



BENEFICIOS Y USOS DE LA HIDRÓLISIS TÉRMICA PARA EL TRATAMIENTO Y REVALORIZACIÓN DE LODO SECUNDARIO

Nicolás Goycochea*

Biología de procesos para el ambiente (BIOPROA), Facultad de Ingeniería, UdelaR, Uruguay.

Nicolás Goycochea es Ing. Químico egresado en 2019 y estudiante del Doctorado en Ing. Química. Es docente e investigador del grupo Biología de Procesos para el Ambiente (BIOPROA).

Iván López

Biología de procesos para el ambiente (BIOPROA), Facultad de Ingeniería, UdelaR, Uruguay.

Liliana Borzacconi

Biología de procesos para el ambiente (BIOPROA), Facultad de Ingeniería, UdelaR, Uruguay.

TEMA: Residuos sólidos: urbanos, industriales y peligrosos; recolección, disposición final, valorización, reciclaje, reúso. Biosólidos y su gestión. Normativa. (N° 3)



Dirección del autor principal (*): Montevideo – Uruguay - Tel.: +598 96691372 – e-mail: ngoycochea@fing.edu.uy

Palabras Clave: Digestión Anaerobia, Economía Circular, Hidrólisis Térmica, Industria de Celulosa, Lodo Secundario

RESUMEN

La disposición final de los lodos secundarios generados en tratamientos aerobios es una problemática actual de nuestro país, tanto en el tratamiento de aguas municipales como industriales. Las formas de disposición actuales no le brindan un valor agregado al residuo. Por lo tanto, en este trabajo se decidió trabajar con lodo secundario de una industria de celulosa y, por otro lado, biolodo del tratamiento de aguas municipales. Se plantean dos alternativas de revalorización del biolodo mediante el uso de hidrólisis térmica en diferentes condiciones (125 °C, 165 °C y 205 °C por 30 min). La primera alternativa es usar hidrólisis térmica (HT) en ambos tipos de biolodo para disminuir la cantidad de material a disponer en relleno, mejorar la sedimentabilidad del residuo y obtener como producto final una fase soluble rica en nitrógeno con potencial uso en el tratamiento aerobio, como sustituto de urea. Se logra disminuir la cantidad de materia orgánica suspendida entre dos y tres veces el valor sin tratamiento con las condiciones más severas y liberar más de un 1400 % de nitrógeno con respecto a la situación sin HT. Como segunda opción se utiliza un sistema de HT y digestión anaerobia (DA), donde se obtiene un producto energético (biogás). Para dicha alternativa se obtuvieron aumentos en la producción de metano entre 100 y 300 % con respecto a la situación sin tratamiento. Se realizaron balances energéticos verificando la autosuficiencia del proceso y con mayor beneficio que la situación sin tratamiento. Ambas alternativas son prometedoras desde un punto de vista ambiental, económico y basados en esquemas de economía circular. La condición con la mayor cantidad de ventajas es 165 °C durante 30 min, logrando mejoras significativas frente a la situación sin tratamiento, tanto para biolodo de industria de celulosa como del tratamiento de aguas municipales.

INTRODUCCIÓN

La práctica habitual de tratamiento para los lodos secundarios es espesarlos o deshidratarlos, lo cual implica costos en la etapa de separación debido a la baja sedimentabilidad del residuo biológico. Luego, se procede a eliminar el biolodo espesado mediante incineración o disposición en vertederos. Los



25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país

tratamientos descriptos conllevan una pérdida del valor agregado del residuo, debido a que presupone una concepción lineal de la economía, además de generarse emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, es necesario desarrollar e investigar nuevos tratamientos que permitan revalorizar el residuo, disminuir los costos de disposición y definir el proceso bajo un esquema de economía circular.

