

4. Pretratamiento de lodos residuales utilizando campo magnético y ultrasonicación



TANIA GUTIÉRREZ MACÍAS*
EDWIN ALDAIR REZA CHÁVEZ**
ALBERTO ESQUIVEL SOTELO***

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.348.04>

Resumen

Los pretratamientos de lodos promueven la solubilización y reducción del tamaño de los compuestos orgánicos refractarios presentes en los lodos residuales antes de ser digeridos, además, se ha demostrado que pueden fomentar la producción de metano en sistemas anaerobios. Por tal motivo el objetivo del presente trabajo fue evaluar la remoción de materia orgánica de los lodos residuales utilizando campo magnético y ultrasonicación como pretratamiento. Como metodología se utilizó lodo residual primario:secundario de una PTAR en una concentración 70:30. Se utilizó un diseño factorial 2^3 en el *software* Statgraphics y se evaluaron como variables el tiempo de contacto, número de imanes y tiempo de ultrasonicación. Para el pretratamiento con campo magnético se utilizaron imanes permanentes de neodimio (2 y 6) con una densidad magnética de 5 000 G y una velocidad de paso de $13.2 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$. Posteriormente, para el pretratamiento con ultrasonicación se utilizó un ultrasonificador Auto Science modelo AS515OB a una potencia de 20 kHz. Como parámetros se evaluó la remoción de la demanda química de oxígeno y sólidos totales. Como resultado se determinaron ocho

* Doctora en Ingeniería Ambiental. Profesora-investigadora del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6760-4800> ; correo electrónico: tgutierrez@secihti.mx

** Maestrante en Ciencias y Tecnología del Agua. Ingeniero de calidad en Baxter de México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9826-9760>

*** Doctorando en Ciencias y Tecnología del Agua. Tecnólogo del Agua titular A en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5322-0750>

pruebas de pretratamiento y se obtuvieron remociones de hasta un 26 % de ST y hasta un 50 % de DQO. En conclusión, el uso de los pretratamientos permite el rompimiento celular de la materia orgánica y fomenta su remoción.

Palabras clave: *neodimio, campo magnético, ultrasonicación.*

Introducción

Los lodos residuales, generados en el proceso de tratamiento de las aguas residuales, son compuestos sólidos con un contenido variable de humedad que presentan la mayor parte de la carga contaminante de las aguas residuales, tales como materia orgánica, organismos patógenos, metales pesados y el resto de las sustancias responsables del carácter peyorativo de las aguas residuales (Sarvenoei et al., 2018). En el Atlas global para el manejo de excretas, lodos residuales y biosólidos publicado en 2008 por el Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (UN-Habitat por sus siglas en inglés), se especifica que los países en vías de desarrollo no consideran los lodos residuales como un residuo a tratar, por lo que se tiene una nula inversión en infraestructura para su tratamiento, disposición final y/o aprovechamiento, así como la falta de datos estadísticos sobre las cantidades generadas. En México a algunas plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTAR) no se les da el tratamiento y/o disposición final de los lodos residuales (Mantilla et al., 2017). Esto se debe principalmente a que la prioridad gubernamental en inversión se concentra en el abastecimiento de agua potable, en el drenaje y en el tratamiento del agua. Si bien existe una Norma Oficial Mexicana para la calidad de lodos residuales (NOM-004-SEMARNAT-2002) un gran porcentaje de las PTAR en la República no cuentan con la infraestructura para tratarlos.

Uno de los tratamientos más utilizados para los lodos residuales es la digestión anaerobia, proceso bioquímico que tiene como principal característica la generación de biogás, el cual está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono, así como reducir el peso y volumen de lodos, lo cual a su vez fomenta los costos de disposición (Mantilla et al., 2017).

Sin embargo, una considerable desventaja de este proceso es que debido al alto contenido de sólidos en los lodos residuales la biodegradabilidad es lenta, por lo tanto, se requieren tiempos de retención del orden de 20 a 30 días. Esto se debe a los tiempos de hidrólisis y al lento crecimiento de las bacterias metanogénicas, lo cual, se traduce en eficiencias moderadas (Pilli et al., 2016). Con la finalidad de reducir estos largos periodos y optimizar las cantidades de biogás generadas durante la digestión anaerobia, durante los últimos 30 años se han desarrollado investigaciones sobre métodos de pretratamiento para lodos generados en PTAR (Sarvenoei et al., 2018), en general podrían mencionarse cuatro tipos principales: térmicos, químicos, mecánicos y biológicos, de las cuales existen todo tipo de variaciones y combinaciones (Pilli et al., 2011).

