

Tratamiento de agua residual de industria aeronáutica con celdas de electrólisis microbianas

Elizabeth Figueroa-Hernández^a, Bibiana Cercado-Quesada^a, Jorge Morales-Hernández^a, Sergio A. Gamboa^b, Antonia Sandoval-González^{c,*}

^a Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S. C. (CIDETEQ), Parque Tecnológico Querétaro, Sanfandila, C.P. 76703 Pedro Escobedo, Querétaro, México.

^b Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco S/N, 62580, Temixco, Morelos, México.

^c CONAHCYT-Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S. C. (CIDETEQ), Parque Tecnológico Querétaro, Sanfandila, C.P. 76703 Pedro Escobedo, Querétaro, México.

* Autora correspondiente e-mail: asandoval@cideteq.mx

Recibido 23 marzo 2023, Aceptado 23 Junio 2023

Resumen

El agua es un recurso indispensable para la vida, a nivel mundial la calidad y cantidad de agua potable se ha ido reduciendo con respecto al uso que se le da en cada país. Ejemplo de esta situación es México, donde la contaminación del recurso hídrico representa una amenaza común de la industria y la población en crecimiento, porque no cuenta con suficientes procesos de tratamiento, y tiene una contaminación notable que afecta la salud y los ecosistemas desde hace décadas. La actividad industrial es la que más consume agua potable y genera grandes cantidades de agua residual, por ello en este trabajo se busca dar tratamiento al agua residual de industria aeronáutica a través de las celdas de electrólisis microbiana con un electrodo anódico de fieltro de grafito y microorganismos provenientes de la composta del humus de lombriz. Se encontró que la DQO se redujo en un 30% y el COT 48% a pesar de las condiciones críticas presentes en el agua residual a través de MEB se observó la formación de biopelícula sobre las fibras de fieltro de grafito. Por otro lado, a través de la VC se observó que cuando no se tienen microorganismos en el sistema los subproductos de la oxidación quedan adsorbidos en la superficie del electrodo, disminuyendo su área catalítica y eficiencia de degradación.

Abstract

Water is an essential resource for life, worldwide the quality and quantity of drinking water has been reducing with respect to the use given to it in each country. An example of this situation is Mexico, where the contamination of water resources represents a common threat from the industry and the growing population, because it does not have sufficient treatment processes, and it has significant contamination that has affected health and ecosystems for a long time. Industrial activity is the one that consumes the most drinking water and generates large amounts of wastewater, therefore this work seeks to treat wastewater from the aeronautical industry through microbial electrolysis cells with an anode electrode made of graphite felt and microorganism from worm humus compost. It was found that the COD was reduced by 30% and the TOC 48% despite the critical conditions present in the wastewater through SEM the formation of biofilm was observed on the graphite felt fibers. On the other hand, through the VC it was observed that when there are no microorganism in the MEC, the oxidation by-products remain adsorbed on the electrode surface, decreasing its catalytic area and degradation efficiency.

Keywords: Graphite Felt; Bioelectrochemical systems; Industrial wastewater; microorganism; organic material.

1. Introducción

A nivel mundial la población prefiere viajar en avión más que por algún otro medio, por lo tanto, mejorar la tecnología para producir aviones de alta calidad y darle un mayor tiempo de vida útil a los motores es de principal importancia para disminuir la contaminación ambiental. Por ello, varios países invierten en el proceso de inspección y reparación de piezas de los motores. No obstante, como toda industria estos procesos han traído un alto consumo de agua potable y con ello la generación de cientos de metros cúbicos de agua contaminada, por ejemplo: salida de agua alcalina, neutra y ácida, con contaminantes de hidrocarburos aromáticos policíclicos, compuestos poliméricos, aceites, grasas y metales pesados. Lo que conlleva a que este tipo de agua presente una demanda química de oxígeno alta (DQO) [1, 2, 3]. Por otro lado, se tiene que el 80% de las aguas residuales provenientes de la industria regresan al ecosistema sin ser tratadas, lo que ha traído como consecuencia que millones de personas sufran de alguna enfermedad [4]. De acuerdo con los datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) resaltan que unos 2100 millones de personas no tienen acceso a agua potable y que, aproximadamente 4500 millones de personas carecen de servicios de saneamiento salubres [5], la escasez de agua afecta al 40% de los habitantes del planeta [6]. México no está exento de la gran problemática que se tiene con la distribución y administración del recurso hídrico, por lo que es de interés el buscar más y mejores soluciones para reutilizar el agua residual después de un tratamiento que de acuerdo con la normatividad aplicable permita reutilizar el agua tratada.

