


HUMEDAL SUBSUPERFICIAL VERTICAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN

Ing. Juan M. Hernández-Ruiz¹, MSc. Maira M. Pérez-Villar¹, Dra. Elena R. Domínguez¹, 
MSc. Isidro J. Cachaldora^{II}

mairapy@uclv.edu.cu

¹Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Cuba; ^{II} Planta de Soldar Carriles, Placetas, Villa Clara, Cuba

● Resumen

En este trabajo, primeramente, se realizó el diseño de un humedal subsuperficial vertical, colocado posterior a los órganos de tratamiento ya existentes en la empresa de soldar carriles de Placetas, para de esta forma lograr la reducción de los contaminantes que no cumplían con la normativa cubana para el vertimiento. Se realizó la caracterización de las aguas residuales afluentes del tanque de reboso según *Standard Methods*, y se realizó el cálculo del área necesaria para lograr la reducción de los contaminantes, considerando el comportamiento de estos sistemas como una cinética de primer orden para la remoción de la DBO y el nitrógeno, entre otros. Se propone un humedal subsuperficial vertical con un área superficial de aproximadamente 20 m² con 0,8 m de altura, y como sustrato el suelo ferralítico rojo que presenta alto contenido de hierro y aluminio, lo que favorece la remoción de fósforo, plantado con *Typha dominguesis*. Además se realizó la construcción del mismo y la evaluación de la eficiencia en la depuración de los principales contaminantes, lográndose una aumento del oxígeno disuelto y la reducción de los sólidos suspendidos, DQO, DBO y nitrógeno por debajo del límite máximo permisible promedio, según NC- 27-1999.

Palabras clave: filtros plantados, humedales subsuperficiales, aguas residuales, depuración.

● Abstract

In this paper, first, there was the design of a vertical subsurface wetland placed post-treatment systems existing in the company to weld rails in Placetas, in order to achieve the reduction of pollutants that did not comply with the Cuba regulations to receipt. A characterization of wastewater effluent overflow tank according to *Standard Methods* and calculates the area needed to achieve the reduction of contaminants. Was considered the behavior of these systems as a first order kinetics for the removal of BOD and nitrogen, among others. We propose a vertical subsurface wetland with a surface area of approximately 20 m² with 0,8 m high and as substrate red ferralitic soil that presents high iron and aluminum content, which favors the removal of phosphorus, planted with *Typha dominguesis*. We also carried out the construction of wetlands and evaluation of efficiency in the treatment of major pollutants, achieving an increase in dissolved oxygen and the reduction of suspended solids, COD, BOD and nitrogen below the maximum permissible Average by NC-27-1999.

Keywords: planted soil filter, subsurface wetlands, wastewater, depuration.

● Introducción

El desarrollo a escala mundial, en las últimas décadas, de técnicas de depuración natural,

compatibles con el medio ambiente y con reducidos requerimientos de inversión económica y mantenimiento, permite abordar el problema de la eliminación de residuos líquidos urbanos desde una

nueva perspectiva. Se trata de técnicas novedosas y eficaces que no hacen sino aprovechar los procesos y sistemas naturales de depuración que durante milenios han posibilitado la eliminación de la contaminación orgánica de la biosfera /1/.

Estos sistemas son simples, costo efectivos y eficientes métodos para purificar la gran cantidad de aguas residuales producidas por nuestra sociedad. Pueden aplicarse a tratamiento secundario o terciario, removiendo bacterias, microorganismos y la materia orgánica /2/.

Los procesos que intervienen en ellos incluyen a muchos de los que se aplican en los tratamientos convencionales (sedimentación, filtración, adsorción, precipitación química, intercambio iónico, degradación biológica, etcetera), junto con procesos propios de los tratamientos naturales (fotosíntesis, fotooxidación, asimilación por parte de las plantas, etcetera), pero en las técnicas de depuración natural se opera a velocidad "natural" (sin aporte de energía) /3/.

Los humedales construidos se incluyen entre los llamados sistemas naturales de tratamiento. Son sistemas ingenieros que han sido diseñados y construidos, para utilizar los procesos naturales que tienen lugar entre la vegetación, el suelo y los microorganismos asociados, y así tratar las aguas residuales /4/.

