REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

TRATAMENTO DE EFLUENTE COM CARBONO AMORFO OBTIDO VIA REAÇÃO FOTOELETROQUÍMICA DE *EUCALYPTUS GRANDIS*

EFFLUENT TREATMENT WITH HYDRATED AMORPHOUS CARBON OBTAINED VIA PHOTOELECTROCHEMICAL REACTION FROM EUCALYPTUS GRANDIS

TRATAMIENTO DE EFLUENTES CON CARBONO AMORFO OBTENIDO MEDIANTE REACCIÓN FOTOELECTROQUÍMICA DE EUCALYPTUS GRANDIS

Francislei Santa Anna Santos[1], Ana Carolina Cortez Lemos[2], Joaquim Paulo da Silva[3], Julio Cesar Ugucioni[4]

e686718
https://doi.org/10.47820/recima21.v6i8.6718

PUBLICADO: 8/2025

RESUMO

O sexto Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU), determina a garantia de acesso universal à água potável e ao saneamento até o ano de 2030. Entretanto, a limitada eficiência operacional das Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) compromete o cumprimento da meta, gerando elevados custos de operação, impactos ambientais negativos e *déficits* sociais em comunidades vulneráveis. Tecnologias avançadas, como a fotodegradação, oferecem alternativas viáveis para o aprimoramento dos processos de tratamento. Neste contexto, destaca-se o Carbono Amorfo Hidratado (CAH), obtido por reação fotoeletroquímica a partir de biomassa de *Eucalyptus grandis*. O presente estudo avalia o desempenho técnico do CAH na Estação de Tratamento de Efluentes Iguatemi, localizada em Feira de Santana, Bahia. A metodologia aplica 1% de CAH ao leito filtrante aeróbio, seguida de análise dos parâmetros de qualidade do efluente tratado: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), sólidos sedimentáveis e pH. Os ensaios foram conduzidos pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento (EMBASA), com análise laboratorial realizada na unidade regional de Feira de Santana. Os dados obtidos indicam os seguintes índices de eficiência: DBO reduzida em 85,1%, DQO em 63,4%, sólidos sedimentáveis em 93,4% e pH ajustado de 8,22 para 7,31. Esses resultados evidenciam a eficiência do CAH na otimização do processo de descontaminação, com conformidade às exigências da Resolução CONAMA nº 430/2011 e contribuições diretas ao desenvolvimento sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Fotoeletrocatálise. Descontaminação. Adsorvente. Ecoeficiência. Remediação.

ABSTRACT

The sixth Sustainable Development Goal (SDG), established by the United Nations (UN), aims to ensure universal access to safe drinking water and sanitation by 2030. However, the limited operational efficiency of Wastewater Treatment Plants (WWTPs) hinders goal achievement, resulting in elevated operational costs, adverse environmental impacts, and social deficits in vulnerable communities. Advanced technologies, such as photodegradation, present viable alternatives for

[1] Doutor em Ciências na área de Engenharia de Biomateriais pelo PPGBIOMAT-UFLA Universidade Federal de Lavras – UFLA.
[2] Universidade Federal de Lavras – UFLA Pós-doutorado em Física, área de concentração Materiais avançados e Energias Renováveis.
[3] Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professor titular na Universidade Federal de Lavras – UFLA.
[4] Doutor em Física Aplicada a Medicina e Biologia pela Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto. Professor efetivo do departamento de física (DFI) do Instituto de Ciências Naturais (ICN) da Universidade Federal de Lavras – UFLA.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

enhancing treatment processes. Within this context, Hydrated Amorphous Carbon (HAC), synthesized via photoelectrochemical reaction from Eucalyptus grandis biomass, emerges as a promising solution. This study evaluates the technical performance of HAC at the Iguatemi Wastewater Treatment Plant, located in Feira de Santana, Bahia. The methodology involves the application of 1% HAC to the aerobic filtering bed, followed by analysis of key effluent quality parameters: Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), settleable solids, and pH. The tests were conducted by EMBASA (Bahia Water and Sanitation Company), with laboratory analysis performed at the regional unit in Feira de Santana. The data revealed the following efficiency rates: BOD reduced by 85.1%, COD by 63.4%, settleable solids by 93.4%, and pH adjusted from 8.22 to 7.31. These results demonstrate HAC's effectiveness in optimizing the decontamination process, aligned with the requirements of CONAMA Resolution No. 430/2011, and provide direct contributions to sustainable development.

