

# Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes

Feasibility of designing a subsurface flow wetland for treating municipal wastewater of 30,000 inhabitants

CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTIZ<sup>1</sup> - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS<sup>2</sup>

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.
2. Ingeniero civil, MEEE. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

camiloespinoortiz@hotmail.com - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 12/02/2014 Aceptado: 20/02/2014  
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

## Resumen

En este artículo se analiza la factibilidad del diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de las aguas residuales municipales de una población de 30.000 habitantes, en comparación con un sistema de lagunas de estabilización. Dentro del análisis se incluyen antecedentes del uso de humedades para el tratamiento de aguas residuales y algunos criterios de diseño. Como resultado del análisis, se establece que el costo del humedal es mayor que el requerido para un sistema de lagunas de estabilización<sup>(1)</sup>.

**Palabras claves:** humedal artificial de flujo subsuperficial, aguas residuales, remoción de DBO, lagunas de estabilización.

## Abstract

This article analyzes the feasibility of designing a manmade sub-surface flow wetland for wastewater treatment for populations of 30,000 inhabitants in comparison with a system of stabilization ponds. Within the analysis some background of sub-surface wetlands and some criteria of design for wastewater treatment is included. As a result of the analysis, it is established that the cost of the wetland is greater than the required for a system of stabilization ponds<sup>(1)</sup>.

**Keywords:** manmade sub-surface flow wetland, wastewater, BOD removal, stabilization ponds.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las características sociales, topográficas, tecnológicas, demográficas, económicas y climáticas, entre otras, de las pequeñas y medianas poblaciones en Colombia y América Latina representan un reto a la hora de seleccionar tecnologías sostenibles para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, creando la necesidad de desarrollar herramientas que faciliten la toma de decisiones para la implementación de estos sistemas<sup>(2)</sup>, basados en tecnologías naturales de depuración, como humedales artificiales.

La problemática planteada se fundamenta en el acelerado crecimiento de la población y de los sectores agrícola e industrial en Colombia, los cuales demandan grandes cantidades de agua para el desarrollo de sus actividades; de acuerdo con las cifras del Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico en Colombia para el año 2011, efectivamente sólo el 9 % de las aguas residuales son tratadas, lo que evidencia el alto déficit de plantas de tratamiento que faltan por implementar en el país, generando problemas ambientales de saneamiento básico (salud, contaminación de suelos, aguas subterráneas, eutrofización de cuerpos de agua, etc.), principalmente en la conservación y protección de los ecosistemas acuáticos y del suelo en general. Así mismo, los altos costos que requiere la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales han sido uno de los principales obstáculos que se presentan para resolver dicha problemática<sup>(2)</sup>.

Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas, con una frecuencia y duración que permitan mantener saturado el terreno. Suelen tener aguas con profundidades inferiores a 60 cm, con plantas emergentes tales como espadañas, carrizos y juncos. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar<sup>(3)</sup>.

Los sistemas diseñados para imitar las características y procesos (físicos, químicos y biológicos) de un humedal natural son comúnmente conocidos como “humedales artificiales” o “humedales construidos”. Los humedales artificiales son sistemas complejos e integrados en los que tienen lugar interacciones entre el agua, plantas, animales, microorganismos, energía solar,

suelo y aire, con el propósito de mejorar la calidad del agua residual y proveer un mejoramiento ambiental<sup>(4)</sup>. Existen dos tipos: humedales artificiales de flujo libre y humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Se definen como humedales artificiales de flujo libre superficial (figura 1) aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. Los humedales artificiales de flujo libre consisten normalmente en una o más cuencas o canales de poca profundidad, que pueden o no tener un recubrimiento de fondo para prevenir la percolación al agua freática vulnerable a la contaminación, y una capa sumergida de suelo para soportar las raíces de la vegetación macrófita emergente<sup>(5)</sup>. Las ventajas y desventajas de un humedal artificial de flujo superficial se ilustran más adelante (tabla 1).