Estos sistemas de tratamiento se han clasificado tradicionalmente en dos tipologías atendiendo a si la circulación del agua es de tipo subterránea o superficial.

Debido a que el medio poroso brinda mayor área superficial para el crecimiento de los microorganismos, la velocidad de remoción en los sistemas con flujo subsuperficial es mayor. Por otra parte, como el agua en estos sistemas fluye por debajo de la superficie del medio, no se presentan problemas con el desarrollo de los mosquitos y otros vectores.

Los humedales de flujo subsuperficial se clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales o verticales. Los humedales con flujo horizontal funcionan permanentemente inundados. Estos sistemas tienen el oxígeno como limitante, debido a que las plantas no son capaces de suministrar el

oxígeno a la velocidad requerida por las cargas orgánicas y tienden a que la nitrificación ocurra a muy bajos niveles /5/.

Los humedales con flujo vertical se diseñan con funcionamiento intermitente, es decir, tienen fases de llenado, reacción y vertido. Los sistemas con flujo vertical operan con cargas superiores que los horizontales y producen efluentes más oxigenados. La aplicación intermitente del agua residual y el drenaje vertical en el lecho permiten que las reacciones aeróbicas se produzcan con rapidez /6/.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar, construir y evaluar un humedal subsuperficial vertical para completar el tratamiento de las aguas residuales domésticas en la empresa de soldar carriles de Placetas (SOLCAR).

● Métodos experimentales

Según lo reportado en la literatura /7-9/, el comportamiento de los humedales puede estimarse como una cinética de primer orden para la remoción de la DBO y el nitrógeno entre otros, siendo la ecuación básica de diseño:

$$C_e/C_o = e^{-K_r * t} \quad (1)$$

El tiempo de retención hidráulica

$$t = \frac{LW_{yn}}{Q} \quad (2)$$

Por lo tanto, el área superficial del humedal se calcula combinando las expresiones anteriores y considerando el cálculo para la eliminación de la DBO.

$$A_s = LW = \frac{Q \ln(C_o / C_e)}{K_r y n} \quad (3)$$

La caracterización del agua residual se realizó tomando muestras compuestas según INRH /10/. (cada 15 min durante todo el tiempo de bombeo).

En la tabla 1 aparecen los métodos analíticos empleados, según *Standard Methods* para estos parámetros /11/.

Para la evaluación estadística de procesamiento de los datos se utilizó el software Statgraphics centurión XV.II.

TABLA 1. PARÁMETROS DE CALIDAD Y MÉTODOS ANALÍTICOS EMPLEADOS

Parámetros.	Símbolo	Unidades	Método empleado
Potencial de hidrógeno	pH	u de pH.	Método electrométrico
Conductividad eléctrica a 25° C	CE	μS/cm.	Método electrométrico
Demanda química de oxígeno	DQO	mg O ₂ /L	Método dicromato
Demanda biológica de oxígeno	DBO ₅	mg O ₂ /L	Método Winkler e incubación
Oxígeno disuelto	OD	mg O ₂ /L	Método Winkler
Nitrógeno Kjeldahl	NK	mg/L	Volumétrico, previa digestión
Nitrógeno amoniacal	N-NH ₄	mg/L	Volumétrico
Fósforo total	PT	mg/L	Espectrofotométrico
Sólidos suspendidos totales	SST	mg/L	Método gravimétrico

● **Resultados y discusión**

Diseño y construcción

Las aguas residuales domésticas de SOLCAR primeramente, son depositadas en una fosa séptica donde sedimentan los sólidos y asciende la materia flotante, eliminándose así parte del sólido y del contenido microbiano. Posteriormente, el líquido aclarado es bombeado hacia el tanque de rebozo, pasando por una salida sumergida hasta una zanja

subterránea llena de rocas a través de la cual puede fluir y filtrarse, donde parte de los contaminantes se oxidan aeróbicamente.