KEYWORDS: *Photoelectrocatalysis. Decontamination. Adsorbent. Eco-efficiency. Remediation.*

RESUMEN
El sexto Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS), establecido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), tiene como finalidad garantizar el acceso universal al agua potable y al saneamiento para el año 2030. No obstante, la baja eficiencia operativa de las Estaciones de Tratamiento de Aguas Residuales (ETARs) compromete el cumplimiento de la meta, generando elevados costos operativos, impactos ambientales negativos y deficiencias sociales en comunidades vulnerables. Tecnologías avanzadas como la fotodegradación ofrecen alternativas viables para mejorar los procesos de tratamiento. En este contexto, se destaca el Carbono Amorfo Hidratado (CAH), sintetizado mediante reacción fotoelectroquímica a partir de biomasa de Eucalyptus grandis. El presente estudio evalúa el rendimiento técnico del CAH en la Estación de Tratamiento de Aguas Residuales Iguatemi, ubicada en Feira de Santana, Bahía. La metodología consiste en la aplicación del 1 % de CAH en el lecho filtrante aeróbico, seguida del análisis de parámetros de calidad del efluente tratado: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos sedimentables y pH. Los ensayos fueron realizados por la Empresa Baiana de Aguas y Saneamiento (EMBASA), con análisis de laboratorio efectuado en la unidad regional de Feira de Santana. Los datos obtenidos indican los siguientes índices de eficiencia: DBO reducida en un 85,1 %, DQO en 63,4 %, sólidos sedimentables en 93,4 % y pH ajustado de 8,22 a 7,31. Estos resultados evidencian la eficacia del CAH en la optimización del proceso de descontaminación, conforme a los requisitos de la Resolución CONAMA n.º 430/2011, y contribuyen directamente al desarrollo sostenible.

PALAVRAS CLAVE*: Fotoelectrocatalisis. Descontaminación. Adsorbente. Ecoeficiencia. Remediación.*

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de biomateriais inovadores representa uma solução tecnológica eficaz para enfrentar desafios associados à eficiência e sustentabilidade do saneamento básico. Em conformidade com o sexto Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), definido pela Organização das Nações Unidas (ONU), estabelece-se a meta global de assegurar o acesso universal à água potável e ao saneamento até 2030.

No cenário brasileiro, a baixa eficiência operacional das Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs), vinculada à escassez de tecnologias sustentáveis, implica em elevados custos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

com reagentes químicos e ocasiona efeitos ambientais adversos, como decomposição de matéria orgânica, proliferação de vetores patogênicos e emissão de odores, impactando o bem-estar social. Tecnologias avançadas, como a fotodegradação, promovem ganho significativo na eficiência do tratamento de efluentes domésticos. De fato, os estudos conduzidos por Li, Zhang e Hu (2024) evidenciam a influência positiva do tempo de retenção hidráulica sobre a atividade fotocatalítica, resultando em maior eficiência na remoção de contaminantes.

O Carbono Amorfo Hidratado (CAH) é sintetizado por meio de uma reação de oxirredução fotoeletroquímica aplicada ao extrato de *Eucalyptus grandis*. Essa rota tecnológica, classificada como ambientalmente sustentável, baseia-se no aproveitamento de resíduos lignocelulósicos oriundos da indústria de papel e celulose, especialmente provenientes da poda de árvores cultivadas em florestas plantadas. O processo envolve a extração do carbono presente na biomassa, seguida de uma etapa de carbonização conduzida em baixas temperaturas, o que preserva características estruturais relevantes para aplicações ambientais. O material resultante é heterogêneo, composto majoritariamente por carbono amorfo e óxido de grafeno de origem vegetal, conferindo-lhe propriedades adsorventes e catalíticas. Essa rota de produção foi originalmente desenvolvida por um dos autores deste estudo em 2015, consolidando-se como uma alternativa inovadora e alinhada aos princípios da química verde. O carbono amorfo hidratado (CAH), obtido pela reação fotoeletroquímica de *Eucalyptus grandis*, emerge como material promissor para essa aplicação, embora ainda subexplorado.

A adsorção é um processo físico-químico no qual moléculas de uma substância (adsorbato) se acumulam na superfície de um sólido (adsorvente), sendo amplamente utilizada na remoção de poluentes orgânicos em meio aquoso devido à sua simplicidade, baixo custo e eficiência. Os materiais carbonáceos, como o grafeno, biochar e nanotubos de carbono, têm se destacado como excelentes adsorventes e catalisadores, graças à sua elevada área superficial, estabilidade química e possibilidade de funcionalização. A fotocatálise, por sua vez, é um processo que utiliza a luz (geralmente UV ou visível) para ativar um catalisador, promovendo reações de oxidação que degradam compostos orgânicos. Magaji *et al.,* (2024) demonstraram que nanoplaquetas de grafeno funcionalizadas com cromóforos orgânicos podem atuar simultaneamente como adsorventes e fotocatalisadores na remoção de corantes como azul de metileno, rodamina B e alaranjado de metila, evidenciando a eficácia da abordagem híbrida para remediação ambiental.