El principal mecanismo de un pretratamiento es la solubilización y conversión de la materia orgánica particulada de lenta degradación en compuestos de bajo peso molecular fácilmente biodegradables. Esto es posible gracias a la desintegración (denominado así con fines prácticos en la gran mayoría de trabajos relacionados al tema, así como en el presente trabajo) de las partículas que componen al lodo, así como la ruptura de los flóculos presentes (Pilli et al., 2011). Dentro de los pretratamientos mecánicos se encuentra la ultrasonificación. Este mecanismo cuenta con una gran confiabilidad de operación debido al elevado grado de investigaciones realizadas hasta la fecha, la ausencia de generación de olores, facilidad de deshidratación del producto final, alto grado de desintegración y solubilización de los flóculos presentes en el lodo y la facilidad de implementación en una PTAR. Sin embargo, la principal desventaja de este proceso es el negativo balance de energía debido al elevado consumo por parte del equipo, lo cual incrementa los costos de tratamiento (Pilli et al., 2016).

Aunado a esto, existe un creciente interés en el desarrollo de tecnologías eficientes y a la vez amigables con el ambiente para el procesamiento de lodos residuales y toda la problemática que conlleva. Por ello, durante los últimos 20 años las investigaciones relacionadas han aumentado significativamente. Una de estas tecnologías se encuentra en la inducción de campo magnético a partir de imanes permanentes, estos se caracterizan por un diseño simple y la mayor ventaja que presenta su aplicación es la falta de necesidad de cualquier tipo de suministro de energía, además, la intensidad

de inducción del campo magnético no se debilita con el tiempo (Zhang et al., 2021; Zieliński et al., 2018). Esto, junto con otras ventajas como la falta de uso de químicos, la inexistencia de contaminantes secundarios y los bajos costos que representa, lo convierten en una tecnología sustentable y amigable con el ambiente, por lo cual cada vez son más las investigaciones relacionadas (Guan et al., 2017; Qu et al., 2020; Sarvenoei et al., 2018; Zhang et al., 2021; Zhao et al., 2020) sustentable y amigable con el ambiente, por lo cual cada vez son más las investigaciones relacionadas (Guan et al., 2017; Qu et al., 2020; Sarvenoei et al., 2018; Zhang et al., 2021; Zhao et al., 2020). Sin embargo, a pesar de las ventajas con las que cuenta, las investigaciones que evalúan su efecto en sistemas anaerobios aún son escasas, por tal motivo el objetivo del presente trabajo fue evaluar la remoción de materia orgánica medida como demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos totales (ST) de los lodos residuales utilizando campo magnético (CM) y ultrasonificación (UL) como pretratamiento.

Metodología

Los lodos residuales utilizados en el presente estudio fueron proporcionados por una PTAR ubicada en Cuernavaca, Morelos, con una capacidad de $750 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. Las muestras fueron tomadas de la purga del sedimentador primario y del sedimentador secundario (posterior a su espesamiento) en contenedores plásticos de 20 litros, posteriormente fueron trasladados y almacenados en un cuarto frío a temperatura de 4°C en la planta piloto del IMTA, para posteriormente llevar a cabo su caracterización

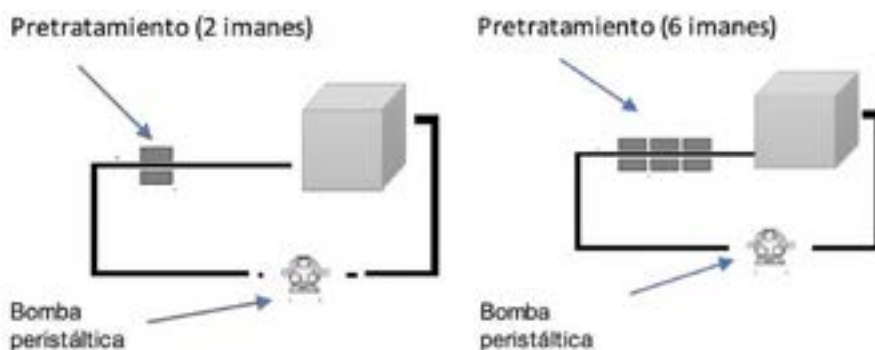
Pretratamiento del lodo

Para el tratamiento del lodo se realizó una mezcla en proporción 70:30 (secundario:primario), y se trató con CM seguido por UL.

