	1/5	70-73	39,8-44,8	33,2-41,4	12,6-24,6	37,0-48,5	4,2-4,6	8,6-13,8	1,8-2,2	(Koottatep et al., 2016)
170-260	1	1/1,35	31-89	55,4-71,5	15,9-26,6	12,6-18,0	46,2-53,9	5,2-6,0	9,7-23,6	4,7-8,3	(Khoshbouy; Takahashi; Yoshikawa, 2019)
180-240	1-4	1/1	51-61	34,1-44,3	51,2-57,9	7,2-9,3	24,2-27,4	3,2-4,0	11,9-16,5	1,9-2,9	(Wang; Chen; Jang, 2020)
200	1-8	1/1,3	48-55	47,3-56,6	40,5-45,4	2,9-4,0	32,5-33,0	3,7-4,4	14,3-17,3	3,1-4,8	(Malhotra and Garg, 2020)
180-300	0,5	1/1,5	69-85	54,7-64,3	38,0-42,9	0,4-4,4	45,3-47,7	4,9-6,5	3,1-8,1	0,7-1,0	(Z. Wang et al., 2020)

Compreender a composição imediata (voláteis, cinzas e carbono fixo) e elemental (C, H, N e O) assim como as propriedades físico-químicas (área de superfície, porosidade, grupos funcionais, potencial zeta, condutividade elétrica) do hidrocarvão é fundamental para a sua utilização em outras aplicações como, por exemplo, recuperação de nutrientes, adsorção de poluentes, geração de energia e melhoramento de solos (Cavali et al., 2023; Ferrentino et al., 2020). Ademais, as pesquisas recentes também têm dedicado atenção ao efluente da CHT de lodo de esgoto, propondo abordagens para a sua valorização como a produção de biogás ou o reuso em um novo processo de CHT (Cavali et al., 2022; Gaur et al., 2020; Xu et al., 2020). A Figura 2 ilustra estas possibilidades.

Paralelamente, a combinação de lodo de esgoto com outros resíduos, como, por exemplo, os lignocelulósicos, tem sido sugerida como uma alternativa para aprimorar as propriedades do hidrocarvão. Este processo é denominado co-carbonização hidrotérmica (Co-CHT) (Shan et al., 2023).

Diante deste cenário, as novas pesquisas também se debruçam sobre a otimização de processos de CHT e Co-CHT envolvendo lodo de esgoto através de ferramentas matemáticas como, por exemplo, superfícies de respostas (Blach and Engelhart, 2021; R. Wang et al., 2022). Já em relação à sustentabilidade da CHT de lodo de esgoto, as ferramentas de análise de ciclo de vida (ACV) têm sido utilizadas para mensurar os ganhos ambientais do processo considerando uma perspectiva mais holística (Mannarino et al., 2022; Medina-Martos et al., 2020).

**Figura 2. Aplicações ambientais potenciais do hidrocarvão e do efluente da CHT ou Co-CHT de lodo de esgoto.**



## CONCLUSÕES

Conforme constatado pelas publicações recentes, há um crescente interesse pela comunidade científica sobre a CHT de lodo de esgoto. Nos últimos cinco anos, o número de publicações referentes ao tema foi expressivo, assinalando um indicativo do potencial deste processo para o manejo, e a consequente valorização, de lodos de ETE. Evidentemente, mais estudos, como, por exemplo, análises econômicas, são necessários para verificar a exequibilidade deste processo em diferentes cenários. Por outro lado, é notável a pertinência das propostas de valorização de lodo de esgoto pelos processos de CHT ou Co-CHT que as novas pesquisas têm reportado.