A adsorção tem se destacado como um processo eficiente na remoção de contaminantes em sistemas aquosos, especialmente quando associada a materiais carbonáceos, que apresentam elevada área superficial e propriedades químicas favoráveis à interação com poluentes. Esses materiais, como o carvão ativado e derivados de grafeno, têm sido amplamente estudados por sua capacidade de atuar como suportes em processos de fotocatálise, potencializando a degradação de compostos orgânicos por meio da ativação de catalisadores sob radiação luminosa. Segundo De

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Sousa, Correia e Colmenares (2010), estratégias que envolvem o uso de materiais adequados e tratamentos químicos específicos, como o ajuste de pH e o uso de revestimentos resistentes, são fundamentais para o controle da qualidade da água e para a mitigação de processos de corrosão e incrustações, que podem comprometer a eficiência dos sistemas de tratamento.

Com base no artigo técnico de Kawahigashi *et al.,* (2014), é possível compreender a relevância da adsorção como processo físico-químico para o tratamento de efluentes complexos, como o lixiviado de aterros sanitários. A adsorção consiste na retenção de substâncias na superfície de um sólido, sendo o carvão ativado granular — um tipo de material carbonáceo — amplamente utilizado devido à sua elevada área superficial e porosidade, que favorecem a remoção de compostos orgânicos recalcitrantes. Embora o artigo não trate diretamente da fotocatálise, a associação de materiais carbonáceos com processos fotoquímicos tem sido explorada em outros estudos como alternativa complementar para a degradação de poluentes persistentes. O trabalho de Kawahigashi *et al.,* demonstrou que o carvão ativado granular foi capaz de remover até 100% da cor verdadeira e até 76% da demanda química de oxigênio (DQO), evidenciando sua eficácia como pós-tratamento de lixiviados, especialmente quando os processos biológicos e físico-químicos convencionais não atingem os padrões exigidos pelas legislações ambientais.

Este trabalho propõe uma solução sustentável voltada a municípios brasileiros com baixa cobertura de esgotamento sanitário — segundo o IBGE (2017), cerca de 39,7% não dispõem de sistemas adequados. A proposta visa reduzir os níveis de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e sólidos suspensos, mantendo o pH em faixa neutra. A implementação dessa alternativa tecnológica promove maior desempenho das ETEs e assegura conformidade com o Novo Marco Legal do Saneamento, as Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico e demais legislações vigentes, contribuindo diretamente para a melhoria da qualidade hídrica e a consolidação da sustentabilidade no setor.

A presente pesquisa tem como objetivo avaliar a eficiência da aplicação do CAH, obtido por meio de reação fotoeletroquímica com *Eucalyptus grandis*, no processo de tratamento em Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs). Este trabalho contempla uma introdução que aborda os desafios do saneamento básico no Brasil e destaca o potencial dos biomateriais inovadores, como o Carbono Amorfo Hidratado (CAH), em conformidade com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A seção de método e materiais descreve a obtenção do CAH por reação fotoeletroquímica com *Eucalyptus grandis*, sua formulação fluida e aplicação experimental em Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs), com detalhamento das etapas e técnicas analíticas utilizadas. A discussão aponta os benefícios técnicos, econômicos, sociais e ambientais do uso do CAH, evidenciando sua superioridade frente ao carvão vegetal tradicional e sua contribuição para a eficiência dos sistemas de tratamento. Por fim, a conclusão reforça a viabilidade do CAH como agente adsorvente e catalítico, além de sugerir novas aplicações e estudos futuros voltados à

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

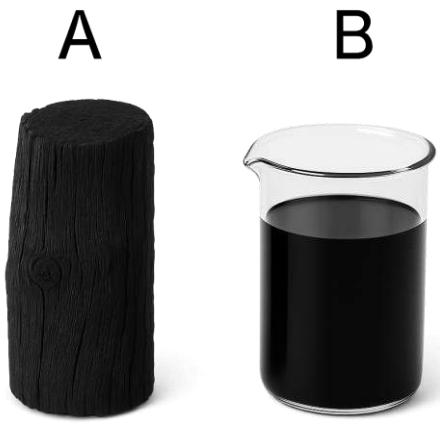
REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

caracterização avançada do material e à ampliação de seu uso em diferentes contextos da engenharia ambiental. Este artigo original se destaca por ser o primeiro trabalho acadêmico a explorar o uso de nanoestruturas de carbono sintetizado por tecnologia brasileira e aplicado em escala industrial em condições reais de operação.