El proceso de hidrólisis térmica (HT) se realiza en un reactor, el cual se opera a temperaturas entre 100 a 200 °C por periodos de tiempo entre 30 a 60 minutos, pudiendo ser en continuo o batch la operación (Devos et al. 2021). La HT tiene un efecto físico y químico sobre la materia orgánica. El efecto físico consiste en la lisis celular y la desintegración de los flóculos de materia orgánica. Cuando se produce la ruptura de los flóculos y bacterias, se produce una liberación del material intracelular que puede ser biodegradado en compuestos más simples. Por lo tanto, se logra la solubilización de materia orgánica y consecuentemente la liberación de macronutrientes (Barber 2016).

Parte de los resultados esperados de aplicar un proceso de HT al residuo es la reducción de la materia orgánica suspendida, ya que una porción de ella es solubilizada por las elevadas temperaturas del tratamiento. Esto conlleva una reducción en costos de transporte y disposición del material biológico hidrolizado. Por otro lado, debido a los mecanismos asociados a la HT se espera la liberación de nutrientes, aprovechables en el propio tratamiento de efluentes como sustituto de urea o eventualmente como mejorador de suelos, dependiendo de las concentraciones. Debido a la posible ruptura de las bacterias filamentosas que componen el lodo secundario se mejoran también las propiedades de sedimentación del residuo hidrolizado. Esto implica la reducción de costos en la etapa de espesamiento. Por lo tanto, se trata de beneficios desde el punto de vista ambiental y económico. Comúnmente se suelen utilizar los procesos de HT como pretratamiento para la digestión anaerobia (DA) logrando aumentar la disponibilidad del residuo y consecuentemente la producción de metano. A nivel internacional se tienen reportadas 57 plantas de HT con DA operativas en Europa, de las cuales 19 están ubicadas en Reino Unido, algunas con casi 10 años de antigüedad (Barber 2016). Estados Unidos posee varias plantas de HT con DA en estados como Tennessee y Washington D.C. A nivel regional un claro ejemplo de esta tecnología aplicada a escala real es en la planta de Mapocho-Trebal, en Santiago de Chile, donde se utiliza HT para mejorar la DA de lodo secundario proveniente del tratamiento de aguas municipales (Donoso-Bravo et al. 2020). La planta de Mapocho-Trebal es un ejemplo a nivel mundial que se encuentra operativa hace 10 años. Por lo tanto, la HT está ampliamente desarrollada para biolodo del tratamiento de aguas municipales, pero prácticamente no estudiada para el caso industrial. A nivel país es de interés evaluar ambas situaciones, pues aún no hay casos de implementación a escala real.

OBJETIVOS

El trabajo se enfoca en analizar y definir las posibles alternativas resultantes de la aplicación de HT como un tratamiento al lodo secundario. La opción 1 de tratamiento se basa únicamente en utilizar HT, por lo tanto, se determina la reducción de materia orgánica suspendida y se evalúa las condiciones de HT que logran la reducción del residuo. También se buscó determinar las mejoras en la sedimentabilidad del residuo hidrolizado, cuantificar la liberación de nitrógeno y realizar observaciones en microscopio a la materia orgánica con y sin tratamiento. Como opción 2 se plantea utilizar un sistema de HT como pretratamiento y posterior DA. En esta última alternativa se buscó determinar el aumento de la producción de biogás en base a las condiciones de HT y se evaluó el contenido de nitrógeno amoniacal de la fracción líquida. El objetivo del trabajo fue estudiar el efecto de diferentes condiciones de HT en lodo secundario de industrias de pasta de celulosa. También se ensayó diferentes condiciones de HT para lodo secundario del tratamiento de aguas municipales uruguayas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la HT se utilizó lodo secundario del sistema de tratamiento aerobio de aguas residuales de una fábrica de pulpa Kraft y, por otro lado, biolodo del tratamiento de aguas municipales. Se realizó en un reactor

discontinuo sellado de 2 L. Las condiciones de temperatura y tiempo ensayadas son 125 °C, 165 °C y 205 °C por un periodo de 30 min.