Los procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales presentan varias desventajas al ser empleados en el tratamiento de aguas residuales industriales como, a) el alto consumo de energía, b) producción de lodos (alrededor de 0.3 a 0.5 kg de biomasa seca al eliminar 1 kg de DQO [7] y c) recuperación ineficiente de recursos de aguas residuales. Asimismo, también existen procesos de oxidación avanzada que son más sofisticados, dando un porcentaje de limpieza mayor comparado con los sistemas convencionales y la cantidad de lodo que generan es mínima, sin embargo, para que se puedan implementar de manera eficiente es necesario darle un tratamiento previo al agua residual, lo cual encarece aún más el tratamiento de aguas [8]. Las aguas residuales de industria aeronáutica han recibido diferentes tipos de tratamiento a nivel mundial, por ejemplo, la empresa J. Huesa 2021 water technology, aplica un proceso muy costoso, que va desde la filtración hasta la evaporación de los contaminantes [9]. Pérez en 2019, encontró que adicionar hipoclorito de sodio mejora el pH que permite una mayor eliminación de cianuros [10]. ENCON evaporators de Estados Unidos, ofrece un tratamiento con evaporadores. En 2010 Meas *et al.*, añadieron la electrocoagulación al proceso convencional y se logró remover el 95% de la DQO, el 99% del color y el 99% de la turbidez [11]. Xu *et al.*, dieron tratamiento a los residuos generados después de aplicar el tratamiento convencional y observaron que el níquel, arsénico, mercurio, cadmio, cromo, benzo(a) pireno podían degradarse y cumplir con la normatividad, mientras que

compuestos fenólicos volátiles, nitrobenenos y nitrógeno amoniacal no se degradaron en su totalidad [3]. Salas en 2018 realizó por fotocatalisis el tratamiento de aguas residuales contaminadas con aceite de motores que resultan del lavado de estas piezas, obteniendo una degradación del 80% en presencia de la luz solar y en días nublados aproximadamente del 60% de degradación de DQO [12]. Por último, López *et al.*, dieron tratamiento a tres tipos de agua residual de industria aeronáutica, ácida, neutra y alcalina, a través de la electrocoagulación a nivel laboratorio observaron que, al realizar un ajuste de pH, la remoción de materia orgánica y de color disminuyeron significativamente [13].

Por otro lado, la remediación microbiana con sistemas bioelectroquímicos, -en específico las celdas de electrólisis microbiana (CEM)- ha atraído la atención debido a que ofrece grandes ventajas como el bajo costo, el cuidado al medio ambiente y la generación de energía eléctrica [14, 15, 16]. Para que las reacciones redox en la CEM se realicen de manera eficiente es importante tener electrodos con gran actividad catalítica y económicos. Los electrodos que presentan mejores eficiencias de degradación y conductividad eléctrica son los metálicos, sin embargo, en las CEM se debe tener cuidado al emplear metales debido a que pueden ser tóxicos para los microorganismos, además de ser costosos y limitar el proceso a escala industrial. En ese aspecto, hasta ahora los electrodos a base de carbón parecen ser la mejor opción como electrodos anódicos, gracias a que hay una buena interacción con los microorganismos, son abundantes, algunos son económicos, permiten la transferencia de electrones, además presentan alta porosidad (gran área superficial), característica que les permite que los microorganismos puedan formar una biopelícula que se adhiera fácilmente a su superficie [17, 18].

De acuerdo con los antecedentes mostrados, se observa que no hay trabajos publicados del tratamiento de aguas residuales de industria aeronáutica con celdas de electrólisis microbiana. Por ello, la presente investigación se enfocó en el estudio de un sistema bioelectroquímico para la degradación de contaminantes orgánicos presentes en el agua residual proveniente del proceso de inspección de piezas de avión, usando como electrodo de trabajo al fieltro de grafito y los microorganismos provenientes del humus de lombriz. Cabe señalar que la relevancia de esta investigación radica en el hecho de que este tipo de agua residual no ha sido tratada con las CEM y a su vez no hay información reportada del humus de lombriz en el tratamiento de aguas residuales de industria aeronáutica.