2. MÉTODO E MATERIAIS

O CAH, obtido por meio de reação fotoeletroquímica com *Eucalyptus grandis,* foi fornecido pela *spin-off* ADPCLEAN, sediada em Alagoinhas, Bahia. A formulação fluida do material, desenvolvida conforme o método registrado sob o pedido BR102016012475-1 (Santos, 2017a; 2017b), permite sua aplicação em processos de tratamento de efluentes sem a necessidade de misturadores mecânicos. O CAH configura-se como um material inovador em meio hidroalcoólico, caracterizado por sua miscibilidade com o efluente e sua superioridade funcional frente ao carvão vegetal sólido, cuja natureza hidrofóbica.

Figura 1. Amostra de Carbono Amorfo da pirólise (A) e Carbono Amorfo da reação fotoeletroquímica (B)



Legenda: O objeto à esquerda, identificado como 'A', é um pedaço sólido de carvão vegetal. À direita, o objeto 'B' consiste em um líquido preto. Fonte: elaboração própria

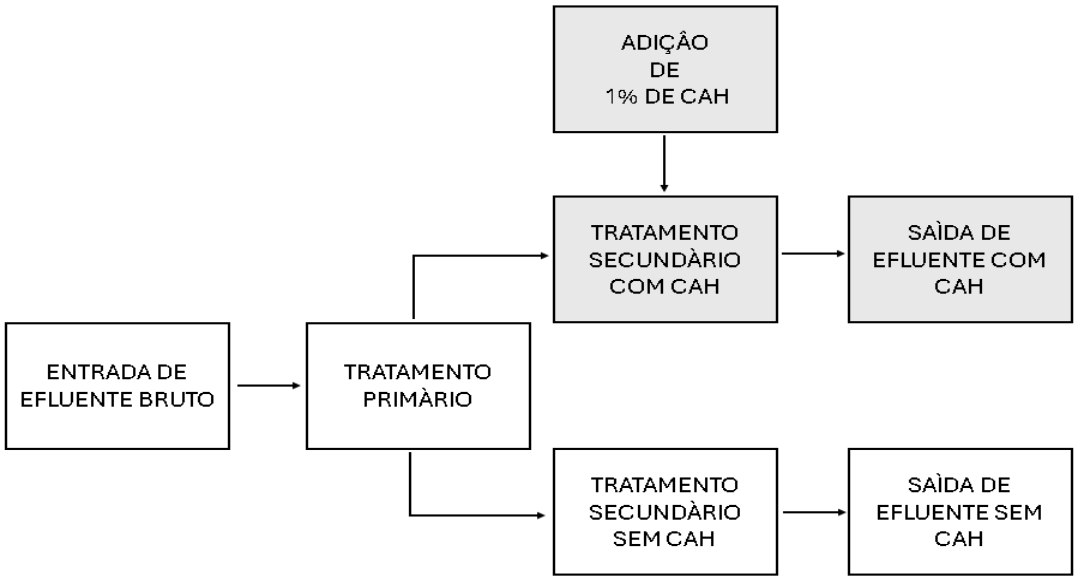
A presente pesquisa aplica uma metodologia experimental dividida em três etapas. Na primeira fase, o carvão ativado híbrido (CAH) é incorporado ao sistema de tratamento na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Iguatemi, situada em Feira de Santana – BA, por meio da adição de 1% (m/m) de estruturas de carbono no leito filtrante aeróbio, conforme especificação técnica do processo. Na etapa subsequente, a equipe técnica monitora os parâmetros físico-químicos do efluente tratado, incluindo Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

(DQO), sólidos suspensos totais (SST) e sólidos sedimentáveis, em conformidade com as normas da ABNT NBR 9898:2021. Por fim, o estudo avalia a eficiência do processo de tratamento e a estabilidade do CAH ao longo do tempo de operação, conforme os dados apresentados na Figura 2.

Figura 2. Metodologia de aplicação de carbono amorfo hidratado na ETE



Legenda: A Figura acima apresenta o diagrama da metodologia de aplicação de estruturas de carbono amorfo no sistema da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). O processo ilustrado contempla duas configurações: tratamento de efluentes com a adição de CAH e tratamento convencional, sem adição do material. Fonte: Santos, 2025

A aplicação de 1% (m/m) de CAH na etapa aeróbia do tratamento secundário da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) fundamenta-se em parâmetros técnicos que conciliam eficiência operacional e viabilidade econômica. A referida concentração promove maximização da superfície de contato entre o CAH e os poluentes presentes no efluente, favorecendo processos de adsorção de compostos orgânicos e inorgânicos, bem como intensificando a degradação da matéria orgânica, sem provocar desequilíbrio microbiológico no sistema aeróbio.

