

TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO APLICANDO HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL HORIZONTAL SUBSURFACE CONSTRUCTED WETLANDS FOR LANDFILL LEACHATE TREATMENT

Lucas Alessiato

Grupo de estudio del medioambiente (GEM) UTN Facultad Regional Rafaela
lucasalessiato@hotmail.com

Sofía Ruffini

Grupo de estudio del medioambiente (GEM) UTN Facultad Regional
Rafaelasofiaruffini1309@gmail.com

Resumen

Un relleno sanitario (RS) es una técnica de disposición final de residuos sólidos que minimiza impactos sobre el medio ambiente. Su funcionamiento genera biogás y lixiviados debido a la descomposición de residuos, los cuales deben recibir un tratamiento adecuado. Los humedales construidos utilizan procesos naturales que eliminan los contaminantes del agua en condiciones controladas para optimizarlos. El objetivo del trabajo es evaluar la eficiencia de remoción de diferentes contaminantes en el tratamiento de lixiviados de RS, utilizando humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (HSSH) a escala laboratorio. Se dispusieron 16 microcosmos en un invernadero estudiando 8 tratamientos por duplicado, con y sin plantas, y combinando cuatro sustratos (residuo de hormigón celular curado en autoclave (HCCA), arcilla expandida, canto rodado y leca plástica). Se realizaron análisis fisicoquímicos antes y después de cada tratamiento y se calcularon eficiencias de remoción. El tratamiento con mejor desempeño fue el que utilizó HCCA con plantas.

Palabras clave: relleno sanitario; lixiviados; humedales construidos; sustratos

Abstract

A landfill is a final disposal technique for solid waste that minimizes environmental impacts. Its operation generates biogas and leachates due to waste decomposition and landfill leachates must be properly treated. Constructed wetlands use natural processes that remove contaminants from water under controlled conditions to optimize its operation. The aim of this work was to evaluate removal efficiencies of different contaminants for landfill leachate treatment, using horizontal subsurface flow constructed wetlands (HSSF). Sixteen microcosms were disposed in a greenhouse and eight treatments were studied by duplicate. Treatments were evaluated with and without plants, and four substrates (autoclaved aerated cellular concrete residue (AACC), light expanded clay aggregates (LECA), pebbles and plastic LECA) were also studied. Physicochemical analysis was carried out before and after the treatment and removal efficiencies for each treatment were

calculated. Treatments with plants and using AACC as substrate demonstrated best contaminant removal performances.

Keywords: landfill; leachates; constructed wetlands; substrates.

Introducción

Debido a que en los últimos años en la ciudad de Rafaela se han puesto en marcha políticas ambientales que tienden a la nula producción de residuos, una iniciativa fue la implementación de un RS en las afueras de la ciudad. El proceso que ocurre en un relleno sanitario (RS) consiste en una descomposición anaeróbica de la materia orgánica, generando biogás y lixiviado, el cual puede incrementarse cuando se mezcla con el agua de lluvia.

Los lixiviados se producen debido a la percolación del agua de lluvia a través de los residuos sólidos y a la biodegradación de éstos (Teng et al., 2021). Se caracterizan por tener una composición muy compleja, ya que son aguas residuales de alta salinidad y ricas en materia orgánica, nitrógeno, fósforo, metales pesados y otros contaminantes (Paiva et al., 2021). Por lo tanto, el tratamiento y disposición final de estos efluentes es uno de los problemas más preocupantes.

Generalmente, estos líquidos residuales pueden ser tratados a través de una combinación de métodos de tratamiento primarios (principalmente fisicoquímicos) y secundarios o biológicos (Mojiri et al., 2016). Una propuesta de tratamiento biológico para estos efluentes podrían ser los humedales construidos (HCs). Los HCs son una tecnología de tratamiento de bajo costo que puede mejorar de manera efectiva la calidad del agua, reduciendo la materia orgánica e inorgánica en diversos tipos de efluentes (Yang et al., 2021). Estos son sistemas diseñados y construidos por el hombre que utilizan los procesos naturales que involucran a la vegetación, los suelos y los microorganismos asociados, para el tratamiento de las aguas residuales. Están diseñados para aprovechar muchos de los procesos que ocurren en los humedales naturales, pero dentro de un entorno más controlado (Vymazal, 2014).