Las variables medidas para la corriente resultante de la HT fueron: DQOs (Demanda Química de Oxígeno soluble), DQO total (Demanda Química de Oxígeno de toda la muestra), SSV (Sólidos Suspendidos Volátiles), SV (Sólidos Volátiles), ST (Sólidos Totales), nitrógeno amoniacal y NTKs (Nitrógeno Total de Kjeldahl soluble), según los protocolos de los métodos estándares (APHA, 2012). Las concentraciones de DQOs, SSV y NTKs se midieron después de utilizar una centrifugadora durante 15 minutos a 6500 rpm. Se definió el parámetro %DQOs, calculado mediante el cociente de la DQOs y la DQO total de la muestra en cuestión. Se realizaron observaciones microscópicas de los biolodos de industria de celulosa con HT durante 30 min a 165 °C y sin HT. Para llevar a cabo las observaciones se realizó una tinción con safranina a las muestras, posteriormente se utilizó una amplificación de x100. Se cuantificó la sedimentabilidad del residuo mediante el cálculo del índice volumétrico de lodos (IVL) permitiendo sedimentar la muestra por un periodo de 30 min.

Para la determinación de la producción de metano de forma anaerobia se cuantificó el parámetro BMP (Potencial de Biometanización) de cada uno de los sustratos en cada una de las condiciones ensayadas. Se utilizó el equipo AMPTS® II (Automatic Methane Potential Test System), que detecta el metano producido de manera continua, y como inóculo biomasa proveniente de un reactor UASB de una maltería. Al finalizar los ensayos a 37°C se determinó, para cada vial, los valores de sólidos suspendidos volátiles (SSV), demanda química de oxígeno y nitrógeno amoniacal en el sobrenadante. Las diferentes fases sólidas y líquidas se obtuvieron posteriormente a la realización de una centrifugación por 15 minutos a 6500 rpm.

Se realizaron balances de energía de una situación a escala industrial donde se considere la HT y DA en conjunto con una concentración de ST de 14 %. El esquema presentado en la figura 1 fue considerado para realizar el cálculo del balance energético. Las unidades utilizadas para todas las magnitudes fue kJ por kg de biolodo húmedo a la concentración definida. Se consideró el consumo de la HT, sistemas eléctricos como bombeo y agitación, pérdidas de calor al ambiente por la DA y HT. Por otro lado, son ganancias energéticas la energía aprovechada por el sistema de cogeneración y el aprovechamiento térmico de la corriente saliente de la HT, como se aprecia en la figura 1. Se consideraron 10 % de pérdidas de calor en el calentamiento necesario para la HT y 80 % de recuperación energética en el intercambiador hipotético del aprovechamiento de la corriente saliente de la HT. Las pérdidas de calor de los equipos de DA y HT fueron calculadas. Se tuvo en cuenta los balances de energía térmica por separado de los de energía total, debido a las necesidades térmicas del proceso.

