

D 31. Medio ambiente y contaminación ambiental

Sistema híbrido de humedales para el tratamiento final del efluente de una industria láctea

Autor: Nocetti, Emanuel; emanuel_nocetti@hotmail.com

Profesores guía: Maine, M. Alejandra, amaine@fiq.unl.edu.ar; Hadad, Hernán R.,
hadadhernan@gmail.com

Universidad Nacional del Litoral

Resumen

Un sistema híbrido de humedales a escala piloto para tratar los efluentes de una industria láctea fue construido en el predio de la fábrica. El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficiencia del sistema para la remoción de nutrientes y materia orgánica del efluente. El sistema híbrido se encuentra formado por dos etapas: 3 humedales de flujo subsuperficial vertical seguidos de un humedal de flujo subsuperficial horizontal. El sistema trata 0,170 m³ d⁻¹ en un régimen semi-continuo de 7 días de tiempo de residencia hidráulico. Se tomaron muestras del efluente en tres puntos del tratamiento. El rendimiento del sistema fue evaluado determinando la eficiencia de remoción de contaminantes en cada etapa. La disminución de la DQO observados demuestran la importancia de la presencia de ambas etapas para lograr la disminución de la materia orgánica. Los compuestos nitrogenados tuvieron una disminución satisfactoria en el sistema, produciéndose una remarcable nitrificación en la primera etapa, y una disminución significativa de NT en la segunda etapa por desnitrificación y remoción de nitrógeno orgánico. La remoción de PT fue significativa en todas las etapas del sistema. Las eficiencias de remoción alcanzadas por el sistema híbrido fueron 82,7 %, 83,8 %, 69,2 % y 64,4 % para DQO, DBO, NT y PT, respectivamente, por lo que se concluye que es factible aplicar un sistema híbrido de humedales para el tratamiento final de efluentes de estas características.

Palabras clave: efluentes lácteos, humedal de flujo vertical, humedal de flujo horizontal.

Introducción

La provincia de Santa Fe se sitúa en la cuenca lechera Argentina, caracterizada por presentar gran concentración de tambos e industrias lácteas. Como es habitual en las empresas del sector agroalimentario, estas industrias producen un importante volumen de efluente. La composición química de los efluentes de industrias lácteas es muy variable y depende del producto que se elabora en la instalación. Típicamente, estos efluentes poseen elevado contenido de compuestos nitrogenados, además de materia orgánica y fósforo (Wood, 2007).

Los Humedales Construidos (HC) son sistemas de ingeniería que se basan en los procesos que ocurren en los humedales naturales para llevar a cabo el tratamiento de diversos efluentes (Kadlec y Wallace, 2009). Los HC han sido utilizados para el tratamiento de efluentes de diferentes características debido a sus múltiples ventajas, entre las que se destacan la efectiva remoción de materia orgánica y nutrientes, los bajos costos de construcción y operación y un impacto ambiental positivo (Flores et al., 2019; Kadlec y Wallace, 2009; Maine et al., 2019; Nivala et al., 2019). Los sistemas de Humedales Híbridos (HH) son arreglos en serie que combinan diferentes tipos de HC, logrando que las ventajas de cada uno se

complementen entre sí, para maximizar la eficiencia del tratamiento (Vymazal, 2013; Vymazal y Kröpfelová, 2015; Maine et al., 2019). Los HH compuestos por Humedales de Flujo subsuperficial Vertical (HFV) y Humedales de Flujo subsuperficial Horizontal (HFH) han demostrado ser eficientes especialmente para la eliminación de compuestos nitrogenados. Los HFVs utilizan un lecho poroso como sustrato, normalmente arena gruesa o combinación de sustratos de diferentes granulometrías, en el cual se encuentran enraizadas macrófitas emergentes. La distribución del efluente se realiza sobre toda la superficie del lecho de manera uniforme mediante pulsos y períodos de descanso. Esta estrategia operativa favorece la aireación del lecho generando condiciones oxidativas. Por otro lado, los HFHs emplean un sustrato de mayor granulometría plantado con macrófitas emergentes, y operan de manera continua en condiciones de saturación, con nivel de efluente por debajo de la superficie del sustrato. El efluente fluye horizontalmente a través del sustrato alrededor de las raíces y rizomas de las macrófitas y en íntimo contacto con el biofilm (Kadlec y Wallace, 2009; Stefanakis et al., 2014). En un sistema de HH, el HFV aporta remoción de compuestos orgánicos por procesos aeróbicos y proporciona las condiciones

requeridas para la nitrificación, mientras que en el HFH toma lugar la remoción de compuestos orgánicos por procesos anaeróbicos, además de proporcionar las condiciones para la denitrificación (Vymazal y Kröpfelová, 2015).

La eficiencia del tratamiento de un HC depende de las condiciones climáticas del tipo de sustrato, las macrófitas empleadas, las características químicas del efluente a ser tratado, su interacción con el biofilm, entre otros (Kadlec y Wallace, 2009; Maine et al., 2007). En nuestra región se presentan las condiciones ideales para la aplicación de HC en el tratamiento de efluentes industriales debido al clima favorable, disponibilidad de terreno en áreas industrializadas, y necesidad de tratamientos de bajo costo.