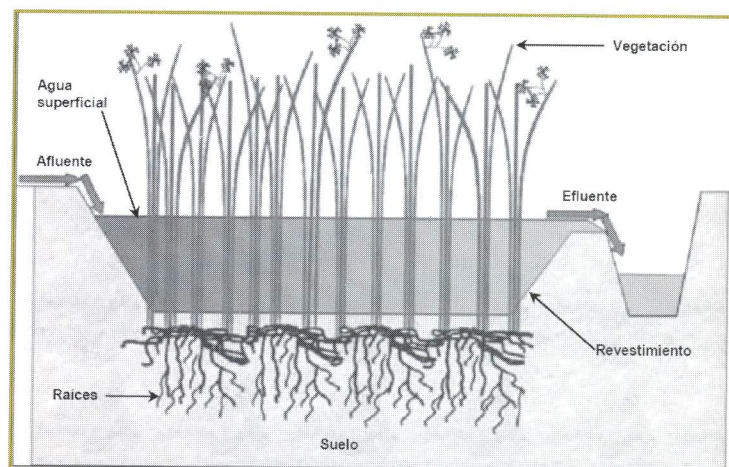
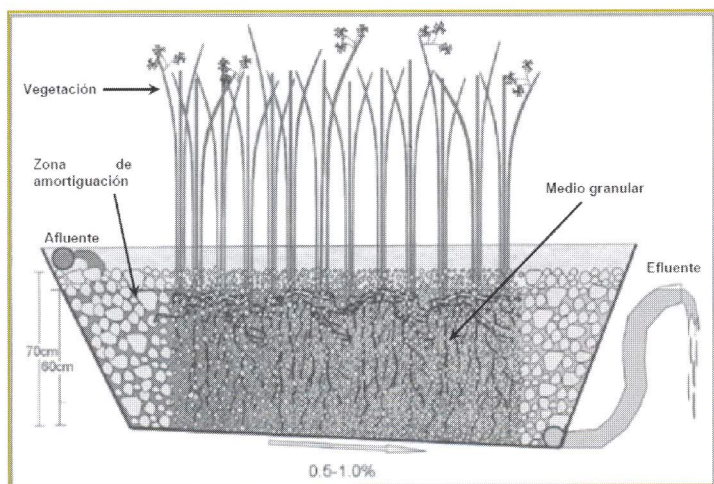


Figura 1. Esquema de un humedal artificial de flujo superficial.

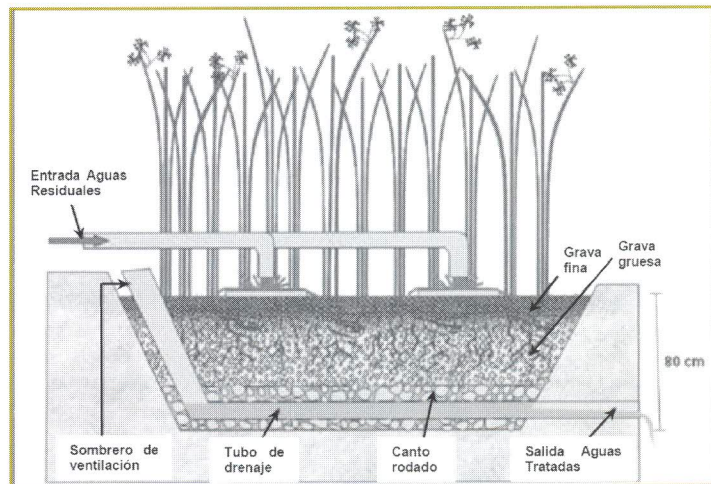
Los sistemas de flujo subsuperficial (figuras 2 y 3) están contruidos típicamente en forma de un lecho o canal que, al igual que el sistema de flujo libre, puede o no tener una barrera que impida la percolación del agua hacia el subsuelo; además, contiene un medio apropiado (grava, arena u otro material) que soporta el crecimiento de las plantas; la vegetación emergente es la misma que en el sistema de flujo libre. La profundidad del medio en estos humedales de flujo subsuperficial tiene un rango de 0,3 a 0,9 metros, siendo 0,6 metros el valor más común<sup>(4)</sup>. El nivel del agua está por debajo de la superficie del soporte y fluye únicamente a través del medio que sirve para el crecimiento de la película microbiana, que es la responsable en gran parte del

**Tabla 1**  
Ventajas y desventajas de un sistema de humedal artificial de flujo superficial<sup>(6)</sup>

Ventajas	Desventajas
Proporcionan tratamiento en forma efectiva y pasiva. Además, minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de personal especializado.	Las necesidades de terreno de estos humedales pueden ser grandes, especialmente si se requiere la remoción de nitrógeno.
Pueden ser menos costosos de construir, operar y mantener que los procesos mecánicos de tratamiento.	El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
La operación de tratamiento secundario es posible durante todo el año, con excepción de los climas fríos. La operación de tratamiento terciario avanzado es posible durante todo el año en climas cálidos o semicálidos.	En climas fríos, las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO y de las reacciones biológicas responsables por la nitrificación y desnitrificación.
Proporcionan la incorporación de hábitat de vida silvestre y oportunidades para la recreación pública.	La mayoría del agua contenida en los humedales de flujo libre es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.
No producen biosólidos ni lodos residuales que requieran tratamiento subsiguiente y disposición.	Los mosquitos y otros insectos vectores de enfermedades pueden ser un problema.
La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención.	



