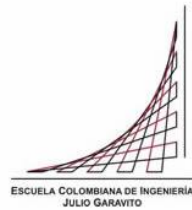


# **Maestría en Ingeniería Civil**

## **Diseño de Humedales Artificiales**

**Camilo Iván Gómez Chavarro**

**Bogotá, D.C., 03 de febrero de 2021**



# **Diseño de Humedales Artificiales**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con  
énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

**Jairo Alberto Romero Rojas**  
**Director**

**Bogotá, D.C., 03 de febrero de 2021**



La tesis de maestría titulada “Diseño de humedales artificiales”, presentada por Camilo Iván Gómez Chavarro, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente

---

Jairo Alberto Romero Rojas

Director de la tesis

---

María Carolina Romero Pereira

Jurado

---

Amalia Avendaño Sánchez

Jurado

Bogotá, D.C., 03 de febrero de 2021

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a todos los que me brindaron su apoyo durante el desarrollo de este trabajo: a mi pareja, a mi familia, a mis amigos y a mis colegas.

Agradezco también a los profesores de la maestría, especialmente a mi director de tesis por sus orientaciones y por su dedicación.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	10
OBJETIVOS.....	11
METODOLOGÍA.....	11
1 HUMEDALES ARTIFICIALES .....	12
1.1 DEFINICIÓN.....	12
1.2 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES .....	13
1.2.1 Humedal artificial de flujo superficial.....	13
1.2.2 Humedal de flujo subsuperficial .....	15
1.2.2.1 Humedal de flujo subsuperficial horizontal .....	15
1.2.2.2 Humedal de flujo subsuperficial vertical.....	16
1.2.2.3 Humedad de flujo híbrido.....	17
1.3 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES .....	18
1.3.1 Afluente.....	18
1.3.2 Sustrato.....	18
1.3.3 Vegetación .....	19
1.3.4 Ecología e interacciones en los humedales.....	21
1.3.5 Acceso y evacuación en el humedal.....	22
2 CRITERIOS DE DISEÑO .....	26
2.1 LOCALIZACIÓN .....	26
2.1.1 Topografía.....	26
2.1.2 Suelos .....	26
2.1.3 Hidrología.....	27
2.2 SELECCIÓN DEL TIPO DE HUMEDAL.....	27
2.2.1 Aplicaciones Potenciales .....	28
2.3 DIMENSIONAMIENTO.....	29
2.3.1 Metodología de Reed:.....	30
2.3.2 Metodología Kadlec y Wallace:.....	32
2.3.3 Profundidad de la estructura .....	33
2.3.4 Tiempo de retención hidráulica .....	33
2.4 DISEÑO HIDRÁULICO .....	34
2.4.1 Humedal artificial de flujo superficial.....	34
2.4.2 Humedal de flujo subsuperficial .....	35

2.4.2.1	Humedales artificiales de flujo vertical.....	35
2.5	INVERSIÓN.....	36
3	CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES.....	37
3.1	PREPARACIÓN DEL TERRENO.....	37
3.2	TERRAPLENES Y PAREDES INTERIORES .....	38
3.2.1	Paredes de contención verticales .....	39
3.3	IMPERMEABILIZACIÓN .....	40
3.4	INSTALACIÓN DE TUBERÍAS .....	40
3.5	CONFORMACIÓN DEL SUSTRATO.....	41
3.6	SIEMBRA DE VEGETACIÓN.....	42
4	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES .....	44
4.1	PREPARACIÓN .....	44
4.2	MONITOREO DEL FLUJO Y DE LOS NIVELES DEL AGUA.....	44
4.3	MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	45
4.4	MANEJO DE VEGETACIÓN.....	45
4.5	CONTROL DE INSECTOS .....	46
4.6	MANTENIMIENTO DE ESTRUCTURAS .....	46
4.7	TAPONAMIENTO Y SEDIMENTACIÓN .....	47
5	ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES EMPLEADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	48
5.1	TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON HUMEDALES ARTIFICIALES EN ZONAS MONTAÑOSAS .....	49
5.1.1	Humedales artificiales .....	50
5.1.2	Desempeño en el funcionamiento del humedal .....	51
5.2	TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA REUTILIZACIÓN EN RIEGO 52	
5.3	TRATAMIENTO DE AGUAS GRISES CON FINES DE REÚSO .....	54
5.4	SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE CAÑO GANDUL .....	59
5.4.1	Desempeño del Humedal.....	61
5.5	USO DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE OTRO TIPO DE VERTIDOS .....	62
5.5.1	Aguas residuales de refinerías.....	62
5.5.2	Tratamiento de lixiviados con humedales artificiales .....	62
	CONCLUSIONES.....	65
	BIBLIOGRAFIA.....	66

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Potencial de remoción relativo de contaminantes en humedales artificiales.....	28
Tabla 2	Carga superficial para humedales de flujo superficial y subsuperficial .....	29
Tabla 3	Métodos de cálculo y valores de las variables necesarias para la determinación del área del humedal artificial para la metodología de Reed .....	30
Tabla 4	Métodos de cálculo y valores de las variables necesarias para la determinación del área del humedal artificial para la metodología de Kadlec y Wallace .....	32
Tabla 5	Porcentajes de remoción promedio en humedales superficiales .....	48
Tabla 6	Características generales del sistema y de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en zonas montañosas .....	51
Tabla 7	Análisis de calidad de agua en los 4 puntos de muestreo.....	51
Tabla 8	Eficiencia de los humedales y del sistema de tratamiento .....	52
Tabla 9	Características generales del sistema y del humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales.....	53
Tabla 10	Análisis de calidad de los efluentes y eficiencia de los humedales y del sistema de tratamiento.....	54
Tabla 11	Características generales del humedal artificial del sistema de tratamiento de aguas grises con fines de reúso .....	55
Tabla 12	Tiempos de retención establecidos para el análisis conforme a los puntos de análisis.....	56
Tabla 13	Eficiencias de remoción del humedal artificial para el tratamiento de aguas grises con fines de reúso .....	58
Tabla 14	Características generales humedal artificial del sistema de tratamiento de Caño Gandul .....	60
Tabla 15	Eficiencias de remoción según resultados del análisis de calidad de agua del humedal.....	61
Tabla 16	Características de los humedales artificiales para el manejo de lixiviados a escala piloto .....	63
Tabla 17	Eficiencias de remoción en humedales artificiales a escala piloto para el tratamiento de lixiviados .....	64

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mecanismos de remoción de los principales contaminantes en humedales artificiales.....	12
Figura 2 Tipos de humedales artificiales .....	13
Figura 3 Componentes básicos de un humedal artificial de flujo superficial .....	14
Figura 4 Esquema de aplicación de humedales artificiales de flujo superficial para el tratamiento de aguas residuales urbanas.....	14
Figura 5 Esquema de aplicación típico de humedales artificiales de flujo subsuperficial de aguas domesticas.....	15
Figura 6 Componentes básicos de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal	16
Figura 7 Componentes básicos de un humedal artificial de flujo subsuperficial vertical ....	17
Figura 8 Mecanismos de acceso a humedales artificiales .....	23
Figura 9 Acceso al humedale mediante tubería perforada.....	24
Figura 10 Acceso directo en humedales de flujo vertical .....	24
Figura 11 Estructura de salida típica de humedales artificiales.....	25
Figura 12 Variantes de excavación y taludes típicos en terraplenes para HHAAPS.....	39
Figura 13 Sección longitudinal de la estructura de gaviones de filtrado.....	49
Figura 14 Plano del sistema de tratamiento de aguas residuales .....	50
Figura 15 Corte A-A del sistema de tratamiento aguas residuales .....	50
Figura 16 Esquema del sistema de tratamiento en Masaya.....	53
Figura 17 Humedal artificial de tratamiento de aguas grises.....	56
Figura 18 Variación de la demanda biológica de oxígeno.....	56
Figura 19 Variación de la demanda química de oxígeno .....	57
Figura 20 Variación de fósforo total.....	57
Figura 21 Variación de nitrógeno total.....	57
Figura 22 Variación en el contenido de coliformes totales .....	57
Figura 23 Esquema del sistema de tratamiento en Caño Gandul .....	59



## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1 Enea ( <i>Typha Latifolia</i> ) .....	20
Fotografía 2 <i>Scirpus Californicus</i> .....	20
Fotografía 3 Carrizo ( <i>Phragmites australis</i> ).....	20
Fotografía 4 Humedad artificial empleado en tratamiento de aguas residuales de Caño Gandul .....	60

## INTRODUCCIÓN

La continua búsqueda de alternativas para reducir la contaminación por vertimientos de efluentes no tratados de todos los orígenes sobre cuerpos de agua como ríos y lagos, no es menos que urgente, ya que como los exponen informes sectoriales sobre cobertura y volúmenes de agua tratada en el país, el caudal estimado total no tratado asciende los 38 m<sup>3</sup>/s de los 68 generados en todas las zonas urbanas y rurales del país (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios y Departamento Nacional de Planeación 2019).

Ante la evidente carencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales, las opciones de manejo en zonas alejadas o con limitaciones para la construcción de plantas, deben centrarse en la implementación de estructuras alternativas que garanticen eficiencia y facilidad en la construcción y operación.

Entre este grupo de estructuras que se constituyen como alternativas, se destacan los humedales artificiales por su comprobada efectividad en la remoción de contaminantes, y su extendida utilización en un amplio rango de condiciones alrededor del mundo. Con el propósito de reconocer sus atributos, tipologías, funcionamiento y aplicabilidad, para la expansión de su uso desde un mejor entendimiento, se expone a continuación una síntesis de criterios de diseño y pautas de operación para estas estructuras. Adicionalmente, se exponen varios casos en los que son utilizados humedales artificiales, los cuales recogen experiencias en el país y en Suramérica, proporcionando elementos para tener en cuenta en la construcción y operación de dichas estructuras.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general:**

- Determinar la aplicabilidad y los criterios establecidos para el diseño, construcción, operación, mantenimiento y monitoreo de humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales.

### **Objetivos específicos:**

- Conocer los diferentes tipos de humedales artificiales y su aplicación para el tratamiento de aguas residuales.
- Establecer los criterios de diseño, construcción, operación, mantenimiento y monitoreo de los diferentes tipos de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales.
- Describir y analizar algunos sistemas existentes de humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales.
- Determinar la eficiencia obtenida en el tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales.

## **METODOLOGÍA**

1. Hacer una revisión bibliográfica para recopilar información relacionada con el diseño, la construcción, la operación, el mantenimiento y el monitoreo de humedales artificiales, estableciendo los tipos de estructuras existentes y sus condiciones de implantación.
2. Realizar un análisis de los criterios de diseño y construcción consignados en guías metodológicas o manuales de humedales artificiales, para establecer procedimientos, técnicas y herramientas aplicables en el tratamiento de aguas residuales.
3. Establecer mediante la recopilación de recomendaciones de diseño y construcción, un conjunto de acciones para la operación, el mantenimiento y el monitoreo de los humedales artificiales, las cuales garanticen el buen funcionamiento de estas estructuras.
4. Recopilar información de humedales artificiales con características que permitan implementarlos como alternativa o complemento en el manejo de aguas residuales.
5. Conforme con la información obtenida de humedales artificiales existentes, se evaluará su aplicación y desempeño, para el tratamiento de aguas residuales.

# 1 HUMEDALES ARTIFICIALES

## 1.1 DEFINICIÓN

Los humedales artificiales son estructuras que tienen el propósito de replicar varias de las funciones de los humedales naturales, efectuando y optimizando los procesos particulares de depuración de aguas que se realizan en estos cuerpos de agua. Dichas estructuras han permitido establecer formas alternativas y complementarias de tratamiento de aguas en medios controlados, donde se realizan procesos tales como: sedimentación, filtración, descomposición bacteriana y aprovechamiento de nutrientes por organismos vegetales (HYDRYC & EPA, 1998, p. 10).

Constructivamente, estas estructuras son similares a estanques de baja profundidad cuyo volumen es ocupado por un sustrato saturado, el cual soporta la vida de organismos como bacterias, algas, y plantas acuáticas macrofitas. La composición y distribución de este sustrato varía conforme a la tipología de humedal, pero en todos los casos, este cumple funciones de filtrado de agua, de soporte mecánico de plantas macrófitas y de almacenamiento de sustancias.



Figura 1 Mecanismos de remoción de los principales contaminantes en humedales artificiales

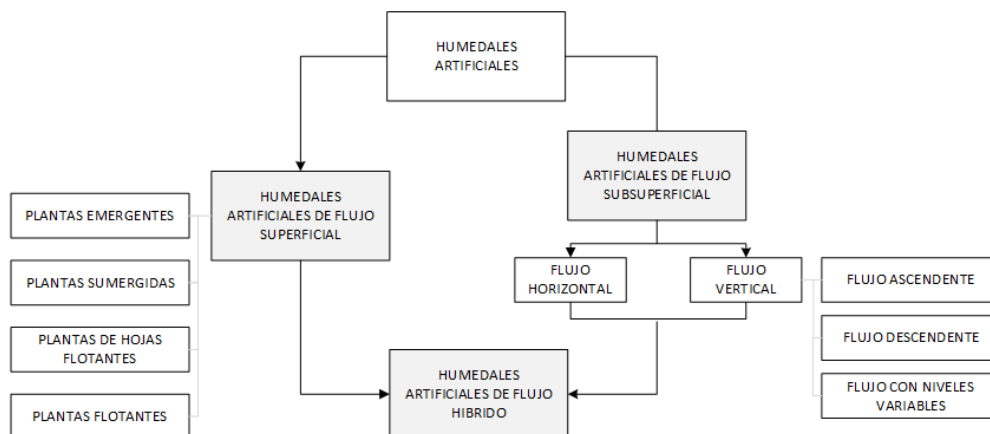
Fuente: Adaptado de UN-HABITAT, 2008, p. 12

El funcionamiento típico de un humedal artificial inicia con el acceso del agua residual a través de diferentes mecanismos que distribuyen el volumen a tratar sobre este, para que fluya superficial o subsuperficialmente. Durante el tiempo de permanencia del agua residual en el humedal, esta experimentará filtrado, eliminación de sólidos por sedimentación, descomposición de contaminantes por acción bacteriana y de varios

otros procesos de remoción (Figura 1) que llevarán a la degradación de materia orgánica, de nitrógeno, de fósforo, de metales pesados, patógenos, etc., hasta un nivel que permita realizar su vertido sobre otros cuerpos de agua o que el agua pueda ser reutilizada (UN-HABITAT, 2008, p. 11).

