

## TRATAMIENTO ELECTROQUÍMICO DE LODOS RESIDUALES COMO FUENTE SUSTENTABLE DE RECURSOS RENOVABLES

JOSÉ ANTONIO BARRIOS PÉREZ

El incremento en la demanda de agua para las actividades humanas ha causado mayor competencia por este recurso entre los diferentes usos y usuarios. Por ello, se ha empleado el reúso de agua tratada como una alternativa para liberar volúmenes de agua de primer uso para satisfacer su demanda. No obstante, para que el reúso del agua se lleve a cabo de manera segura, se requiere tratar el agua residual para darle la calidad necesaria de acuerdo con la normatividad vigente, lo que genera subproductos denominados lodos residuales. Estos lodos contienen alto porcentaje de agua (aproximadamente de 95 a 99%) así como materia orgánica, incluyendo biomasa, la cual, tiene un alto potencial para producir energía o diversos subproductos. Tomando en cuenta el concepto de economía circular, se ha propuesto redefinir el principio de las plantas de tratamiento de agua residual para denominarlas fábricas de recursos por la variedad de subproductos del tratamiento

que tienen potencial de reutilización, incluyendo los lodos residuales, los cuales van desde el biogás, hasta bioplásticos y aditivos de alimentos (Figura 1).

Bajo este concepto, el principal subproducto del tratamiento del agua residual lo constituyen los lodos residuales, los cuales, se denominan primarios o secundarios en función del proceso de tratamiento que los genera. Se estima que a nivel mundial se generan cada año 45 millones de toneladas de lodos residuales (Gao *et al.*, 2020); mientras que en México esta cifra es del orden de 0.9 millones de toneladas (cálculos propios). Por su origen, estos lodos concentran diversos tipos de contaminantes, microorganismos y materia orgánica, por lo que deben ser adecuadamente tratados para reducir los riesgos a la salud y al ambiente. Una vez tratados, los lodos residuales se denominan biosólidos y pueden ser empleados como fertilizantes o mejoradores de suelos debido al contenido de materia orgánica, nutrientes y elementos traza que contienen, los cuales aportan diferentes beneficios al suelo y a los cultivos. Por esta razón, en algunos países el porcentaje de reutilización es considerable debido a que representan una alternativa de manejo económica y sustentable. Por ejemplo, en Estados Unidos 53% de los lodos residuales es aprovechado en diversas aplicaciones benéficas como biosólidos (Beecher *et al.*, 2022). Esta práctica incrementa la productividad agrícola, reduce el consumo de fertilizantes químicos, por ende,

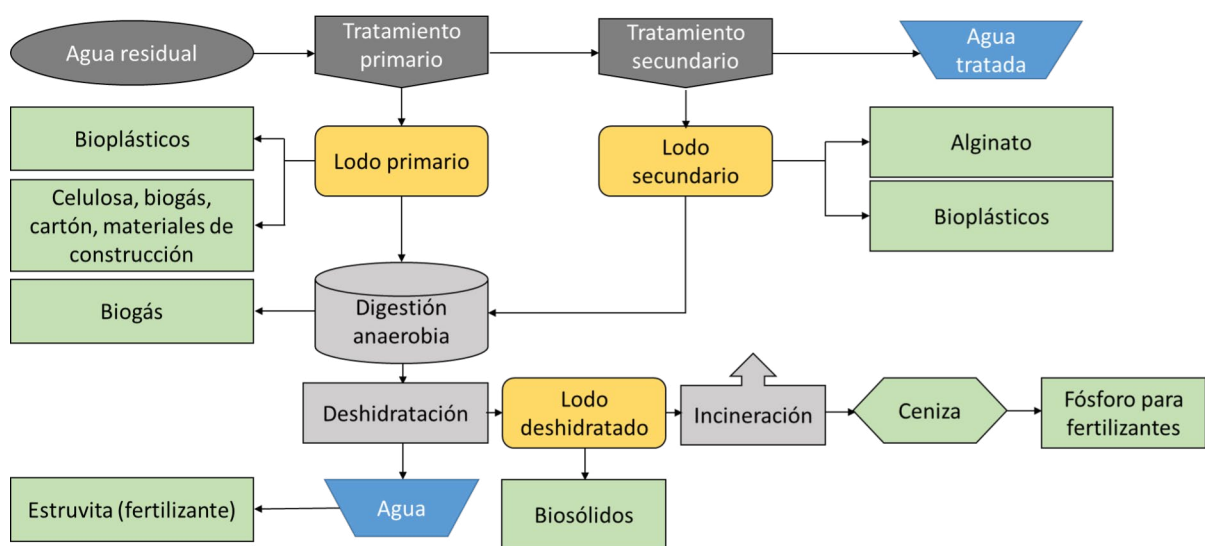


Figura 1. Planta de tratamiento de agua residual como fábrica de recursos (PHA: polihidroxicanoatos; basada en van Nieuwenhuijzen *et al.*, 2017)

genera mayor rentabilidad para los agricultores y silvicultores, así como un beneficio en términos de emisiones de gases de efecto invernadero.