A nivel global, el uso de HC en el tratamiento de efluentes lácteos y de producción de queso es escaso. Como ejemplo, pueden mencionarse dos trabajos realizados en Italia. Un HFH plantado con *Typha latifolia* removió satisfactoriamente materia orgánica y nutrientes de los efluentes de una quesería (Mantovi et al., 2011). Comino et al. (2011) estudiaron un HH, compuesto por HFV y HFH, para tratar los efluentes de una quesería de montaña. Nuestro grupo evaluó en estudios de invernadero el uso de HC para el tratamiento de efluentes de una industria

láctea local (Nocetti et al., 2020). En estos experimentos se utilizaron reactores a escala microcosmos para seleccionar una especie vegetal y un sustrato para el tratamiento del efluente. Recientemente, se realizó un cambio de escala construyendo un sistema de HH en el predio de la industria, con el fin de evaluar la respuesta del sistema en mayor escala, frente a las condiciones reales de tratamiento con la variabilidad en la calidad del efluente propia de la industria.

Objetivos

El objetivo general de este trabajo fue evaluar la eficiencia de un HH construido a escala piloto para la remoción de nutrientes (N y P) y materia orgánica del efluente de una industria láctea. Se espera generar información que resulte de utilidad para el diseño de HC a gran escala en industrias similares de la región.

Materiales y métodos

Se diseñó y construyó un sistema de HH a escala piloto para tratar los efluentes de una industria láctea cercana a la ciudad de Santa Fe (Argentina). El sistema híbrido se encuentra formado por una etapa de HFV conectado en serie con una etapa de HFH (Figura 1). La primera etapa presenta tres unidades de HFVs idénticas dispuestas en paralelo. Cada unidad HFV fue construida

en contenedores industriales de 1,20 m³ de capacidad (largo/ancho/profundidad: 1,20/1,00/1,00 m). La Figura 2 muestra las dimensiones de los HFVs a escala piloto. Los HFVs presentan un sistema de cañería interna en la zona inferior que facilita la captura del efluente tratado. En la salida de la etapa HFV, el efluente es conducido por gravedad a la siguiente etapa del tratamiento. La segunda etapa presenta una unidad de HFH construido por medio de una excavación en el terreno, la cual fue impermeabilizada con tres capas de polietileno de alta densidad de 200 µm de espesor. La Figura 3 muestra las dimensiones del HFH a escala piloto. El mismo posee un volumen total de 4,95 m³ (largo/ancho/profundidad: 3,00/1,50/1,10 m).

De acuerdo a un estudio previo (Nocetti et al., 2020), los HFVs y el HFH se rellenaron con arena gruesa y canto rodado como sustrato, respectivamente, y se plantaron con ejemplares de *Typha domingensis* (5 – 6 individuos m⁻²) colectados de un humedal natural próximo a la ciudad de Santa Fe. Las plantas fueron aclimatadas en los humedales durante seis meses, en los cuales se volcó efluente diluido (1:2) para favorecer el incremento de la biomasa y el desarrollo del biofilm en el sistema. El sistema HH es alimentado con efluente previamente tratado por un DAF (dissolved

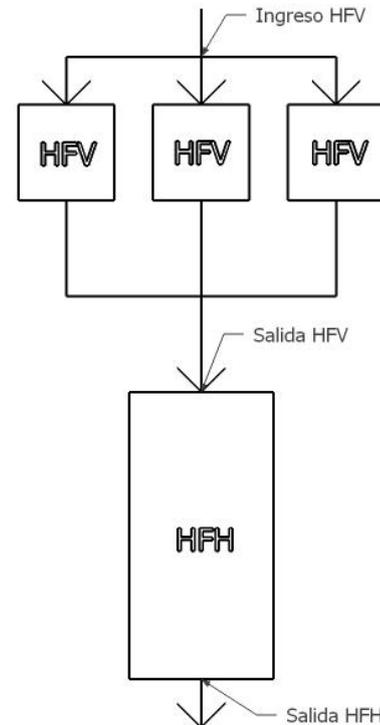


Figura 1: Sistema de humedales híbrido.
HFV: humedal de flujo vertical. HFH: humedal de flujo horizontal.

air flotation) y una laguna aireada por lo que presenta bajo contenido de sólidos, grasas y una reducción en la materia orgánica. A partir de este punto, los principales contaminantes en el efluente son materia orgánica disuelta, compuestos nitrogenados (mayoritariamente nitrógeno orgánico y NH₄⁺) y fósforo. El efluente es conducido completamente por gravedad desde la entrada de la etapa HFV hacia la salida del HFH en un régimen semi-continuo.