2. Materiales y Métodos

2.1 Materiales

El electrodo de fieltro de grafito de 2x2 cm obtenido de la empresa Especialidades de Grafito SA de CV, fue tratado con ácido nítrico (HNO_3) haciendo referencia a lo descrito previamente por [19], con el fin de incrementar su carácter hidrofílico al añadir grupos funcionales basados en

oxígeno (-COH, -CO, -COOH) para favorecer la adhesión de las bacterias; así como para disminuir la resistencia interna para promover la transferencia electrónica entre los microorganismos y el ánodo. El fieltro de grafito utilizado en el sistema electroquímico sin bacterias lo nombraremos, FG-EQ y el fieltro de grafito con microorganismos lo llamaremos, FG-BEQ, donde BQE significa bioelectroquímico.

2.2 Caracterización física del material

La morfología del FG, FG-EQ y FG-BEQ se observó a través de un microscopio electrónico de barrido ZEISS EVO MA15 con filamento de tungsteno, y el análisis elemental se realizó a través un detector Bruker XFlash 6130.

2.3 Diseño de la celda

Los experimentos se realizaron en celdas de vidrio con una capacidad de 0.05 L, el electrodo de trabajo fue de fieltro de grafito, en las pruebas electroquímicas se utilizó un electrodo de referencia de Ag/AgCl saturado con KCl, como electrodo auxiliar se utilizó acero inoxidable de 2x2 cm. La separación de los electrodos fue de 5 mm, se adicionaron 0.010 L de lixiviado de composta y 0.05 L de agua residual. Los electrodos fueron conectados eléctricamente con un alambre de titanio. Todos los reactivos utilizados fueron grado analítico. El lixiviado de composta (microorganismos) se obtuvo de acuerdo con lo reportado por [20]. Los experimentos se realizaron al pH que trae el agua residual de la industria aeronáutica, pH 9. A través de la capacitancia se realizó el cálculo del área electroactiva en presencia de KNO_3 0.1 M. Asimismo, la experimentación se realizó con microorganismos y sin microorganismos. Las condiciones experimentales de las CEM fueron 27 °C, pH: 9, y conductividad eléctrica de 4 mS.

2.4 Técnicas electroquímicas

A través de técnicas electroquímicas se estudia el comportamiento electroquímico del fieltro de grafito en la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual de industria aeronáutica. Se realizó la voltamperometría cíclica (VC) para observar si hay picos de oxido/reducción que muestren la presencia de los contaminantes o la actividad de los microorganismos, y a través de la cronoamperometría se observó la densidad de corriente con respecto al tiempo.

2.5 Análisis de la calidad del agua

A todas las muestras se les midió el pH, la DQO y el Carbón Orgánico Total (COT), antes, y al finalizar el tratamiento. LA DQO se determinó por el método de reflujo abierto con espectrofotometría UV-VIS con el reactor DQO marca HACH DBR200, espectrofotómetro HACH DR1900. El pH, ORP y temperatura se obtuvieron con un medidor multiparamétrico OAKTON PCD650, Potenciómetro marca Conductonic modelo

PH140. La conductividad se obtuvo con el medidor de conductividad HACH Pocket Pro (HR). Para la medición del COT se utilizó un equipo Shimadzu modelo TOC-L de acuerdo al método 5310 B de Standard Methods.

3. Resultados

3.1 Microscopia electrónica de barrido

En la figura 1 se muestran la morfología del (a) FG sin ocupar en el experimento, se observan fibras de fieltro de grafito libres de biopelícula o contaminantes, teniendo una composición atómica de 88.23% para C y 11.77% de oxígeno, así como se observa en la figura 1 (b). El oxígeno puede ser atribuido por el tratamiento de limpieza y activación que se le dio antes de ser usado. La figura 1 (c) es del FG usado con experimentos EQ, en la cual se observa que sobre la superficie de las fibras de fieltro de grafito se ve un color opaco con algunas partes adherencia de algunos contaminantes presentes en el agua como las grasas, el Na, y N. La figura 1 (d) muestra que la figura 1(c) tienen una composición atómica después de haber terminado el experimento, de 80.0% C, 10.49% O, 6.72% Al, 0.89% Na, y 0.19% de otros compuestos, los cuales se deben a los contaminantes presentes en el agua residual que se está tratando. La figura 1 (e) hace referencia al electrodo de FG usado en los experimentos BEQ, se puede observar que las fibras del fieltro de grafito están cubiertas por el crecimiento de la biopelícula sobre su superficie. El análisis químico elemental que observamos en la figura 1 (f) muestra la presencia de 52.18% C, 29.10% O, 10.73 Al, 3.82% Na, y 4.17% de otros elementos. La formación de la biopelícula de microorganismos es la que permitió que se alcanzara una eficiencia de degradación de la materia orgánica en un 30%. Se observa que en los experimentos de FG-EQ y FG-BEQ, los elementos presentes en la superficie del electrodo son similares, por lo tanto, podemos decir que esos elementos son atribuibles al agua residual tratada o a los procesos de transformación mientras ocurre la oxidación de la materia orgánica.

