

HUMEDALES CONSTRUIDOS PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE INDUSTRIAS LÁCTEAS: UN APOORTE DESDE LA ECONOMÍA CIRCULAR

Schierano, María Celeste^{1,2}; Gutierrez, Gonzalo^{1,2}; Panigatti, María Cecilia¹; Maine, María Alejandra², Boglione, Rosana¹ y Griffa, Carina¹.

¹Grupo de Estudios de Medio Ambiente (GEM). Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Rafaela. Acuña 49.

Rafaela (2300) – Santa Fe. Argentina. labquimicautn@gmail.com

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Introducción

El aumento en los vertidos de aguas residuales sin tratar, junto con la escorrentía de tierras agrícolas y las aguas residuales industriales con tratamiento inadecuado, han llevado al deterioro de la calidad del agua en el mundo. Las industrias lácteas en particular tienen alta producción de aguas residuales, que deben ser tratadas para evitar la degradación ambiental de los cursos receptores. En este sentido, los sistemas circulares se proponen como alternativas más viables y sustentables a los sistemas lineales convencionales.

Se trabajó con una empresa láctea de la cuenca lechera santafesina que, apuntando a la economía circular, se plantea como objetivo la reutilización de sus aguas residuales y el aprovechamiento de subproductos de la industria de la construcción. Para ello, se propone adicionar un humedal construido (HC) como tratamiento terciario al tratamiento biológico ya existente, con el objeto de mejorar las condiciones del efluente y que el mismo sea apto para reúso. Los HCs pueden ser definidos como una solución basada en la naturaleza (SbN) donde los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los humedales naturales son emulados y optimizados para la depuración de aguas residuales. (Maine et al., 2022). Esta tecnología también ofrece un proceso de tratamiento fiable y especialmente adecuado para países en vías de desarrollo y zonas rurales (Liu et al., 2015). Si bien requieren grandes superficies de terreno para su instalación, esto representa una ventaja en países como Argentina, ya que aún se disponen de grandes extensiones de tierras. Además, al contar con bajos costos de operación y mantenimiento, suman un atractivo más para su instalación en nuestro país.

En estudios previos se demostró la eficiencia de un HC del tipo subsuperficial horizontal (HSSH) para el tratamiento de estos efluentes, utilizando *Typha domingensis* como macrófita y canto rodado como sustrato (Schierano et al., 2020). Actualmente, y como punto innovador en el diseño, se propone utilizar como sustrato residuos de ladrillos RETAK®. El objetivo del trabajo es evaluar y comparar la eficiencia de remoción de contaminantes en HCs utilizando canto rodado y residuos de RETAK® como sustratos para el tratamiento de efluentes de una industria láctea.

Metodología

Se construyeron dos HSSHs a escala piloto (2,5 m de largo; 1,0 m de ancho; 0,80 m de profundidad), dispuestos a la salida del tratamiento biológico ya existente (Figura 1). Ambos fueron plantados con ejemplares de *T. domingensis*; en uno se utilizó canto rodado como sustrato y en el otro, residuos de RETAK®. Este material consiste en ladrillos de hormigón celular curado en autoclave (HCCA). El HCCA es un material a base de arena, cemento, cal y un agente expansor, que luego de un curado en autoclave, adopta forma de ladrillo. En nuestro estudio, se utilizó un subproducto formado por trozos de descarte de estos ladrillos.

Se realizaron 7 muestreos sucesivos a la entrada y salida de cada uno de los sistemas (tiempo de residencia hidráulico: 7 días) durante el período comprendido entre Abril-Junio de 2023. Las muestras se trasladaron refrigeradas al laboratorio y se almacenaron a 4 °C hasta el momento de analizarlas. Se determi-

naron por duplicado los siguientes parámetros fisicoquímicos para calcular posteriormente eficiencias de remoción: sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), Nitrógeno Kjeldahl Total (NTK), Amonio (NH₄⁺), Nitratos (NO₃⁻), Nitritos (NO₂⁻) y fósforo total (PT). También se midieron en todas las muestras pH y Conductividad Eléctrica (CE). Para los análisis se emplearon técnicas normalizadas de acuerdo a APHA (2017). Una vez determinadas las concentraciones de los diversos contaminantes a la entrada y salida de cada sistema en evaluación se calcularon las eficiencias de remoción para cada uno.