**Figura 2.** Esquema de un humedal subsuperficial de flujo horizontal.



**Figura 3.** Esquema de un humedal subsuperficial de flujo vertical.

tratamiento que ocurre al agua residual. Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos, según la forma de aplicación de agua al sistema, ya sea de flujo vertical u horizontal<sup>(7)</sup>. Posteriormente se enumeran las ventajas y desventajas de un sistema de humedad de flujo subsuperficial (tabla 2).

Las plantas emergentes (tabla 3) que frecuentemente se encuentran en la mayoría de los humedales para aguas residuales son las espadañas, carrizos, juncos y juncos de laguna<sup>(3, 5, 7, 8)</sup>.

## ANTECEDENTES

En Europa existen más de 200 sistemas de humedales naturales y alrededor de 5000 humedales artificiales usados para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. El primer sistema de tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales comenzó a operar en Inglaterra en octubre de 1985 para una población de 1260 habitantes y un caudal promedio de 189 m<sup>3</sup>/d; entre 1983 y 1988 se construyeron en Dinamarca más de 130 humedales artificiales, para poblaciones de

**Tabla 2**  
Ventajas y desventajas de un sistema de humedal de flujo subsuperficial<sup>(6)</sup>

Ventajas	Desventajas
Proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de personal especializado.	El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
Pueden ser menos costosos de construir, operar y mantener que los procesos mecánicos de tratamiento.	Un humedal de flujo subsuperficial requiere un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales de tratamiento.
La configuración de los humedales de flujo subsuperficial proporciona una mayor protección térmica que los humedales de flujo libre.	La mayoría del agua contenida en los humedales de flujo subsuperficial es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.
No producen biosólidos ni lodos residuales que requieran tratamiento subsiguiente y disposición.	En climas fríos, las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO, NH <sub>3</sub> y NO <sub>3</sub> .
La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles puede ser también efectiva, con un tiempo de retención significativamente mayor.	Los humedales de flujo subsuperficial no se pueden diseñar para lograr una remoción completa de compuestos orgánicos, SST, nitrógeno o bacterias coliformes. Los ciclos ecológicos en estos humedales producen concentraciones naturales de esos compuestos.
Los mosquitos y otros insectos vectores similares no son un problema con los humedales de flujo subsuperficial, mientras el sistema se opere adecuadamente y el nivel subsuperficial de flujo se mantenga.	Si bien los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de menor superficie que los humedales de flujo libre, para la remoción de la mayoría de los constituyentes del agua residual el costo mayor del medio de grava en los sistemas de flujo subsuperficial puede dar como resultado costos de construcción más altos para sistemas con una capacidad mayor de 227 m <sup>3</sup> por día (60.000 galones por día).

**Tabla 3**  
Plantas emergentes más utilizadas en humedales artificiales<sup>(2)</sup>

Especie	Nombre latino	Nombre común más usual	Temperatura, °C		Máxima salinidad tolerable, ppt	Rango efectivo de pH
			Deseable	Germinación de las semillas		
Ciperáceas	<i>Carex sp.</i>	NA	14 - 32	NA	NA	5 - 7,5
	<i>Eleocharis sp.</i>	NA	NA	NA	NA	NA
	<i>Scirpus lacustris L. (*)</i>	Junco de laguna	18 - 27	NA	20	4 - 9
Gramíneas	<i>Glyceria fluitans (L.) R. Br.</i>	Hierba del maná	NA	NA	NA	NA
	<i>Phragmites australis (Caw)</i>					
	<i>Trin. Ex Steudel (*)</i>	Carrizo	12 - 23	10 - 30	45	2 - 8
Iridáceas	<i>Iris pseudacorus L.</i>	Lirio amarillo, espadaña fina	NA	NA	NA	NA
Juncáceas	<i>Juncus sp.</i>	Juncos	16 - 26	NA	20	5 - 7,5
Tifáceas	<i>Thypha sp (*)</i>	Eneas, aneas, espadañas	10 - 30	12 - 24	30	4 - 10

hasta 7100 habitantes con caudales del orden de 1065 m<sup>3</sup>/d; también se encuentran humedales artificiales funcionando en Bélgica, Holanda, Hungría, Suecia, República Checa y la India<sup>(7)</sup>.