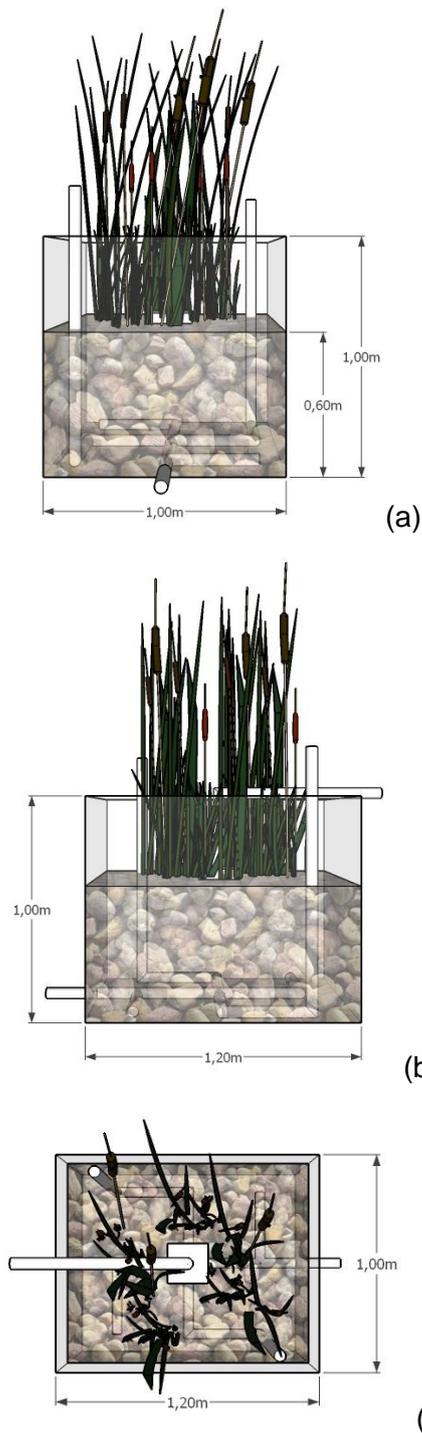


Figura 2: Humedal de flujo subsuperficial vertical (HFV) a escala piloto. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral. (c) Vista superior.

El sistema de HH trata un caudal de $0,170 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ con un tiempo de residencia hidráulico de 7 días. Los HFVs son alimentados alternadamente mediante pulsos y respetando un periodo de descanso de dos días en cada unidad para restablecer las condiciones oxidativas. Los HFVs son drenados lentamente por gravedad y el efluente es conducido a la segunda etapa de HFH, donde ingresan con un régimen continuo con el caudal medio de diseño. El efluente tratado por el HFH fue tomado en el extremo opuesto en el fondo del sustrato, manteniendo la profundidad de diseño. El sistema HH fue operado durante tres meses (02/2021-04/2021). Se tomaron muestras semanalmente con un total de 12 muestreos realizados. En cada muestreo se recolectaron muestras del efluente en tres puntos del sistema: ingreso HFV, salida HFV y salida HFH. En todas las muestras se determinó la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda biológica de oxígeno (DBO), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , fósforo total (PT) y fósforo reactivo soluble (PRS). Las concentraciones de nitrógeno orgánico (N-Org) y nitrógeno total (NT) fueron estimadas como $\text{N-Org} = \text{NTK} - \text{N-NH}_4^+$ y $\text{NT} = \text{NTK} + \text{N-NO}_2^- + \text{N-NO}_3^-$. Las determinaciones analíticas se realizaron de acuerdo a APHA (2012).

Para evaluar el rendimiento del sistema se determinó la eficiencia de remoción de cada contaminante en cada etapa utilizando la ecuación 1:

$$R = \frac{C_I - C_S}{C_I} \times 100 \quad (1)$$

donde R es la eficiencia de remoción (%), C_I es la concentración del contaminante en el ingreso de cada etapa del HH (mg L^{-1}), y C_S es la concentración del contaminante en la salida de cada etapa del HH (mg L^{-1}).

Se realizó análisis de la varianza para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de los contaminantes entre los diferentes puntos muestreados en el sistema HH.

Resultados y discusión

Durante todo el estudio, las concentraciones de DQO en la salida de los HFV fueron significativamente menores que las del ingreso. Las concentraciones determinadas en la salida del HFH fueron las más bajas (Figura 4). La Figura 5 muestra los valores medios de la DQO en el ingreso al sistema HH y la salida de cada etapa. Las eficiencias de remoción medias de DQO de la primera (HFV) y segunda etapa (HFH) fueron de $51,4 \pm 14,8 \%$ y $63,6 \pm 9,8 \%$, respectivamente.