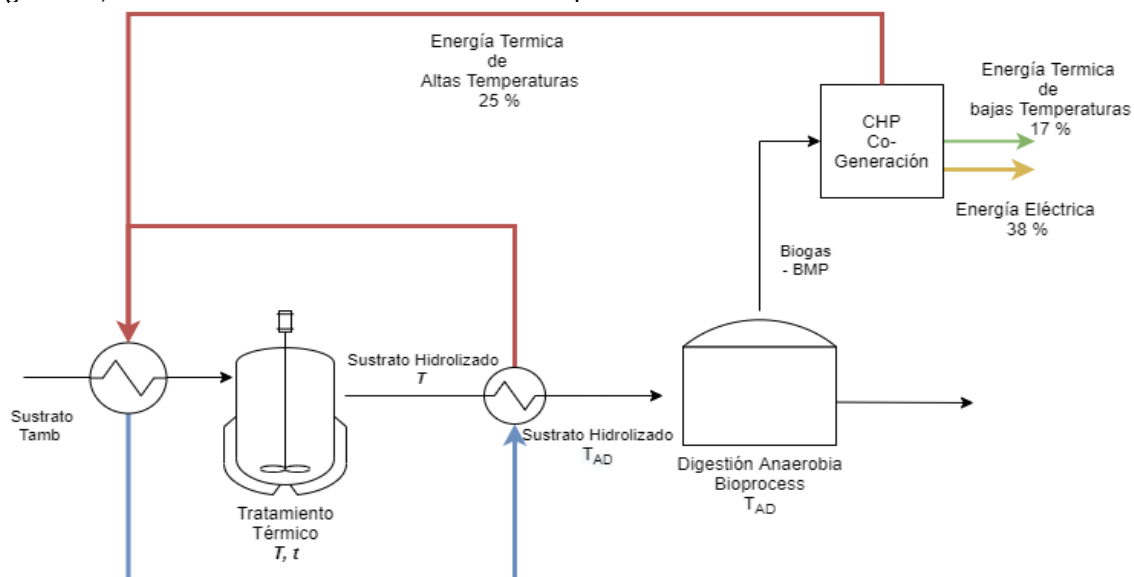


Figura 1: Esquema del proceso y las corrientes energéticas consideradas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos para el residuo hidrolizado térmicamente que representa la corriente saliente de la HT. La opción 1 implica una primera etapa de sedimentación, para la cual se obtuvo como resultado una reducción del IVL de hasta 2 y 3 veces comparado a la situación sin tratamiento, tanto para el lodo secundario de cloacal como de industria de celulosa. Esto implica una mejora en la sedimentación. Por otro lado, el residuo hidrolizado presenta una menor concentración de materia orgánica suspendida, reduciéndose hasta 2 y 3 veces el valor respecto a la situación sin tratamiento, según se muestra en la tabla 1. Consecuentemente se tiene un aumento en la concentración de DQO en la fase soluble, lográndose niveles de solubilización de la materia orgánica mayores al 50 % para ambos tipos de biolodo. Se aprecia en las observaciones en microscopio presentadas en la figura 2 la transformación que sufre el residuo al realizar HT, acorde a las tendencias de las variables.

Tabla 1: Resultados de %DQOs, SSV/SV y IVL con su correspondiente desviación estándar (σ).

Variables experimentales de la hidrólisis térmica		Industria de Celulosa			Municipales		
T (°C)	t (min)	% DQOs (σ) (%)	SSV/SV (σ) (%)	IVL _{30 min} (mL/gSST)	% DQOs (σ) (%)	SSV/SV (σ) (%)	IVL _{30 min} (mL/gSST)
Sin tratamiento	Sin tratamiento	3.3 (0.2)	95 (2)	99.0	0.04 (0.01)	95 (1)	79.5
125	30	23.2 (1.3)	73 (2)	84.0	25.3 (7.1)	78 (2)	NA
165	30	54.3 (0.8)	40 (6)	78.1	40.8 (2.4)	42 (6)	77.0
205	30	57.7 (2.0)	31 (1)	15.7	59.3 (0.4)	40 (2)	51.7

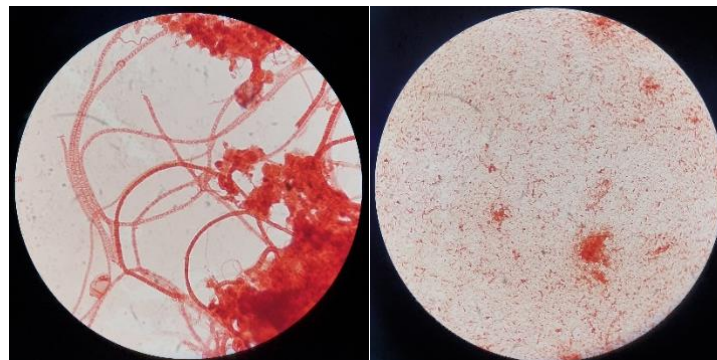
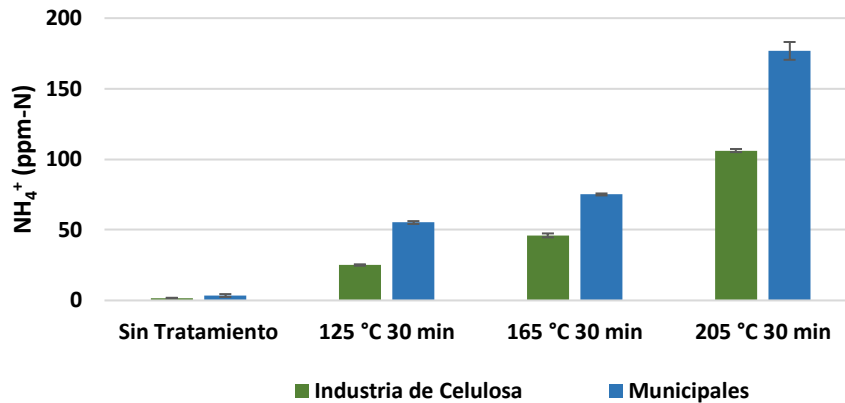