De acuerdo con el régimen de flujo de agua, los HCs se pueden clasificar en humedales de flujo superficial, humedales de flujo subsuperficial y sistemas híbridos. En los sistemas de flujo subsuperficial, se pueden distinguir dos tipos: humedales de flujo horizontal (HFSSH) y humedales de flujo vertical (HFSSV). De acuerdo a experiencias previas (Schierano et al., 2018; 2020) se optó por trabajar con HFSSH, cuyo funcionamiento esquemático puede observarse en la Figura 1.

La selección de la especie vegetal y el sustrato son factores claves para el buen desempeño de los humedales construidos (Schierano et al., 2017). En el presente trabajo se utilizaron macrófitas, las cuales son plantas acuáticas que pueden desarrollarse en terrenos inundados o encharcadas. La especie *Typha domingensis*, comúnmente llamada “Totora”, se encuentra en una variedad de ecosistemas de humedales, incluidos pantanos, marismas y orillas de lagos (Dilshad et al., 2022) y es común en los humedales naturales de la zona.

En cuanto al sustrato, el mismo debe proveer un entorno adecuado para el crecimiento de las plantas, el desarrollo radicular, la descomposición de materia orgánica y la retención de nutrientes, por lo tanto, su selección también es un aspecto importante del diseño (Nocetti et al., 2020).

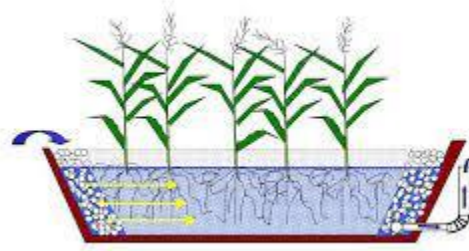


Figura 1. Esquema de funcionamiento de HFSSH

El objetivo del presente trabajo es evaluar la eficiencia de remoción de diferentes contaminantes en un lixiviado del RS de Rafaela, utilizando HFSSH a escala laboratorio y comparando el desempeño del sistema mediante la combinación de una macrófita (*Typha domingensis*) con cuatro sustratos diferentes.

Materiales y métodos

Diseño experimental

Se dispusieron en un invernadero 16 microcosmos simulando HFSSH (0,40 m x 0,60 m x 0,20 m). Se utilizaron 4 microcosmos para cada sustrato evaluado: canto rodado, arcilla expandida (LECA, por sus siglas en inglés), leca plástica (Arqlite®) y residuos de Hormigón Celular Curado en Autoclave (HCCA, Retak®). Por cada sustrato se dispusieron dos microcosmos plantados con dos ejemplares de *Typha domingensis* (Totora) y dos sin ejemplares, para ser evaluados como blancos o tratamiento control. A continuación, se presenta un detalle del diseño experimental empleado.

Tabla 1. Diseño experimental.

T°	R°	Tratamiento	T°	R°	Tratamiento
T1	R1	<i>Typha domingensis</i> + Canto rodado	T5	R9	<i>Typha domingensis</i> + Leca Plástica
	R2	<i>Typha domingensis</i> + Canto rodado		R0	<i>Typha domingensis</i> + Leca Plástica
T2	R3	Canto rodado	T6	R11	Leca Plástica
	R4	Canto rodado		R12	Leca Plástica
T3	R5	<i>Typha domingensis</i> + LECA	T7	R13	<i>Typha domingensis</i> + HCCA
	R6	<i>Typha domingensis</i> + LECA		R14	<i>Typha domingensis</i> + HCCA
T4	R7	LECA	T8	R15	HCCA
	R8	LECA		R16	HCCA

Extracción y monitoreo de plantas

Se extrajeron macrófitas de humedales naturales cercanos a la ciudad de Rafaela. Se plantaron dos ejemplares en cada microcosmo en un invernadero y se podaron a una altura uniforme de 40 cm.

Las plantas fueron aclimatadas durante un período de 30 días, regándolas durante la primera quincena con agua de red y luego con lixiviado diluido (1:2). Se monitoreó periódicamente el crecimiento de las macrófitas, midiendo las alturas de los ejemplares en cada reactor.

Punto de muestreo del lixiviado

Dentro del relleno sanitario, todas las muestras de lixiviado fueron extraídas del mismo pozo, (Pozo N° 1), por su facilidad de acceso. Este pozo fue el primero en construirse en el predio del RS, por lo que los lixiviados extraídos y utilizados en este experimento, son líquidos residuales con más de 10 años de antigüedad.