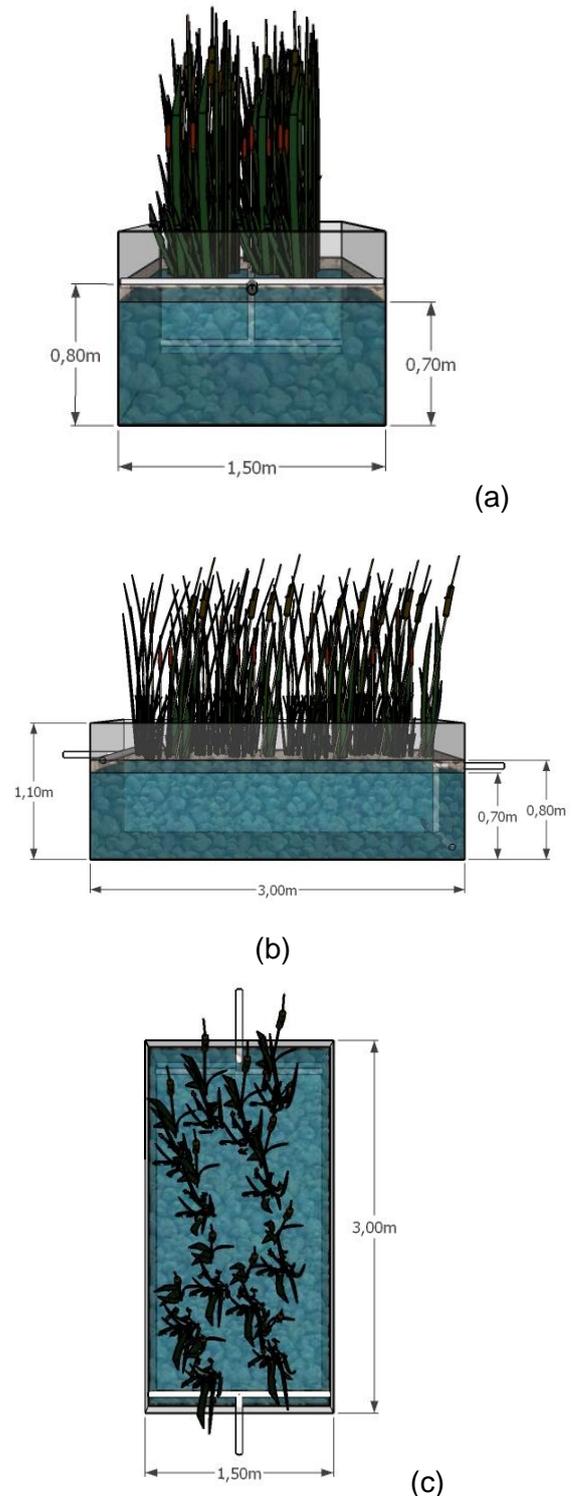


Figura 3: Humedal de flujo subsuperficial horizontal (HFH) a escala piloto. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral. (c) Vista superior.

La eficiencia de remoción total de DQO del sistema híbrido fue de $82,7 \pm 2,2$ %. Comino et al. (2011) evaluaron el tratamiento de efluentes de una fábrica de quesos mediante el uso de un sistema de HH, el cual fue diseñado principalmente para la reducir la carga orgánica del efluente. El sistema estuvo conformado por una etapa de HFV seguida de una etapa HFH. Las eficiencias de remoción de DQO variaron entre 53 – 80 %. La eficiencia de remoción máxima es comparable con la reportada en nuestro trabajo. Comino et al. (2011) explican los valores de remoción de DQO inferiores con períodos de bajas temperaturas en los cuales la actividad biológica presenta un decaimiento en su velocidad, junto con una posible acumulación de materia orgánica inerte en el interior del sustrato, la cual puede reducir el tiempo de residencia hidráulico del sistema.

Se observó una disminución de la DBO en ambas etapas del sistema HH. Las DBO determinadas en la salida del HFH fueron las más bajas (Figura 6). La Figura 7 muestra los valores medios de la DBO en el ingreso al sistema HH y la salida de cada etapa. La eficiencia de remoción de DBO de la primera (HFV) y segunda etapa (HFH) del sistema híbrido fueron de $21,8 \pm 12,0$ % y $72,3 \pm 8,0$ %, respectivamente.

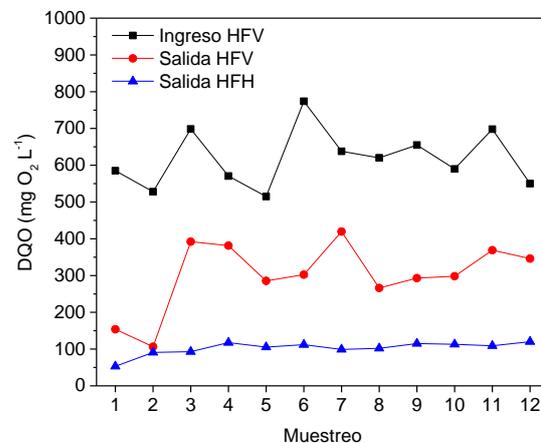


Figura 4: Valores de DQO ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$) en ingreso HFV, salida HFV y salida HFH determinados en cada muestreo del sistema híbrido.

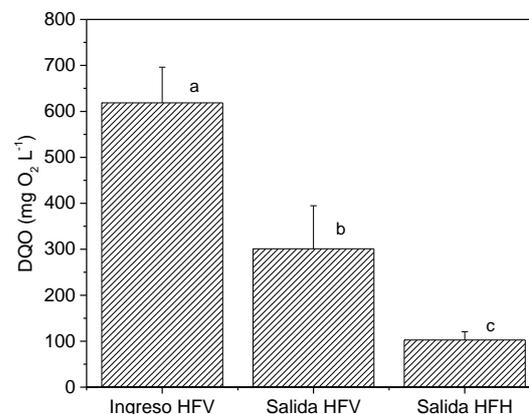


Figura 5: DQO media en ingreso HFV, salida HFV y salida HFH. Diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas.

La eficiencia de remoción total de DBO del sistema híbrido fue de $80,6 \pm 2,4$ %. La relación DBO:DQO fue $0,4 \pm 0,1$ en todas las etapas. A pesar de que la relación DBO:DQO se mantuvo por debajo de un

valor de 0,5, el cual es el recomendado para tratamiento biológicos (Metcalf y Eddy, 2003), el sistema mostró ser eficiente para la remoción de contaminantes. Esto se debe a que un gran número de procesos físicos, químicos y biológicos puede contribuir a la remoción de contaminantes en un humedal (Kadlec y Wallace, 2009).