Os avanços científicos revelam o potencial dos lodos de ETE como insumo para a produção de hidrocarvão. Esta prática pode ter um benefício ambiental duplo se o hidrocarvão for destinado a aplicações ambientais (Figura 2). Além de contribuir para o tratamento e valorização do lodo de esgoto, o hidrocarvão tem potencial para atuar como adsorvente de poluentes, melhorar a qualidade dos solos ou ainda gerar energia. Estas possibilidades podem ser a chave para abrir mercados para este material, auxiliando na consolidação da CHT e/ou Co-CHT como uma alternativa viável para a valorização de lodos de esgoto. Ademais, a transformação de um resíduo em um produto com maior valor agregado cuja utilização pode promover a mitigação de outros problemas ambientais é certamente uma abordagem em acordo com o modelo de bioeconomia circular, em direção ao qual a sociedade precisa urgentemente caminhar

## REFERÊNCIAS

1. Aria, M., Cuccurullo, C., 2017. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *J Informetr* 11, 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
2. Blach, T., Engelhart, M., 2021. Optimizing the hydrothermal carbonization of sewage sludge—response surface methodology and the effect of volatile solids. *Water (Switzerland)* 13. <https://doi.org/10.3390/w13091225>
3. Brasil, 2020. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) - Painel de informações sobre saneamento [WWW Document]. URL <http://www.snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/> (accessed 4.20.21).
4. Cavali, M., Junior, N.L., Mohedano, R.D.A., Filho, P.B., Helena, R., Borges, A., Junior, D.C., 2022. Biochar and hydrochar in the context of anaerobic digestion for a circular approach: An overview. *Science of the Total Environment* 822, 153614. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153614>
5. Cavali, M., Libardi Junior, N., de Sena, J.D., Woiciechowski, A.L., Soccol, C.R., Belli Filho, P., Bayard, R., Benbelkacem, H., de Castilhos Junior, A.B., 2023. A review on hydrothermal carbonization of potential biomass wastes, characterization and environmental applications of hydrochar, and biorefinery perspectives of the process. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159627>
6. Danso-Boateng, E., Shama, G., Wheatley, A.D., Martin, S.J., Holdich, R.G., 2015. Hydrothermal carbonisation of sewage sludge: Effect of process conditions on product characteristics and methane production. *Bioresour Technol* 177, 318–327. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.096>
7. Ellen MacArthur Foundation, 2017. The Circular Economy In Detail [WWW Document]. The Circular Economy In Detail. URL <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/explore/the-circular-economy-in-detail> (accessed 2.8.21).
8. Ferrentino, R., Ceccato, R., Marchetti, V., Andreottola, G., Fiori, L., 2020. Sewage sludge hydrochar: An option for removal of methylene blue from wastewater. *Applied Sciences (Switzerland)* 10. <https://doi.org/10.3390/app10103445>
9. Gaur, R.Z., Khoury, O., Zohar, M., Poverenov, E., Darzi, R., Laor, Y., Posmanik, R., 2020. Hydrothermal carbonization of sewage sludge coupled with anaerobic digestion: Integrated approach for sludge management and energy recycling. *Energy Convers Manag* 224. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113353>
10. He, C., Giannis, A., Wang, J.Y., 2013. Conversion of sewage sludge to clean solid fuel using hydrothermal carbonization: Hydrochar fuel characteristics and combustion behavior. *Appl Energy* 111, 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.084>