En el tanque de rebozo el agua residual sufre el proceso de sedimentación, pues posee en su interior un sedimentador donde se eliminan los sólidos sedimentables. Dicho sistema de tratamiento se describe gráficamente a continuación mediante las figuras 1 y 2, donde se observan el diagrama de bloque y el diagrama de flujo del proceso.

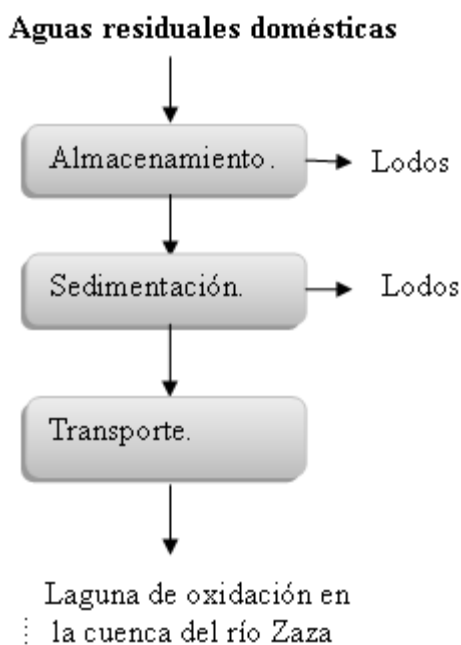


Fig. 1 Diagrama de bloque del sistema de pretratamiento de las aguas residuales domésticas.

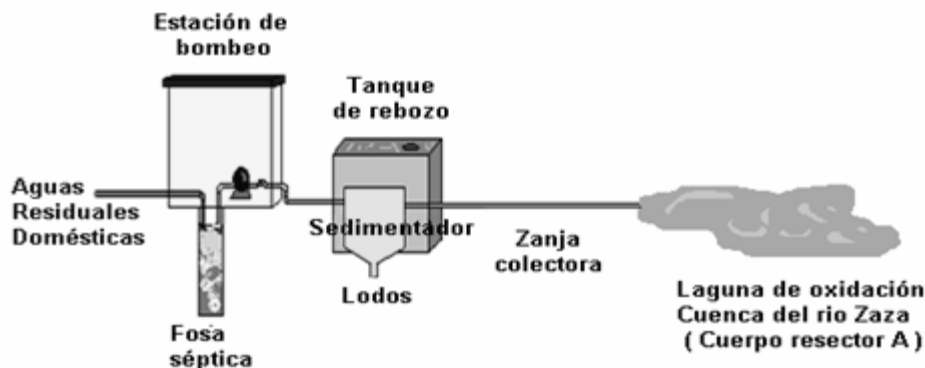


Fig. 2 Diagrama de flujo del sistema de pretratamiento de las aguas residuales domésticas.

En la tabla 2 se presentan los valores medio de los parámetros analizados al agua residual efluente de dicho tanque de rebozo, así como el Limite Máximo Permissible Promedio (LMPP) según NC-27-1999 /12/.

TABLA 2. VALORES MEDIOS Y LMPP DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS

Parámetros	UM	LMPP NC 27. 1999.	Afluente
pH	U	6,5 – 8,5	7,31 ± 0,49
Conductividad eléctrica	μS/cm	1 400	746 ± 89
DQO	mg/L	70	96,1 ± 23,4
DBO ₅	mg/L	30	52,5 ± 5,6
Oxígeno Disuelto	mg/L	-	0,45 ± 0,9
Fósforo Total	mg/L	2	6,56 ± 0,21
Nitrógeno Total	mg/L	5	11,6 ± 2,1
NH ₄	mg/L	-	7,35 ± 1,2
NO ₂	mg/L	-	0,03 ± 0,02
NO ₃	mg/L	-	4,9 ± 2,7
Sólidos suspendidos totales	mg/L	-	20,75 ± 9,07

La combinación de los órganos de tratamiento existentes en SOLCAR con un humedal subsuperficial vertical, puede permitir cumplir con los requisitos de calidad de las aguas residuales domésticas para su vertimiento. Las aguas residuales presentan las siguientes características:

- Flujo pequeño (9 m³/día)
- Proceden de la cocina comedor y baños del emplazamiento, por lo que son de origen doméstico.
- Cuentan con una serie de tratamientos preliminares para eliminar los sólidos, lo que permite un mejor funcionamiento del humedal.