Sistema experimental de CM

Para el pretratamiento con CM se evaluaron dos sistemas: el primero consistió en el uso de seis imanes permanentes y el segundo constituido por dos imanes, ambos de neodimio y una densidad magnética de 5 000 Gauss (G). Cada sistema contó con un contenedor de almacenamiento en forma de cubo de 500 ml. En cada sistema se introdujo un volumen de lodo de 200 ml a una velocidad de $13.15 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$ (figura 4.1). La intensidad de campo magnético se midió con un gaussímetro marca LakeShore, modelo 410.

Figura 4.1. Sistema experimental de pretratamiento con CM



Fuente: Elaboración propia

Sistema experimental de UL

La muestra de lodo efluente del sistema de CM inmediatamente fue enviada a UL, donde se utilizó un sonicador digital de la marca Auto Science modelo AS5150B con una potencia de 180 watts (W), capacidad de 6 L y ajuste de potencia del 10 al 100 %. Para todas las corridas se indujo una frecuencia de UL de 40 kHz (Tiehm et al., 2000; Pilli et al., 2011). Para calcular la eficiencia del pretratamiento se utilizó el porcentaje de remoción para CM y UL tanto de ST como de DQO, las cuales fueron determinadas de acuerdo a las técnicas APHA.

Diseño de experimento

Con el objetivo de determinar las mejores remociones tanto de DQO como de ST se realizó un diseño de experimentos Diseño factorial 2³, se utilizaron como variables: tiempo de contacto del CM, el número de imanes y el tiempo de UL; se evaluaron 2 niveles alto y bajo, usando el programa estadístico Statgraphics. En la tabla 4.1 se presentan las variables descritas.

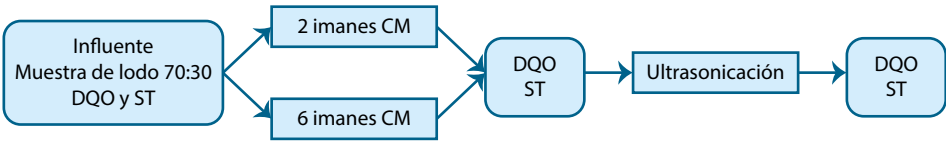
Tabla 4.1. *Diseño de experimentos de diseño factorial 2³*

Variables	Tiempo de contacto CM		No. de imanes		Ultrasonificación	
Niveles	15 min	30 min	2 imanes	6 imanes	20 min	30 min

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de los resultados de las pruebas de pretratamiento se determinaron los parámetros de ST y DQO en el influente del sistema de CM y efluente, este último fue considerado también el influente de la UL, y finalmente en el efluente de UL. En la figura 4.2 se presenta de manera esquemática lo anterior, a fin de determinar la remoción en cada uno de las etapas de operación.

Figura 4.2. *Esquema del tren de pretratamiento*



Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

En la tabla 4.2 se presentan la caracterización de los lodos residuales de la PTAR de Acapantzingo 70 % lodo secundario y 30 % lodo primario. Como resultados se observó una DQO de 58 200 mg·L⁻¹ y ST de 59 518 mg·L⁻¹.

Tabla 4.2. Resultados de la caracterización de la mezcla de lodo (70:30)

Parámetro	Valor
DQO _i (mg·l ⁻¹)	58 200
DQO _s (mg·l ⁻¹)	234.68
ST (mg·l ⁻¹)	59 518.2
STV (mg·l ⁻¹)	24 341.7
SST (mg·l ⁻¹)	45 719.2
SSV (mg·l ⁻¹)	21 507.7
Alcalinidad (g CaCO ₃ ·ml ⁻¹)	4.3
pH	6.4
Conductividad (ms·cm ⁻¹)	3.34

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del diseño factorial 2³ realizado con el *software* Statgraphics se presentan en la tabla 4.3 y se puede observar que en total se determinaron 8 pruebas de pretratamiento en combinación a las 3 variables a evaluar; por ejemplo, para la prueba 1 se indicó realizar la prueba en CM con un tiempo de contacto de 15 min, para la variable de número de imanes fue de 2 imanes y en tiempo de ultrasonicación fue de 30 min. Una vez obtenido el análisis estadístico se procedió a realizar cada una de las pruebas, realizando DQO y ST.