Dentro de los procesos de tratamiento de lodos se tienen la digestión aerobia, la digestión anaerobia, la producción de composta y el tratamiento alcalino como las principales alternativas. Cada uno de ellos presenta ventajas y desventajas que deben ser consideradas previo a la definición del tren de tratamiento elegido.

En este rubro, desde 1970 se han estudiado los tratamientos biológicos de lodos residuales mediante digestión anaerobia. A lo largo de este tiempo, el proceso ha adquirido gran popularidad debido a que logra la estabilización de los lodos, genera energía en forma de biogás (principalmente metano), produce un residuo semisólido que puede ser utilizado como fertilizante o acondicionador de suelos, reduce la masa de lodos residuales que tienen que ser transportados, y generalmente, el producto cumple con los límites de la normatividad vigente. De hecho, se estima que el biogás generado por este proceso puede servir para abastecer más de 50% de la energía requerida en una planta de tratamiento, lo cual, se considera una de sus mayores ventajas contra el resto de los procesos de estabilización.

Por todo lo anterior, la digestión anaerobia es uno de los procesos de tratamiento de lodos más utilizados a nivel global y

se estima que 70% de los lodos son tratados por este método (Tyagi and Lo, 2011). En este proceso, la materia orgánica es convertida por microorganismos en biogás y en digestato (residuo orgánico con posibilidad de aprovechamiento). No obstante, dicha conversión es limitada debido a que se requiere llevar a cabo la hidrólisis de moléculas grandes y microorganismos, por lo cual, sólo se degrada entre 20 y 50% de la materia orgánica (Tyagi *et al.*, 2014). Además, la mayoría de los lodos residuales poseen alto contenido de sustancias poliméricas extracelulares (SPE), las cuales, son generadas por los microorganismos y les permiten adherirse entre ellos, formando flóculos y protegiéndolos de ser lisados. Dichas sustancias están formadas por una mezcla compleja de proteínas, carbohidratos, lípidos y sustancias húmicas. Es importante mencionar que, en el lodo secundario, las SPE representan hasta 80% de la masa del lodo, lo cual, es relevante debido a que su presencia reduce la biodegradabilidad de la materia orgánica durante la digestión anaerobia. Otra desventaja de la presencia de las SPE es que evitan que el lodo sea deshidratado eficientemente, lo que incide en menor reducción de volumen y mayor costo de transporte a los sitios de aprovechamiento o disposición (Wu *et al.*, 2017)

Como resultado, se ha propuesto que los lodos sean pretratados antes de la digestión anaerobia para favorecer la conversión de materia orgánica a metano, incrementando con



Figura 2. Digestor anaerobio de la planta de tratamiento de agua residual, Acapatzingo, Morelos

ello el potencial energético de estos subproductos. Así, se han aplicado diversos pretratamientos, principalmente térmicos, mecánicos, químicos y biológicos, que tienen como finalidad favorecer la hidrólisis de las células y las SPE. El fundamento de estos procesos es que logran romper las células de la biomasa y liberan el material intracelular, así como las SPE a la fase soluble, lo que facilita su transformación durante el proceso de digestión e incrementa la producción de biogás.

Recientemente, han sido reportados métodos de pretratamiento alternativos como el uso de ultrasonido o la aplicación de oxidantes. Bajo este principio, se han venido aplicando pretratamientos electroquímicos previo a la digestión anaerobia, además de emplearlos para degradar contaminantes específicos (Barrios *et al*, 2021y Barrios *et al.*, 2016). En este sentido, los procesos electroquímicos aplicados a la ingeniería ambiental han tenido un gran desarrollo en las últimas cuatro décadas, con mayor contribución en el tratamiento de agua potable y agua residual. Este tipo de procesos presentan diversas ventajas, como la generación de los reactivos oxidantes *in situ*, la ausencia de residuos contaminantes, la operación en condiciones “normales” (temperatura ambiente y presión atmosférica) y el uso de un equipamiento relativamente sencillo. En particular, la electrooxidación se considera un proceso de oxidación avanzada que se basa en la generación electroquímica de especies oxidantes como el radical hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ) o el hipoclorito de sodio.