➤ Se bombean por un tiempo de 4 h dos veces por semana, lo que permite el flujo intermitente del humedal vertical.

Se utilizó un humedal subsuperficial vertical, por sus características de remoción y las ventajas que presenta. En este tipo de humedal, el medio poroso no se encuentra saturado, por que el agua se aplica a intervalos de tiempo. Debido a la intermitencia del flujo, en estos humedales existe buena oxigenación, lo que favorece la remoción de la mayoría de los contaminantes.

Parámetros de diseño del humedal subsuperficial vertical

➤ Sustrato

Suelo ferralítico rojo, el cual se colocó por encima de una capa de grava, utilizada para evitar las tupiciones en la tubería perforada de salida. El empleo de este sustrato permite obtener mejores resultados en la remoción de los contaminantes, por su alto contenido en minerales del mismo. Pérez, evaluó la remoción de los contaminantes en agua residual urbana con humedales subsuperficiales verticales a pequeña escala, utilizando diferentes sustratos,



mostrando mejores resultados el que contenía suelo ferralítico rojo /13/.

➤ Vegetación

Typha domingensis por su poder depurador, nivel de adaptación a un habitat pantanoso, su capacidad de crecimiento y propagación, y por ser reportada como una planta emergente con buenos resultados en la depuración de aguas residuales en humedales construidos /14/.

En la figura 3 se pueden apreciar diferentes tipos de *Typha domingensis*.



Fig. 3 Vegetación (*Typha domingensis*).

➤ Impermeabilización

Como material impermeabilizante se utilizó arcilla, con la cual se estableció una barrera para impedir la contaminación del subsuelo o el agua subterránea con las aguas residuales.

➤ Estructuras de entrada y de salida

El sistema requiere condiciones de flujo uniforme para alcanzar los rendimientos deseados. Esto se alcanza con tuberías de recolección perforadas que se extienden a lo ancho de toda la celda, tanto para la entrada como para la salida. En el medio granular se insertan tuberías verticales de aireación que sirven para mantener aireadas las capas más profundas del medio. De esta manera, se mejoran y favorecen los procesos de degradación aeróbica y la nitrificación.

Cálculo de área del humedal subsuperficial vertical

Teniendo en cuenta las características químico-físicas del agua residual y el régimen

de alimentación al tanque de rebozo (intermitente), se propone un humedal subsuperficial vertical colocado después de dicho tanque con un área superficial (A_s) calculada con la expresión 3, considerando la reducción de la DBO.

$$A_s = LW = \frac{Q \ln(C_o / C_e)}{K_T n}$$

Flujo de agua residual (Q): 9 m³/día (intermitente dos veces por semana)

Porosidad (n): 0,54 reportado por Dirección Provincial de Recursos Hidráulicos Villa Clara

Profundidad (y): 0,8 m

Concentración de DBO afluente (C_o): 52 mg/L

Concentración de DBO efluente (C_e): 20 mg/L

Constante cinética (k): Se asume el valor reportado por Reed para humedales subsuperficiales que es 1,104 d⁻¹ /7/.

$$As = \frac{9 \cdot \ln\left(\frac{20}{52}\right)}{1,04 \cdot 0,8 \cdot 0,54} = 18 m^2$$

$$t = \frac{18 \cdot 0,8 \cdot 0,54}{9} = 0,9 \text{ días}$$

El diagrama de flujo, incluyendo el humedal al sistema de tratamiento existente, se presenta en la figura 4.