A ETE Iguatemi, situada na Unidade Regional de Feira de Santana (UNF) da Empresa Baiana de Águas e Saneamento (EMBASA), constitui o ambiente experimental para avaliação comparativa do desempenho do tratamento de efluentes com e sem adição de CAH. Os ensaios laboratoriais incluem a introdução de 1% de CAH no leito filtrante aeróbio, conforme protocolo estabelecido. As etapas processuais são dispostas conforme apresentado na Figura 2:

- (a) entrada de efluente bruto – efluente não tratado;
- (b) tratamento primário – remoção de sólidos grosseiros e sedimentação inicial;

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

- (c) tratamento secundário com CAH – incorporação de 1% de CAH com finalidade de ajuste de pH e intensificação da remoção de poluentes;

- (d) tratamento secundário sem CAH – procedimento convencional sem adição do material;

- (e) saída de efluente tratado com CAH – efluente pós-processamento com uso do adsorvente;

- (f) saída de efluente tratado sem CAH – efluente oriundo do tratamento convencional.

As amostras coletadas são analisadas no laboratório técnico da EMBASA em Feira de Santana, empregando parâmetros físico-químicos e microbiológicos padronizados. Os resultados indicam incremento na qualidade do efluente tratado, com redução significativa de cargas poluentes sob ação do CAH. A metodologia adotada valida o uso do novo biomaterial como alternativa inovadora e sustentável para aprimoramento da eficiência em sistemas de tratamento de esgoto sanitário.

2.1. Base de cálculo da eficiência da ETE

O sistema de avaliação da eficiência de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) aplica a Equação (1), que estabelece o índice percentual de remoção de carga orgânica a partir da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). A saída útil (SU) representa o resultado líquido do processo, determinado pela diferença entre a DBO na entrada e na saída do sistema ($DBO_{entrada} - DBO_{saída}$), expressa em miligramas por litro (mg/L). A entrada total (ET), por sua vez, corresponde à carga orgânica afluente, quantificada pela DBO de entrada. O cálculo permite quantificar, em termos percentuais, a eficiência do sistema no abatimento de matéria orgânica, conforme metodologias padronizadas para avaliação de desempenho em sistemas de saneamento ambiental.

$$Ef\ (\%) = \left(\frac{SU}{ET}\right) x100 \quad (1)$$

2.2. Técnicas de caracterização

A caracterização da qualidade do efluente tratado na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) Iguatemi, situada em Feira de Santana – BA, utiliza métodos analíticos padronizados para determinação de parâmetros físico-químicos. A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), expressa em miligramas por litro (mg/L), é quantificada pelo método de Diluição e Inoculação, o qual estima a quantidade de oxigênio consumido na biodegradação da matéria orgânica presente na amostra, conforme diretrizes da *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. A Demanda Química de Oxigênio (DQO), também expressa em mg/L, é determinada por espectrofotometria,

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

avaliada com base na quantidade de oxigênio requerida para a oxidação de matéria orgânica e inorgânica.

A concentração de sólidos sedimentáveis é obtida por meio do método gravimétrico, que compreende as etapas de filtração, secagem em estufa a 103–105 °C e pesagem dos resíduos retidos, com resultados expressos em mg/L. O potencial hidrogeniônico (pH) é mensurado pelo método potenciométrico, utilizando eletrodo combinado calibrado, conforme padrão NBR 10547:2019, refletindo a atividade dos íons H^+ e a acidez ou alcalinidade do meio.

As análises são conduzidas em amostras de efluente bruto e tratado, coletadas nas condições com e sem aplicação de CAH. A abordagem comparativa permite a avaliação da eficiência do processo de tratamento e a verificação da influência do CAH na melhoria da qualidade do efluente final. Os resultados obtidos subsidiam a validação técnica do uso de CAH como alternativa sustentável e inovadora no aprimoramento dos sistemas convencionais de saneamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise dos parâmetros de qualidade do efluente, obtidos por medição em amostras coletadas nos pontos de entrada e saída da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) Viver Iguatemi I e II, localizadas em Feira de Santana – BA. Os dados contemplam condições operacionais com e sem adição de CAH. Os resultados indicam alta eficiência do sistema no abatimento de carga poluente, com destaque para o uso do CAH, que potencializa os índices de remoção de matéria orgânica e sólidos, conforme critérios da NBR 12209:2011.

O desempenho observado justifica a incorporação de tecnologias avançadas ao processo de tratamento de efluentes, com vistas à elevação da qualidade da água tratada, proteção dos corpos receptores e conformidade com exigências legais vigentes, como as estabelecidas pela Resolução CONAMA nº 430/2011. Adicionalmente, verifica-se a contribuição dessas soluções tecnológicas para a promoção da sustentabilidade no setor de saneamento, mediante uso racional dos recursos hídricos e melhoria da eficiência operacional das ETEs.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Tabela 1. Medição dos parâmetros físico-químicos em amostras coletadas nos pontos de entrada e saída da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), referentes às unidades VIVER IGUATEMI I e II, sob condições operacionais com e sem a presença de CAH