Análisis fisicoquímicos y eficiencias de remoción

Se realizaron experiencias tipo Batch, donde se midió la concentración de contaminantes del efluente al inicio y al final de cada tratamiento, con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 7 días, durante 6 semanas consecutivas. Se utilizó efluente diluido (50% agua y 50% lixiviado), a partir del lixiviado recolectado en el RS. Con las concentraciones halladas para cada contaminante a la entrada y a la salida de cada reactor se calcularon eficiencias de remoción.

Se analizaron los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica, alcalinidad total, demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo total (PT), Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK), amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-) y sólidos suspendidos (SST). Para los análisis se utilizó la metodología propuesta por APHA (2017).

La evapotranspiración fue medida y compensada con agua destilada debido a las altas temperaturas registradas durante el período experimental.

Resultados y discusión

Crecimiento de macrófitas

Se presenta en la Figura 2, el promedio del crecimiento de las macrófitas a lo largo del período experimental para cada tratamiento evaluado.

En términos generales, se observa un crecimiento en la altura de los ejemplares de todos los tratamientos. En los casos donde se observa una disminución de altura (T3, semana 1; T1 y T5, semana 2), esto se debe al nacimiento de nuevos ejemplares, cuya pequeña altura incide estadísticamente en el valor promedio calculado para cada tratamiento.

Se verificó que las plantas presentaron cierta tolerancia al efluente ya que crecieron de manera satisfactoria (en altura y en desarrollo de biomasa).

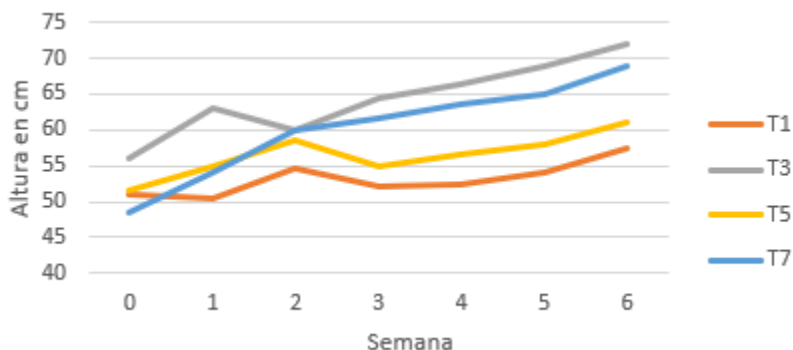


Figura 2. Gráfico de crecimiento de macrófitas según tratamientos con plantas

Eficiencias de remoción

En la Tabla 2 se muestran los valores iniciales promedio de cada contaminante o parámetro, medidos en el lixiviado utilizado en el experimento, y los valores promedio de salida luego de cada tratamiento evaluado, junto con las desviaciones estándar de los mismos.

Tabla 2. Valores promedio iniciales y finales para cada contaminante.