En este tema se han reportado algunas aplicaciones de la electrooxidación de lodos como pretratamiento para la digestión anaerobia empleando diferentes configuraciones electroquímicas en términos de arreglo de electrodos (malla o placas paralelas) y materiales (titanio cubierto con óxidos de rutenio -Ti/RuO<sub>2</sub>- y diamante dopado con boro -DDB-). Se ha reportado que el pretratamiento de los lodos logra incrementar la producción de biogás hasta 65% comparado con pruebas control (Barrios *et al.*, 2021). En particular, los electrodos de DDB han sido estudiados en diferentes aplicaciones debido a su alta generación de radicales hidroxilos, alta estabilidad, resistencia a la corrosión y superficie inerte.

Por otro lado, además del incremento en la producción de biogás, el pretratamiento abre una ventana de oportunidad para que se liberen y recuperen las SPE, pudiendo así ser empleadas en diversas aplicaciones, como remoción de metales pesados, coagulación y floculación. En este tema, existen ya plantas a nivel industrial en los Países Bajos en las que se procesan sustancias poliméricas extracelulares, derivadas de los lodos residuales para obtener un producto con diversas aplicaciones que van desde un bioestimulante para plantas, hasta compuestos para materiales de construcción; además, se está en busca de nuevas aplicaciones para este tipo de productos (<https://kaamera.com/english/kaamera/>).

Bajo estos conceptos, actualmente se desarrolla en el Instituto de Ingeniería un proyecto de pretratamiento de lodo secundario mediante electrooxidación con electrodos de diamante dopado con boro para la recuperación de sustancias poliméricas extracelulares que puedan ser reutilizadas en el tratamiento de agua residual o como insumo para la producción de biocombustibles. Mediante esta tecnología es posible liberar los carbohidratos y los lípidos, así como las proteínas de los lodos residuales para proceder a su separación y concentración. De esta manera, se pretende aprovechar los lodos como una fuente sustentable de recursos renovables con gran potencial de reutilización y contribuir al desarrollo de una economía circular en México. |

## Referencias

1. Barrios, J. A.; Cano, A.; Rivera, F. F.; Cisneros, M. E. y Durán, U. (2021). Efficiency of integrated electrooxidation and anaerobic digestion of waste activated sludge. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), 81.
2. Barrios, J. A.; Cano, A.; Becerril, J. E. y Jiménez, B. (2016). Influence of solids on the removal of emerging pollutants in electrooxidation of municipal sludge with boron-doped diamond electrodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 776, 148-151.
3. Beecher, N.; Beecher, J.; Burke-Wells, J.; Lono-Batura, M.; Goldstein, N.; Kester, G. y Toffey, B. (2022). National Biosolids Data Project: Biosolids management in the U.S. <https://www.biosolidsdata.org>, accessed 12/05/2023.
4. Gao, N.; Kamran, K.; Quan, C. y Williams, P. T. (2020). Thermochemical conversion of sewage sludge: A critical review. *Progress in Energy and Combustion Science* 79, 100843.
5. Tyagi, V. K. y Lo, S. L. (2011). Application of physico-chemical pretreatment methods to enhance the sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: An up to date review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 10(3), pp. 215-242.
6. Tyagi, V. K.; Lo, S.-L.; Campoy, R. A.; Álvarez-Gallego, C. J.; Romero García, L. I.; Sun, L. P.; Qiu, C. S. (2014). Sono-biostimulation of aerobic digestion: a novel approach for sludge minimization. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 89, 1060-1066.
7. Van Nieuwenhuijzen, A.; Lewis, R.; Bergsma, G. y Uiterlinde, C. (2017) Life Cycle Assessment of Resource Recovery from Primary and Waste Activated Sludge. *Proceedings from SludgeTech 2017*. London. International Water Association.
8. Wu, B. R.; Ni, B. J.; Horvat, K.; Song, L. Y.; Chai, X. L.; Dai, X. H.; Mahajan, D. (2017). Occurrence state and molecular structure analysis of extracellular proteins with implications on the dewaterability of waste-activated sludge. *Environ. Sci. Technol.* 51, 9235-9243.