## 1.2 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales tienen 2 tipologías básicas clasificadas por el carácter del flujo: humedales de flujo superficial y humedales de flujo subsuperficial. Partiendo de esta primera clasificación se definen clasificaciones adicionales que permiten distinguir humedales de flujo superficial de acuerdo con la vegetación acuática predominante y humedales de flujo subsuperficial según la dirección del flujo.



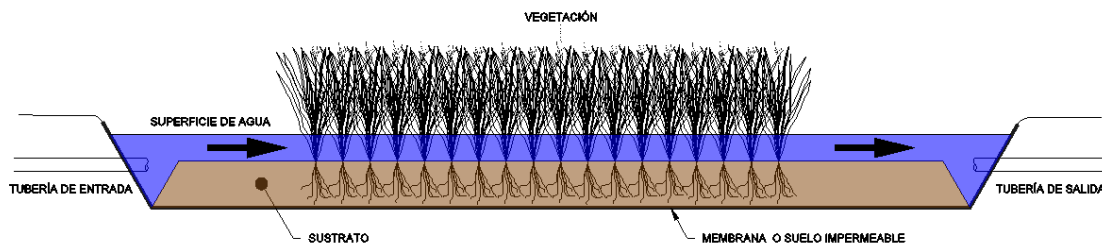
**Figura 2 Tipos de humedales artificiales**  
**Fuente: Adaptado de Mahmood et al., 2013, p. 3**

Una tercera categoría denominada humedal híbrido integra varios tipos de humedal artificial, en distribuciones en serie que permiten explotar las potencialidades depurativas de cada una de estas estructuras.

### 1.2.1 Humedal artificial de flujo superficial

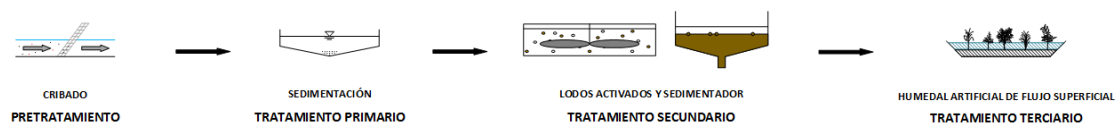
El humedal artificial de flujo superficial es una estructura que consiste en una cuenca o canal excavado en el que el agua a tratar forma una lámina de un espesor de entre 0.05 y 0.8 m, sobre un sustrato seleccionado, de acuerdo con la caracterización del efluente

y de los requerimientos de calidad del vertido final. Los caudales de diseño de estas estructuras pueden variar desde 4 m<sup>3</sup>/d a 75000 m<sup>3</sup>/d. La vegetación del sistema está compuesta, predominantemente, por plantas macrófitas emergentes enraizadas en el sustrato seleccionado (Crites et al., 2014, p. 259). Aunque existen diferentes variantes de estas estructuras, un esquema básico con sus principales componentes se muestra en la Figura 3



**Figura 3 Componentes básicos de un humedal artificial de flujo superficial**  
**Fuente: Adaptado de *Constructed wetlands:: Blumberg Engineers, Germany, s/f***

El área de los humedales de flujo superficial puede variar de entre 5-10 m<sup>2</sup> para efluentes provenientes de pozos sépticos, a decenas de miles de hectáreas (EPA, 2000b, p. 2). Asimismo, este tipo de humedales están reservados principalmente para complementar el tratamiento de aguas residuales luego de la etapa secundaria y terciaria, y aunque en ocasiones se empleen como tratamiento principal, exigen siempre un pretratamiento y un tratamiento primario para reducir el paso de sedimentos al humedal que puedan generar la formación de depósitos en el sustrato y así limitar el flujo de agua. Un esquema de aplicación típico de humedales artificiales de flujo superficial para el tratamiento de aguas residuales urbanas se muestra en la Figura 4.



**Figura 4 Esquema de aplicación de humedales artificiales de flujo superficial para el tratamiento de aguas residuales urbanas**

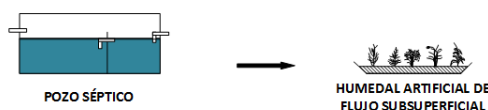
**Fuente: Adaptado de Kadlec & Wallace, 2008, p. 6**

La implementación de estos sistemas de tratamiento, también se puede observar en la recuperación de aguas provenientes de explotaciones industriales, mineras o agropecuarias. Un sistema de tratamiento de aguas residuales de una explotación agropecuaria con humedales construidos, puede incorporar una distribución en serie con una laguna anaerobia en el inicio, seguido por una laguna facultativa y un humedal

de flujo superficial al final, garantizando una calidad aceptables para hacer el vertido sobre terrenos o corrientes naturales (Kadlec & Wallace, 2008, p. 845). Este tipo de humedales están compuestos por estructuras de entrada y salida, membranas impermeabilizantes por debajo del sustrato, vegetación macrofita con alto potencial de depuración y estructuras de confinamiento como terraplenes

## 1.2.2 Humedal de flujo subsuperficial

Este tipo de humedales construidos son canales o cuencas excavadas en donde se incorpora un sustrato de alta porosidad y vegetación adecuada, buscando que el nivel del agua permanezca por debajo del nivel del suelo (EPA, 1995, p. 13). El agua residual fluye por entre el sustrato horizontal o verticalmente, eliminando contaminantes por mecanismos que difieren según la dirección del flujo. El tamaño máximo estimado de estas estructuras en función del volumen a tratar esta en torno a 7 y 9.7 ha para sistemas con capacidades de 3785 m<sup>3</sup>/d (1x10<sup>6</sup> galones por día) (Crites et al., 2014, p. 19). Estos sistemas generalmente son utilizados en el tratamiento secundario de aguas residuales procedentes de pequeñas poblaciones o para el tratamiento de efluentes industriales en el que estos humedales pueden estar precedidos por pozos sépticos o lagunas de oxidación.



**Figura 5 Esquema de aplicación típico de humedales artificiales de flujo subsuperficial de aguas domesticas**

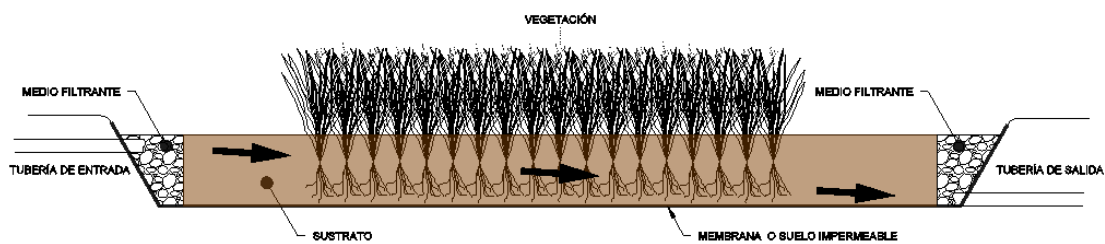
**Fuente: Adaptado de Kadlec & Wallace, 2008, p. 6**

### 1.2.2.1 Humedal de flujo subsuperficial horizontal

Este tipo de humedales son construidos con una ligera pendiente en el fondo con la intención de promover el movimiento semihorizontal del agua en el medio poroso (1%), desde el extremo de entrada hasta la salida. A lo largo de su recorrido, el agua atraviesa zonas aeróbicas, anóxicas y anaeróbicas, en los que los diversos mecanismos de remoción de contaminantes van depurando el agua (Armengol, 2016, p. 47). Los principales componentes de estas estructuras son:

- Sistemas de entrada y de salida: Usualmente se utilizan tuberías con sistemas de regulación de acceso y salida, aunque para la evacuación del agua también se utilizan vertederos.
- Membranas impermeabilizantes: Se emplean principalmente para evitar la percolación del agua residual y para evitar el acceso de agua proveniente del ascenso de los niveles freáticos. Suele utilizarse también arcilla compactada para aislar la estructura del suelo del terreno natural.
- Sustrato: El sustrato constituye el medio filtrante, suelen emplearse arenas gruesas, o gravas gruesas y delgadas, con el objeto de permitir una conductividad hidráulica adecuada. Las zonas de entrada y salida son de materiales con diámetros mayores para facilitar el reemplazo del material del sustrato en caso de presentarse obstrucciones.
- Vegetación emergente

Los componentes de los humedales de flujo horizontal se presentan la Figura 1 – 6.



**Figura 6 Componentes básicos de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal**

Fuente: Adaptado de *Constructed wetlands:: Blumberg Engineers, Germany, sff.*

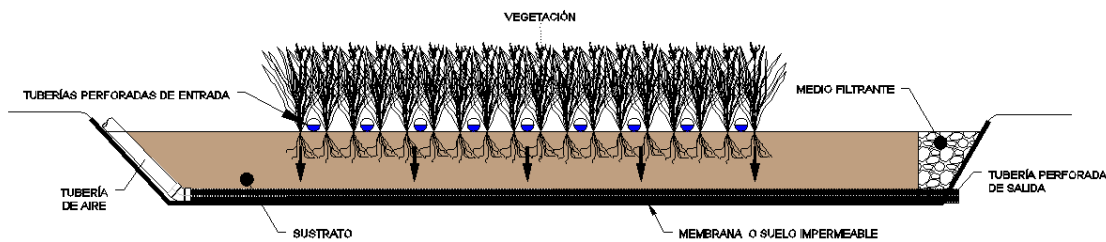
### 1.2.2.2 Humedal de flujo subsuperficial vertical

Los humedales artificiales de flujo vertical difieren de los de flujo horizontal, en la forma en la que ingresa el agua; en éstos, el agua ingresa discontinuamente (pulsos) a través de tuberías dispuestas sobre el humedal de forma longitudinal o transversal para que el agua se infiltre y percole a través del medio poroso de forma distribuida, haciendo que se activen mecanismos de remoción como oxidación bacteriana, filtración física y nitrificación (Armengol, 2016, p. 49). Los componentes de este tipo de humedales se explican a continuación, reconociendo las diferencias existentes con los humedales de flujo horizontal.

- Sistema de entrada: Usualmente son utilizadas tuberías perforadas puestas sobre el sustrato o elevadas con estructuras de soporte para evitar el contacto entre el sustrato y la tubería.



- Sistema de salida: La evacuación del agua es llevada a cabo a través de tubería de drenaje ubicada en el fondo de la estructura.
- Membranas impermeables o arcillas compactadas.
- Sustrato: arenas gruesas, o gravas gruesas y delgadas que pueden estar organizadas en capas de acuerdo con las necesidades del tratamiento.
- Vegetación emergente



**Figura 7 Componentes básicos de un humedal artificial de flujo subsuperficial vertical**

**Fuente: Adaptado de *Constructed wetlands:: Blumberg Engineers, Germany, s/f.***

### 1.2.2.3 Humedad de flujo híbrido

Debido a que en los humedales de flujo subsuperficial existen diferencias en el desempeño de remoción, la combinación en serie de ambas estructuras se implementa para mejorar las características del efluente final. Los humedales de flujo horizontal poseen un desempeño superior en la reducción de DBO y SST; sin embargo, su baja capacidad de transferencia de oxígeno al medio saturado impide que se lleve a cabo un eficiente proceso de nitrificación, lo que lleva a que se complemente el tratamiento, empleando un humedal de flujo vertical aguas abajo. Gracias a esta distribución, se mejora la calidad final de las aguas tratadas y se reduce la obstrucción del espacio poroso que experimentan los humedales de flujo vertical con el paso del tiempo (UN-HABITAT, 2008, p. 9).

## **1.3 COMPONENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES**

### **1.3.1 Afluente**

El afluente de los humedales artificiales puede provenir de diferentes lugares o explotaciones, y de acuerdo con la tipología de la estructura, puede hacer parte de las etapas secundarias o terciarias del tratamiento de aguas residuales. La utilización exclusiva de humedales artificiales como método de tratamiento de aguas residuales no es común; no obstante, cuando se implementan como estructuras únicas de depuración es conveniente, al menos, que se traten sus aguas eliminando materiales gruesos y sedimentos a través de filtros o cribas.

### **1.3.2 Sustrato**

El sustrato en los humedales artificiales constituye la matriz del tratamiento del agua; en este se encuentran los microorganismos que llevarán a cabo las diferentes acciones de remoción y transformación de contaminantes, proporcionando también los nutrientes para el desarrollo de la vegetación.

Debido a que las propiedades del suelo condicionan el desempeño de estas estructuras, la selección de materiales debe ajustarse a unos parámetros que definen las características ideales de este componente: el pH del sustrato debe estar entre 6,5 y 8,5 para poder ejercer la función de retención de metales pesados y nutrientes; la conductividad eléctrica debe permanecer por debajo de 4 dS/m, para que la actividad microbiana sea realizada adecuadamente; y la capacidad de intercambio catiónico debe estar por encima de 15 mEq/100 g de suelo (EPA, 1995, p. 29).

