



Análisis de la influencia ambiental de un humedal construido para el tratamiento de efluentes de una industria láctea, basado en el cálculo de la huella hídrica gris.

**Panigatti, Maria Cecilia^a, Gutierrez, Gonzalo^{a,b}, Schierano, María Celeste^{a,b*},
Jennerich Luciana^a, Boglione Rosana^a, Griffa, Carina^a,**

^a *Grupo de Estudios de Medio Ambiente (GEM). Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela. Acuña 49. Rafaela (2300), Santa Fe, Argentina. labquimicaun@gmail.com*

^b *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Godoy Cruz 2290 (C1425FQB) CABA-Argentina*

Resumen

En la Región Pampeana Argentina se concentran las principales cuencas lecheras y casi la totalidad de los tambos vacunos e industrias vinculadas. Las empresas lácteas emplean grandes volúmenes de agua para su actividad, generando efluentes de diversa calidad, los cuales requieren un tratamiento adecuado. La huella hídrica (HH) es un indicador utilizado para la evaluación del consumo y contaminación de los recursos hídricos en la producción de bienes y servicios. La huella hídrica gris (HHg), es una de sus componentes, y establece en forma teórica el volumen de agua necesaria para asimilar los contaminantes presentes, hasta alcanzar niveles permitidos de concentración determinados por normativas locales. El objetivo del trabajo es evaluar la eficiencia de eliminación de contaminantes de un humedal de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH) a escala piloto para el tratamiento terciario de aguas residuales de una industria láctea y su contribución a la disminución de la HHg. Se evaluó un HFSSH construido luego de 12 lagunas aeróbicas. En el mismo se empleó grava de río como sustrato y la macrófita *Typha domingensis*. Durante un período de 7 meses, se analizaron 32 muestras (afluente y efluente) para analizar parámetros fisicoquímicos, y calcular eficiencias de remoción. Para el cálculo de HHg se emplearon datos de caudal de efluente, concentración de cada componente en el efluente, concentración de vuelco permitida según la normativa local y concentración natural presente en el cuerpo receptor. Los sólidos suspendidos presentaron una eficiencia de remoción promedio de 83,1%. Para DBO y DQO, las eficiencias de remoción promedio fueron respectivamente 66,6 y 70,8%, mientras que para Nitrógeno total Kjeldahl (NTK), Nitratos y Fósforo total (PT) fueron inferiores a los demás parámetros (10,1%, 53,6% y 35,0%). En cuanto al cálculo de HHg, el humedal ha contribuido a disminuirla respecto al sistema original.

Por una universidad de excelencia y solidaria



HUPANAM
Red Panamericana
de Sistemas de Humedales

Grupo GCISA - Facultad de Ingeniería Civil
Carrera 2 # 15N esquina. Sector Tulcán - Popayán - Cauca - Colombia
Teléfono 312 815 7158 – 315 610 8844
panamericanohumedales@unicauca.edu.co / www.unicauca.edu.co
sites.google.com/unicauca.edu.co



Palabras claves: industria láctea, humedales construidos, huella hídrica, contaminación

Introducción

En Argentina, el modelo productivo configurado por el sector agropecuario y factores de mercado conllevan a un proceso de intensificación generalizada de los sistemas productivos, con impactos sobre los servicios ambientales. Como en la mayoría de las empresas del sector agroalimentario, las industrias lácteas consumen diariamente grandes cantidades de agua en sus procesos, especialmente para mantener las condiciones higiénicas y sanitarias requeridas. La mayor parte del agua consumida se convierte finalmente en agua residual, lo cual constituye un gran problema ambiental para el sector, tanto por el volumen de efluentes producidos, como por la carga contaminante asociada.