Figura 2: Observaciones en microscopio, de la muestra sin tratamiento (izquierda) y HT a 165 °C 30 min (derecha), ambas teñidas con safranina, correspondientes al biolodo de industria de celulosa.

La liberación de materia orgánica de la HT fue acompañada de una liberación de nitrógeno, reportados como nitrógeno amoniacal y NTKs en la figura 3. Se aprecia una mayor liberación del nutriente a condiciones de HT más severas, permitiendo aumentar la disponibilidad del nitrógeno en la fase soluble para potenciales diversos usos. Por ejemplo, sustituto de urea en plantas de tratamiento aerobio con déficit de nutrientes. Como era de esperar, el biolodo municipal presenta una mayor cantidad de nitrógeno que

el proveniente de la industria de celulosa, debido a la presencia de proteínas y otros compuestos nitrogenados de las aguas municipales.

Nitrógeno Amoniacal



NTKs

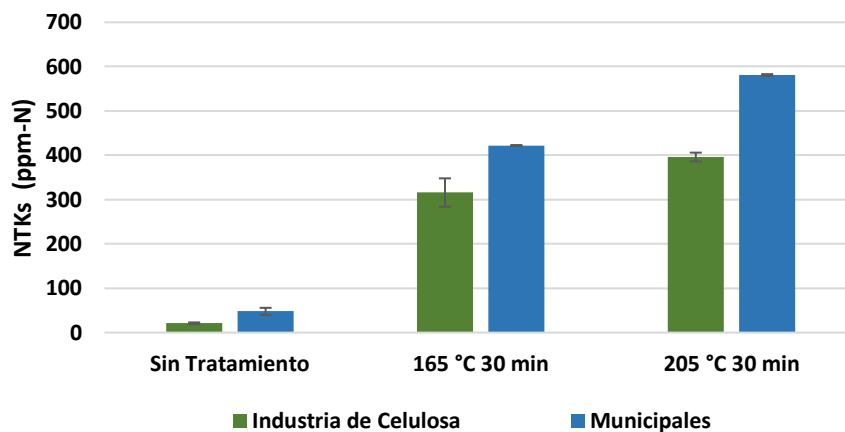


Figura 3: Nitrógeno amoniacal y NTKs de la fase soluble resultante de la HT.

En la opción 2, se considera la posibilidad de realizar una digestión anaerobia de los lodos biológicos hidrolizados. La tabla 2 presenta los resultados obtenidos para dicha alternativa de DA. En base a la producción de metano, se obtuvieron incrementos del 100 % al 300 % en comparación con la situación sin tratamiento, como se observa en la tabla 2, siendo mayor los valores de producción para la industria de celulosa. Los balances energéticos evaluados fueron positivos, demostrando la autosuficiencia energética del proceso. También, se obtiene una evidente mejora al realizar una HT desde un punto de vista energético, debido a que la recuperación energética es de 135 a 260 % mayor que la situación sin tratamiento. El biolodo de industria de celulosa logra un mayor aprovechamiento de la energía disponible del residuo que el caso de municipales. Se tiene una mínima variación del balance energético entre la condición de 165 °C 30 min y 205 °C 30 min. Por lo tanto, operar en temperaturas elevadas no tendría mayores beneficios energéticos que la opción de 165 °C 30 min. En la tabla 2 se aprecia los incrementos de las concentraciones de nitrógeno amoniacal después de la DA. Los altos niveles que se obtendrían a escala industrial podrían ser prometedores para su potencial utilización como nutriente, permitiendo su uso en un contexto de economía circular. La condición de 205 °C 30 min presenta una menor cantidad de



25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país

nitrógeno amoniacal que 165 °C 30 min, una posible razón es la presencia del nitrógeno soluble en otras formas más complejas.