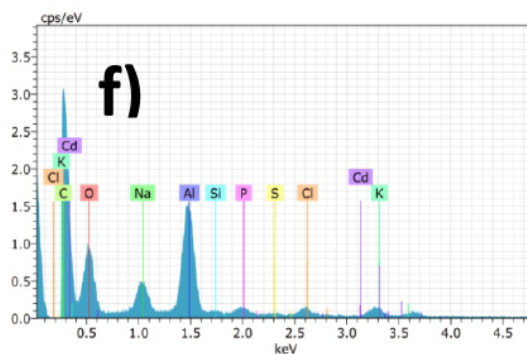
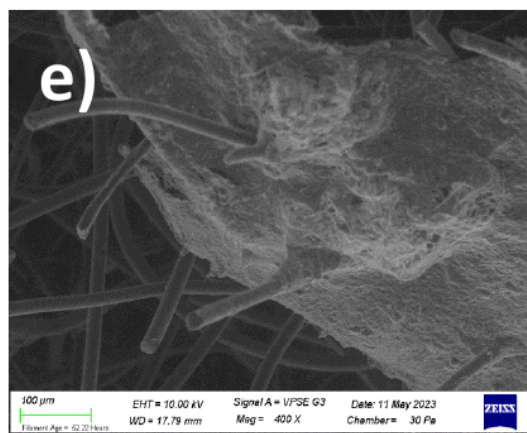
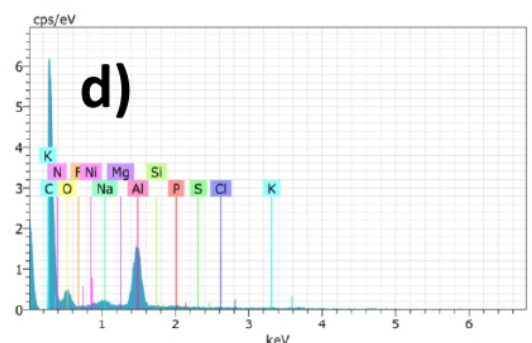
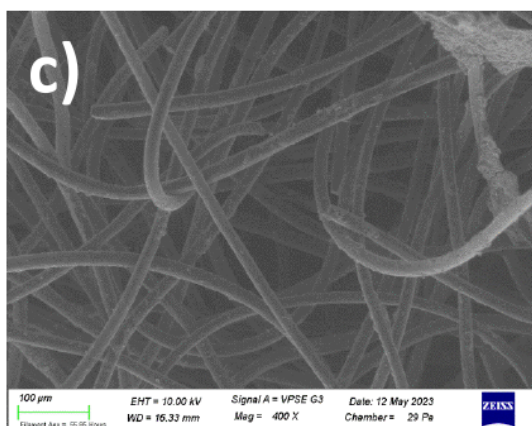
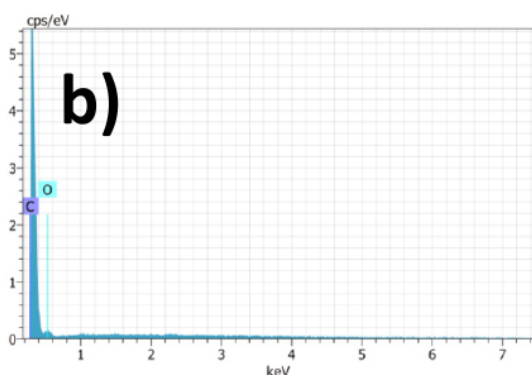
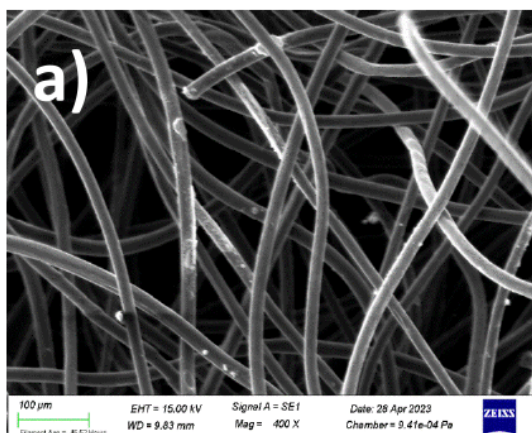