Otra condición de los suelos para garantizar la remoción y retención de contaminantes es la superficie de contacto entre el agua y el suelo y la capacidad de fluir al interior del sustrato; en los suelos arenosos o con gravas la velocidad de flujo es rápida, y su capacidad de retención es baja; en contraste, los suelos de texturas más finas, la velocidad del agua es baja y la retención es alta. De igual forma, el desarrollo radicular de la vegetación emergente se ve limitado por la textura del suelo, puesto que los suelos finos impiden el crecimiento normal de las raíces y aquellos con partículas más gruesas no restringen su desarrollo.

Debido a las condiciones que imponen las diferentes propiedades del suelo, la selección de materiales para conformar el sustrato está supeditada a los propósitos del tratamiento que se prevé hacer. De forma general, para los humedales artificiales de flujo superficial, los materiales suelen tener una fracción mayor de partículas finas, pero se agregan partículas más gruesas para no limitar el crecimiento radicular de las plantas y permitir que estas jueguen su papel en la retención de contaminantes. De forma contraria, en los humedales de flujo subsuperficial los suelos son gruesos (capas de arena y grava) y permiten el flujo rápido del agua, aunque su capacidad de retención y de disponibilidad de nutrientes sea baja; esto conduce a que se incorporen fracciones de suelo fino para aumentar la capacidad de intercambio catiónico, lo que servirá para que se pueda proveer de nutrientes suficientes a las plantas (Crites et al., 2014, p. 267). El tamaño promedio de las partículas sugerido es de 20 a 30 mm para humedales subsuperficiales ( $K=100,000$  m/d), modificándose para los extremos de entrada y salida donde el diámetros promedio de la partícula puede llegar a estar de 40 a 80 mm (EPA, 2000a, p. 113)

### **1.3.3 Vegetación**

La vegetación de los humedales artificiales suele ser variada y cumple diferentes funciones dentro del proceso de depuración de las aguas residuales. Al interior de estas estructuras se alojan principalmente plantas acuáticas emergentes y, en ocasiones, se permite el desarrollo de plantas flotantes en humedales de flujo superficial (Alarcón Herrera et al., 2018, p. 34). Los mecanismos con los que la vegetación aporta para el tratamiento de aguas residuales se enumeran a continuación (Lara Borrero, 1998, p. 9):

- Reducción de la velocidad de flujo del agua, contribuyendo al depósito de sólidos.
- Absorción de carbono y otros nutrientes para la formación de tejidos propios de la planta.
- Oxigenación de zonas anóxicas de la rizosfera, beneficiando a los microorganismos que realizan degradación aeróbica de sustancias orgánicas y a la nitrificación.
- Soporte para el desarrollo de microorganismos en tallos, raíces, ramas y hojas.
- Generación de macróporos que mejoran la conductividad hidráulica en el sustrato.

- Consumo de nutrientes de nitrógeno y fósforo (amonio y nitratos, y compuestos inorgánicos de fósforo).

Las plantas más comunes utilizadas en humedales artificiales pertenecen al género *Typha*, *Scyrpus*, *phragmites*, *carex* (cortaderas), entre otras.



**Fotografía 1 Enea (*Typha Latifolia*)**

**Fuente: Tomado de Díaz Espinosa et al., 2012, p. 77)**



**Fotografía 2 *Scirpus Californicus***

**Fuente: Tomada de <http://www.mostlynatives.com/plants/scirpus-californicus>**



**Fotografía 3 Carrizo (*Phragmites australis*)**

**Fuente: Tomado de <https://colombia.inaturalist.org/taxa/64237-Phragmites-australis>**

### 1.3.4 Ecología e interacciones en los humedales

Los humedales artificiales integran una gran cantidad de organismos cuyas interacciones permitirán asimilar, transformar y reciclar los constituyentes de las aguas residuales. En este grupo de organismos, las bacterias cumplen funciones metabólicas muy importantes, permitiendo eliminar contaminantes y generando compuestos asimilables por la vegetación.

Dentro del grupo de bacterias que habitan los humedales, se tienen géneros quimioautótrofos que garantizan el tratamiento de las aguas residuales al procesar varios de sus componentes más importantes como compuestos de nitrógeno, azufre, hierro, entre otros (Kadlec & Wallace, 2008, p. 61). A continuación, se listan algunos géneros involucrados en estos procesos:

*Nitrosomonas*: Bacterias nitrificantes envueltas en la oxidación de amoníaco para producir nitritos.

*Nitrobacter*: Bacterias que obtienen energía a partir de la oxidación de nitritos, generando nitratos como subproducto de este proceso.

*Beggiatoa*: Grupo de bacterias que metabolizan el sulfuro de hidrógeno, obteniendo energía en el proceso.

*Thiobacillus*: Bacterias cuyas características permiten metabolizar hierro y algunas formas de sales de azufre.

Como complemento al grupo de bacterias quimioautótrofas, las bacterias heterótrofas cumplen con la función de descomponer carbohidratos mediante procesos aeróbicos para la obtención de energía en forma de ATP y liberando agua y dióxido de carbono en el proceso. Asimismo, en los procesos anaeróbicos intervienen bacterias que reducen compuestos inorgánicos para la obtención de energía, llevando a cabo procesos como la desnitrificación (géneros *Bacillus* y *Pseudomonas*) o metanogénesis (*Methanobacterium*).

Otras poblaciones presentes en los humedales artificiales que brindan beneficios para mejorar el tratamiento son las algas y los hongos, las primeras, ayudan a fijar oxígeno disuelto en el agua, mientras que los hongos ayudan a degradar materia orgánica muerta.

La interacción de estos organismos con la vegetación macrófita, el sustrato y el agua residual definen varios factores que condicionan los procesos de depuración para cada

tipología de humedal. En los humedales artificiales de flujo libre se forma una zona anóxica en la parte baja de la lámina de agua y una aeróbica en la superficie, de forma que en la lámina se distribuirán las bacterias de acuerdo con sus características metabólicas (Alarcón Herrera et al., 2018, p. 97). En el caso de los humedales artificiales de flujo horizontal o vertical, dentro el material granular del sustrato se formarán zonas aeróbicas cerca de las raíces y otras anaeróbicas por fuera del alcance de las plantas (fondo y nivel alcanzado por el agua de la zona del sustrato en saturación).

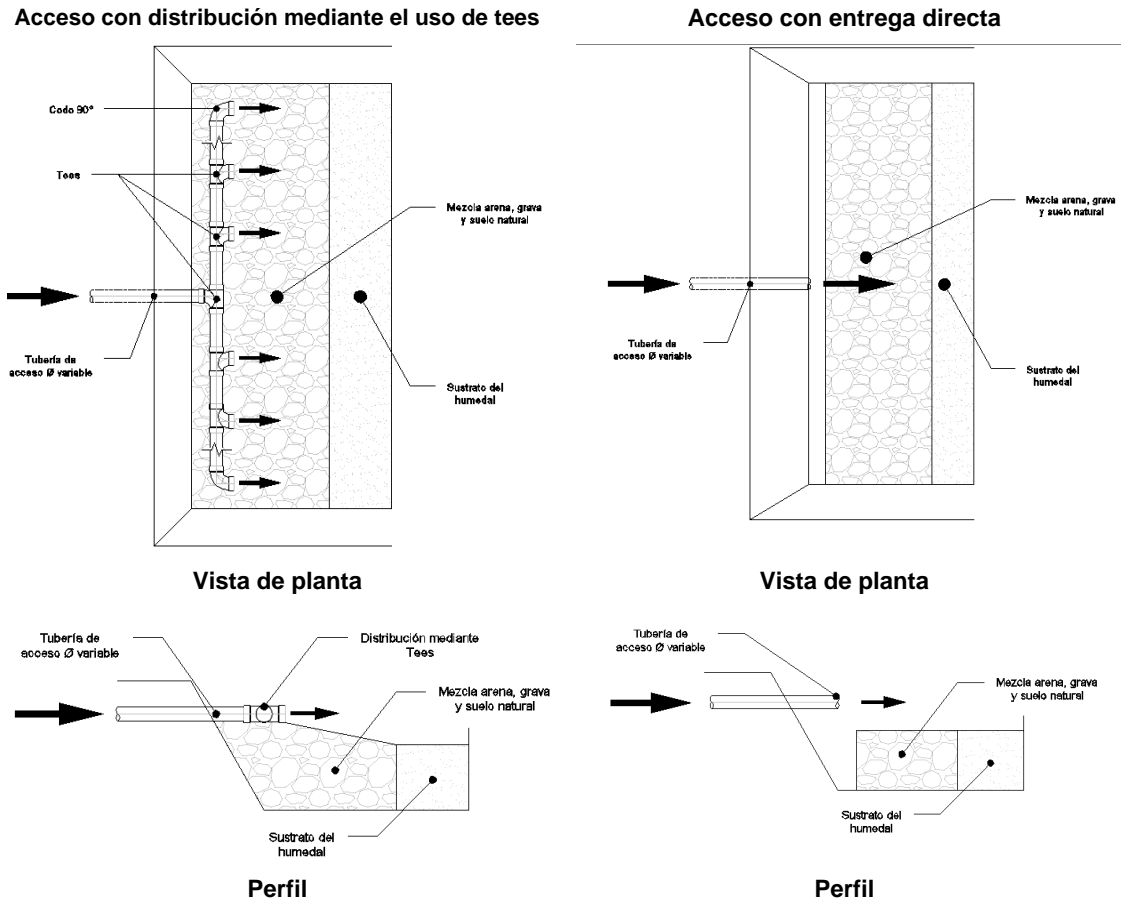
En los procesos que se desarrollan al interior de los humedales artificiales son liberadas sustancias de diferente naturaleza como nitratos, metano, nitrógeno molecular, dióxido de carbono, oxígeno, etc. De estos subproductos, los nitratos y el amonio son formas absorbidas por la planta, mientras que las otras se volatilizan o se agregan a la fase acuosa del sustrato. Otras sustancias absorbidas por la planta, presentes en el afluente son sales de fósforo, potasio, boro, compuestos férricos, entre otros. A pesar de la capacidad de las plantas para remover los compuestos mencionados, la eliminación no suele ser completa, condición que sirve para favorecer la eutrofización de los humedales de flujo superficial y por lo tanto, la alteración de la dinámica depuradora del humedal (Crites et al., 2014, p. 90).

La carga patógena que se introduce dentro de los humedales constituida por bacterias, virus, helmintos, protozoarios y hongos, es eliminada por varios mecanismos: Desinfección por efecto de los rayos ultravioletas; depredación, y sedimentación y filtración, el mecanismo de desinfección por medio del componente ultravioleta de la radiación solar se presenta en humedales de flujo superficial y está sujeta a la cantidad de sólidos en suspensión, a la absorbancia del agua y a la densidad vegetal. Dada la variada presencia de poblaciones microscópicas en los humedales, es posible encontrar interacciones de depredación que reduce significativamente colonias de bacterias como la de los rotíferos y *paramecium* con *E. Coli* o *salmonella* (Kadlec & Wallace, 2008, p. 486). El mecanismo de eliminación de agentes patógenos mediante sedimentación y filtración se da por la floculación bacteriana y por las películas generadas por las especies macrófitas, a las que se adhieren bacterias y virus (Jackson & Jackson, 2008, p. 1216).

### **1.3.5 Acceso y evacuación en el humedal**

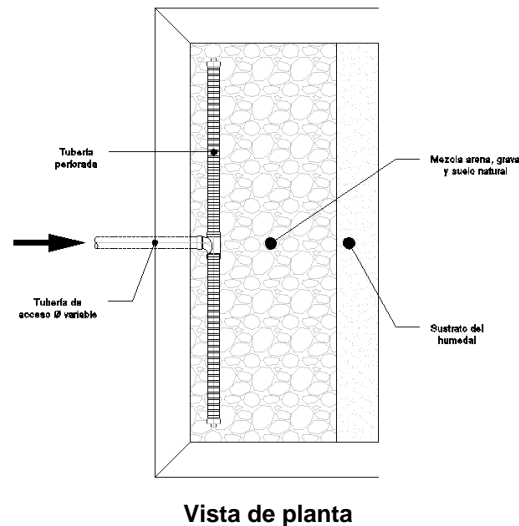
El propósito de los mecanismos de acceso y evacuación al humedal es el de permitir la entrada uniforme del afluente sobre las estructuras y realizar la salida del efluente final

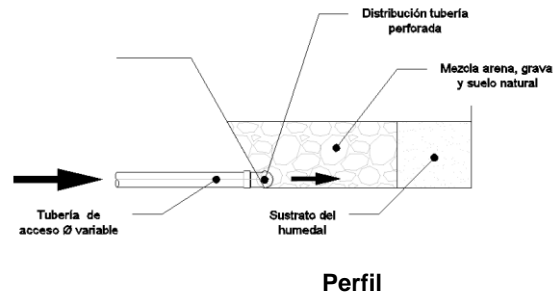
adecuadamente, cuando haya transcurrido el tiempo de residencia. Para cumplir con estas funciones, se emplean tuberías de acceso que pueden tener varias distribuciones, entre las que se destaca el acceso mediante tubería con entrega directa, tubería con distribución transversal mediante el uso de tees o perforada con distribución transversal (EPA, 1995, p. 21). El esquema de entrada se observa en las Figuras 1-8 y 1-9.