PARÁMETRO	INICIAL	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Alcalinidad (mg/l CaCO ₃)	2167,8 ± 567,7	1463,3 ± 86,7	1131,0 ± 229,5	1230,1 ± 272,9	1017,5 ± 233,0	1129,3 ± 354,8	1119,4 ± 291,7	160,5 ± 15,7	133,4 ± 31,1
NH ₄ ⁺ (mg HN ₄ ⁺ /l)	337,5 ± 161,5	44,9 ± 36,7	58,1 ± 52,3	53,2 ± 36,7	58,7 ± 40,1	101,1 ± 73,1	107,9 ± 77,4	46,4 ± 32,4	39,6 ± 26,4
Conductividad (mS/cm) (20°C)	7,8 ± 0,9	6,1 ± 1,7	6,2 ± 1,0	6,3 ± 0,7	6,3 ± 0,5	5,7 ± 0,7	5,8 ± 0,7	6,6 ± 0,4	7,1 ± 0,6
DBO (mg O ₂ /l)	307,7 ± 102,1	90,9 ± 43,9	103,5 ± 62,2	108,4 ± 37,9	102,9 ± 62,9	103,8 ± 47,5	69,0 ± 32,6	92,0 ± 66,4	104,8 ± 72,2
DQO (mg O ₂ /l)	463,4 ± 111,7	272,9 ± 79,2	305,2 ± 90,6	240,3 ± 76,7	297,3 ± 95,1	236,9 ± 123,5	250,1 ± 94,9	195,6 ± 104,3	264,3 ± 91,6
P (mg P/l)	2,9 ± 1,2	1,7 ± 0,5	1,32 ± 0,41	1,8 ± 0,8	1,5 ± 0,5	2,1 ± 0,9	1,4 ± 0,4	0,3 ± 0,2	0,3 ± 0,3
NO ₃ ⁻ (mg NO ₃ /l)	80,2 ± 78,9	34,9 ± 3,5	93,1 ± 47,5	65,0 ± 27,4	131,9 ± 10,9	27,5 ± 9,8	33,9 ± 6,5	37,2 ± 9,6	93,5 ± 23,8
NO ₂ ⁻ (mg NO ₂ /l)	0,4 ± 0,6	20,5 ± 11,8	105,1 ± 69,3	25,8 ± 25,8	143,8 ± 93	11,7 ± 10,5	40,2 ± 18,6	97,3 ± 64,0	233,9 ± 68,6
NTK (mg N/l)	300,0 ± 151,5	55,1 ± 44,0	59,8 ± 60,8	56,3 ± 37,7	61,2 ± 49,0	96,2 ± 70,2	105,6 ± 78,5	42,9 ± 31,4	41,5 ± 37,7
pH	7,90 ± 0,48	8,20 ± 0,41	8,39 ± 0,25	7,97 ± 0,19	8,21 ± 0,13	8,22 ± 0,15	8,34 ± 0,12	8,14 ± 0,10	8,07 ± 0,03
SST (mg/l)	47,8 ± 15,1	18,3 ± 29,7	11,8 ± 58,0	9,7 ± 7,9	7,1 ± 5,8	10,5 ± 6,0	9,3 ± 7,0	4,8 ± 3,1	5,7 ± 3,8

Como se puede observar, se obtuvieron eficiencias de remoción satisfactorias para la mayoría de los parámetros evaluados y diferencias significativas para algunos de los parámetros analizados.

En las mediciones de pH, los valores de entrada (7,6 – 8,7) fueron inferiores a los de salida (7,7 – 9,0). Para la conductividad eléctrica se presentaron valores de entrada (6,8 – 9 mS/cm²) superiores a los de salida (5,7 – 7,12 mS/cm²), siendo los menores valores correspondientes a la Leca plástica. Para la alcalinidad total, se presentaron valores de entrada (1347,4 – 2854,1 mg CaCO₃/l) superiores a los de salida (133,3 – 1463,32 mg CaCO₃/l), siendo los menores valores correspondientes a HCCA.

En cuanto a los sólidos suspendidos totales (SST), los valores de entrada (30 – 64 mg/l) fueron superiores a los de salida (1 – 24 mg/l). Las mayores eficiencias de remoción fueron obtenidas con el sustrato HCCA. Las eficiencias de remoción y los porcentajes de eliminación reportados para este parámetro en la mayoría de los HSSH en general son altas (Vymazal, 2002).

Para el parámetro amonio (NH₄⁺) se obtuvieron eficiencias de remoción entre 56 y 86%, siendo los menos eficientes los de Leca plástica. En cuanto a Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) se hallaron diferencias significativas para los valores de remoción entre los sustratos estudiados, siendo los tratamientos con HCCA los más eficientes y los de Leca plástica los menos eficientes. Dichos valores variaron entre 60,1 y 84,7%. Para el contaminante nitrato (NO₃⁻) se obtuvieron eficiencias significativamente superiores en los tratamientos con plantas. Los de Leca plástica fueron los más eficientes (66,6 – 65,1%). Los mecanismos por los cuales el nitrógeno es eliminado del sistema son diversos, sin embargo, la vía de eliminación principal se debe a la nitrificación – desnitrificación (Ayaz et al., 2012). Para el nitrito (NO₂⁻) los valores de entrada fueron menores que los de salida (eficiencias de remoción negativas), debiéndose este fenómeno al proceso de nitrificación. En cuanto al fósforo total (PT) se obtuvieron mayores porcentajes de eliminación para los tratamientos con HCCA, con una media de 87,4% para los tratamientos sin plantas y 90% para los tratamientos con plantas.