Figura 1. Micrografías de MEB a), c) y d) y análisis químico elemental b), d) y f) del FG, FG-EQ y FG-BEQ, respectivamente, utilizados en el tratamiento del agua residual de industria aeronáutica en una celda de electrólisis microbiana.

3.2 Voltamperometría Cíclica y Cronoamperometría

En la figura 2(a) muestra la voltamperometría cíclica (VC) del fieltro de grafito sin microorganismos, $EQ_{inicial}$ (línea roja) y EQ_{final} (línea punteada roja) y con microorganismos $BEQ_{inicial}$ (línea azul) y BEQ_{final} (línea punteada azul), realizadas a una velocidad de barrido de 5 mV s^{-1} en una ventana de potencial de -0.7 V a 0.7 V vs Ag/AgCl con KCl saturado. La densidad de corriente (j) de la figura 1 fue normalizada con el área electroactiva calculada con la ecuación de Randles Sevcick, 24.99 cm^2 [21]. Se aprecia que en las VC iniciales taneo del FG-EQ y FG-BEQ presentan una respuesta típica del FG [22].

En el voltamperograma EQ_{final} (línea punteada roja) en -0.291 V vs Ag/AgCl KCl sat hay un incremento de la corriente faradaica, de $-23.033 \text{ mA cm}^{-2}$ la cual corresponde a la reducción de especies que fueron formadas durante el proceso de la oxidación de la materia orgánica y que quedaron adsorbidas en la superficie del electrodo de FG, esa señal no fue observada en el VC inicial. De los antecedentes de la investigación (información confidencial), se sabe que el agua residual de la industria aeronáutica contiene fósforo, nitratos, nitritos, cianuros, grasas, aceites, arsénico, cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo, zinc, mercurio, y compuestos orgánicos volátiles, como tolueno, fenol, éter metílico de dipropilenglicol, 1-(2-methoxypropoxy)-2-propanol, glicol de propileno,

tripropylene glycol, 1-metil-2-pyrrolidone, pentadecano, ácido fosfórico, citrato de trietilo, benzenosulfonamida, mezcla de isómeros de Nonilfenol, isómeros de octilfenol, acetaldehído, 1,3-octanodiol, 1,2-hexanodiol, dicitclohexano, y etanol, entre otros. No obstante, en el VC FG-BEQ_{final} (línea punteada azul) no se observa la señal mostrada en FG-EQ, se considera que los microorganismos de la composta del humus de lombriz degradaron el subproducto que se formó durante la oxidación de la materia orgánica, lo cual es bueno para el sistema porque así se tiene más área electroactiva disponible para que siga ocurriendo la oxidación de la materia orgánica, por eso observamos una mayor eficiencia de remoción de DQO y COT, empleando el sistema FG-BEQ.

se observó un aumento significativo de la corriente faradaica el cual se mantuvo constante hasta cerca del quinto día de operación de la celda. La respuesta que observamos en el FG-BEQ se atribuye a la actividad electrogénica del metabolismo de los microorganismos, el cual se promueve a partir de la degradación de la materia orgánica disuelta en el agua residual. Los microorganismos formaron colonias en la superficie del electrodo, de tal manera que formaron una biopelícula, que de acuerdo a lo que se muestra en la micrografía de MEB de la figura 1(e) la biopelícula no crece de manera uniforme en todo el FG, por ello se tiene esa fluctuación de la densidad de corriente. Por otro lado, el lixiviado de la composta agrega más materia orgánica al sistema. Asimismo, la textura porosa del electrodo ocasiona que las grasas y algunos metales se adsorban en su superficie dejando inhabilitada esa área para la formación de la biopelícula, como se observa en las figuras 1(d) y 1(f). Asimismo, es importante hacer notar que la adaptación de los microorganismos en el medio, es importante, porque de ello depende la transferencia electrónica al electrodo. Asimismo, en algunos trabajos se ha encontrado que los microorganismos iniciales no son los mismos durante el transcurso y al final del experimento [23, 24, 25].