**Figura 8 Mecanismos de acceso a humedales artificiales**  
**Fuente: Adaptado de EPA, 1995, p. 21**

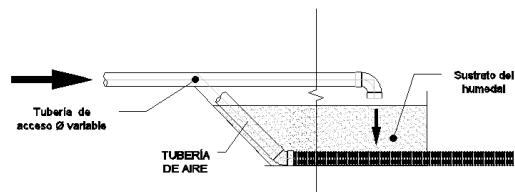
**Acceso con distribución mediante el uso de tubería perforada**





**Perfil**  
**Figura 9 Acceso al humedale mediante tubería perforada**  
**Fuente: Adaptado de EPA, 1995, p. 21**

Las diferentes entradas incluidas en las Figura 8 y 9 son utilizadas en los humedales de flujo libre; para los humedales de flujo horizontal es común el empleo de tuberías perforadas como las de la Figura 9, con variaciones en el nivel de entrega y en la disposición, de forma que se puede encontrar entregas perpendiculares a la dirección del flujo. En humedales de flujo vertical, la tubería de entrada debe permitir que el agua haga un recorrido vertical desde la superficie, por lo que esta puede localizarse sobre la estructura utilizando soportes ubicados dentro de ella o directamente sobre la superficie, aunque se puedan presentar obstrucciones posteriormente, si emplea tubería perforada.

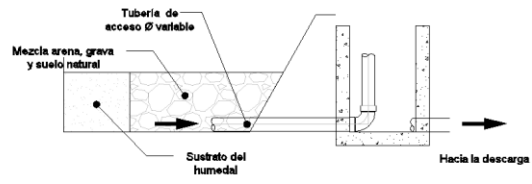


**Figura 10 Acceso directo en humedales de flujo vertical**  
**Fuente: Adaptado de *Vertical Flow Constructed Wetland | SSWM - Find Tools for Sustainable Sanitation and Water Management!***

El ingreso de las aguas residuales a los humedales puede hacerse también mediante estructuras como vertederos o zanjas, sin embargo, requieren constante mantenimiento y pueden generar malos olores en el transporte del afluente.

La evacuación de las aguas en los humedales artificiales tiene en cuenta el nivel máximo de diseño del agua y suelen ser estructuras que controlan el efluente a través de cajas, vertederos o tuberías de nivel ajustable que permiten regular la salida.





**Figura 11 Estructura de salida típica de humedales artificiales**  
**Fuente: Adaptado de UN-HABITAT, 2008, p. 34**

## **2 CRITERIOS DE DISEÑO**

### **2.1 LOCALIZACIÓN**

La selección del lugar de emplazamiento de los humedales artificiales requiere del reconocimiento de factores como la topografía y la disponibilidad de espacio, los tipos de suelos, la geología, el volumen de agua residual a tratar y la ecología del paisaje, entre otros.

#### **2.1.1 Topografía**

Para la selección del terreno destinado para la construcción de humedales artificiales se deberá considerar la localización y cercanía del sistema de conducción del afluente y la ubicación del punto de vertimiento. Adicionalmente, se identificarán zonas altas de baja pendiente por fuera de planicies de inundación, con el fin de reducir el movimiento de tierras en la excavación; contrarrestar los efectos de las crecientes de cuerpos de agua cercanos, que puedan llegar a arrastrar las aguas en tratamiento o depositar sedimentos en la estructura; y garantizar el movimiento del agua dentro del humedal por acción de la gravedad. Para ubicaciones en zonas de alta pendiente, una opción para el diseño de estos sistemas es el establecimiento de sucesivas celdas distribuidas en terrazas, permitiendo el tránsito del agua a través de caídas (Mueller et al., 2003, p. 53).

#### **2.1.2 Suelos**

Los tipos de suelos recomendables para la ubicación del humedal son aquellos con capas de textura fina en el fondo, con el fin de evitar la circulación del agua hacia el exterior de la estructura, por infiltración o hacia al interior de éste por efecto del ascenso de los niveles subsuperficiales del agua. En caso de no encontrar características de este tipo, se debe incluir un recubrimiento del fondo con membranas impermeables (Mueller et al., 2003, p. 54). El estudio de los suelos y de las características hidrogeológicas de la zona donde se asentará la estructura constituye un punto de partida importante en la definición de la viabilidad del proyecto pues permitirá reconocer la composición de los

suelos y su posible utilización para la conformación del sustrato; el nivel de la capa freática y la susceptibilidad de la zona a experimentar inundaciones (Alarcón Herrera et al., 2018, p. 39)

### 2.1.3 Hidrología

La caracterización hidrológica del humedal permitirá establecer parámetros de diseño para el dimensionamiento de la estructura, conforme a la magnitud de los caudales de entrada y de salida, de la precipitación y de la evapotranspiración; así se podrá estimar un área mínima de la estructura a través de su balance hídrico, Ecuación 1.

$$Q_o = Q_i + A \cdot (P - ET)$$

**Ecuación 1**

Donde,  $Q_i$  es el caudal del afluente ( $m^3/d$ ),  $Q_o$  es el caudal del efluente ( $m^3/d$ ),  $A$  es el área del humedal ( $m^2$ ),  $P$  es la precipitación ( $m/d$ ) y  $ET$  es la evapotranspiración ( $m/d$ ). En este balance no se consideran posibles pérdidas por infiltración o entradas por el ascenso del nivel freático, considerando que se cuenta con un aislamiento adecuado entre la estructura y el exterior. La importancia de analizar factores hidroclimatológicos como la precipitación y la evapotranspiración reside en la influencia de estos sobre el desempeño de los humedales artificiales. Por esta razón, la capacidad de almacenamiento de un humedal debe estimarse reconociendo escenarios con entradas de agua extraordinarias vía lluvia y afluente, para evitar la disminución en el tiempo de residencias o el desbordamiento de la estructura y la subsecuente contaminación en las inmediaciones de esta. Otro aspecto por analizar en el diseño son las concentraciones de contaminantes en el volumen de agua presente, ya que se pueden generar problemas por acumulación o intoxicación de los componentes biológicos del humedal (Koob et al., 1999, p. 326).

## 2.2 SELECCIÓN DEL TIPO DE HUMEDAL

Para la selección del tipo de humedal para el tratamiento de aguas residuales se recogerá información de las características fisicoquímicas del afluente y de su proveniencia; así mismo, se establecerán los objetivos del tratamiento, con lo que se

podrá proponer el tipo de estructura a construir, buscando identificar necesidades y metas en el proceso de depuración con inserción de este tipo de estructuras en fases avanzadas del tratamiento. En la Tabla 1 se ofrecen criterios para la selección del tipo de humedal. En la tabla se indica el potencial de remoción según el contaminante y la tipología de humedal, de acuerdo con una calificación de baja (B), moderada (M) y alta (A).

**Tabla 1 Potencial de remoción de contaminantes en humedales artificiales**

Tipo de Humedal	Clasificación	Costo relativo por area	Potencial de reducción de contaminantes							
			DBO <sub>5</sub>	SST	NH <sub>4</sub> -N <sub>T</sub>	NOx-N	P <sub>T</sub>	Metales	Patogenos	Organicos
Flujo superficial	Plantas emergentes	B	A	A	B	A	B	A	B	A
	Plantas flotantes	M	A	A	B	M	M	M	B	M
	Plantas sumergidas	B	M	A	A	M	A	A	B	A
Flujo subsuperficial	Flujo horizontal	A	A	A	A	A	B	A	B	A
	Flujo vertical	A	A	A	A	B	A	B	A	B

Fuente: Adaptado de Kadlec & Wallace, 2008, p. 832

## 2.2.1 Aplicaciones Potenciales

Complementando los criterios para la selección del tipo de humedal, se reconoce la efectividad de los humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales según su origen. Para el tratamiento de aguas residuales municipales es posible utilizar cualquiera de las tipologías; para las aguas provenientes de zonas residenciales, la selección entre humedales de flujo superficial o subsuperficial depende del volumen a tratar, en este caso los humedales de flujo superficial requieren menos superficie de tratamiento y por tanto la implementación se basará en la disponibilidad de zonas para el establecimiento del humedal. Para el caso de afluentes con altos contenidos de nitrógeno es recomendable la construcción de humedales de flujo vertical.

El tratamiento de aguas de origen industrial debe incluir el análisis y caracterización detallada de la descarga antes de realizar la selección del humedal artificial, debido a que en muchas ocasiones el afluente presenta bajas cantidades de nutrientes, pH por fuera de los valores ideales para que se dé la depuración o compuestos que pueden afectar el tratamiento biológico que ocurre en los humedales. Como consecuencia de la vulnerabilidad de los humedales a las aguas industriales, se prefiere emplearlos únicamente en la etapa terciaria del tratamiento de aguas residuales y en renglones productivos como: producción de papel, refinería de petróleo (aguas con contenidos de

benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, entre otros), y producción de alimentos (Crites et al., 2014, p. 288).

## 2.3 DIMENSIONAMIENTO

Inicialmente, metodologías utilizadas para el dimensionamiento de humedales se basaron en la carga superficial de los parámetros de diseño elegidos para diseñar, partiendo de las concentraciones del afluente y del efluente para definir una carga superficial máxima para seleccionar el área necesaria de tratamiento.

**Tabla 2 Carga superficial para humedales de flujo superficial y subsuperficial**

Constituyente	Concentración típica del afluente (mg/L)		Meta de tratamiento del efluente (mg/L)		Carga superficial contaminante (kg/Ha-día)	
	Flujo superficial	Flujo subsuperficial	Flujo superficial	Flujo subsuperficial	Flujo superficial	Flujo subsuperficial
<b>DBO</b>	5 a 100	30 a 175	5 a 30	10 a 30	10 - 100	67 - 157
<b>SST</b>	5 a 100	30 a 150	5 a 30	10 a 30	10 - 112	45 - 168
<b>NH<sub>3</sub>/NH<sub>4</sub></b>	2 a 20	30 a 150	1 a 10	10 a 30	1 - 4,5	45 - 168
<b>NO<sub>3</sub></b>	2 a 10	2 a 10	1 a 10	1 a 10	2,2 - 10	3,4 - 13,5
<b>Nitrógeno total</b>	2 a 20	2 a 40	1 a 10	1 a 10	2,2 - 10	3,4 - 12,3
<b>Fósforo total</b>	1 a 10	1 a 10	0,5 a 3	0,5 a 3	1 - 4,5	1 - 4,5

Fuente: Adaptado de EPA, 2000a y Rabat Blázquez, 2016, p. 36

Posteriormente, las metodologías implementadas para el dimensionamiento de humedales artificiales establecieron ecuaciones basadas en la biocinética de las reacciones de remoción que ocurren al interior de las estructuras. Dentro de estas expresiones se determinaron parámetros de cálculo propios para cada tipo de humedal artificial, teniendo en cuenta características tales como la profundidad, la porosidad, la profundidad de raíces y la temperatura, entre otros. En los siguientes apartes, se presentan las metodologías de dimensionamiento de los humedales artificiales desarrolladas por Reed, Crites, y Middlebrooks (Crites et al., 2014); y, Kadlec y Wallace (Kadlec & Wallace, 2008).

### 2.3.1 Metodología de Reed:

La metodología desarrollada por Reed consiste en la determinación del área necesaria para llevar la concentración inicial de un contaminante a una proyectada, en función de los requerimientos del vertido final. Se debe estimar el área requerida para hacer la reducción del contaminante para DBO, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, nitrógeno total, fósforo y sólidos totales.

$$A_s = \frac{Q \cdot \ln (C_o/C_e)}{K_t \cdot y \cdot n} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde A<sub>s</sub> es el área del humedal (m<sup>2</sup>); Q es el caudal de diseño (m<sup>3</sup>/d); C<sub>0</sub> es la concentración del contaminante en el afluente (mg/l); C<sub>e</sub> es la concentración del contaminante del efluente (mg/l); y es la profundidad del humedal (m, altura de la lámina de agua en los humedales de flujo superficial); n es la porosidad y K<sub>T</sub> es una constante para la reacción de primer orden, dependiente de la temperatura (d<sup>-1</sup>) y calculable a partir de la expresión K<sub>T</sub>=K<sub>20</sub>·(θ)<sup>(T-20)</sup>, en la que T es la temperatura promedio del agua en operación (°C), θ es el coeficiente de temperatura a 20 °C y K<sub>20</sub> es la constante para 20 °C (d<sup>-1</sup>). Los valores característicos de las constantes y las recomendaciones para la determinación del área según el parámetro se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3 Métodos de cálculo y valores de las variables necesarias para la determinación del área del humedal artificial para la metodología de Reed**

Parámetro de diseño	Tipo de humedal	
	Flujo superficial	Flujo subsuperficial
Remoción de DBO	K <sub>20</sub> = 0,678 d <sup>-1</sup> θ = 1,06	K <sub>20</sub> = 1,104d <sup>-1</sup> θ = 1,06
Remoción de NH <sub>4</sub>	θ = 0 a 0 °C y, θ = 1,048 a T>1 °C y K <sub>20</sub> = 0,2187 d <sup>-1</sup>	K <sub>NH</sub> = 0,01854+0,3922(r <sub>z</sub> ) <sup>2,6077</sup> θ = 1,048 K <sub>T</sub> = K <sub>NH</sub> (θ) <sup>(T-20)</sup>  Donde r <sub>z</sub> representa el desarrollo de las raíces dentro del humedales (1 equivale a completamente desarrollado y 0 a desarrollo nulo)
Remoción de NO <sub>3</sub>	:K <sub>20</sub> = 1 d <sup>-1</sup> ; si T =0 °C K <sub>20</sub> = 0 d <sup>-1</sup> θ = 1,15	K <sub>20</sub> = 1 d <sup>-1</sup> θ = 1,15
Remoción SST	Se estima la carga hidráulica superficial a partir de:  $CHS = 100 \cdot Q/A_s$	Se estima la carga hidráulica superficial a partir de:  $CHS = 100 \cdot Q/A_s$

Parámetro de diseño	Tipo de humedal	
	Flujo superficial	Flujo subsuperficial
	<p>El área correspondería a la mayor calculada para los parámetros anteriores, posteriormente se calculará la concentración de sólidos en suspensión en el efluente mediante:</p> $C_e = C_o \cdot (0,1139 + 0,00213 \cdot CHS)$ <p>Para corroborar que este valor sea menor al proyectado inicialmente.</p>	<p>El área correspondería a la mayor calculada para los parámetros anteriores, posteriormente se calculará la concentración de sólidos en suspensión en el efluente mediante:</p> $C_e = C_o \cdot (0,1058 + 0,0014 \cdot CHS)$ <p>Para corroborar que este valor sea menor al proyectado inicialmente</p>

Fuente: Adaptado de Crites et al., 2014 y Kadlec & Wallace, 2008

Para realizar el cálculo del área necesaria para la remoción de fosforo total ( $P_T$ ) se emplea la ecuación 3.

$$A_s = \frac{Q \cdot \ln(C_o/C_e)}{0,01 \cdot K_p} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde  $A_s$  es el área del humedal ( $m^2$ );  $Q$  es el caudal de diseño ( $m^3/d$ );  $C_o$  es la concentración del contaminante en el afluente ( $mg/l$ );  $C_e$  es la concentración del contaminante del efluente ( $mg/l$ ); y  $K_p$  equivale a 2,74

En cuanto al nitrógeno total ( $N_T$ ), a partir del valor de concentración de amonio residual se calcula el tiempo de retención hidráulico a partir de la expresión 4.