A nivel internacional, en lo que corresponde al análisis del uso del agua, ha surgido el indicador de Huella Hídrica (HH), un enfoque desarrollado por la “Water Footprint Network” (WFN) para conceptualizar y cuantificar la presión sobre los recursos hídricos que la sociedad ejerce a través de la producción y el consumo [1]. La HH_{total} se compone de las siguientes huellas: verde (HH_{ve}), azul (HH_{az}) y gris (HH_g) según su procedencia. La HH_{ve} es aquella que se incorpora al producto proveniente de las precipitaciones, HH_{az}, representa el agua consumida en forma directa que proviene de fuentes superficiales y subterráneas [2]. La HH_g, corresponde al agua necesaria para asimilar la carga contaminante generada por la actividad para alcanzar los niveles permitidos en el cuerpo receptor.

Los humedales artificiales o construidos (HCs) son sistemas de ingeniería diseñados para mejorar la calidad del agua con requisitos mínimos de energía externa, bajos costos de construcción, fácil operación y mantenimiento y beneficios ambientales sustanciales [3,4]. En los últimos 60 años, el uso de HCs se ha expandido significativamente desde el tratamiento terciario y secundario tradicional de aguas residuales domésticas a muchos tipos de efluentes industriales [5,6]. La incorporación de esta tecnología a los sistemas de tratamiento, va en concordancia con los objetivos de una producción más limpia con enfoque de circularidad. Recientemente, el cálculo de HH y la evaluación de ciclo de vida se ha comenzado a aplicar en la valoración del uso y aplicación de HCs para el tratamiento de efluentes [7,8].

En Argentina, el uso de HCs a escala real para tratamiento de efluentes es aún muy limitado a pesar de sus ventajas y de contar con espacios disponibles para su implementación [9]. El tratamiento de las aguas residuales generadas en la industria láctea, utilizando HCs, como técnica de tratamiento secundario o terciario, es una alternativa promisoriosa en varias regiones de Argentina, donde la contaminación generada por la gran cantidad de establecimientos de este tipo, representa una problemática cada vez más acuciante. El objetivo del trabajo es evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes de un humedal de

Por una universidad de excelencia y solidaria



HUPANAM
Red Panamericana
de Sistemas de Humedales

Grupo GCISA - Facultad de Ingeniería Civil
Carrera 2 # 15N esquina. Sector Tulcán - Popayán - Cauca - Colombia
Teléfono 312 815 7158 – 315 610 8844
panamericanohumedales@unicauca.edu.co / www.unicauca.edu.co
sites.google.com/unicauca.edu.co



flujo subsuperficial horizontal (HFSSH) a escala piloto para el tratamiento terciario de aguas residuales de una industria láctea y su contribución a la disminución de la HHg.

Metodología

El presente estudio se llevó a cabo en una industria láctea ubicada en la Provincia de Santa Fe, Argentina. La misma genera diariamente gran cantidad de efluentes (caudal: 600–750 m³/día) y posee un tratamiento biológico que consiste en 12 lagunas aeróbicas dispuestas en serie. Algunos parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales tratadas no cumplen con la normativa estatal de volcamiento [10,11], por lo que se construyó un HFSSH piloto, como tratamiento de afino luego de dichas lagunas. El humedal posee 250 cm de largo, 95 cm de ancho y 77 cm de profundidad; se empleó grava de río como sustrato (60 cm de altura) y la macrófita *Typha domingensis*. Luego de un período de adaptación de las macrófitas, se recolectaron 32 muestras en la entrada y salida del humedal durante un período de 7 meses. La recolección de muestras para análisis fisicoquímicos se llevó a cabo utilizando botellas de plástico (PET) de 2 l. Las muestras se trasladaron al laboratorio y se almacenaron a 4 °C hasta el análisis. Se midieron los siguientes parámetros fisicoquímicos para calcular las eficiencias de remoción y la HHg: pH, sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), Nitrógeno Kjeldahl Total (NTK), nitritos (NO₂⁻), nitratos (NO₃⁻), fósforo total (PT). Para los análisis se emplearon técnicas normalizadas propuesta por APHA [12]. Para comparar las medias de concentración de cada parámetro fisicoquímico se utilizó una prueba t pareada. La normalidad de los residuales se analizó gráficamente. Se utilizó un nivel de p < 0,05 para todas las comparaciones. Los cálculos se realizaron utilizando el Statgraphics Centurion XVI [14]