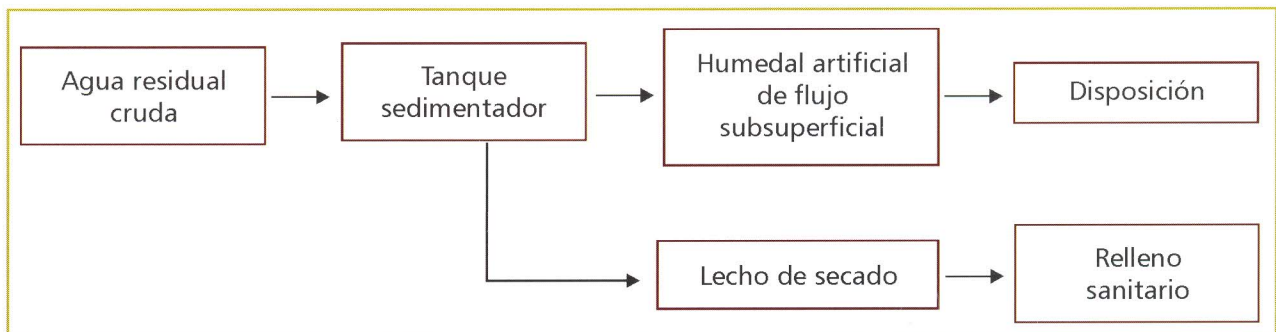
Los humedales proveen tratamiento eficiente de afluentes pretratados (tabla 4). En Colombia, el RAS 2000 establece que los humedales deben localizarse aguas abajo de un tanque séptico<sup>(8)</sup>.

**Tabla 4**  
Resultados del tratamiento de aguas residuales mediante humedales

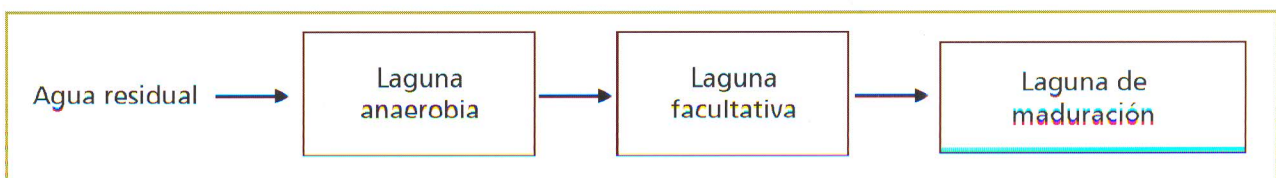
País	Ciudad	Población (hab.)	Caudal (m³/d)	Tipo de afluente	Remoción DBO5 (%)	Remoción DQO (%)	Remoción SST (%)
E.U.	California	30.000	9464	Secundario	82	-	77,6
E.U.	Arcata	19.056	8706	Secundario	-	-	-
España	Los Gallardos	1200	155	Secundario	75,5	-	96
España	Bustillo de Cea	400	66	Sin información	65,95	57,34	67,34
Perú	Lacabamba	1300	106	Secundario	48	-	96
Brasil	Botucatu	-	-	Secundario	-	88	80
Colombia	Tunja (prueba piloto)	-	2,2	Secundario	45,1	51,7	88,6
Colombia	Cogua, Cundinamarca (prueba piloto)	6	1,34	Secundario	80	-	44
Colombia	Escuela Colombia de Ingeniería Julio Garavito (prueba piloto) <sup>(16)</sup>	-	0,096	Secundario	52	70	-

## DISEÑO

A renglón seguido se ilustran los dos sistemas de tratamiento analizados (figuras 4 y 5).