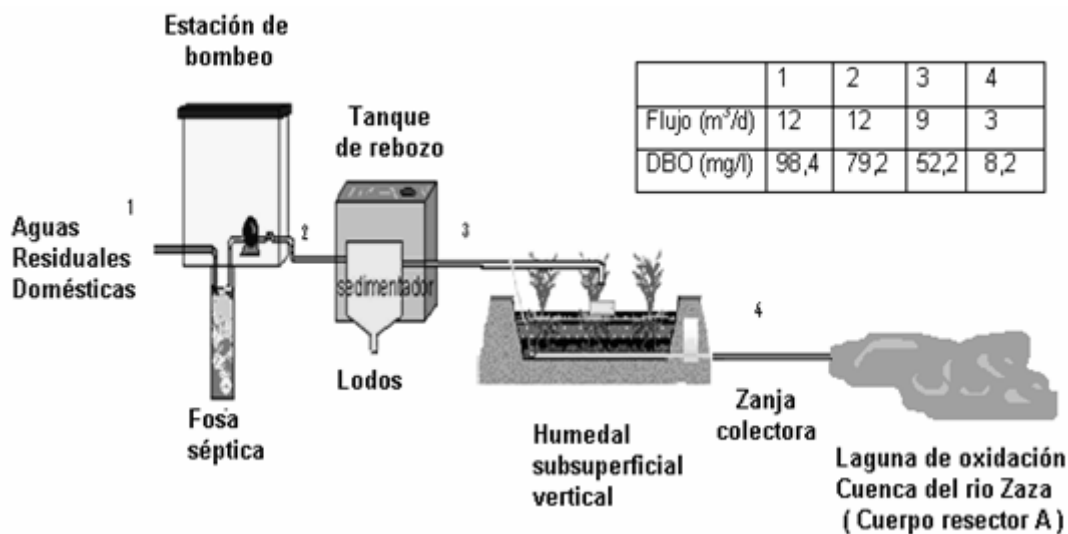


Fig. 4 Diagrama de flujo del sistema de tratamiento de las aguas residuales domésticas.

Construcción del humedal

Para la construcción del humedal, se realiza el movimiento de tierra para adecuar el terreno, pasando a continuación a la fase de impermeabilización con

arcilla (figura 6). Posteriormente, se realiza el relleno y acondicionamiento, donde se coloca la tubería de salida y las tuberías de aireación y una capa de grava para evitar las tupiciones en la tubería de salida (figura 7).



Fig. 6 Impermeabilización con arcilla.



Fig. 7 Relleno y acondicionamiento.

Finalmente, se coloca el sustrato y se realiza la siembra de la planta (figura 8).



Fig. 8 Humedal recién plantado.

Evaluación del desempeño del humedal

En la tabla 4 se observa, el incremento considerable del oxígeno disuelto en el agua residual a la salida del

humedal, lo que se favorece por la alimentación intermitente, que permite la aireación del sistema. El incremento del nitrato, evidencia la existencia de zonas aeróbicas dentro del humedal que benefician los procesos de nitrificación planteados por diferentes autores en la remoción del nitrógeno /4/.

Con el empleo del suelo ferralítico rojo, se logra remover significativamente el fósforo en el humedal con un área mucho menor que la requerida, pero el valor promedio del mismo aún se encuentra ligeramente por encima de la norma cubana de vertimiento para cuerpo receptor A (2 mg/L). Esto corrobora la necesidad de un estudio más profundo sobre los mecanismos de remoción de este contaminante, que como reportan numerosos autores está influenciado principalmente por el tipo de sustrato utilizado /15-17/.

TABLA 4. ANÁLISIS FÍSICO- QUÍMICO DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS

Parámetros	UM	LMPP NC 27. 1999.	Efluente
pH	U	6,5 – 8,5	7,1 ± 0,07
Conductividad eléctrica	μS/cm	1400	783 ± 197
DQO	mg/L	70	20,1 ± 9,3
DBO ₅	mg/L	30	8,2 ± 1,7
Oxígeno Disuelto	mg/L	-	5,95 ± 0,76
Fósforo Total	mg/L	2	2,6 ± 1,3
Nitrógeno Total	mg/L	5	< 5
NH ₄	mg/L	-	< 5
NO ₂	mg/L	-	0,02 ± 0,006
NO ₃	mg/L	-	6,1 ± 1,5
Sólidos suspendidos totales	mg/L	-	0,16 ± 0,11



Conclusiones

1. Las aguas residuales de la empresa SOLCAR necesitan un sistema de tratamiento adicional para cumplir con la norma cubana de vertimiento.

2. El área necesaria para la remoción mediante un humedal subsuperficial vertical en la planta de soldar carriles es de 18 m², calculada usando una cinética de primer orden.