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T \cdot t} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde  $K_T$  es la constante de reacción de primer orden hallada para la remoción de amonio y  $C_o$  es la concentración de amonio en el afluente. Obtenido el tiempo se recalcula el  $C_e$  con el  $K_T$  del nitrato. Finalmente, para corroborar si el humedal tiene la capacidad de remover la fase residual de nitrógeno, se debe sumar la concentración del valor residual del amonio y la  $C_e$  calculada para nitratos, y si el resultado es menor a la concentración proyectada en el efluente, la magnitud del área determinada para remover amonio y nitratos es suficiente.

### 2.3.2 Metodología Kadlec y Wallace:

Replicando la metodología anterior, se determinará el área necesaria para llevar la concentración inicial de un contaminante a una proyectada, en función de los requerimientos del vertido final. Las áreas que se hallarán serán las correspondientes a los mismos contaminantes analizados en la metodología de Reed.

La expresión utilizada para determinar el área necesaria para reducir la concentración para los contaminantes del afluente es la ecuación 5.

$$A_s = \frac{365 \cdot Q}{K_t} \cdot \ln \left( \frac{C_o - C_*}{C_e - C_*} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $A_s$  es el área del humedal ( $m^2$ );  $Q$  es el caudal de diseño ( $m^3/d$ );  $C_o$  es la concentración del contaminante en el afluente ( $mg/l$ );  $C_e$  es la concentración del contaminante en el efluente ( $mg/l$ ),  $C_*$  es la concentración de fondo ( $mg/l$ ) y  $K_T$  es la constante de reacción de primer orden que se puede calcular mediante  $K_T = K_{20} \cdot (\theta)^{(T-20)}$  ( $d^{-1}$ ). Los parámetros determinados por los autores para cada tipología de humedal se incluyen en la Tabla 4.

**Tabla 4 Métodos de cálculo y valores de las variables necesarias para la determinación del área del humedal artificial para la metodología de Kadlec y Wallace**

Contaminante	Tipo de humedal					
	Flujo superficial			Flujo subsuperficial		
	$K_{20}$ (m/año)	$\theta$	$C_*$ (mg/l)	$K_{20}$ (m/año)	$\theta$	$C_*$ (mg/l)
<b>SST</b>	1000	1,065	$7,8+0,063C_o$	1000	1,065	$5,1+0,16C_o$
<b>DBO<sub>5</sub></b>	180	1	$3,5+0,053C_o$	34	1	$3,5+0,053C_o$
<b>N-NH<sub>4</sub></b>	34	1,04	0	18	1,04	0
<b>N-NO<sub>3</sub></b>	50	1,09	0	35	1,09	0
<b>N<sub>T</sub></b>	27	1,05	1,5	22	1,05	1,5
<b>P<sub>T</sub></b>	12	1	0,02	12	1	0,02

Fuente: Adaptado de Crites et al. 2014 y de Kadlec & Wallace, 2008.

Las ecuaciones anteriormente descritas son aplicables a humedales artificiales de flujo vertical, sin embargo, el dimensionamiento para esta tipología se suele hacer a partir de la definición del área necesaria para llevar a cabo el tratamiento de las aguas residuales generadas por una persona, relación que depende de las condiciones climatológicas,



siendo más elevada en regiones de condiciones más frías y alcanzando valores de 1 a 2 m<sup>2</sup> por persona en zonas cálidas (Stefanakis et al., 2014, p. 87).

### 2.3.3 Profundidad de la estructura

La profundidad de los humedales artificiales es variable según su tipología y las particularidades de la localización. En los humedales artificiales de flujo superficial la altura de la lámina de agua ideal varía de entre 0,10 y 0,50 m (Persson et al., 2000), aunque esta altura puede salirse de este rango e incrementarse en climas fríos y en el manejo de volúmenes grandes, esto podría generar limitaciones en el intercambio de oxígeno. La altura del sustrato es variable y está sujeta a la profundidad de raíces de la vegetación seleccionada.

En humedales artificiales de flujo subsuperficial la profundidad varía según el subtipo, En las estructuras de flujo horizontal se encuentran profundidades del sustrato que van de 0,30 a 0,60 m, siendo recomendable utilizar profundidades de 0,40 m para evitar la saturación e inundación por precipitaciones extraordinarias. En humedales de flujo vertical se recomienda profundidades promedio de 0,70 m para generar una adecuada nitrificación y eliminación de contaminantes orgánicos (UN-HABITAT, 2008).

### 2.3.4 Tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica hace referencia al periodo que el afluente permanece dentro de la estructura de tratamiento; en humedales artificiales, este tiempo representa la relación del volumen de tratamiento de la estructura y el caudal a tratar, la expresión empleada para su cálculo se muestra a continuación

$$TRH = \frac{A_s \cdot h \cdot \eta}{Q} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde TRH es el tiempo de retención (días);  $A_s$  es el área del humedal (m<sup>2</sup>),  $h$  es la profundidad del humedal (m),  $\eta$  es la porosidad y  $Q$  es el caudal tratado (m<sup>3</sup>/s). Para humedales artificiales, el tiempo de retención hidráulico puede llegar a comprender periodos de entre 7 y 15 días en humedales de flujo superficial, y de 3 a 14 días en humedales de flujo subsuperficial.

## 2.4 DISEÑO HIDRÁULICO

El diseño hidráulico de humedales artificiales constituye el aspecto más importante para garantizar el buen funcionamiento de la estructura, puesto que las características del flujo condicionan la eficiencia de remoción de contaminantes. En este sentido, la determinación de la velocidad de flujo de las diferentes tipologías de humedal fundamenta la selección de materiales en el sustrato, la definición del ancho y del largo de la estructura, el tipo de humedal y la distribución de la vegetación a emplear.

### 2.4.1 Humedal artificial de flujo superficial

La modelación hidráulica en un humedal de flujo superficial encuentra en la ecuación de Manning una representación aproximada para conocer las características del flujo, sin embargo, requiere incorporar a la resistencia al flujo el efecto de la vegetación, agregando un factor  $n$  para el cálculo del número de Manning a través de la expresión 6.

$$n = \frac{a}{y^{1/2}} \quad \text{Ecuación 7}$$

En donde  $y$  es la altura de la lámina (m) y  $a$  es el factor de resistencia que adquiere un valor de 0,40 s.m<sup>1/6</sup> para vegetación escasa y distribuida, 1,60 s.m<sup>1/6</sup> para humedales moderadamente densos y 6,40 s.m<sup>1/6</sup> para humedales con alta densidad vegetal (Crites et al., 2014, p. 301). Reemplazando la ecuación 6 en la expresión de Manning, se obtiene la ecuación 7.

$$v = \frac{1}{n} \cdot y^{7/6} \cdot s^{1/2} \quad \text{Ecuación 8}$$

Siendo  $s$  el gradiente hidráulico (m/m) y  $v$  la velocidad en m/s. Mediante el procesamiento de la ecuación 7 se determina la ecuación 8 para el cálculo de la longitud de un humedal rectangular.

$$L = \left( \frac{A_s \cdot y^{8/3} \cdot m^{1/2} \cdot 86.400}{Q \cdot a} \right)^{2/3} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde  $L$  es la longitud (m),  $A_s$  es el área calculada a partir de los modelos de remoción,  $m$  es la pendiente de fondo del lecho del humedal (m/m, con valores que van de 0,01 a 0,03) y  $Q$  es el caudal de diseño ( $m^3/d$ ).

## 2.4.2 Humedal de flujo subsuperficial

El comportamiento hidráulico en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal es descrito a través de la ecuación de Darcy, ecuación 10, a pesar de que no siempre se consiga mantener un sistema con flujo constante y uniforme, por la heterogeneidad en la porosidad del sustrato, la obstrucción de la vegetación, el aporte de agua por lluvia o la salida vía evapotranspiración (Rabat Blázquez, 2016, p. 49).

$$Q = K_s \cdot A_c \cdot s \quad \text{Ecuación 10}$$

En la ecuación de Darcy empleada para humedales subsuperficiales  $Q$  es el caudal promedio entre el caudal afluente y efluente ( $m^3/d$ );  $K_s$  es la conductividad hidráulica (m/d);  $A_c$  es el área de la sección transversal perpendicular a la dirección del flujo ( $m^2$ ), y  $s$  el gradiente hidráulico (m/m). Integrando la ecuación de Darcy con la geometría del humedal se obtiene la expresión 10 que permite calcular el ancho de la estructura.

$$W = \frac{1}{y} \cdot \left( \frac{Q \cdot A_s}{m \cdot K_s} \right)^{0.5} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde  $W$  es el ancho del humedal (m),  $Q$  es el caudal de diseño ( $m^3/d$ ),  $A_s$  es el área calculada a partir de los modelos de remoción,  $m$  es la pendiente de fondo del lecho del humedal (m/m, con valores que van de 0,05 a 0,2) y  $K_s$  es la conductividad hidráulica (m/d) (Crites et al., 2014, p. 337).

### 2.4.2.1 Humedales artificiales de flujo vertical

Para los humedales artificiales de flujo vertical se debe tener en cuenta que la entrada del afluente se lleva a cabo mediante el control de pulsos de caudales grandes que saturan el medio poroso, llegando a generar láminas delgadas en la superficie. Gracias a las características del sustrato, el agua va drenando hacia abajo y ocupando los poros por un periodo de tiempo establecido, hasta que el agua abandona la estructura dejando

que el espacio poroso se llene de aire y genere condiciones aeróbicas nuevamente. El ciclo de funcionamiento de esta estructura se compone por dos etapas: entrada del afluente y la recesión que permite el drenaje de las aguas residuales (Stefanakis et al., 2014, p. 27). Dependiendo de las características de los afluentes y del dimensionamiento del humedal se pueden llevar a cabo varios pulsos al día o pueden existir pulsos con duraciones de varios días. Entendido, el funcionamiento de estas estructuras, el diseño hidráulico solo se ocupará de comprobar que los flujos de entrada no sean superiores a los flujos de infiltración, teniendo en cuenta que en la medida que se utilice la estructura, la conductividad hidráulica se reduce por obstrucción de los poros, por lo que se sugiere decrementar este coeficiente en un 40% para el cálculo del caudal de filtración empleando la Ecuación 10, teniendo en cuenta que el área corresponde al área superficial calculada para el dimensionamiento (Delgadillo et al., 2010, p. 39).

## **2.5 INVERSIÓN**

Los costos de inversión inicial para la construcción de humedales artificiales son variables para cada región y pueden incrementarse o disminuir en función del acceso a maquinaria y al material que compone el sustrato. No obstante, se asume que la suma de los costos de excavación y de conformación del sustrato equivalen aproximadamente al 50-60 % del valor de la inversión; la geomembrana y su instalación pueden alcanzar entre el 15 y 25 % del total de los costos iniciales del proyecto, mientras que el valor de compra e instalación de tuberías, compra y siembra de vegetación, conformación de terraplenes y actividades complementarias pueden calcularse como el 25% de la inversión (Vymazal & Kröpfelová, 2008a, p. 273).

Sobre los costos iniciales por área de los humedales artificiales en arreglos de construcción convencionales, para Colombia estos alcanzan valores promedio a los US\$51/m<sup>2</sup> (ajustado por inflación a 2020), conforme con los análisis de costos unitarios para sistemas de tratamiento naturales hecho por Patiño (2012). En Centroamérica estos valores pueden ser cercanos a los US\$46/m<sup>2</sup> para tipologías con capacidad para tratar los efluentes de poblaciones de entre 1000 y 9000 personas.(Gauss, 2008, p. 33).

### **3 CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES**

A partir de la información suministrada en el levantamiento topográfico de la zona definida para localización de la estructura, se establece la forma del humedal, teniendo en cuenta que, para minimizar el volumen de movimiento de tierra en la excavación y nivelación, el eje de la pendiente longitudinal de la estructura debe coincidir con la dirección de la pendiente dominante del terreno natural. Una vez establecida la forma y dirección del flujo de la estructura, definiendo accesos y salidas, se puede delinear los límites del proyecto conforme al área superficial calculada para el tratamiento de las aguas (EPA, 2000a, p. 122).