**Figura 4.** Sistema de tratamiento utilizando un humedal artificial de flujo subsuperficial.



**Figura 5.** Sistema de tratamiento mediante lagunas de estabilización.

### Caudal de diseño

Como caudal de diseño se supone el caudal afluente promedio a la PTARM de municipios con aforos conocidos, 202 L/hab. • d. El caudal para 30.000 habitantes será:

$$\text{Caudal promedio} = (202 \text{ L/hab.} \cdot \text{d}) (30.000 \text{ hab.}) = 6060 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{Caudal pico} = (6060 \text{ m}^3/\text{d})(3) = 18.180 \text{ m}^3/\text{d}$$

Las dimensiones del tanque sedimentador y de los lechos de secado que forman parte del sistema de tratamiento primario se presentan a continuación (tablas 5 y 6).

**Tabla 5**  
Dimensiones del tanque sedimentador primario<sup>(10)</sup>

Parámetro	Valor
Caudal pico, Q (m <sup>3</sup> /d)	18.180
Carga superficial, m/d	80
Profundidad del agua, m	3
Área tanque, A (m <sup>2</sup> )	227
Diámetro sedimentador, m	17
Carga de rebose sobre el vertedero, L/s•m	4,5
Longitud vertedero perimetral, L (m)	53
Verificación carga rebose sobre el vertedero, L/s•m	4,0 < 4,5
Volumen del tanque, V (m <sup>3</sup> )	682

**Tabla 6**  
Dimensiones del lecho de secado<sup>(10)</sup>

Característica	Valor
Área requerida	0,05 (m <sup>2</sup> /cap) (lecho con cobertura)
Borde libre	0,5 - 0,9 por encima de la arena
Espesores	- Capa de grava, 200 - 460 mm - Cara de arena, 300 - 460 mm
Granulometría	- Diámetro partículas de grava, 3 - 25 mm - Diámetro partículas de arena, 0,3 - 0,75 mm
Recolección de percolados	- Las tuberías de drenaje principal deben tener no menos de 100 mm de diámetro y una pendiente no menor de 1 %; deben espaciarse entre 2,5 y 6 m. - Se localizarán por debajo de la capa de grava con no menos de 150 mm de este material por encima de ellas. - Se recomienda que los canales laterales de alimentación de las tuberías principales tengan un espaciamiento entre 2,5 y 3 m.
Carga superficial	134 kg/ m <sup>2</sup> • año
Área requerida para 30.000 hab.	0,15 ha

La concentración de DBO en el afluente se calcula suponiendo los valores del título E (tabla E.2.6) del RAS 2000 (tabla 7).

El cálculo de las dimensiones del humedal artificial de flujo subsuperficial, utilizando cuatro modelos diferentes de remoción de DBO, se incluye más adelante (tabla 8).

**Tabla 7**  
Aportes per cápita para aguas residuales domésticas<sup>(11)</sup>

Parámetro	Intervalo	Valor sugerido
DBO 5 días, 20 °C, g/hab./día	25 - 80	50
Concentración DBO, mg/L para 30.000 habitantes		248
Concentración DBO, mg/L para 30.000 habitantes, removiendo un 40 % por el sedimentador primario		149

El diseño más económico corresponde al que conforma los criterios de diseño de la EPA, razón por la cual se selecciona esta alternativa para el análisis de factibilidad. Posteriormente se muestran las dimensiones del humedal (tabla 9).

Para el humedal diseñado se recomienda sembrar juncos (*Scirpus*), dado que son plantas capaces de penetrar hasta 6 cm en el lecho filtrante del humedal, donde la mayoría de las especies tienen un crecimiento moderado y pueden lograr un buen cubrimiento en

alrededor de un año, con separaciones cercanas a 0,3 m<sup>(3)</sup>.

Los principales elementos que se incluyen en los costos de inversión de los humedales de flujo subsuperficial son similares a los requeridos para los sistemas de lagunas. Éstos incluyen el costo del terreno, evaluación del sitio, limpieza del sitio, movilización de suelos, recubrimiento, medio de grava, plantas, estructuras de entrada y descarga, cercas, tuberías misceláneas, ingeniería, costos legales, contingencias, gastos fijos y ganancia del contratista<sup>(12)</sup>.