Por otro lado, en el FG-EQ debido a que no hay microorganismos la j tiende a mantenerse ligeramente más estable en los primeros cinco días. El comportamiento de las curvas de cronoamperometría de la figura 2(b) se puede justificar debido a que el agua residual contiene alta carga de materia orgánica, la cual a través del proceso de degradación se va transformando en otros componentes que tienen características energéticas diferentes a los iniciales.

De acuerdo con los datos mostrados en la figura 2, se concluye que el FG-BEQ presento una mayor degradación de la materia orgánica, lo cual fue verificado con los datos obtenidos de la DQO y el COT.

3.3 Demanda Química de Oxígeno

La DQO inicial del agua residual de industria alcalina presento una DQO de 3690 mg L⁻¹, después de haber recibido tratamiento electroquímico con el FG la DQO disminuyo a 2890 mg L⁻¹, y con el FG en el sistema BEQ se obtuvo un valor de 2565 mg L⁻¹, al finalizar los diez días de experimento. Las eficiencias obtenidas de cada sistema son 21% y 30% para el FE-EQ y FG-BEQ, respectivamente. Estas bajas eficiencias de degradación de la materia orgánica presente en el agua residual de industria aeronáutica se deben a que los microorganismos no tuvieron una adaptación previa antes de ser utilizados en el tratamiento del agua residual, asimismo se considera que el agua residual tratada es altamente agresiva para la sobrevivencia de los microorganismos y no todos se adaptan a esas condiciones.

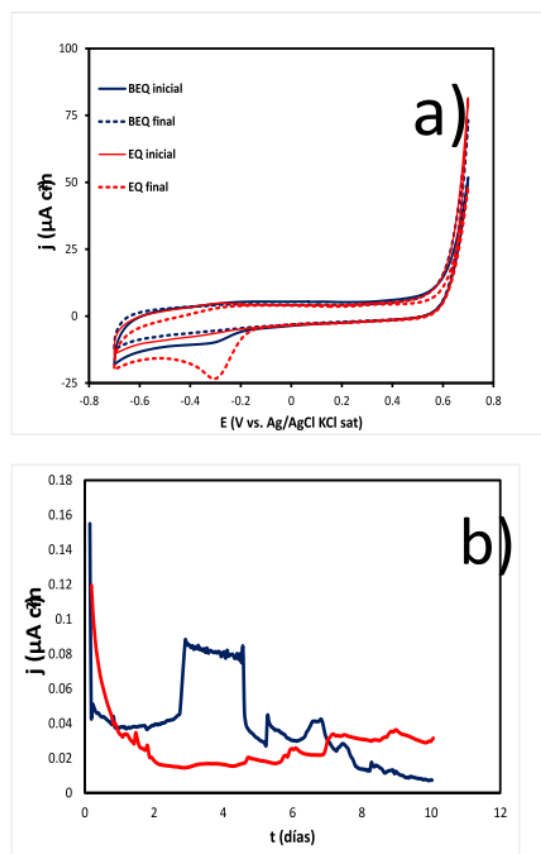


Figura 2. (a) Voltamperograma cíclico del FG-EQ_{inicial} (línea roja) y FG-EQ_{final} (línea punteada roja) y con microorganismos FG-BEQ_{inicial} (línea azul) y FG-BEQ_{final} (línea punteada azul), (b) Cronoamperogramas del FG-EQ_{inicial} (línea morada) y FG-BEQ_{inicial} (línea roja) durante 10 días de experimento en el tratamiento del agua residual de industria aeronáutica en una CEM.

En la figura 2(b) se observan los resultados del monitoreo de la j durante diez días, realizada a un potencial de 0.2 V vs Ag/AgCl con KCl saturado, potencial al cual se observó oxidación de la materia orgánica. Se puede observar que el cronoamperograma del FG-BEQ de la figura 2 (b) tiene ligeramente una mayor densidad de corriente faradaica incrementando a partir del tercer día

3.4 Carbón Orgánico Total (COT)

El agua cruda tenía un valor de 617 mg L⁻¹ de COT y aplicando el tratamiento electroquímico se alcanzó una eficiencia de remoción de la materia orgánica del 30%, mientras que el sistema que empleó microorganismos, FG-BEQ, se obtuvo un 48% de remoción.