3. El humedal subsuperficial vertical, dispuesto posterior al sistema de tratamiento existente en la planta de soldar carriles, logra la remoción de los contaminantes en el agua residual, excepto el fósforo que presenta un valor ligeramente superior al límite de vertimiento.

4. La alimentación intermitente en el humedal subsuperficial vertical permite la oxigenación del sistema, lográndose el vertimiento de residuales más oxigenadas.

Agradecimiento

Al Proyecto de Cooperación Inter Universidades, (VLIR), y especialmente al Departamento de Química Analítica de la Facultad de Bioingeniería. Universidad de Gante, Bélgica, por su contribución en la realización del presente trabajo.



Bibliografía

1. MORENO, L. *et al.* *La Depuración de Aguas Residuales Urbanas de Pequeñas Poblaciones Mediante Infiltración Directa en el Terreno Fundamentos y Casos Prácticos*. Primera edición. Vol. 1 España. 2003. Consultado marzo 2010, <http://www.aguas.igme.es>
2. BRIX, H. "Use of Constructed Wetland in Water Pollution Control: Historical Development, Present Status and Future Perspectives". *Water Sciences Technology*. 1999, 40, 3, págs. 87-93.
3. TIETZ, A.; A. KIRSCHNER; G. LANGERGRABEL; K. SLEYTR; R. HABERL. "Characterization of Microbial Biocoenosis in Vertical Subsurface flow Constructed Wetlands". *Science of the Total Environment*. 2007, 380, 1-3, 163-172.
4. VYMAZAL, J. "Removal of Nutrients in Various Types of Constructed Wetlands". *Science of the Total Environment*. 2007, 380, 1-3, 48-65.
5. LANGERGRABEL, G.; C. PRANDTSTETTEN; A. PRESSL; R. ROHRHOFER; R. HABERL. "Optimization of Subsurface Vertical flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment". *Water Science and Technology*. 2007, 55, 7, 72-78.
6. EPA. 832-F-00-023 *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales humedales de flujo subsuperficial*. Washington, D.C. 2000.
7. REED, S. C. *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. 2da Edición McGraw Hill, New York. 1995.
8. WATSON, J. T. *et al.* "Performance Expectations and Loading Rates for Constructed Wetlands". En *Hammer D.A.* (ed) *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Municipal, Industrial and Agricultural. Lewis Publishers. Chelsea. 1989.
9. KADLEC, R. H.; R. KNIGHT. *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers. Florida. 1996.
10. INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS HIDRÁULICOS. "Procedimiento para la aplicación de la norma NC-27: 1999. "Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones" 2004.
11. APHA, AWWA, WEF. *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. 20th edition Washington D.C. 1998.
12. ONN: NC27/1999. "Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Oficina Nacional de Normalización". La Habana. 1999.
13. PÉREZ, M. M. *et al.* "Evaluación de la eficiencia de diferentes sustratos de filtros de suelo plantados en la depuración de aguas residuales domésticas". *CENIC Ciencias Biológicas* 2009, 40, 99-103.
14. HEALY, M. G.; M. RODGERDS; J. MULQUEEN. "Treatment of Daily Wastewater Using Constructed Wetlands and Intermittent Sand Filters". *Bio-Resource Technology*. 2007, 98, 12, 2268-2281.
15. PROCHASKA, C.; A. ZOUBOULIS. "Removal of Phosphates by Pilot Vertical-Flow Constructed Wetlands Using a Mixture of Sand and Dolomite as Substrate". *Ecol. Eng.* 2006, 26, 3, 293-303.
16. ASUMAN, K. E.; M. BEKLIOGLU; G. N. DEMINER. "Use of Blast Furnace Granulated Slag as a Substrate in Vertical Flow Reed Beds: Field Application". *Bioresource Technology* 2007, 98, 11, 2089-2101.
17. DRIZO, A.; A. FROST; J. GRACE; K. A. SMITH. "Physico-Chemical Screening of Phosphate-Removing Substrates for Use in Constructed Wetland Systems". *Wat. Res.* 1999, 33, 33, 3595-602.