**Tabla 8**  
Resumen de resultados de diseño

Parámetro	Reed <sup>(6)</sup> , RAS	Kadlec <sup>(10)</sup>	EPA, 1988 <sup>(6)</sup>	Romero <sup>(11)</sup>
	Remoción de DBO	Remoción de DBO	Remoción de DBO	Remoción de DBO
	$A_s = \frac{Q \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_r(h)(\eta)}$	$A_s = \frac{Q}{K_A} \ln\left(\frac{C_o - C^*}{C_e - C^*}\right)$	$A_s = \frac{Q \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_r(h)(\eta)}$	$A_s = \frac{V}{y} V = Q * t$
Área superficial del humedal, m <sup>2</sup>	A <sub>s</sub> = 28.049	24.290	19.171	40.400
Área de la sección transversal del lecho, m <sup>2</sup>	A <sub>t</sub> = 1263	1263	1263	1263
Ancho del humedal, m	a = 2104	2104	2104	2104
Longitud del humedal, m	l = 13,3	11,54	9,1	19,2
Concentración de DBO en el efluente, mg/L	C <sub>e</sub> = 30	30	30	3,3
Concentración de DBO en el afluente, mg/L	C <sub>o</sub> = 149	149	149	149
Profundidad promedio del sistema, m	h = 0,6	0,6	0,6	0,6
Constante de remoción, d <sup>-1</sup>	K <sub>g</sub> = 1,49	0,42 m/d	2,17	0,95
Conductividad hidráulica, m/d	K <sub>s</sub> = 480	480	480	480
Porosidad promedio del sistema	η = 0,32	0,32	0,32	0,32
Caudal, m <sup>3</sup> /d	Q = 6060	6060	6060	6060
Pendiente del lecho, fracción	S = 0,01	0,01	0,01	0,01
Temperatura, °C	T = 25	25	25	25
Tiempo de retención hidráulico, d	t = 2,8	2,4	1,9	4
Volumen humedal, m <sup>3</sup>	V = 16829	14574	11503	24240
Carga orgánica, kg/d	900	900	900	900
COS, kg/ha. * d	321	371	469	223

**Tabla 9**  
Dimensiones del humedal para el tratamiento de aguas residuales de 30.000 habitantes

Parámetro	Valor
Caudal, Q (m <sup>3</sup> /d)	6060
Área superficial, A <sub>s</sub> (ha)	1,91
Área transversal, A <sub>t</sub> (m <sup>2</sup> )	1263
Ancho, m (a)	2104
Largo, l (m)	9,10
Altura, h (m)	0,6
Pendiente del lecho, S (m/m)	0,01
Material lecho filtrante	Arena gruesa

**Tabla 10**  
Costos del humedal de flujo subsuperficial para 30.000 habitantes<sup>(13)</sup>

Elemento		Valor
Tanque sedimentador	Movimiento de tierra	\$5.675.000
	Concreto $f'c = 17,5$ Mpa	\$31.780.000
	Acero de refuerzo	\$27.300.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$15.000.000
Humedal artificial	Costo terreno	\$267.000.000
	Evaluación del sitio (topografía, geotecnia)	\$58.000.000
	Limpieza en el sitio	\$5.000.000
	Movimiento de tierra	\$229.200.000
	Recubrimiento	\$286.500.000
	Medio de grava	\$916.000.000
	Plantas	\$22.920.000
	Sembrado	\$7.400.000
Estructuras de entrada y descarga	\$20.000.000	
Lecho secado de lodos	Costo terreno	\$21.000.000
	Movimiento de tierra	\$56.250.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$10.000.000
<b>Total</b>		<b>\$1.979.025.000</b>

En la tabla 10 se presentan los costos para la construcción del humedal artificial de flujo subsuperficial para 30.000 habitantes, con caudal de  $6060 \text{ m}^3/\text{día}$ , de acuerdo con las dimensiones de la tabla 9, como también para el tanque sedimentador primario y el lecho de secado de lodos, basados en los costos de Construdata<sup>(13)</sup>.

Así mismo, se muestran los principales costos de inversión que requiere un sistema de lagunas convencional (tabla 12 y figura 10), cuantificando los valores para 30.000 habitantes, de acuerdo con las dimensiones obtenidas (tabla 11), con base en los costos de Construdata<sup>(13)</sup>.

Los costos de operación y mantenimiento de los dos sistemas de tratamiento se muestran en la página siguiente (tabla 13).

El costo evaluado de construcción de un sistema de tratamiento de aguas residuales para 30.000 habitantes mediante lagunas de estabilización es de \$1871 millones, mientras que el costo del humedal artificial de flujo subsuperficial es de \$1979 millones, es decir, superior en \$108 millones. El costo anual de operación del humedal será de \$86 millones y el de lagunas de estabilización de \$23 millones.