Parâmetro	Entrada ETE (Amostra 1)	Saída ETE sem CAH (Amostra 2)	Saída ETE com CAH (Amostra 3)
DBO [mg/L DBO]	473,50	280,10	70,70
DQO [mg/L DBO]	722,00	609,00	264,50
Sólidos sedim. [mg/L]	3,50	0,60	0,23
pH [1]	8,22	7,46	7,31

Fonte: Arquivo pessoal do autor

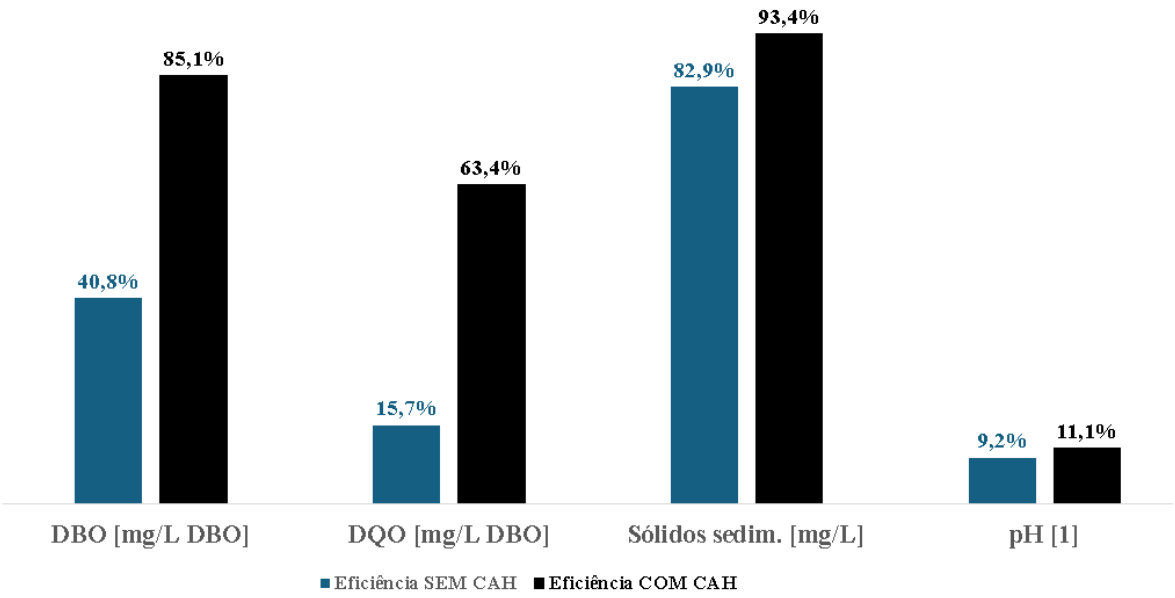
A Tabela 1 apresenta os resultados comparativos da eficiência do sistema de tratamento de efluentes com e sem a aplicação de CAH, considerando os principais parâmetros de qualidade. No indicador de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), observa-se redução de 473,50 mg/L na entrada para 70,70 mg/L na saída do sistema tratado com CAH, correspondendo a uma eficiência de remoção de 85,1%. Esse valor contrasta com os 40,8% obtidos na configuração sem adição do aditivo. O resultado evidencia a alta capacidade do CAH em remover matéria orgânica biodegradável, promovendo melhoria significativa na qualidade do efluente final e contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais decorrentes do descarte em corpos receptores.

Quanto à Demanda Química de Oxigênio (DQO), a aplicação do CAH resulta em uma redução de 722,00 mg/L para 264,50 mg/L, refletindo uma eficiência de remoção de 63,4%, frente aos 15,7% obtidos no tratamento convencional. Considerando que a DQO quantifica a concentração total de substâncias oxidáveis presentes (orgânicas e inorgânicas), os dados reforçam a capacidade do sistema potencializado com CAH em eliminar compostos que demandam oxigênio, favorecendo a preservação da qualidade hídrica e o cumprimento de requisitos ambientais estabelecidos por normas como a Resolução CONAMA nº 430/2011.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 3. Avaliação da eficiência da ETE antes e depois da aplicação de CAH



Legenda: Eficiência do sistema de tratamento de efluentes com e sem a aplicação de carbono amorfo hidratado. Fonte: elaboração própria

Acima, a Figura 3 apresenta os dados referentes à eficiência do sistema de tratamento de efluentes quanto à remoção de sólidos sedimentáveis, com e sem a aplicação de CAH. A concentração inicial de sólidos sedimentáveis de 3,50 mg/L reduz-se para 0,23 mg/L com o uso do CAH, correspondendo a uma eficiência de remoção de 93,4%, superior à eficiência de 82,9% observada no sistema convencional. Esse desempenho indica aprimoramento significativo na clarificação do efluente tratado, mitigando o risco de deposição de sedimentos nos corpos receptores. O parâmetro pH sofre leve redução de 8,22 na entrada para 7,31 na saída do sistema com adição de CAH. Embora a eficiência percentual não se aplique diretamente ao pH, a aproximação do valor para a faixa de neutralidade favorece a estabilidade físico-química do meio aquático, conforme diretrizes ambientais.