Seguido a la definición de la forma, se organizarán los aspectos logísticos de la obra como accesos viales, requerimiento de maquinaria, fuentes de energía, sitios de disposición de material sobrante y de préstamo de material para el sustrato, medidas para el manejo del agua durante la construcción, entre otras actividades relacionadas con las funciones del ingeniero residente,

#### **3.1 PREPARACIÓN DEL TERRENO**

La preparación del terreno comprende, inicialmente, el desmonte del área donde se ejecutará el proyecto, eliminando pastos, arbustos y árboles que puedan afectar la ejecución de los trabajos de construcción. Posteriormente, se hace un replanteo del proyecto y se traza el diseño final del humedal incorporando datos de los taludes de las paredes y de los mecanismos de acceso y salida (cotas y dimensiones de tuberías o canales de conducción) (Alarcón Herrera et al., 2018, p. 40).

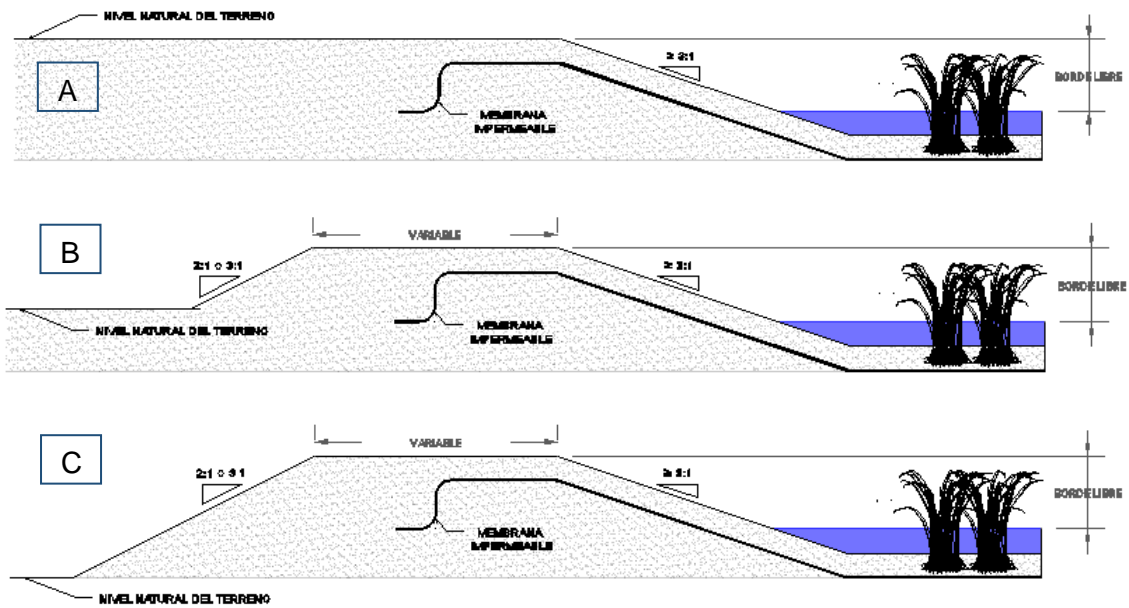
La profundidad de la estructura además de la determinada para el tratamiento de las aguas residuales deberá contemplar la lámina que los volúmenes de excesos pueden generar por acción del aumento del caudal afluente o por el incremento de las lluvias, y la reducción del volumen de la estructura por efecto de la acumulación de sedimentos y crecimiento vegetal, que suele estar alrededor de 1 cm/año. Las profundidades totales más usuales de estas estructuras van de 1 a 1,5 m en los que el borde libre puede llegar a alcanzar el 60% de esta altura (Kadlec & Wallace, 2008, p. 668).

La construcción del humedal debe incluir la nivelación del terreno y la compactación del suelo de soporte, con lo que se garantiza el buen desempeño en el tratamiento de las aguas residuales, al permitir una buena distribución del agua en el fondo de la estructura, y evitando así que se presenten obstrucciones en el flujo, las cuales inducen trayectorias preferenciales. Adicionalmente, la nivelación del fondo del humedal asegura que la instalación de membranas plásticas no se vea afectada por las cargas que soportará una vez se deposite el sustrato o durante la instalación por perforaciones (EPA, 2000a, p. 122).

Para llevar a cabo la nivelación se requiere mantener un balance entre los cortes y rellenos en el terreno con objeto de reducir el movimiento de tierra, no obstante, en ocasiones esto no es posible y se hace necesario subdividir el humedal en celdas independientes conectadas a través de estructuras como cámaras o mediante tuberías (sifones), constituyendo sistemas de tratamiento en serie o en paralelo.

### **3.2 TERRAPLENES Y PAREDES INTERIORES**

Para el proyecto de construcción de humedales artificiales de flujo superficial, se puede o no requerir hacer excavación del terreno de acuerdo con las definiciones del diseño, puesto que existen 3 opciones para la construcción: hacer una excavación para mantener el humedal completamente bajo el nivel de la superficie (Figura 12, A); excavar para conformar los terraplenes sobre el nivel de la superficie con una parte de la estructura por debajo del terreno (Figura 12, B); o estableciendo la superficie del terreno como fondo del humedal sin hacer excavación y construyendo los terraplenes a partir de material externo (Figura 12 C); para todos estos casos, es necesario tener en consideración el diagnóstico geotécnico sobre la estabilidad de los materiales utilizados en la construcción de los taludes de las paredes interiores del humedal o de los terraplenes que rodearán la fosa de la estructura, cuya función será la de mantener y direccionar el flujo dentro de la estructura; En la mayoría de los casos, para el talud exterior del terraplén se emplea valores de entre 2:1 a 3:1 y de 3:1 o más para los taludes interiores.



**Figura 12 Variantes de excavación y taludes típicos en terraplenes para HHAFFS**

Fuente: Adaptado de EPA, 2000a, p. 123

Para el caso de los terraplenes que sirven para separar celdas, los taludes interiores están dentro del rango de 2:1 a 3:1 con ancho de cresta variable pero no mayor a 1 metro (Kadlec & Wallace, 2008, p. 669).

Para la construcción de humedales de flujo subsuperficial, la excavación se lleva a cabo de forma similar a la que se realiza para la otra tipología de humedal, manteniendo taludes y conformación de terraplenes similares, pero reduciendo los bordes libres en función de los volúmenes de tratamiento.

### 3.2.1 Paredes de contención verticales

Como alternativa a la construcción de terraplenes, se adelanta la construcción de muros verticales con materiales como madera, ladrillo o concreto. Las ventajas de este sistema constructivo reside en la reducción en el movimiento de tierras y en la obtención de una estructura rígida y aislada a través de un proceso de impermeabilización más eficaz (Kadlec & Wallace, 2008, p. 762).

### **3.3 IMPERMEABILIZACIÓN**

En la impermeabilización de humedales artificiales se utilizan membranas plásticas o arcillas como material de aislamiento. De estas dos alternativas, la utilización de membranas es la que mejores resultados genera en el propósito de crear una barrera entre la estructura y el medio externo. Sin embargo, las geomembranas pueden resultar más costosas y su instalación exige especial cuidado, para evitar roturas.

La instalación de membranas impermeabilizantes requiere de la nivelación del fondo del humedal, de manera similar a la forma que se realiza en el proceso de adecuación de la subrasante en una carretera (Lara Borrero, 1998, p. 28). Una vez hecho el alisado del fondo del humedal estableciendo la pendiente del fondo, se adelanta el proceso de instalación de la membrana, desplegándola en dirección de la pendiente del eje longitudinal y extendiéndola sobre los taludes de las paredes interiores. El anclaje se realiza abriendo una zanja perimetral hasta donde debe prolongarse la membrana para que posteriormente sea tapada, atrapándola por el peso del relleno (Delgadillo et al., 2010, p. 45). Los materiales más usuales de las membranas impermeables empleadas en humedales artificiales son Cloruro de polivinilo (PVC), Polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP), de espesores mayores o iguales a 1 mm, que garantizan la resistencia necesaria para soportar las etapas de llenado con el sustrato y de siembra de la vegetación (Alarcón Herrera et al., 2018, p. 195).

El uso de arcillas para la impermeabilización es conveniente cuando se puede acceder a ellas con facilidad y cuando se puede garantizar su compactación mediante el uso de maquinaria. El espesor de estas arcillas debe alcanzar al menos 0.30 m para formar una barrera hidráulica y ser suficientemente compactada para evitar la penetración de raíces (Crites et al., 2014, p. 316).

### **3.4 INSTALACIÓN DE TUBERÍAS**

Es recomendable, para humedales de flujo superficial y humedales subsuperficiales de flujo horizontal, los sistemas de distribución que reparten el agua sobre el sustrato de forma uniforme, como el mostrado en la Figura 9. En el caso de los humedales subsuperficiales de flujo vertical se emplea el mecanismo de acceso mostrado en la Figura 10. La tubería de acceso al humedal puede tener posiciones diferentes a las de las figuras indicadas dentro de la estructura, pudiendo asumir diferentes niveles, incluso



desde el fondo de la estructura para elevar la lámina de agua, la cual se puede regular para impedir anegamientos mediante el ajuste de la estructura de salida en humedales de flujo subsuperficial. Para humedales de flujo vertical esta disposición produce un flujo ascendente que sirve para el tratamiento de aguas residuales que requieren un tiempo de retención mayor como los efluentes con alto contenido de cloro (Stefanakis et al., 2014, p. 32). La construcción del sistema de entrada y de salida de agua se realizará según las especificaciones del diseño. Ambas tuberías deben ser contempladas desde el inicio de la obra para incorporar su instalación desde la excavación o luego de la impermeabilización. El mecanismo de distribución transversal del agua puede realizarse en estas mismas etapas o al final del llenado de la estructura con el sustrato, si se tiene previsto entregar el afluente desde la superficie.

El sistema de drenaje de los humedales subsuperficiales emplea tubería perforada en el fondo de la estructura que puede ubicarse al extremo final en humedales de flujo horizontal y a lo largo del eje longitudinal en forma de espina de pescado en humedales de flujo vertical, cuyo sentido irá en dirección a la salida de la estructura (Delgadillo et al., 2010, p. 44). Para el drenaje debe incluirse la instalación de tuberías aireación que permitan el acceso de aire al sistema, de manera que estas deberán ser incorporadas desde que se extiende la tubería perforada en el fondo de la estructura.

### **3.5 CONFORMACIÓN DEL SUSTRATO**

Esta etapa tiene lugar una vez se termina con la impermeabilización del fondo de la estructura; para humedales de flujo superficial esta actividad consiste en la distribución del suelo que servirá de soporte para la vegetación. El espesor de la capa de suelo debe ser de entre 0,20 y 0,30 m y puede ser suelo proveniente de la excavación, si es de tipo franco y proporciona los elementos necesarios para que se produzca un buen desarrollo de la vegetación. En el llenado de la estructura con el material del sustrato, se debe asegurar que el uso de maquinaria no vaya a afectar la impermeabilización y que no haya sobrecarga en ningún punto del fondo, por lo cual es necesario hacer una buena distribución del material buscando que el espesor de la capa sea uniforme en todo el espacio (Kadlec & Wallace, 2008, p. 681).

En los humedales artificiales de flujo subsuperficial es importante que el sustrato esté limpio de materiales que puedan acelerar el proceso de taponamiento del espacio poroso, por lo que se recomienda que sean seleccionados adecuadamente y sometidos a una limpieza intensiva antes de hacer su instalación (UN-HABITAT, 2008, p. 37).

Considerando que en los humedales de flujo vertical puede concebirse con un arreglo de capas de diferentes materiales en el perfil del sustrato, es necesario plantear estrategias de llenado que permitan hacer uso de maquinaria, puesto que esta operación es crítica, dados los volúmenes y las necesidades de distribución en la construcción de la estructura, por lo cual se suele reducir el ancho del humedal para facilitar la colocación de materiales desde algunos de sus márgenes con excavadoras.

Como medida de protección de la membrana impermeabilizante se recomienda poner una capa de arena de 10 cm de espesor sobre esta, con el fin de distribuir mejor los pesos de las gravas de capas superiores (Delgadillo et al., 2010, p. 44).

### **3.6 SIEMBRA DE VEGETACIÓN**

En la siembra de la vegetación del humedal es necesario hacer una adecuada selección de las plantas que se usarán. Los factores determinantes en el análisis de especies vegetales para hacer la selección son: hidrología, clima, costo y disponibilidad, método de siembra, tamaño de la planta, propósitos de la depuración y mantenimiento (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1996, p. 47).

La siembra de la vegetación de un humedal se realiza sobre el sustrato mediante el trasplante manual o mecánico de plantas, esquejes, rizomas o raíces, o a través de la siembra directa de semillas. Gracias a las ventajas que ofrece la siembra de rizomas y la propagación por esquejes, estos métodos son los más extendidos para el establecimiento de la vegetación. Entre otras ventajas, estos sistemas de siembra garantizan que las plantas tengan una mayor resistencia a los impactos del trasplante; faciliten la obtención del material vegetal, el cual se puede hacer a partir de humedales artificiales o naturales; y se garantice el desarrollo de un mayor número de individuos, en comparación con los otros métodos de siembra (UN-HABITAT, 2008, p. 40).