Con los resultados obtenidos tanto de la DQO y el COT se aprecia que durante los diez días de tratamiento del agua residual no se alcanzó el 50% de eficiencia del sistema, lo cual es debido al exceso de materia orgánica disuelta presente en el agua residual.

Conclusiones

Las celdas de electrólisis microbiana demostraron que son eficientes en la remoción de materia orgánica, considerando que el agua residual de la industria aeronáutica tiene una composición compleja y que no es de fácil tratamiento. También se observó que es necesario que los microorganismos tengan una adaptación previa a los contaminantes que presenta el agua residual a tratar para así alcanzara mayores eficiencias de degradación en las CEM. Antes de darle tratamiento al agua residual con las CEM, se debe realizar un tratamiento previo para eliminar los sólidos suspendidos y las grasas, los cuales roban área electroactiva de los electrodos al quedarse adheridos sobre las fibras. Por último, aunque las eficiencias de degradación mostradas en este trabajo no son altas, nos dan un panorama de seguir trabajando en esta área mejorando la actividad catalítica de los electrodos realizando modificaciones en su superficie y considerar algunas condiciones técnicas para su mejora.

Contribución de los autores

La estudiante de maestría realizó lo experimental, la Dra. Cercado, participó en el diseño del experimento biológico. El Dr. Jorge ayudó en la interpretación de la caracterización física del material. El Dr. Gamboa apoyó en la interpretación electroquímica y la Dra. Sandoval en el diseño de experimentos e interpretación de resultados. Todos los investigadores participaron en la redacción del documento.

Fuente de financiamiento

Apoyo a proyectos por parte del programa Investigadoras e investigadores por México, No. 626.

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran que no hay conflicto de interés.

Agradecimientos

Agradecemos a la técnica académica MC Susana Citlalli Gaucín por el apoyo en la microscopía electrónica de barrido y el análisis químico elemental. Agradecemos al CONAHCYT por la beca otorgada a la estudiante Elizabeth Figueroa Hernández. Asimismo, agradecemos al CIDETEQ por permitirnos realizar el trabajo en sus instalaciones y por último damos gracias al programa de CONACYT Investigadoras e Investigadores por México por el apoyo a proyectos del proyecto 626.

Referencias

- [1] Guan, X., Hou, S., Meng, Y., & Liu, W. (2019). Study on the quantification of ecological compensation in a river basin considering different industries based on water pollution loss value. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26, 30954-30966. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06215-6>
- [2] Agliardi, E., Pinar, M., & Stengos, T. (2017). Air and water pollution over time and industries with stochastic dominance. *Stoch. Environ. Res. Sisk. Assess.* 31(6), 1389-1408. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1258-y>
- [3] Xu, J., Yang, J., Zhao, N., Sheng, L., Zhao, Y., & Tang, Z. (2013). Evaluation of efficiency of aircraft liquid waste treatment and identification of daily inspection indices: a case study in Changchun, China. *Environ. Monit. Assess.* 185, 6063-6070. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-3006-1>
- [4] UN-Water (2021). Summary Progress Update 2021: SDG 6 — water and sanitation for all. <https://www.unwater.org/publications/summary-progress-update-2021-sdg-6-water-and-sanitation-for-all/>
- [5] OMS & UNICEF (2017). Mapas de saneamiento. https://www.who.int/images/default-source/maps/global_sanitation_1990.png?sfvrsn=43dc8b78_0
- [6] OMS (2016). Mapas de fuentes de agua potable. https://www.who.int/images/default-source/maps/global_water_1990.png?sfvrsn=99bf3608_0
- [7] Xiaoyuan, Z., Zhang, M., Liu Hang, Gu, J., & Liu, Y. (2019). Environmental sustainability: a pressing challenge to biological sewage treatment processes. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, 12, 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.05.00>
- [8] Wang, Y. (2017). The Electro-peroxone Technology as a Promising Advanced Oxidation Process for Water and Wastewater Treatment. En Zhou, M., Oturan, M., Sfrés, I. *Electro-Fenton Process. The Handbook of Environmental Chemistry*. 61. Singapur: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-2017-57>
- [9] Huesa, J. (2021). Solución global al tratamiento de aguas en la industria aeronáutica. Obtenido de: <https://www.iagua.es/noticias/j-huesa-water-technology/solucion-global-al-tratamiento-aguas-industria-aeronautica>.
- [10] Pérez García, A. (2019). Ingeniería básica de una planta de depuración de aguas residuales en la industria aeronáutica. (Trabajo Fin de Grado Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla.
- [11] Meas, Y., Ramirez, J.A., Villalon, M.A., & Chapman, T.W. (2010). Industrial wastewaters treated by electrocoagulation. *Electrochim. Acta* 55, 8165-8171.
- [12] Salas, J. (2018). Tratamiento de aguas contaminadas con aceite de motores por fotocatalisis heterogénea. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional del Centro de Perú. Obtenido de: https://repositorio.unep.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6883/T010_40136897_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [13] López, K.M., Aguilar, J., & Medel, A. (2018). Tratamiento electroquímico de aguas residuales procedentes de la industria aeronáutica. Informe de residencias profesionales, San Felipe del Progreso, Estado de México.
- [14] Guo, H., & Kim, Y. (2019). Stacked multi-electrode design of microbial electrolysis cells for rapid and low-sludge treatment of municipal wastewater. *Biotechnol. Biofuels* 12, 23. <https://doi-org.cideteq.biblio.remotexs.co/10.1186/s13068-019-1368-0>
- [15] Huang, L., Wan, H., Song, S., Liu, D., & Puma, G.L. (2022). Complete removal of heavy metals with simultaneous efficient treatment of etching terminal wastewater using scaled-up microbial electrolysis cells. *Chem. Eng. J.* 439, 135763. DOI: <https://doi-org.cideteq.biblio.remotexs.co/10.1016/j.cej.2022.135763>
- [16] Jiawei, X., Xinyi, Z., Yaofeng, C., Junxiang, X., He, L., Min-hua, C., Tian, C., & Chongjun C. (2023). The microbial synergy and response mechanisms of hydrolysis-acidification