A incorporação do CAH ao sistema de tratamento de efluentes demonstrou ganhos significativos na remoção de sólidos sedimentáveis, com eficiência de 93,4%, superior ao sistema convencional. Esse resultado reforça o papel dos materiais carbonáceos como agentes de clarificação e adsorção, conforme discutido por Kawahigashi *et al.,* (2014), que evidenciaram a eficácia do carvão ativado granular na remoção de cor verdadeira e DQO em lixiviados de aterros sanitários. A elevada área superficial e porosidade desses materiais favorecem a retenção de compostos orgânicos recalcitrantes, contribuindo para a melhoria da qualidade do efluente tratado

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

e para o atendimento aos limites estabelecidos pelas legislações ambientais, como a Resolução CONAMA nº 430/2011.

Além disso, os resultados obtidos com o uso do CAH indicam uma leve redução do pH, aproximando-o da faixa de neutralidade, o que favorece a estabilidade físico-química do meio aquático. Essa observação dialoga com os apontamentos de De Sousa, Correia e Colmenares (2010), que destacam a importância do controle de parâmetros como o pH e o uso de revestimentos resistentes para garantir a eficiência dos sistemas de tratamento e evitar processos de corrosão e incrustações. A capacidade de ajuste químico proporcionada pelos materiais carbonáceos amplia sua aplicabilidade em diferentes etapas do tratamento de águas, especialmente em contextos em que há necessidade de remediação de efluentes com alta carga orgânica e complexidade química.

Ademais, embora o estudo de Kawahigashi *et al.,* (2014) não tenha abordado diretamente a fotocatálise, os avanços apresentados por Magaji *et al.,* (2024) demonstram o potencial de integração entre adsorção e processos fotoquímicos. A funcionalização de nanoplaquetas de grafeno com cromóforos orgânicos permite que esses materiais atuem simultaneamente como adsorventes e fotocatalisadores, promovendo a degradação de corantes orgânicos sob radiação luminosa. Essa abordagem híbrida representa uma evolução tecnológica promissora, alinhada à busca por soluções sustentáveis e de alta eficiência para o tratamento de efluentes industriais e urbanos, ampliando o escopo de aplicação dos materiais carbonáceos para além da adsorção convencional.

Com base nas obras de Silva *et al.,* (2009) e Teixeira (2022), é possível estabelecer uma comparação entre o sistema tradicional de produção de carvão vegetal e a tecnologia emergente do Carbono Amorfo Hidratado (CAH), especialmente no contexto de reaproveitamento de resíduos florestais, eficiência energética e viabilidade econômica. Segundo Silva *et al.,* o processo convencional de produção de carvão vegetal em forno-fornalha utiliza madeira com custo médio de R$ 71,37/m³ e opera a temperaturas superiores a 180 °C, o que acarreta elevado consumo energético e maior impacto ambiental. Em contraste, a *spin-off* ADPCLEAN estima que o CAH, obtido por reação fotoeletroquímica em Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), apresenta custo de produção de apenas R$ 32,27/m³, utilizando cascas de eucalipto como matéria-prima reaproveitada — uma redução superior a 50% no custo unitário.

A dissertação de Teixeira (2022), ao abordar sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), destaca a relevância da longevidade e produtividade estável dos componentes florestais, como o eucalipto, para a viabilidade técnica e econômica desses modelos. Essa perspectiva é essencial para avaliar o CAH, cuja estabilidade operacional, resistência à saturação e capacidade de regeneração devem ser investigadas para garantir sua aplicabilidade em operações contínuas. Além disso, Teixeira utiliza indicadores como Valor Presente Líquido (VPL) e Valor Anua l Uniforme Equivalente (VAUE) para demonstrar que sistemas integrados são

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

financeiramente atrativos, sobretudo quando diversificam receitas e reduzem riscos — abordagem que pode ser metodologicamente aplicada à avaliação do CAH frente a tecnologias consolidadas, como o carvão ativado convencional ou processos biológicos.