Tabla 4.3. Diseño de experimentos

Variables	TC CM		No. de imanes		UL	
Niveles	15 min	30 min	2 imanes	6 imanes	20 min	30 min
Prueba 1	x		x			x
Prueba 2		x		x	x	
Prueba 3		x		x		x
Prueba 4	x			x	x	
Prueba 5		x	x			x
Prueba 6		x	x		x	
Prueba 7	x		x		x	
Prueba 8	x			x		x

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4.4 se presentan los resultados ST y DQO de las diferentes pruebas realizadas. Partiendo de una concentración inicial del lodo sin pretratamiento de ST de 59 518 mg·L⁻¹, en la prueba 1 donde el lodo fue some-

tido a CM por 15 min, se observó una remoción de un 13 % de ST, lo cual corresponde a una concentración de $51\,881\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ de los mismos. Posteriormente el lodo efluente del CM fue pretratado con UL durante 20 min y como resultado se obtuvo una concentración de $43\,958\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ de ST, lo que da como resultado una remoción del 15 % con respecto a CM y un 28 % en combinación. Con lo anterior se observó que la suma de ambos pretratamientos o su aplicación en conjunto se obtuvieron mejores remociones que de manera individual, lo anterior concuerda con Guan et al. (2017). Además, de manera particular el pretratamiento con UL proporcionó mayor remoción que el CM, lo cual también concuerda con Pilli et al. (2011).

Por otro lado, la prueba 4 que correspondió a 30 min de CM se observó una remoción de hasta 41 %, sin embargo, al pasar por UL no existió remoción, ya que la concentración en CM de ST fue de $34\,883\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ y de UL de $37\,809\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, en lo cual se logró observar que al contrario de la prueba 1 no existió remoción.

Con el sistema de 6 imanes la remoción de ST de la prueba 5 y 6 fueron de un 13-14 % utilizando 30 min de CM, sin embargo, en las pruebas 7 y 8 donde el tiempo se redujo a 15 min las remociones fueron solo de un 1 y 2 %, lo cual observándose que a mayor tiempo de contacto con el campo magnético se logran obtener mejores remociones de ST. Con respecto a la UL se observó en la prueba 1 que con los altos tiempos de 30 min de CM y UL aplicados en conjunto la ultrasonificación tiende a provocar una mayor solubilidad en el lodo y, por lo tanto, una nula remoción de ST, sin embargo, esto no ocurrió cuando se utilizó 15 min de CM y 30 min de UL. Por otro lado, cuando el CM es bajo se logran obtener remociones posterior a la UL de 22-27 % con tiempos de 20-30 min de pretratamiento.

Con respecto a la remoción de DQO en las pruebas 1 y 2 se observó que aplicando CM por 15 min las remociones son bajas (2-4 %), sin embargo, al posteriormente aplicar UL las remociones fueron de un 42 y 53 % respectivamente. Con los tiempos mayores de CM de 30 min si se observaron remociones entre 38 y 47 % (pruebas 3 y 4) y con tiempos de UL de 20 min se registró una remoción del 30 %, lo cual en conjunto fue la mejor lograda de hasta un 68 %. Con el sistema de 6 imanes las remociones de campo magnético en las pruebas 5 a la 8 fueron de 44 a 48 %, es decir, el tiempo de exposición al CM no presentó diferencias en la remoción de DQO, mientras

que a diferencia de la UL las remociones fueron nulas y solo en la prueba 5 fue de un de un 6 %.

Conclusiones

El pretratamiento de CM y UL para el tratamiento de lodo residual es una tecnología que presenta remociones de hasta 48 % DQO y ST al utilizar un arreglo de 6 imanes. El CM como tratamiento solo presentó mejores remociones con el sistema de 6 imanes. A mayor densidad magnética mayor remociones de DQO. Con el sistema de 2 imanes es mejor utilizar tiempos de contacto de 30 min en comparación a 15 min, ya que presentan mejores remociones.