Schierano et al. (2020) evaluaron la eficiencia de remoción de contaminantes en un HFH a escala piloto como tratamiento terciario de efluentes lácteos. Al igual que en nuestro trabajo, el HFH utilizó canto rodado y fue plantado con *T. domingensis*. La eficiencia de remoción de DQO reportada por los autores fue del 68,7 %. En nuestro trabajo se alcanzó una eficiencia de remoción de DQO superior, posiblemente una de las razones sea que la velocidad de carga superficial de DQO fue mayor, afectando ésta directamente a la velocidad de remoción. En general, los humedales de flujo subsuperficial pueden exhibir un mayor rendimiento de tratamiento con cargas más elevadas (Gorra et al., 2014).

Schierano et al. (2020) asocian este porcentaje de remoción directamente con la remoción de DBO, la cual alcanzó un valor de 57,9 %.

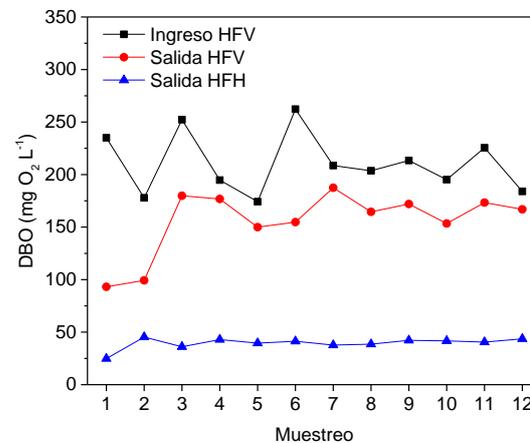


Figura 6: Valores de DBO (mg O₂ L⁻¹) en ingreso HFV, salida HFV y salida HFH determinados en cada muestreo del sistema híbrido.

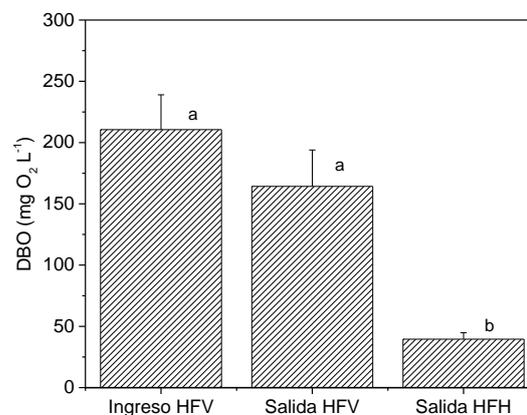


Figura 7: DBO media en ingreso HFV, salida HFV y salida HFH. Diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas.

Estos autores destacan que el efluente utilizado en su estudio no tiene un predominio orgánico o inorgánico bien definido, con lo cual encuentran razonable que los porcentajes de remoción de DQO y

DBO sean similares e incluso que la relación de DBO:DQO se mantenga próxima a 0,4 en el ingreso y la salida del HFH estudiado.

La Figura 8 muestra las concentraciones (mg N L^{-1}) de N-NH_4^+ , N-NO_3^- , N-Org y NT determinadas en cada muestreo. Puede observarse que la concentración de N-NH_4^+ a la salida del HFV fue inferior a la concentración de ingreso y la concentración de N-NO_3^- fue superior para todos los muestreos. Estos resultados sugieren la ocurrencia del proceso de nitrificación (Lee et al., 2009). Las concentraciones de N-Org y NT presentaron una disminución en cada etapa del sistema.

La concentración de NT (mg N L^{-1}) no tuvo una disminución significativa en los HFVs pero si luego de atravesar el HFH (Figura 9). En cuanto a la distribución de los compuestos nitrogenados en las distintas etapas del sistema híbrido puede observarse que luego de la primera etapa (HFV), se produce la nitrificación del efluente, disminuyendo la concentración de NH_4^+ e incrementando la concentración de NO_3^- .

En la segunda etapa (HFH) se produce la desnitrificación del efluente, disminuyendo la concentración de NO_3^- , contribuyendo a la remoción de NT del efluente (Lee et al., 2009).

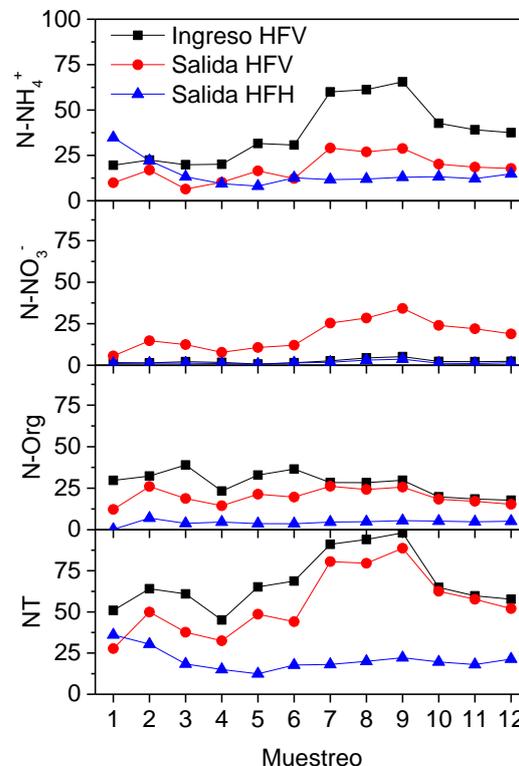


Figura 8: Concentraciones de NH_4^+ , NO_3^- , N-Org y NT (mg N L^{-1}) en ingreso HFV, salida HFV y salida HFH determinadas en cada muestreo del sistema híbrido.