**Tabla 11**  
Dimensiones del sistema de lagunas para el tratamiento de aguas residuales de poblaciones de 30.000 habitantes

Parámetros de diseño	Laguna anaerobia	Laguna facultativa	Laguna de maduración
Tiempo de retención, (d) <sup>(14)</sup>	5	10	5
Profundidad, (m) <sup>(14)</sup>	3	2	1,5
Volumen, (m <sup>3</sup> ) <sup>(14)</sup>	30.300	60.600	30.300
Área, (m <sup>2</sup> ) <sup>(14)</sup>	10.100	30.300	20.200
COS, kg/Ha. d	1485	200	22



**Tabla 12**  
Costos del sistema de tratamiento de aguas residuales para 30.000 habitantes, utilizando lagunas de estabilización.

Elemento		Valor
Laguna anaerobia	Costo terreno	\$141.400.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$7.500.000
	Costo excavación	\$250.000.000
Laguna facultativa	Costo terreno	\$424.200.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$7.500.000
	Costo excavación	\$500.000.000
Laguna de maduración	Costo terreno	\$282.800.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$7.500.000
	Costo excavación	\$250.000.000
<b>Total</b>		<b>\$1.870.900.000</b>

**Tabla 13**  
Costos de operación y mantenimiento<sup>(15)</sup>.

Sistema de tratamiento	Costo operación y mantenimiento (\$/año · habitante) <sup>(15)</sup>	Costo operación y mantenimiento para 30.000 habitantes (\$/año) <sup>(15)</sup>
Sistema de lagunas de estabilización	760	22.800.000
Humedales artificiales de flujo subsuperficial	2850	85.500.000

## CONCLUSIONES

- De acuerdo con los antecedentes relacionados, los humedales artificiales con espejo de agua predominan en Estados Unidos, en poblaciones de hasta 20.000 habitantes, debido a que requieren un menor costo de inversión que los humedales de flujo subsuperficial.
- Los humedales artificiales de flujo subsuperficial se han empleado principalmente en Europa y Estados Unidos; sin embargo, en Colombia es una tecnología nueva, y sólo se conocen experiencias de su utilización en el municipio de Macanal.
- Los humedales artificiales se usan como tratamiento secundario o terciario de aguas residuales municipales, lo que hace necesario implementar previamente tratamiento primario (sedimentadores, otros), con el fin de garantizar su adecuado funcionamiento y prevenir a largo plazo problemas de colmatación.
- Los modelos para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial presentan diferencias en el cálculo del área superficial de diseño y, por tanto,

en el tiempo de retención y en la carga superficial orgánica aplicada.

- Los costos de inversión que requiere la construcción de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales de 30.000 habitantes, en comparación con un sistema de tratamiento convencional de lagunas de estabilización, son superiores en un 6 %.
- El costo de operación y mantenimiento del humedal es superior en un 273 % al sistema de lagunas de estabilización.
- La diversidad en los criterios de diseño de humedales para el tratamiento de aguas residuales indica la necesidad de efectuar estudios que contribuyan a definir con mayor perfección sus valores.

## REFERENCIAS

1. Espinosa, O.C.E. (2014, enero). Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes. Trabajo de grado. Maestría en Ingeniería Civil. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Bernal, D.P. (2000). *Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por medios naturales*. Universidad del Valle / Instituto Cinara.
3. Borrero L., J.A. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Trabajo final (Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental). Barcelona: Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña.
4. Osnaya, M. (2012). *Propuesta de diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de la Sierra Juárez*. México: Universidad Sierra Juárez.
5. Delgadillo, Ó., Camacho, A., Pérez, L.F. & Andrade, M. *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). Bolivia: Universidad Mayor de San Simón.
6. Usepa (U.S. Environmental Protection Agency) (1988, September). *Design Manual, Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*.
7. Estrada, I. (2010). Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías.
8. República de Colombia, Ministerio de Desarrollo Económico (2010). Resolución 1096/2000 de noviembre de 2000, por la cual se adopta el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. RAS 2000.
9. Reed, S.C., Crites, R.W. & Middlebrooks, E.J. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill.
10. Kadlec, R.H. & Knight, R.L. (1996). *Treatment Wetlands*. Boca Raton: Lewis.
11. Romero R., J.A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. 3.<sup>a</sup> ed. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
12. EPA (2000, septiembre). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales en humedales de flujo subsuperficial*.
13. <http://www.construdata.com>. Octubre de 2013.
14. Romero R., J.A. (2008). *Lagunas de estabilización de aguas residuales*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.