Tabla 4.4. Resultados de DQO, ST y sus remociones en el tren de pretratamiento

Parámetro	Combinación	ST (mg·L ⁻¹)	Remoción (%)	DQO (mg·L ⁻¹)	Remoción (%)
	Influyente (mezcla)	59 518		58 200	
Pruebas					
2 imanes + UL					
1	15 CM	51 881	13	56 145	4
	15 CM + 20 UL	43 958	15	32 267	42
	Total		28		46
2	15 CM	49 353	17	56 824	2
	15 CM + 30 UL	39 106	21	26 600	53
	Total		38		55
3	30 CM	46 648	22	35 923	38
	30 CM + 20 UL	45 850	2	24 978	30
	Total		24		68
4	30 CM	34 883	41	30 614	47
	30 CM + 30 UL	37 809	0	30 536	0.2
	Total		41		47
6 imanes + UL					
5	30 CM	50 963	14	32 306	44
	30 CM + 30 UL	52 130	0	30 469	6
	Total		14		50
6	30 CM	51 784	13	32 232	44
	30 CM + 20 UL	43 943	15	33 650	0
	Total		28		44
7	15 min CM	59 121	1	30 032	48
	15 min CM + 30 UL	46 987	21	38 805	0
	Total		22		48
8	15 CM	58 478	2	30 144	48
	15 CM + 20 UL	43 505	27	55 186	0
	Total		29		48

Fuente: Elaboración propia

Las remociones de UL solo se presentaron cuando se utilizó el pretratamiento de CM con dos imanes. Con 6 imanes las remociones fueron nulas.

El uso de la combinación de ambas tecnologías es prometedor, sin embargo, es necesario hacer estudios a escala real, así como el análisis de los microorganismos presentes posterior al pretratamiento.

Referencias

- Guan, S., Deng, F., Huang, S., Liu, S., Ai, L. y She, P. (2017). Optimization of magnetic field-assisted ultrasonication for the disintegration of waste activated sludge using Box-Behnken design with response surface methodology. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 9-18.
- Mantilla Morales, G., Sandoval Yoal, L., Ramírez Camperos, E., Gasca Álvarez, S., Navarro Franco, J., Hernández Cruz, N., García Rojas, J. L., Esquivel Sotelo, A. y Calderón Mólgora, C. (2017). *Energía limpia del agua sucia: Aprovechamiento de lodos residuales*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (2003, 15 de agosto). *Protección ambiental: Lodos y biosólidos: Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. Semarnat.
- Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. (2008). *Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: Moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource* (R. J. LeBlanc, P. Matthews y R. P. Richard, Eds.).
- Pilli, S., Bhunia, P., Yan, S., LeBlanc, R. J., Tyagi, R. D. y Surampalli, R. Y. (2011). Ultrasonic pretreatment of sludge: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(1), 1-18.
- Pilli, S., Yan, S., Tyagi, R. D. y Surampalli, R. Y. (2016). Anaerobic digestion of ultrasonicated sludge at different solids concentrations-Computation of mass-energy balance and greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Management*, 166, 374-386.
- Qu, G., Lv, P., Cai, Y., Tu, C., Ma, X. y Ning, P. (2020). Enhanced anaerobic fermentation of dairy manure by microelectrolysis in electric and magnetic fields. *Renewable Energy*, 146, 2758-2765.
- Sarvenoei, F. F., Zinatizadeh, A. A. y Zangeneh, H. (2018). A novel technique for waste sludge solubilization using a combined magnetic field and CO₂ injection as a pretreatment prior anaerobic digestion. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2182-2194.
- Zhang, Z., Zhang, Y., Ming, W., Zhang, Y., Cao, C. y Zhang, G. (2021). A review on magnetic field assisted electrical discharge machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 694-722.
- Zhao, B., Sha, H., Li, J., Cao, S., Wang, G. y Yang, Y. (2020). Static magnetic field enhanced methane production via stimulating the growth and composition of microbial community. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122664.
- Zieliński, M., Rusanowska, P., Dębowski M. y Hajduk, A. (2018) Influence of static magnetic field on sludge properties. *Science of the Total Environment*, 625, 738-742.