Resultados

En la Tabla 1 se pueden observar los valores promedio de ingreso a ambos sistemas para los diferentes contaminantes analizados, como así también las concentraciones de salida para el sistema que utilizó canto rodado como sustrato (HC/CR) y el que utilizó RETAK® (HC/R). También se informan los valores de desviación estándar correspondientes.



Figura 1.- Humedales Construidos, día de plantación de los ejemplares de *T. domingensis*.

Como puede observarse, los valores de los compuestos nitrogenados son los que presentaron mayor variabilidad. Para el caso específico de NTK, en ambos sistemas se logró disminuir la concentración de este contaminante. Las concentraciones de amonio, en cambio, presentaron gran variabilidad a lo largo de los diferentes muestreos realizados. En particular, en los últimos muestreos se obtuvieron concentraciones de salida mayores a las de ingreso a ambos humedales. Esto podría deberse a variaciones estadísticas y errores analíticos, ya que como puede observarse

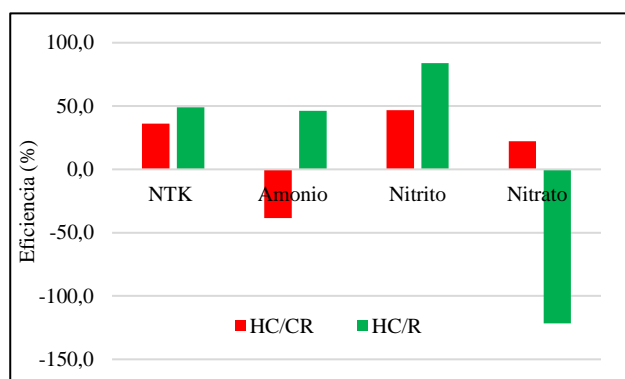
las concentraciones de amonio tanto a la entrada como a la salida son bajas.

Tabla 1.- Valores de entrada y salida de cada sistema. (promedio \pm desviación estándar; n=7)

Parámetro	ENTRADA	HC/CR	HC/R
pH	9,6 \pm 0,1	9,1 \pm 0,4	9,1 \pm 0,3
CE (mS/cm)	6,1 \pm 0,4	5,4 \pm 0,3	5,60 \pm 0,3
SST (mg/l)	181,7 \pm 44,0	28,3 \pm 16,8	27,4 \pm 12,6
DQO (mg O ₂ /l)	269,7 \pm 30,4	123,7 \pm 56,4	117,8 \pm 42,9
DBO (mg O ₂ /l)	71,6 \pm 18,7	33,9 \pm 19,4	32,3 \pm 15,6
NTK (mg N/l)	32,9 \pm 5,1	21,0 \pm 9,6	16,8 \pm 5,0
NH ₄ ⁺ (mg NH ₄ ⁺ /l)	2,0 \pm 2,1	2,7 \pm 1,8	1,1 \pm 1,3
NO ₃ ⁻ (mg NO ₃ ⁻ /l)	0,7 \pm 0,9	0,6 \pm 0,5	1,6 \pm 2,4
NO ₂ ⁻ (mg NO ₂ ⁻ /l)	2,0 \pm 3,1	1,1 \pm 2,0	0,3 \pm 0,6
PT (mg P/l)	22,4 \pm 1,7	12,7 \pm 6,9	10,5 \pm 6,7

Observando los valores de entrada para NTK y Amonio también puede inferirse que la mayor parte del Nitrógeno se encuentra en forma orgánica y una pequeña proporción en forma amoniacal.

En cuanto a nitratos y nitritos, también presentaron amplia variabilidad a lo largo del tiempo, no pudiendo establecerse un comportamiento uniforme que permita concluir si un sistema es más eficiente que el otro. En la Figura 2 pueden observarse las eficiencias de remoción promedio de cada sistema para todos los compuestos nitrogenados. El sistema HC/R presentó mayores eficiencias que el sistema HC/CR, a excepción del Nitrato en que la eficiencia es negativa por presentar valores promedio de salida superiores a los de entrada, lo que podría deberse al proceso de nitrificación. Un comportamiento similar ocurrió para Amonio



en el caso del sistema HC/CR.

Figura 2.- Eficiencias de remoción de compuestos nitrogenados para ambos sistemas evaluados.

En relación al resto de los parámetros analizados, las eficiencias obtenidas para cada sistema pueden observarse en la Figura 3. En todos los casos se obtuvieron eficiencias de remoción satisfactorias para los dos sistemas.