Para conseguir una adecuada adaptación de las plantas al medio artificial de tratamiento, se requiere ofrecer un ambiente inicial que evite que las plantas experimenten excesivo calor o frío, manteniendo un sustrato húmedo sin que llegue a saturarse, pues se puede afectar las plantas que están en etapa de enraizamiento o establecimiento de los rizomas (Ellis et al., 2003, p. 26). El volumen de agua en la entrada de los humedales de flujo superficial podrá incrementarse gradualmente en el tiempo, generando láminas de agua temporales de poco espesor que proporcionarán agua y nutrientes, pero que no afectarán prolongadamente a la planta en crecimiento.

En esta misma etapa, en los humedales de flujo subsuperficial, el agua proporcionada deberá alcanzar las raíces de las plantas sin que se produzca saturación prolongada para que estas puedan captar los elementos necesarios para su desarrollo; progresivamente el nivel del agua se irá bajando en consecuencia del crecimiento de las raíces.

La densidad de siembra en los humedales artificiales está en el rango de 1000 a 40000 plantas/ha, siendo ideal utilizar distancias de siembra de entre 0.30 m y 1 m (EPA, 2000a, p. 128). Algunas especies tienen un crecimiento y propagación rápida, que aumenta la densidad concebida en el diseño, al terminar el periodo de establecimiento.

## **4 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES**

La entrada en operación de los humedales demanda la ejecución de una serie de actividades que aseguren el buen desempeño de esta estructura durante su vida útil. Como parte de este conjunto de actividades, aquellas vinculadas con el mantenimiento se harán tras la realización de un monitoreo en el que se revisarán los componentes constructivos del humedal y su desempeño.

### **4.1 PREPARACIÓN**

La preparación del humedal que entra en operación se enfoca en la regulación de los niveles del agua, con objeto de favorecer el crecimiento de las plantas recién plantadas. El humedal entra en funcionamiento en esta etapa, aunque la vegetación no esté completamente desarrollada y su desempeño sea menor al que se plantea en el diseño, puesto que su objetivo sólo se conseguirá cuando la vegetación esté completamente establecida luego de 6 meses o dos años, dependiendo de las especies sembradas y de las condiciones climáticas.

### **4.2 MONITOREO DEL FLUJO Y DE LOS NIVELES DEL AGUA**

El monitoreo de los flujos y de los niveles de agua permitirá identificar diferentes problemas que se pueden dar dentro de los humedales. La variación en los flujos de entrada genera cambios cuyas consecuencias directas son incrementos o reducciones en los tiempos de retención, produciendo alteraciones en los procesos de remoción de nutrientes y contaminantes, haciéndolos menos eficaces. En el caso de evidenciar cambios en los niveles de agua dentro de la estructura, será necesario identificar las posibles causas, revisando posibles fugas, obstrucciones al interior del sustrato o afectaciones en los taludes (UN-HABITAT, 2008, p. 48).

### **4.3 MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA**

El análisis de las características de la calidad del agua del afluente y del efluente se llevará a cabo desde el momento de entrada en operación del humedal y durante un tiempo que se extenderá en función de los resultados de los análisis; esta actividad permitirá evaluar la eficiencia de la estructura e identificar problemas iniciales generados en la construcción. El monitoreo de la calidad del agua una vez establecida la estructuras, se hará periódicamente (1 a 5 veces al año) con el fin de conocer la evolución de la capacidad de remoción del humedal y de reunir información suficiente para desarrollar modelos propios que sirvan para proyectar características del efluente frente a fluctuaciones en las cargas del afluente (Davidsson et al., 2000, p. 19).

### **4.4 MANEJO DE VEGETACIÓN**

El objeto del control de la vegetación es el de mantener un funcionamiento óptimo del humedal cuando se ve afectado por las poblaciones vegetales que en él se asientan. El manejo de la vegetación en los humedales se procura realizar a través de diferentes métodos, incluyendo: ajuste de niveles de agua, eliminación de vegetación diferente a la establecida en el diseño, y cosecha de material vegetal. La más importante de estas actividades es el ajuste de la lámina de agua, pues permite hacer control del crecimiento de las plantas emergentes del humedal y previene que prosperen especies vegetales no deseadas. Un manejo atento y adecuado de los niveles del agua en humedales de ambas tipologías sirve como estrategia de control de la vegetación, llevando a prescindir de las actividades de poda y de eliminación de plantas invasoras (UN-HABITAT, 2008, p. 48).

La cosecha de la vegetación del humedal puede servir para mejorar las condiciones hidráulicas de funcionamiento, pero no para mejorar su potencial de remoción de contaminantes (Ellis et al., 2003, p. 49). La eliminación de plantas ajenas al diseño del humedal artificial, se recomienda para evitar la reducción en la capacidad de tratamiento del humedal y para mantener las condiciones hidráulicas en la estructura (Lara Borrero, 1998, p. 96).

## **4.5 CONTROL DE INSECTOS**

La proliferación de moscos es una situación potencialmente crítica en humedales de flujo superficial. Los métodos de control más utilizados emplean estrategias de control biológico que permiten el crecimiento de las poblaciones de especies depredadoras de mosquitos. El uso de insecticidas puede llegar a ser inocuo para el control de estos insectos y el incremento en la dosis puede afectar otras especies animales como aves, anfibios u otros insectos, por lo que no se recomienda su uso, a menos de que sea completamente necesario. Las actividades relacionadas con el mejoramiento de las condiciones hidráulicas del agua al interior del humedal, también sirven para evitar el desarrollo de larvas las cuales encuentran un medio idóneo para su desarrollo en aguas estancadas (Crites et al., 2014, p. 324).

## **4.6 MANTENIMIENTO DE ESTRUCTURAS**

El mantenimiento de estructuras comprende todas las operaciones envueltas en la preservación de los mecanismos de entrada y de salida, de terraplenes y de taludes de paredes interiores. Sobre las estructuras de entrada se debe hacer chequeos semanales para identificar y quitar bloqueos en la tubería por obstrucción de sedimentos; este monitoreo permite determinar si se está haciendo un deficiente manejo en los procesos primarios o secundarios que preceden el tratamiento en los humedales artificiales (Ellis et al., 2003, p. 44). En las estructuras de salida de los humedales pueden ocurrir obstrucciones por acumulación de material vegetal, tales como ramas y hojas; en este caso se recomienda hacer monitoreo semanal de elementos como tuberías o estructuras como vertederos de salida para realizar la eliminación de los residuos (Kadlec & Wallace, 2008, p. 788). Complementando las actividades de mantenimiento en los sistemas de acceso y evacuación de aguas, anualmente, deberá llevarse a cabo la limpieza de tuberías retirando tapones y agregando limpiadores que ayuden a remover sedimentos y obstrucciones en su interior (EPA, 2000a, p. 129).

Los terraplenes y taludes de paredes internas de los humedales deben mantener las características iniciales de construcción por lo que cualquier alteración debe ser corregida rápidamente para impedir que la estructura colapse; las acciones que se pueden llevar a cabo para prevenir daños estructurales en los humedales artificiales son: monitoreo de zonas de afectación por erosión en taludes y limpieza de taludes

evitando el crecimiento de especies vegetales que puedan crecer y generar inestabilidad. Sobre terraplenes externos e interiores de separación, también se realizan actividades de mantenimiento de bermas e inspección de pies de los taludes exteriores (Kadlec & Wallace, 2008, p. 786)

#### **4.7 TAPONAMIENTO Y SEDIMENTACIÓN**

Frente a los problemas de sedimentación que ocurren en el acceso de los humedales de flujo superficial, generados por la acreción de materiales y el subsecuente aumento del nivel de fondo, será necesario remover la vegetación y el sustrato de la zona afectada, para reemplazarlo completamente. Realizando este reemplazo, se espera recuperar las características hidráulicas del humedal y evitar que se genere aumento de velocidades al inicio de la estructura y de rutas que pueden inducir la formación de canales.

El taponamiento del espacio poroso en humedales artificiales de flujo subsuperficial también exige el reemplazo de sustrato y vegetación de la zona afectada; este problema se refleja en el ascenso del nivel del agua, llegando a evidenciarse flujo superficial. Algunas alternativas más económicas a la dada inicialmente para el manejo del taponamiento, son el lavado del sustrato y la resiembra del material vegetal, o la utilización de sustancias químicas que ayudan a remover los biosólidos como peróxido de hidrogeno ( $H_2O_2$ ).

En los humedales subsuperficiales de flujo vertical, la acumulación de partículas sólidas sobre la superficie del sustrato deberá ser removida al menos cada 8 o 10 años; esta actividad es inherente a la operación del humedal y compromete el funcionamiento de la estructura en caso de no realizarlo (Kadlec & Wallace, 2008, p. 790).

## 5 ANALISIS DEL DESEMPEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES EMPLEADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los humedales artificiales presentan desempeños variables, según lo reflejado en los análisis de calidad de agua de afluentes y efluentes reportados en las diferentes fuentes consultadas. En general, el desempeño de los humedales en la reducción de la DBO<sub>5</sub> y de los SST suele ser alto, ya que los mecanismos involucrados en la eliminación de estos contaminantes ocurren en la parte inicial de los humedales, sin llegar a requerir de vastas áreas o tiempos de retención prolongados. No obstante, en los humedales, la eliminación de nitrógeno, metales y patógenos se muestra variable, pues su capacidad de remoción está en función de las condiciones climáticas, de las concentraciones en el afluente, la disponibilidad de materia orgánica y al tiempo de retención. Así mismo, ocurre para la capacidad de remoción de fósforo, la cual suele ser variable y a la vez reducida en humedales artificiales. A continuación, se resumen algunos porcentajes de remoción esperados para humedales artificiales:

**Tabla 5 Porcentajes de remoción promedio en humedales superficiales**

Parámetro	Humedal flujo subsuperficial		Humedal flujo superficial*
	Flujo vertical	Flujo horizontal	
<b>DBO<sub>5</sub></b>	88%	85%	71%
<b>SST</b>	77%	80%	68%
<b>P<sub>TOTAL</sub></b>	48%	44%	46%
<b>N<sub>TOTAL</sub></b>	44%	51%	56%
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	79%	49%	52%
<b>Coliformes</b>	98%	48%	27%

Fuente. Adaptado de Vymazal & Kröpfelová, 2008, pp. 159, 186 y 325

\*Humedal con vegetación emergente

Los valores reunidos en el cuadro anterior corresponden a los porcentajes de remoción de humedales alrededor del mundo en locaciones donde su uso está más difundido, con condiciones de mantenimiento y control de la vegetación, del sustrato y del flujo de aguas residuales.

Con objeto de identificar y conocer con más detalle el desempeño en los humedales artificiales en zonas tropicales, a continuación se muestran 5 experiencias en sistemas de tratamiento de aguas residuales en los que se han implementado estas estructuras.



## 5.1 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON HUMEDALES ARTIFICIALES EN ZONAS MONTAÑOSAS

La Universidad de Portsmouth de Inglaterra y centro de entrenamiento Fundación Manuel Mejía diseñaron un sistema de tratamiento de aguas residuales, cuya localización imponía limitantes en el uso del espacio por la topografía quebrada de la zona. Partiendo de esta condición, los investigadores de la Universidad de Portsmouth diseñaron un sistema de depuración integrado por una serie de estructuras sanitarias no convencionales destinadas para realizar tratamiento primario, secundario y terciario.

En primer lugar, se construyó una estructura de filtrado de partículas gruesas, compuesto por una cámara de acceso y un gavión filtrante de piedras de 10 cm de diámetro en las zonas superiores y de 2 cm en la parte inferior de cada nivel. Esta estructura fue diseñada para ser localizada sobre las pendientes más fuertes del terreno y para reproducir algunos de los procesos de los humedales artificiales de flujo vertical, mejorando su capacidad de filtrado de partículas gruesas. En la figura 5-1 se presenta un esquema de la estructura de filtrado del tratamiento primario.