Tabla 2: Resultados de BMP y nitrógeno amoniacal generado en la DA con su correspondiente desviación estándar (σ).

Variables experimentales de la hidrólisis térmica		Industria de Celulosa		Municipales	
T (°C)	t (min)	BMP (σ) (Nml CH ₄ gSV ⁻¹)	NH ₄ ⁺ Generado en DA (σ) (ppm N)	BMP (σ) (Nml CH ₄ gSV ⁻¹)	NH ₄ ⁺ Generado en DA (σ) (ppm N)
Sin tratamiento	Sin tratamiento	84 (18)	54 (12)	61 (8)	56 (16)
125	30	208 (9)	67 (20)	129 (8)	84 (20)
165	30	257 (3)	92 (14)	212 (12)	94 (27)
205	30	276 (2)	70 (23)	247 (22)	77 (36)

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se logró demostrar empíricamente que la HT libera materia orgánica y se reduce la cantidad de sólidos a disponer. Para la opción, la fase soluble posee una concentración de DQO elevada, por lo cual debe ser tratada, siendo una alternativa la recirculación al tratamiento aerobio ya existente en la planta o mediante reactores anaerobios de alta carga, abriendo posibles investigaciones a futuro. Por otro lado, se logra obtener concentraciones considerables de nitrógeno en la fase soluble del residuo hidrolizado, generando una oportunidad de aprovechamiento como fertilizante o sustituto de urea como nutriente.

Utilizar una HT previa a una DA logra aumentar la biodisponibilidad del residuo logrando mejorar el valor de BMP y, por lo tanto, de biogás. La DA logra producir una corriente líquida enriquecida en nitrógeno amoniacal, que puede ser aprovechada. Es necesario tener en cuenta que, si bien la concentración de ST en los análisis presentados fue de 1 a 1.5 %, a escala industrial se trabajaría en el entorno de 10 % de ST, concentración típica utilizada en DA. Esto conlleva a mayores concentraciones de nitrógeno remanente de la DA o de solo el proceso de HT.

Los balances energéticos realizados son positivos, por lo tanto, autosuficientes energéticamente y mejores que la situación sin HT. Igualmente, desde un punto de vista económico es más costoso utilizar un equipo a 205 °C, 30 min, que, a 165 °C, 30 min, siendo prácticamente el mismo retorno energético.

Por todo lo mencionado, la condición con la mayor cantidad de ventajas es 165 °C durante 30 min, logrando mejoras significativas frente a la situación sin tratamiento, tanto para biólodo de industria de celulosa como del tratamiento de aguas municipales.

Agradecimientos: El proyecto que permitió obtener los resultados presentados en el presente trabajo fueron financiados por la AGENCIA NACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INOVACIÓN bajo el código POS_FMV_2020_1_1009243.

REFERENCIAS

[1] APHA, AWWA, WEF (2012) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22nd Edition, American Public Health Association, American Water Works, Water Environment Federation, Washington DC.



XI Congreso Nacional de AIDIS

Cambios, desafíos y soluciones:

El rol de la Ingeniería Ambiental en el desarrollo sostenible

25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país



- [2] Barber, W. P. F. (2016). Thermal hydrolysis for sewage treatment: A critical review. *Water Research*, 104, 53–71. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.07.069>
- [3] Devos, P., Haddad, M., & Carrère, H. (2021). Thermal Hydrolysis of Municipal sludge: Finding the Temperature Sweet Spot: A Review. *Waste and Biomass Valorization*, 12(5), 2187–2205. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01130-1>
- [4] Donoso-Bravo, A., Olivares, D., Lesty, Y., & Bossche, H. Vanden. (2020). Exploitation of the ADM1 in a XXI century wastewater resource recovery facility (WRRF): The case of codigestion and thermal hydrolysis. *Water Research*, 175, 115654. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115654>