La concentración de N-Org muestra una marcada disminución en la etapa de HFH. La eficiencia de remoción de NT de la segunda etapa (HFH) del sistema híbrido fue de $63,9 \pm 6,8 \%$. La eficiencia de remoción total de NT del sistema híbrido fue de $69,2 \pm 11,1 \%$.

El mecanismo más frecuente para la remoción de NT en HC es la nitrificación-desnitrificación (Lee et al., 2009; Saeed y Sun, 2017; Vymazal y Kröpfelová, 2015). Schierano et al. (2020) reportaron una

eficiencia de remoción de NTK (N-Org + N-NH₄⁺) del 25,7 % siendo éste el parámetro con menor eficiencia de remoción en el HFH estudiado. Los autores indican que el 90 % del NTK en el ingreso del HFH fue en forma de NH₄⁺, con lo cual las bajas concentraciones de oxígeno en el HFH actuaron como limitante en el proceso de nitrificación. Este hecho refleja la importancia de la presencia de una primera etapa de HFV en el sistema HH para el tratamiento de los efluentes lácteos. Nuestros resultados muestran que la etapa HFV no disminuye significativamente la concentración de NT. Sin embargo, incrementa la concentración de NO₃⁻ por nitrificación que luego es factible de ser removido por desnitrificación en la etapa subsecuente de HFH. Pelissari et al. (2014) compararon la eficiencia de remoción de nitrógeno en HFH y HFV operando en paralelo. Los autores reportaron remociones del 59 y 58 % para NT y NH₄⁺, respectivamente, en HFH, y del 23 y 80 % para NT y NH₄⁺, respectivamente, en HFV. Estos autores concluyeron que la nitrificación es el principal mecanismo de remoción de NH₄⁺ en HFV por su condición aeróbica, obteniéndose baja remoción de NT.

Las eficiencias de remoción de NT en un HH reportadas por Comino et al. (2011) fueron inferiores variando entre 40 – 51 %.

A pesar de esto, y en concordancia con los resultados obtenidos en este trabajo, los autores indican que el N que ingresó en el sistema en forma orgánica experimentó una fuerte oxidación en la etapa HFV, produciéndose además una leve amonificación en la etapa HFH.

La Figura 10 muestra las concentraciones de PRS y PT en el ingreso y la salida de cada etapa del sistema híbrido. Notoriamente, la concentración de PT tuvo una importante disminución en ambas etapas del sistema híbrido para todos los muestreos, no así la concentración de PRS. Respecto de las concentraciones medias, el PRS disminuyó

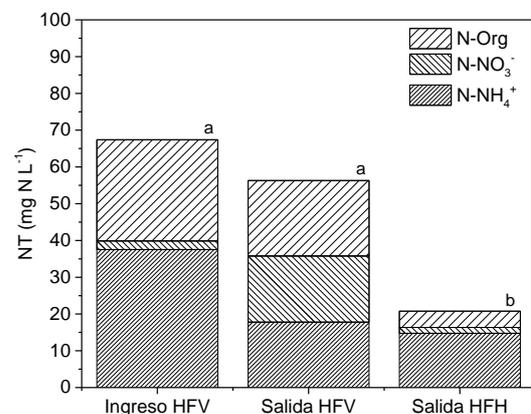


Figura 9: Concentración media de NT y distribución de NH₄⁺, NO₃⁻ y N-Org en ingreso HFV, salida HFV y salida HFH. Diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas para la concentración del NT.

significativamente en la primera etapa del sistema híbrido (Figura 11). Sin embargo, no se determinó diferencia significativa entre la entrada y salida del HFH. La eficiencia de remoción de PRS de la primera etapa (HFV) del sistema híbrido fue de $51,9 \pm 9,8 \%$. La eficiencia de remoción global de PRS del sistema híbrido fue de $58,1 \pm 11,3 \%$ no observándose una diferencia significativa con la remoción de la etapa HFV. La concentración de PT disminuyó significativamente en cada etapa del sistema híbrido. La eficiencia de remoción de PT de la primera (HFV) y segunda etapa (HFH) del sistema híbrido fueron de $40,1 \pm 7,6 \%$ y $40,1 \pm 15,6 \%$, respectivamente. La eficiencia de remoción total de PT del sistema híbrido fue de $64,4 \pm 8,3 \%$.

La mayor remoción de P correspondió al PRS en el HFV. La presencia de *T. domingensis* influye positivamente en el rendimiento del sistema respecto a la remoción de P. Esta macrófita es capaz de retener P en sus tejidos y crecer cuando es expuesta a elevada concentración del mismo (Di Luca et al., 2015).