Para la Demanda química de Oxígeno (DQO) se obtuvieron mayores eficiencias en el tratamiento de HCCA con plantas (60%), mientras que para la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) se obtuvieron medias de eficiencias de remoción entre 60,2 y 72,4%. Los procesos de filtración y sedimentación de los componentes orgánicos del sustrato y la degradación microbológica en las raíces son los mecanismos principales de eliminación de materia orgánica en HCs, debido a que ésta es necesaria para el crecimiento y metabolismo de muchos microorganismos que se encuentran adheridos al sustrato o a las raíces de los vegetales (Zhang et al., 2019).

CONCLUSIONES

- Se ha logrado disminuir las concentraciones de la mayoría de los parámetros estudiados.
- Los tratamientos que han empleado el residuo HCCA como sustrato han obtenido las mejores eficiencias de remoción.
- Existieron diferencias significativas entre tratamientos con y sin plantas sólo en los contaminantes nitrito, fósforo total y DQO. Al no encontrarse estas diferencias para el resto de los parámetros evaluados, no se puede determinar si la macrófita cumple un papel determinante en el tratamiento.

REFERENCIAS

APHA, 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Amer. Publ. Health Assoc., New York.

Ayaz, S. C.; Aktaş, Ö.; Findık, N.; Akça, L.; and Kinacı, C., 2012. Effect of recirculation on nitrogen removal in a hybrid constructed wetland system. *Ecological Engineering*, 40, 1-5.

Chen, G., Wu, G., Li, N., Lu, X., Zhao, J., He, M., Yan, B., Zhang, H., Duan, X., Wang, S., (2021). Landfill leachate treatment by persulphate related advanced oxidation technologies. *J. Hazard Mater.* 418, 126355.

Dilshad, R., Ahmad, S., Aati, H. Y., Al-qahtani, J. H., Sherif, A. E., Hussain, M., ... & Ahmed, M. (2022). Phytochemical profiling, in vitro biological activities, and in-silico molecular docking studies of *Typha domingensis*. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(10), 104133.

Lavrova, S., & Koumanova, B. (2010). Influence of recirculation in a lab-scale vertical flow constructed wetland on the treatment efficiency of landfill leachate. *Bioresource technology*, 101(6), 1756-1761.

Mojiri, A., Ziyang, L., Tajuddin, R. M., Farraji, H., & Alifar, N. (2016). Co-treatment of landfill leachate and municipal wastewater using the ZELIAC/zeolite constructed wetland system. *Journal of environmental management*, 166, 124-130.

Nocetti, E., Maine, M. A., Hadad, H. R., de Las Mercedes, M., Di Luca, G. A., & Sánchez, G. C. (2020). Selection of macrophytes and substrates to be used in horizontal subsurface flow wetlands for the treatment of a cheese factory wastewater. *Science of The Total Environment*, 745, 141100.

Paiva, A.L.P., Gonçalves daFonseca, D., Couto, E., (2021). Recycling of landfill leachate nutrients from microalgae and potential applications for biomass valorization. *J. Environ. Chem. Eng.* 9 (5), 105952.

Schierano, M. C., Maine, M. A., & Panigatti, M. C. (2017). Dairy farm wastewater treatment using horizontal subsurface flow wetlands with *Typha domingensis* and different substrates. *Environmental technology*, 38(2), 192-198.

Schierano, M. C., Panigatti, M. C., & Maine, M. A. (2018). Horizontal subsurface flow constructed wetlands for tertiary treatment of dairy wastewater. *International journal of phytoremediation*, 20(9), 895-900.

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.

Teng, C., Zhou, K., Peng, C., & Chen, W. (2021). Characterization and treatment of landfill leachate: A review. *Water research*, 203, 117525.

Vymazal, J. (2002). The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecological Engineering*, 18(5), 633-646.

Vymazal, J. (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. *Ecological engineering*, 73, 724-751.

Yang, C., Fu, T., Wang, H., Chen, R., Wang, B., He, T., ... & Chen, M. (2021). Removal of organic pollutants by effluent recirculation constructed wetlands system treating landfill leachate. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101843.

Zhang, Y., Liu, X., Fu, C., Li, X., Yan, B., & Shi, T. (2019). Effect of Fe²⁺ addition on chemical oxygen demand and nitrogen removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Chemosphere*, 220, 259-265.