11. Khoshbouy, R., Takahashi, F., Yoshikawa, K., 2019. Preparation of high surface area sludge-based activated hydrochar via hydrothermal carbonization and application in the removal of basic dye. *Environ Res* 175, 457–467. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.04.002>
12. Kim, D., Lee, K., Park, K.Y., 2014. Hydrothermal carbonization of anaerobically digested sludge for solid fuel production and energy recovery. *Fuel* 130, 120–125. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.030>
13. Koottatep, T., Fackaew, K., Tajai, N., Pradeep, S. v., Polprasert, C., 2016. Sludge stabilization and energy recovery by hydrothermal carbonization process. *Renew Energy* 99, 978–985. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.068>
14. Langone, M., Basso, D., 2020. Process waters from hydrothermal carbonization of sludge: Characteristics and possible valorization pathways. *Int J Environ Res Public Health* 17, 1–31. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186618>
15. Malhotra, M., Garg, A., 2020. Hydrothermal carbonization of centrifuged sewage sludge: Determination of resource recovery from liquid fraction and thermal behaviour of hydrochar. *Waste Management* 117, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.026>
16. Mannarino, G., Caffaz, S., Gori, R., Lombardi, L., 2022. Environmental Life Cycle Assessment of Hydrothermal Carbonization of Sewage Sludge and Its Products Valorization Pathways. *Waste Biomass Valorization* 13, 3845–3864. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01821-x>
17. Marin-Batista, J.D., Mohedano, A.F., Rodríguez, J.J., de la Rubia, M.A., 2020. Energy and phosphorous recovery through hydrothermal carbonization of digested sewage sludge. *Waste Management* 105, 566–574. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.004>
18. Medina-Martos, E., Istrate, I.R., Villamil, J.A., Gálvez-Martos, J.L., Dufour, J., Mohedano, Á.F., 2020. Techno-economic and life cycle assessment of an integrated hydrothermal carbonization system for sewage sludge. *J Clean Prod* 277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122930>
19. Parshetti, G.K., Chowdhury, S., Balasubramanian, R., 2014. Hydrothermal conversion of urban food waste to chars for removal of textile dyes from contaminated waters. *Bioresour Technol* 161, 310–319.
20. Peng, C., Zhai, Y., Zhu, Y., Xu, B., Wang, T., Li, C., Zeng, G., 2016. Production of char from sewage sludge employing hydrothermal carbonization: Char properties, combustion behavior and thermal characteristics. *Fuel* 176, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.068>
21. Saetea, P., Tippayawong, N., 2013. Recovery of Value-Added Products from Hydrothermal Carbonization of Sewage Sludge 2013.
22. Shan, G., Li, W., Bao, S., Li, Y., Tan, W., 2023. Co-hydrothermal carbonization of agricultural waste and sewage sludge for product quality improvement: Fuel properties of hydrochar and fertilizer quality of aqueous phase. *J Environ Manage* 326, 116781. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116781>
23. Sperling, M. Von, Andreoli, C.V., Fernandes, F., 2007. Biological Wastewater Treatment Vol.6: Sludge treatment and disposal, Sludge treatment and disposal.
24. Tasca, A.L., Stefanelli, E., Raspolli Galletti, A.M., Gori, R., Mannarino, G., Vitolo, S., Puccini, M., 2020. Hydrothermal Carbonization of Sewage Sludge: Analysis of Process Severity and Solid Content. *Chem Eng Technol* 43, 2382–2392. <https://doi.org/10.1002/ceat.202000095>
25. Wang, R., Lin, K., Peng, P., Lin, Z., Zhao, Z., Yin, Q., Ge, L., 2022. Energy yield optimization of co-hydrothermal carbonization of sewage sludge and pinewood sawdust coupled with anaerobic digestion of the wastewater byproduct. *Fuel* 326. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125025>
26. Wang, R., Wang, C., Zhao, Z., Jia, J., Jin, Q., 2019. Energy recovery from high-ash municipal sewage sludge by hydrothermal carbonization: Fuel characteristics of biosolid products. *Energy* 186. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.178>
27. Wang, W., Chen, W.H., Jang, M.F., 2020. Characterization of hydrochar produced by hydrothermal carbonization of organic sludge. *Future Cities and Environment* 6, 1–10. <https://doi.org/10.5334/fce.102>
28. Wang, Y., Yu, Y., Huang, H. jun, Yu, C. long, Fang, H. sun, Zhou, C. huo, Yin, X., Chen, W. hua, Guo, X. chun, 2022. Efficient conversion of sewage sludge into hydrochar by microwave-assisted hydrothermal carbonization. *Science of the Total Environment* 803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149874>
29. Wang, Z., Zhai, Y., Wang, T., Peng, C., Li, S., Wang, B., Liu, X., Li, C., 2020. Effect of temperature on the sulfur fate during hydrothermal carbonization of sewage sludge. *Environmental Pollution* 260. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114067>



30. Xu, Z.X., Song, H., Li, P.J., He, Z.X., Wang, Q., Wang, K., Duan, P.G., 2020. Hydrothermal carbonization of sewage sludge: Effect of aqueous phase recycling. *Chemical Engineering Journal* 387. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123410>
  31. Zhao, K., Li, Y., Zhou, Y., Guo, W., Jiang, H., Xu, Q., 2018. Characterization of hydrothermal carbonization products (hydrochars and spent liquor) and their biomethane production performance. *Bioresour Technol* 267, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.006>
- 1.