La adsorción del sustrato es otro de los mecanismos de remoción de P (Maine et al., 2009). De acuerdo con Schierano et al. (2020), el canto rodado utilizado como sustrato en este estudio presenta baja capacidad de adsorción de P. Sin embargo,

dicho material fue seleccionado en estudios previos debido a la eficiencia demostrada en estudios a escala microcosmos (Nocetti et al., 2020). Este hecho concuerda con el bajo nivel de remoción de PRS en el HFH. Comino et al. (2011) reportaron eficiencias de remoción de PT entre 10 – 73 %, donde las menores eficiencias se relacionaron con una baja concentración de PT en el ingreso del sistema.

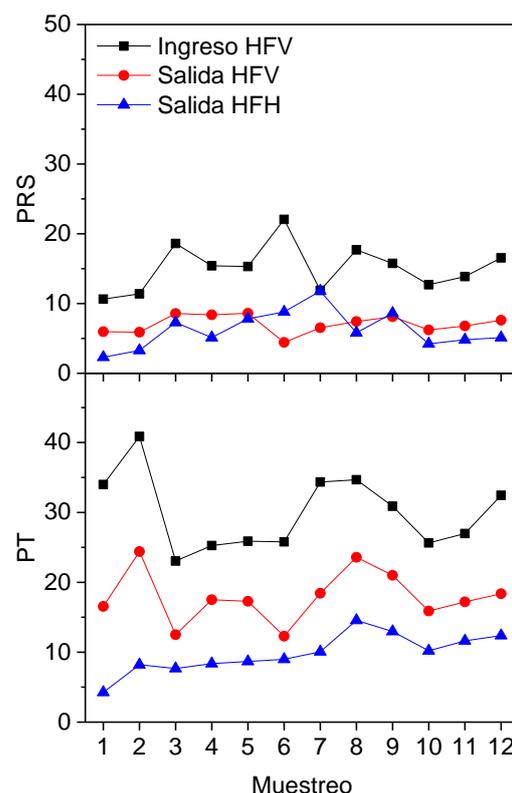


Figura 10: Concentraciones de PRS y PT (mg P L^{-1}) en ingreso HFV, salida HFV y salida HFH determinados en cada muestreo del sistema híbrido.

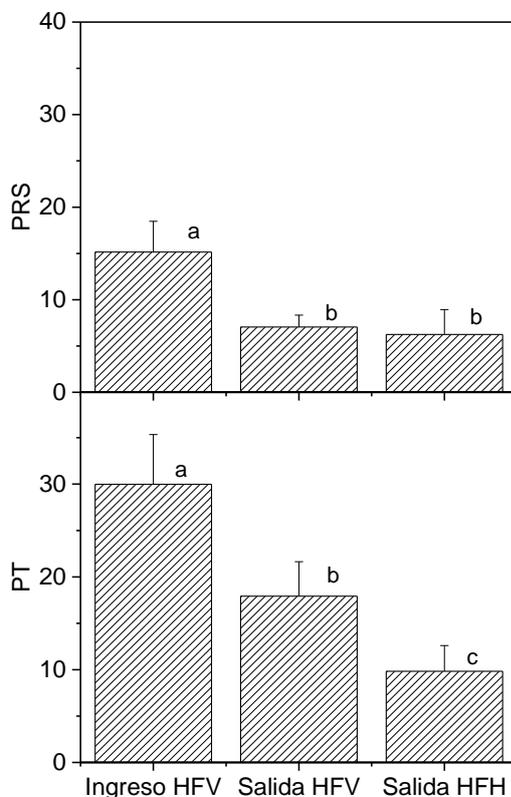


Figura 11: Concentración media de PRS y PT (mg P L^{-1}) en ingreso HFV, salida HFV y salida HFH. Diferentes letras representan diferencias estadísticamente significativas.

Conclusiones

El sistema HH construido a escala piloto en el predio de una industria láctea mostró eficiencia y robustez en la depuración del efluente.

La disminución de la DQO y DBO observada en cada etapa del sistema demuestran la necesidad de la presencia de ambas etapas (HFV y HFH) para lograr la disminución de la materia orgánica.

Tanto la DQO como la DBO alcanzaron remociones superiores al 80 % al final del tratamiento.

Los compuestos nitrogenados tuvieron una disminución satisfactoria en el sistema HH. Si bien la remoción de NT no fue significativa en la etapa HFV, se produjo la nitrificación del efluente debido a las condiciones imperantes en el sistema. La etapa HFH mostró una disminución significativa en la concentración de NT, no sólo por desnitrificación sino también por remoción de nitrógeno orgánico. La eficiencia de remoción de NT del sistema híbrido fue próxima al 70 %.

La remoción de PT fue significativa en todas las etapas del sistema HH, obteniéndose una remoción de PT del sistema híbrido de alrededor del 65 %. La remoción de PRS tuvo una disminución significativa en la etapa HFV, pero no se observó una mejora en la remoción de PRS en la etapa HFH. Sin embargo, la remoción de PRS del sistema híbrido fue satisfactoria, con valores cercanos al 60%. Las eficiencias de remoción alcanzadas por el sistema permiten concluir que es factible aplicar un HH para el tratamiento de efluentes de estas características. Se espera continuar con las investigaciones para aplicar medidas de manejo con el fin de mantener estos valores a largo plazo.