Para el caso particular de SST, las eficiencias obtenidas en los dos humedales evaluados fueron superiores al 80%, sin diferencias significativas entre ambos. Por lo general, en los sistemas de flujo subsuperficial horizontal, la eliminación de este contaminante suele ser alta, debido a que el agua a tratar está en permanente contacto con el sustrato y los sólidos son retenidos a través de procesos de filtración, adsorción y sedimentación sobre el mismo (Vymazal, 2022).

La materia orgánica también es eliminada eficientemente en este tipo de sistemas, lo cual puede verificarse observando los porcentajes de remoción de DBO y DQO en ambos HCs, superiores al 50% para ambos casos. La eliminación de materia orgánica puede llevarse a cabo tanto por microorganismos

aeróbicos como anaeróbicos, aunque los procesos aeróbicos prevalecen únicamente en las zonas adyacentes a las raíces y rizomas de las macrófitas, donde se generan microzonas ricas en oxígeno (Vymazal y Kröpfelová, 2009). Al ser la eliminación de materia orgánica un proceso ligado a los microorganismos asociados a las macrófitas, es razonable que no haya diferencias entre los rendimientos obtenidos para los dos sustratos evaluados.

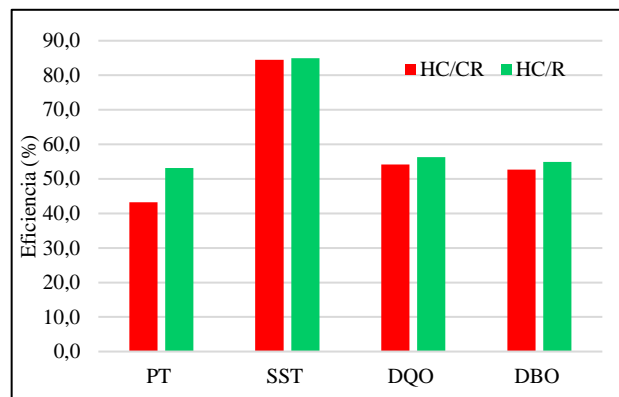


Figura 3.- Eficiencias de remoción de PT, SST, DQO y DBO para ambos sistemas evaluados.

En lo que respecta a PT, tal como se indica en la Figura 3 el desempeño promedio del sistema utilizando RETAK^R (53,2%) fue superior al del sistema con canto rodado (43,2%). De acuerdo a la literatura la eliminación de este nutriente no suele ser alta en HCs que utilizan sustratos convencionales (tal es el caso del canto rodado), pero puede mejorarse con el uso de materiales con mayores capacidades de adsorción. Uno de estos materiales es el RETAK^R ya que con el agregado de agentes expansores y la aplicación de calor durante su fabricación se obtienen mayores sitios de adsorción (Ji et al., 2022).

Conclusiones

La Economía Circular es una premisa a aplicar en los procesos productivos actuales y los HCs son una herramienta tecnológica viable para su implementación.

Utilizando como sustrato en un HSSH, un subproducto (RETAK), se han obtenido eficiencias de remoción satisfactorias para diversos contaminantes, lo convertiría a este material en una alternativa de diseño viable para este tipo de sistemas de tratamiento.

Referencias

- APHA. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition.
- Ji, Z., Tang, W., & Pei, Y. (2022). Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal. *Chemosphere*, 286, 131564.
- Liu, R., Zhao, Y., Doherty, L., Hu, Y., & Hao, X. (2015). A review of incorporation of constructed wetland with other treatment processes. *Chemical Engineering Journal*, 279, 220-230.
- Maine, M. A., Sanchez, G. C., Hadad, H. R., Caffaratti, S. E., del Carmen Pedro, M., Di Luca, G. A., ... & Nocetti, E. (2022). Hybrid wetland system for a pet-care center wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 182, 106700.
- Schierano, M. C., Panigatti, M. C., Maine, M. A., Griffa, C. A., & Boglione, R. (2020). Horizontal subsurface flow constructed wetland for tertiary treatment of dairy wastewater: removal efficiencies and plant uptake. *Journal of Environmental Management*, 272, 111094.
- Vymazal, J. (2022). The historical development of constructed wetlands for wastewater treatment. *Land*, 11(2), 174.
- Vymazal, J. & Kröpfelová, L. (2009). Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of field experience. *Sci. Total Environ.* 407, 3911-3922.