Portanto, a comparação entre as tecnologias revela que o CAH não apenas apresenta vantagens econômicas e ambientais em relação ao carvão vegetal tradicional, como também se alinha a modelos sustentáveis e integrados, a exemplo do ILPF. Essa convergência é especialmente relevante ao considerar o reaproveitamento de resíduos florestais, a operação em CNTP e o baixo custo de produção. Do ponto de vista econômico, o aprimoramento da eficiência tecnológica contribui para a redução dos custos operacionais nas Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs), ampliando a viabilidade técnica e financeira do saneamento básico e impactando positivamente a cobertura dos serviços prestados. Socialmente, a melhoria da qualidade da água reduz a incidência de enfermidades associadas à contaminação hídrica, fortalecendo a saúde pública e o bem-estar da população. Ambientalmente, a remoção eficaz de poluentes preserva a biodiversidade e promove a integridade dos ecossistemas aquáticos, assegurando a sustentabilidade das cadeias ecológicas e o cumprimento das metas de proteção ambiental.

4. CONCLUSÃO

Este estudo avalia a eficiência do Carbono Amorfo Hidratado (CAH), obtido por meio de reação fotoeletroquímica aplicada ao *Eucalyptus grandis*, como agente adsorvente e catalítico em processos de tratamento de efluentes. Os dados laboratoriais indicam elevada eficiência na remoção de poluentes, com reduções substanciais nos parâmetros de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e sólidos sedimentáveis, além da manutenção da estabilidade do pH dentro da faixa recomendada para descarte, conforme Resolução CONAMA nº 430/2011. Os resultados demonstram a viabilidade técnica e ambiental do CAH como material alternativo em Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs), promovendo maior eficiência nos processos de descontaminação e contribuindo para a conservação dos recursos hídricos.

O levantamento experimental também sugere aplicações emergentes do CAH no tratamento de água potável, na retenção de microcontaminantes e na reabilitação de ambientes contaminados. O material apresenta potencial de uso em sistemas de tratamento de efluentes industriais complexos, reuso agrícola de águas residuais e desenvolvimento de materiais tecnológicos, como membranas seletivas e sensores ambientais. A versatilidade funcional do CAH consolida-o como recurso inovador para múltiplos setores da engenharia ambiental e sanitária.

Para aprimorar o desempenho técnico do material, estudos futuros deverão investigar a possível presença de óxido de grafeno nas amostras, com foco na caracterização físico-química

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

avançada e na exploração de novas propriedades estruturais aplicáveis a processos de adsorção, filtração seletiva e remediação ambiental.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos servidores da Estação de Tratamento de Efluentes – ETE Iguatemi, vinculada à Unidade Regional de Feira de Santana da EMBASA, pela emissão dos laudos técnicos. Estendemos também nossos agradecimentos à *spin-off* ADPCLEAN pela doação das partículas de carbono amorfo hidratado em escala industrial.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Conama Nº 430, de 13 de maio de 2011. **Diário Oficial da União***:* Seção 1, Brasília, DF, 16 maio 2011. Disponível em: https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770. acesso em: 3 jun. 2025.

DE SOUSA, Cristina; CORREIA, Angelina; COLMENARES, María Cristina. Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: revisión de las estrategias de control. **Boletín de malariología y salud ambiental**, v. 50, n. 2, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa nacional de saneamento básico**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/28326-quatro-em-cada-dez-municipios-nao-tem-servico-de-esgoto-no-pais. acesso em: 3 jun. 2025.

KAWAHIGASHI, Flávia et al. Pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário com carvão ativado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 235–244, jul./set. 2014. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-41522014019000000652.

LI, Y.; ZHANG, C.; HU, Z. Hydraulic retention time governed the micro/structures of titanium-incorporated diatoms and their photocatalytic activity. **Environmental *Pollution*,** Barking, v. 345, mar. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123398. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026974912400112X. acesso em: 6 jul. 2023.

MAGAJI, Aminu et al. Advanced one pot photochemical surface modification approach towards graphene materials and their application in dye removal. **Journal of Photochemistry & Photobiology A: Chemistry**, v. 457, p. 115884, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.115884.

SANTOS, Francislei Santa Anna. Instituto nacional de propriedade industrial – INPI. **Produção de nanopartículas de carbono a temperatura ambiente**. Depositante: Francislei Santa Anna Santos. BR 102016012475-1 A2. Depósito: 13 maio 2016. Publicação: 28 NOV. 2017a.

SANTOS, Francislei Santa Anna. Instituto Nacional De Propriedade Industrial – INPI. **Foto-eletrólise da urina humana para geração de hidrogênio de alta pureza**. Depositante: Francislei Santa Anna Santos. BR 102015032448-0 A2. Depósito: 9 DEZ. 2015. Publicação: 1 ago. 2017b.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

SANTOS, Francislei Santa Anna. **Produção verde de carbono amorfo via reação fotoeletroquímica de cascas de eucalyptus grandis**. 2025. 88 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2025.

TEIXEIRA, Lara de Carvalho. **Viabilidade econômica de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF):** o estudo de caso da fazenda boa vereda – Cachoeira Dourada – GO. 2022. 72 f. Dissertação (Mestrado em agronegócio) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia, Goiânia, 2022.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.