Bibliografía

- APHA (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. New York: American Public Health Association.
- Comino, E., Riggio, V., y Rosso, M. (2011). *Mountain cheese factory wastewater treatment with the use of a hybrid constructed wetland*. *Ecol. Eng.*, 37, 1673–1680.
- Di Luca, G. A., Maine, M. A., Mufarrege, M. M., Hadad, H. R. y Bonetto, C. A. (2015). *Influence of Typha domingensis in the removal of high P concentrations from water*. *Chemosphere*, 138, 405–411.
- Flores, L., García, J., Pena, R. y Garfí, M. (2019). *Constructed wetlands for winery wastewater treatment: A comparative life cycle assessment*. *Sci. Tot. Environ.*, 659, 1567–1576.
- Gorra, R., Freppaz, M., Zanini, E. y Scalenghe, R. (2014). *Mountain dairy wastewater treatment with the use of a “irregularly shaped” constructed wetland (Aosta Valley, Italy)*. *Ecol. Eng.*, 73, 176–183.
- Kadlec, R.H. y Wallace, S.D. (2009). *Treatment wetlands*. 2nd edn. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Lee, C. G., Fletcher, T. D. y Sun, G. (2009). *Nitrogen removal in constructed wetland systems*. *Eng. Life Sci*, 9(1), 11–22.
- Maine, M. A., Sanchez, G. C., Hadad, H. R., Caffaratti, S. E., Pedro, M. C., Mufarrege, M. M. y Di Luca, G. A. (2019). *Hybrid constructed wetlands for the treatment of wastewater from a fertilizer manufacturing plant: Microcosms and field scale experiments*. *Sci. Total Environ.*, 650, 297–302.
- Maine, M. A., Suñe, N., Hadad, H., Sánchez, G. y Bonetto, C. (2009). *Influence of vegetation on the removal of heavy metals and nutrients in a constructed wetland*. *J. Environ. Manag.*, 90(1), 355–363.
- Maine, M. A., Suñe, N., Hadad, H., Sanchez, G. y Bonetto, C. (2007). *Removal efficiency of a constructed wetland for wastewater treatment according to vegetation dominance*. *Chemosphere*, 68(6), 1105–1113.
- Mantovi, P., Piccinini, S., Marmiroli, M. y Marmiroli, N. (2011). *Constructed wetlands are suitable to treat wastewater from italian cheese productions*. *Water Pract., Technol.*, 6(3).
- Metcalf y Eddy (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, fourth ed. McGraweHill, USA.

- Nivala, J., Boog, J., Headley, T., Aubron, T., Wallace, S., Brix, H. y Müller, R.A. (2019). *Side-by-side comparison of 15 pilot-scale conventional and intensified subsurface flow wetlands for treatment of domestic wastewater*. *Sci. Tot. Environ.*, 658, 1500–1513.
- Nocetti, E., Maine, M. A., Hadad, H. R., Mufarrege, M. M., Di Luca, G. A. y Sanchez, G. C. (2020). *Selection of macrophytes and substrates to be used in horizontal subsurface flow wetlands for the treatment of a cheese factory wastewater*. *Sci. Tot. Environ.*, 745, 141100.
- Pelissari, C., Sezerino, P. H., Decezaró, S. T., Wolff, D. B., Bento, A. P., Junior, O. de C. y Philippi, L. S. (2014). *Nitrogen transformation in horizontal and vertical flow constructed wetlands applied for dairy cattle wastewater treatment in southern Brazil*. *Ecol. Eng.*, 73, 307–310.
- Saeed, T. y Sun, G. (2017). *A comprehensive review on nutrients and organics removal from different wastewaters employing subsurface flow constructed wetlands*. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 47(4), 203–288.
- Schierano, M. C., Panigatti, M. C., Maine, M. A., Griffa, C. A. y Boglione, R. (2020). *Horizontal subsurface flow constructed wetland for tertiary treatment of dairy wastewater: Removal efficiencies and plant uptake*. *J. Environ. Manag.*, 272(June), 111094.
- Stefanakis, A., Akratos, C. S. y Tsihrintzis V. A. (2014). *Vertical Flow Constructed Wetlands. Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. First Edition.
- Vymazal, J. y Kröpfelová, L. (2015). *Multistage hybrid constructed wetland for enhanced removal of nitrogen*. *Ecol. Eng.*, 84, 202–208.
- Vymazal, J. (2013). *The use of the hybrid constructed wetland for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: a review of a recent development*. *Water Res.*, 47, 4795–4811.
- Wood, J., Fernandez, G., Barker, A., Gregory, J. y Cumby, T. (2007). *Efficiency of reed beds in treating dairy wastewater*. *Biosyst. Eng.*, 98, 455 – 469.

Financiamiento

Este trabajo fue realizado con fondos provenientes de los siguientes proyectos: CAI+D 2017-2020 50420150100020LI (UNL), PICT 2015-1015 y PICT 2018-1743 (ANPCyT), PIP 2015-2017 0416 (CONICET), “Agregando Valor 2017”



XXVIII Jornada de
Jóvenes Investigadores
10, 11 y 12 de noviembre
Generación de conocimientos desde
el sur para el mundo post pandemia



UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE



Asociación de Universidades
GRUPO MONTEVIDEO

(APN-SECPUM).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Litoral (UNL, Argentina), al Consejo Nacional de Investigaciones

Científicas y Técnicas (CONICET, Argentina), a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT, Argentina) y a la Secretaria de Políticas Universitarias de la Nación por proporcionar fondos para este trabajo.