Para el cálculo de HHg (para el sistema original y el sistema+HFSSH) se aplicó la ecuación (1) donde se emplearon datos de caudal de efluente generado (Q_{efl}), concentración de cada componente en el efluente (C_{efl}), concentración de vuelco permitida según la normativa local (C_{max}) [10,11] y concentración natural presente en el cuerpo receptor (C_{nat}). Esta ecuación es la utilizada en la metodología propuesta por [13], quien realiza una adaptación de [1]. La misma se puede expresar en diferentes unidades, por ejemplo: m³ agua/año, l agua/l de leche procesada.

$$HHg = \frac{\{Q_{efl} \times (C_{efl} - C_{nat})\}}{(C_{max} - C_{nat})} \quad (1)$$



Resultados y discusión

Los valores de pH a la entrada y salida del HC se encontraron entre $8,85 \pm 0,22$ y $8,35 \pm 0,27$ respectivamente, cumpliendo con el límite de volcamiento (5,5 – 10,0). En la Tabla 1 se muestran los resultados promedios de entrada y salida de los parámetros estudiados durante el período del experimento, presentando en todos los casos diferencias significativas entre ambas corrientes. Los SST y nitritos presentaron las mejores eficiencias de remoción promedio, siendo de 83,1% y 99,5 % respectivamente. Por su parte, para DBO y DQO, las eficiencias de remoción fueron elevadas, siendo 66,6 y 70,8% respectivamente. En cambio, al analizar las remociones para NTK, nitratos y PT, fueron inferiores a los demás parámetros (10,1%, 53,6% y 35,0%) y no cumplieron con la legislación estatal. Analizando el cumplimiento de los límites de volcamiento exigidos, se pudo observar que SST y DBO cumplen con los mismos.

Tabla 1. Resultados promedios y desvío estándar de análisis realizados a la entrada y salida del HC, eficiencias de remoción y valores de volcamiento según normativa.

Parámetros	Entrada humedal	Salida humedal	Eficiencia remoción (%)	Límites volcamiento
DBO (mg O ₂ /l)	100,6 ± 32,4	33,56 ± 22,6	66,6	50
DQO (mg O ₂ /l)	282,3 ± 67,8	82,29 ± 25,7	70,8	75
Nitrato (mg NO ₃ ⁻ /l)	160,1 ± 143,9	74,27 ± 66,2	53,6	-
Nitrito (mg NO ₂ ⁻ /l)	70,7 ± 25,3	0,35 ± 0,76	99,5	-
Nitrógeno total (mg N/l)	59,4 ± 28,9	53,40 ± 16,85	10,1	15
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	169,8 ± 35,3	28,75 ± 17,0	83,1	30
Fósforo total (mg P/l)	28,0 ± 16,0	18,20 ± 8,9	35,0	2

En la Figura 1 se observan los valores de HHg calculados para los diferentes parámetros en el sistema original (lagunas de estabilización) y en el sistema mejorado (lagunas de estabilización + HC). Como puede observarse, el HC ha contribuido a disminuir la HHg. Para el caso del sistema mejorado, el valor de huella más alto obtenido corresponde al parámetro PT seguido de NTK, lo que se vincularía con una baja eficiencia en el humedal para su remoción y un consecuente posible impacto producido por eutrofización de aguas. Si los resultados se expresan por cantidad de leche procesada se obtiene para el sistema original una HHg de 20,4 y para el sistema mejorado una HHg de 13,3l agua/l leche. Se deberán

Por una universidad de excelencia y solidaria



HUPANAM
Red Panamericana
de Sistemas de Humedales

Grupo GCISA - Facultad de Ingeniería Civil
Carrera 2 # 15N esquina. Sector Tulcán - Popayán - Cauca - Colombia
Teléfono 312 815 7158 – 315 610 8844
panamericanohumedales@unicauca.edu.co / www.unicauca.edu.co
sites.google.com/unicauca.edu.co



realizar futuros estudios para mejorar la calidad de los efluentes ya sea mediante el uso de diferentes sustratos o mediante la aplicación de humedales híbridos.