combined microbial electrolysis cell system with stainless-steel cathode for textile-dyeing wastewater treatment. *Sci. Total Environ.* 855, 158912. DOI: <https://doi.org/cideteq.biblio.remotexs.co/10.1016/j.scitotenv.2022.158912>.

[17] Bi, L., Ci, S., Cai, P., Li, H., Wen, Z. (2018). One-Step pyrolysis path to three-dimensional porous carbon doped with nitrogen as anodic materials for microbial fuel cells. *Appl. Surf. Sci.* 427 (Part A) 10-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.030>

[18] Chen, S., Patil, S.A., Schröder, U. (2018). High performance rotary graphite fiber brush air cathode for microbial fuel cells. *Appl. Energy.* 211, 1089-1094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.013>

[19] Cai, H., Wang, J., Bu, Y., Zhong, Q. (2013). Treatment of carbon cloth anodes for improving power generation in a dual-chamber microbial fuel cell. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 88, 623-628.

[20] Cercado, B., Cházaro-Ruiz, L.F., Ruiz, V., López-Prieto, I., Buitrón, G., Razo-Flores, E. (2013). Biotic and abiotic characterization of bioanodes formed on oxidized carbon electrodes as a basis to predict their performance. *Biosens. and Bioelectron.* 50, 373-381.

[21] Bard, J. A., Faulkner, L., & White H. (2001). *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd edition, Austin Texas.

[22] Fitriana, H. N., Lee, S., Kim H.S., Lee, J., Lee, Y., Lee, J.-S., Pak, H., Ko, C.H., Lim S.Y., Lee, S.Y. (2022). Enhanced CO₂ electroconversion of *Rhodobacter sphaeroides* by cobalt-phosphate complex assisted water oxidation. *Bioelectrochemistry* 145, 108102.

[23] Ilbay, T., & Alcivar, B. (2020). Comparación de producción electroquímica de celdas de combustible microbiana utilizando electrodos de fibra de carbono y un electrodo híbrido de grafito-cabuya (agave americana). *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*. Obtenido de: <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/15018>

[24] Apaza Aquino, H., Rojas Machaca, Y. P., Mamani Mamani, E., & Chura Palli, V. (2021). Microorganismos empleados para la biorremediación de efluentes mineros con cianuro. *Aporte Santiaguino*, 14(1), 120-137. <https://doi.org/10.32911/as.2021.v14.n1.711>

[25] Silva Cuevas, H.F., & Peña García, J.A. (2021). Diseño y ejecución de un prototipo de celda de combustible microbiana para el tratamiento de aguas residuales y generación de gas metano a partir de residuos en una vivienda rural promedio en el departamento de Boyacá.