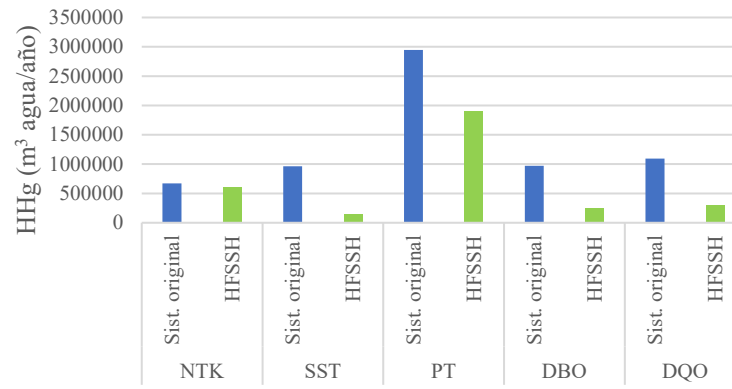


Fig 1. Valores de HHg para diferentes parámetros evaluados a la salida del sistema de tratamiento original y a la salida del sistema de tratamiento mejorado.

Conclusiones

El presente estudio demostró que la calidad química de un efluente de industria láctea mejora usando un HFSSH, haciendo posible su vertido según la normativa vigente. Al mismo tiempo, se logra disminuir la HHg, lo que implica menor impacto ambiental y disminución del agua dulce necesaria para asimilar los contaminantes.

Referencias

- [1] Hoekstra, A.Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., Mekonnen, M. M., 2011. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Routledge.
- [2] Hoekstra, A.Y., Mekonnen, M.M., 2012. The water footprint of humanity. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, 3232–3237.
- [3] Corbella, C., Puigagut, J., 2018. Improving domestic wastewater treatment efficiency with constructed wetland microbial fuel cells: Influence of anode material and external resistance. *Science of the total environment*, 631, 1406-1414.
- [4] Ji, Z., Tang, W., Pei, Y., 2022. Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal. *Chemosphere*, 286, 131564.
- [5] Gholipour, A., Zahabi, H., Stefanakis, A. I., 2020. A novel pilot and full-scale constructed wetland study for glass industry wastewater treatment. *Chemosphere*, 247, 125966.



- [6] Vymazal, J., 2014. *Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. Ecological engineering*, 73, 724-751.
- [7] Beyers, M., Ravi, R., Devlamynck, R., Meers, E., Jensen, L. S., Bruun, S., 2023. *Constructed wetlands and duckweed ponds as a treatment step in liquid manure handling—A life cycle assessment. Science of The Total Environment*, 163956.
- [8] Fang, Y. K., Wang, H. C., Fang, P. H., Liang, B., Zheng, K., Sun, Q., ... Wang, A. J., 2023. *Life cycle assessment of integrated bioelectrochemical-constructed wetland system: environmental sustainability and economic feasibility evaluation. Resources, Conservation and Recycling*, 189, 106740.
- [9] Maine, M. A., Hadad, H. R., Sanchez, G. C., de las Mercedes Mufarrege, M., Di Luca, G. A., Schierano, M. C., ... del Carmen Pedro, M., 2022. *Constructed wetlands plant treatment system: An eco-sustainable phytotechnology for treatment and recycling of hazardous wastewater. In Phytoremediation Technology for the Removal of Heavy Metals and Other Contaminants from Soil and Water*, 481-496. Elsevier.
- [10] Resolución N° 1089/82, 1982. *Reglamento para el control del vertimiento de líquidos residuales.*
- [11] Ley 11220 Anexo 1.2.2., 1994. *Normas de calidad de agua potable y efluentes cloacales. Provincia de Santa Fe (Santa Fe, Argentina).*
- [12] APHA, 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition.*
- [13] Pellicer-Martinez, F., Martínez Paz, J. M., 2014. *La evaluación de la Huella Hídrica Gris en una Demarcación Hidrográfica. Congreso Nacional de Medio Ambiente. Instituto Universitario del Agua y del Medio Ambiente (INUAMA).*
- [14] Statgraphics Centurion, X.V.I., 2009. *Statpoint Technologies. INC. version, 16–17.*