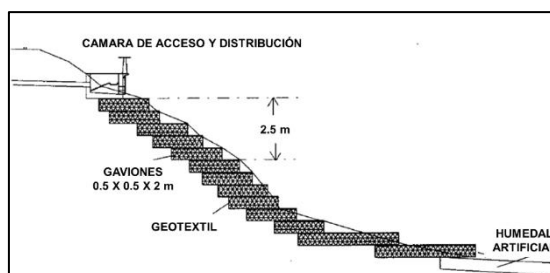
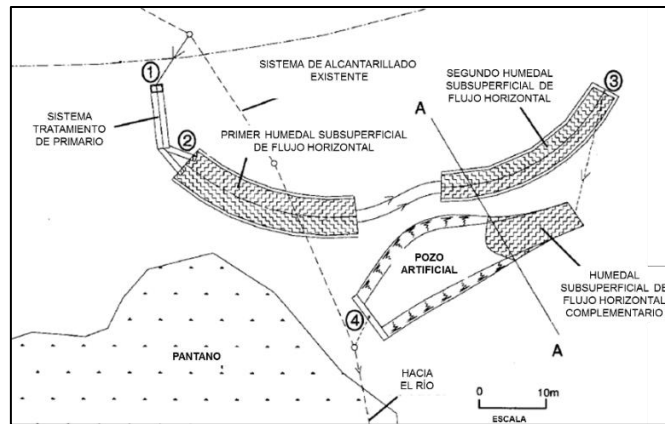


Figura 13 Sección longitudinal de la estructura de gaviones de filtrado

Fuente. Adaptado de Williams et al., 1999

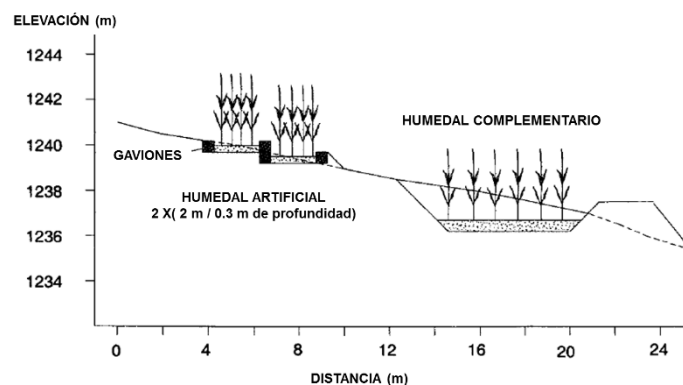
Una vez el agua atraviesa la estructura de filtrado de gaviones, esta ingresa al tratamiento secundario que se efectúa en 2 humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal de baja profundidad en una distribución en serie. Finalmente, el tratamiento culmina con una laguna de estabilización para reducir el remanente de coliformes fecales que persisten a la salida de los humedales. La profundidad de esta estructura es de 0,90 m y su dimensionamiento responde a la necesidad de garantizar un tiempo de retención de 5 días. En la Figura 14, se muestra la distribución del sistema de tratamiento concebido para verter el agua depurada directamente sobre el río que pasa en cercanías al predio en el que se desarrolló el proyecto



**Figura 14 Plano del sistema de tratamiento de aguas residuales**  
Fuente. Adaptado de Williams et al., 1999

### 5.1.1 Humedales artificiales

Para el diseño de los humedales artificiales en el caso de estudio analizado, fue necesario adaptar las estructuras convencionales de estos sistemas a las condiciones del terreno, incorporando una distribución en la que se ajustaran los ejes longitudinales con el contorno de la topografía. Definida la distribución en planta, se requirió dividir el área de tratamiento calculada en 2 humedales en serie compuestos por 2 celdas paralelas y oblongas, separadas por un muro de gavión; asimismo, las paredes externas de los humedales fueron construidas con muros de gavión y aislados mediante la instalación de una geomembrana en el fondo y en los lados. En la Figura 15 se presenta la sección transversal, correspondiente al corte A-A indicado en la Figura 14



**Figura 15 Corte A-A del sistema de tratamiento aguas residuales**  
Fuente. Adaptado de (Williams et al., 1999)

En el dimensionamiento de los humedales se tuvo en cuenta los aportes por escorrentía y lluvia que podrían darse por condiciones climáticas extremas, de forma que el caudal a tratar es mayor al caudal promedio del efluente. Las características generales del diseño del humedal se recopilan en la Tabla 6.

**Tabla 6 Características generales del sistema y de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en zonas montañosas**

Departamento	Caldas
Municipio	Chinchiná
Descripción	2 humedales de flujo subsuperficial distribuidos en serie y compuestos por 2 celdas paralelas cada uno
Población	No definida
Origen Efluente	Aguas residuales domesticas provenientes del centro de entrenamiento
Tipo de humedal y características	Humedales de flujo subsuperficial de flujo horizontal
Temperatura promedio	20.8 °C
Precipitación media anual	2656 mm
Caudal del afluente	45 l/min (64.8 m <sup>3</sup> /d), con capacidad para 90 l/min (129,6 m <sup>3</sup> /d) en periodos de alta pluviosidad
Volumen	- Primer humedal: 54 m <sup>3</sup> - Segundo humedal: 39.6 m <sup>3</sup>
Área	- Primer humedal artificial: 180 m <sup>2</sup> (2 humedales paralelos de 90 m <sup>2</sup> cada uno, de 30 m de longitud y 3 m de ancho). - Segundo humedal artificial: 132 m <sup>2</sup> (2 humedales paralelos de 66 m <sup>2</sup> cada uno, de 36 m de longitud y 2 m de ancho).
Profundidad	0.3 m en ambos humedales
Vegetación	Typha angustifolia
Sustrato	Grava con diámetros de entre 10 y 20 mm

Fuente. Adaptado de Williams et al., 1999

### 5.1.2 Desempeño en el funcionamiento del humedal

Para adelantar la evaluación del sistema, se realizaron muestreos en 4 puntos del sistema, como lo indica la Figura 14, de modo que se monitoreo la calidad del agua en el afluente, a la salida del gavión de filtraje de los humedales y del efluente de todo el sistema. Con el seguimiento de los contaminantes en los 4 puntos, se encontraron los valores medios incluidos en la Tabla 7.

**Tabla 7 Análisis de calidad de agua en los 4 puntos de muestreo**

Punto de muestreo	1	2	3	4
<b>COD (mg/l)</b>	405 ±48	309 ±77	63 ±4	32 ±7
<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	360 ±12	263 ±10	43 ±4	17 ±4
<b>SST</b>	196 ±20	199 ±22	27 ±6	28 ±8
<b>PT (mg/l)</b>	27 ±5	22 ±2	10 ±1	7 ±1
<b>N-NH<sub>4</sub> (mg/l)</b>	7 ±1	9 ±1	14 ±1	6 ±1
<b>Coliformes (/100 ml)</b>	660000		7000	38

Fuente. Adaptado de Williams et al., 1999

Los análisis de calidad del sistema demuestran una constante reducción en la magnitud de los valores medios de carbono orgánico disuelto, demanda biológica de oxígeno, sólidos totales, fósforo total y coliformes fecales. Si bien se experimentan reducciones significativas de varios parámetros, los datos registrados de nitrógeno amoniacal presente en las muestras ascendieron hasta a un doble con respecto al valor inicial al salir del tratamiento en los humedales, lo cual se explica por la probable mineralización de nitrógeno orgánico a una tasa más rápida que la de nitrificación, conforme a lo que exponen los autores.

Evaluados los contenidos en cada uno de los puntos de muestreo, se calcularon las eficiencias de remoción respecto a cada contaminante, reflejando una alta efectividad, a excepción del desempeño en la eliminación de nitrógeno amoniacal, la cual podría mejorarse a través de la inclusión de especies vegetales con mayor aporte de oxígeno en el sustrato. Los desempeños de los humedales y del sistema completo se muestran en la Tabla 8, en donde se puede observar la eficacia de un sistema que sigue constituyendo una alternativa viable técnica y económica para zonas con relieves quebrados en zonas rurales.

**Tabla 8 Eficiencia de los humedales y del sistema de tratamiento**

Contaminante / nutriente	Eficiencia humedales	eficiencia del sistema
COD (mg/l)	80%	92%
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	84%	95%
SST	86%	86%
PT (mg/l)	55%	74%
N-NH <sub>4</sub> (mg/l)	-56%	14%
Coliformes (/100 ml)*		100%

Fuente. Adaptado de Williams et al., 1999

\*No se determinaron concentraciones a la salida del gavión filtrante

## 5.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA REUTILIZACIÓN EN RIEGO

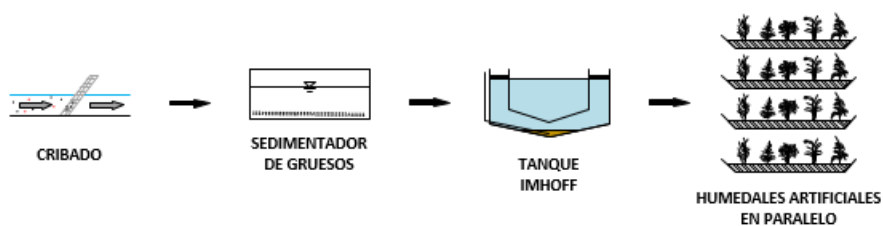
La Agencia de Desarrollo de Austria apoyo la implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Masaya, Nicaragua, con el fin de establecer una planta de tratamiento demostrativa y de recopilar información local sobre el funcionamiento de humedales artificiales y otros mecanismos alternativos de depuración. En la Tabla 9 se brinda una descripción de los componentes del sistema y algunos de los criterios de diseño empleados en esta planta de tratamiento.

**Tabla 9 Características generales del sistema y del humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales**

País	Nicaragua
Departamento	Masaya
Municipio	Masaya
Descripción	Sistema de tratamiento de aguas residuales con pretratamiento mediante cribado y sedimentación en tanque para las partículas gruesas, y tratamiento primario en un tanque Imhoff, terminando en cuatro humedales subsuperficiales de flujo horizontal dispuestos en paralelo para el tratamiento secundarios de aguas residuales.
Población	1000 habitantes
Origen Efluente	Aguas residuales domesticas provenientes de asentamientos a las afueras de la ciudad
Tipo de humedal y características	4 humedales de flujo subsuperficial de flujo horizontal
Temperatura promedio	26.6 °C
Precipitación media anual	1361 mm
Caudal del afluente del sistema	100 m <sup>3</sup> /d
Área	1400 m <sup>2</sup> (350 m <sup>2</sup> cada uno de los humedales)
Vegetación	Phragmites australis, Pennisetum purpureum, Typha domingensis, Phalaris arundinacea
Sustrato	Gravas y rocas volcánicas.

Fuente. Adaptado de Gauss, 2008, p. 27

En la Figura 16 se presenta el esquema del sistema de tratamiento de las aguas residuales generadas por una población de 1000 habitantes incluyendo humedales artificiales.



**Figura 16 Esquema del sistema de tratamiento en Masaya**

Fuente: Adaptado de Gauss, 2008, p. 27

La planta de tratamiento fue diseñada para alcanzar los estándares exigidos por la normatividad nicaragüense en relación con los vertimientos permitidos y calidad de agua riego. Acorde con lo anterior, se monitoreó la planta por 9 años con muestreos periódicos en el afluente y los efluentes del tanque Imhoff y de los humedales, los datos registrados se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 10 Análisis de calidad de los efluentes y eficiencia de los humedales y del sistema de tratamiento**

Parámetro	Afluente	Efluente del tanque Imhoff	Efluente de los humedales	Eficiencia humedales	eficiencia del sistema	Límites de descarga a cuerpos de agua o para uso en riego
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	270	92	6	93%	98%	90-120
COD (mg/L)	653	249	35	86%	95%	180-200
SST (mg/L)	251	59	7.5	86%	97%	80-120
Nitrógeno total (mg/L)	34	34	22	33%	33%	-
Fosforo total (mg/L)	6.1	5.5	4.5	18%	27%	-
E. coli (UFC/100 ml)	1.6 × 10 <sup>7</sup>	3.5 × 10 <sup>6</sup>	7.0 × 10 <sup>4</sup>	1.7 log	2.4 log	1.0 × 10 <sup>3</sup>

Fuente: Adaptado de Gauss, 2008, p. 28

El seguimiento de los parámetros promedio de calidad de agua indican que la eficiencia de remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos totales es alta, ajustándose a los límites máximos para la descarga y para su utilización como agua para riego. Pruebas de irrigación sobre cultivos de frijol, maíz y caña de azúcar, con el agua tratada, mostraron rendimientos similares a los obtenidos a los cultivos regados con agua proveniente de pozo profundo a la cual se le habían aplicado fertilizantes. En este caso la aplicación de aguas tratadas con un significativo contenido de nitrógeno en sus diferentes formas sobre varios tipos de cultivo incorpora compuestos metabolizables por las plantas como nitratos y amonio. El contenido final de fósforo, sin embargo, podría afectar los cultivos y favorecer la salinización del suelo en el que es aplicado. La presencia de contaminantes microbiológicos fue notable en productos como tubérculos, lo que se podría contrarrestar con tratamientos de desinfección complementarios.

### 5.3 TRATAMIENTO DE AGUAS GRISES CON FINES DE REÚSO

Basado en la evaluación llevada a cabo por Rodrigo Cesar de Moraes Monteiro en 2009 del sistema de tratamiento de aguas grises implementado para la depuración del efluente generado en los baños y por lavado de ropas en el CENTRO INTERNACIONAL DE REFERÊNCIA EM REÚSO DE AGUA –CIRRA- del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Sanitaria de la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo. En la Tabla 11 se presenta una descripción de la conformación del humedal artificial empleado y los resultados obtenidos en su evaluación de desempeño.

**Tabla 11 Características generales del humedal artificial del sistema de tratamiento de aguas grises con fines de reúso**

País	Brasil
Estado	São Paulo
Municipio	São Paulo
Descripción	Humedal artificial como tratamiento único de aguas grises del efluente proveniente de baños y cuarto de limpieza de ropa de una dependencia del departamento de Ingeniería Hidráulica y Sanitaria de la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo
Población	Variable (Estudiantes, profesores y empleados de la Universidad)
Origen Efluente	Baños y cuarto lavado de ropa
Tipo de humedal y características	Humedal subsuperficial de flujo horizontal con icon fondo y paredes verticales en concreto e impermeabilizadas. El humedal fue dividido en 2 partes iguales para emplear materiales de sustrato distintos en cada lado
Temperatura promedio	19 °C
Precipitación media anual	1450 mm
Caudal del afluente	297 ± 55 ml/min (0.428 ±0.079 m <sup>3</sup> /d)
Volumen	4.32 m <sup>3</sup>
Área	7.2 m <sup>2</sup>
Profundidad	0.6 m
Vegetación	En la primera etapa del humedal se sembraron las siguientes especies teniendo en cuenta su potencial de crecimiento dentro de medios con alta carga organica: <i>Cyperus alternifolius</i> (paraguas del Japón o paragüitas), <i>Typhas</i> sp y <i>Cyperus papyrus</i> (Papiro). En la segunda etapa fueron sembradas plantas con potencial de tratamiento de aguas, pero con mayor valor estético y ecosistémico: <i>Equisetum</i> sp, <i>Zantendeschias aethiopica</i> , <i>Cymbopodon</i> sp, <i>Pontederia cordata</i> , <i>Ins pseudacorus</i> , <i>Saururus</i> sp, <i>Coix lacryma</i> , <i>Costus</i> sp, <i>Echinodorus</i> sp, <i>Sagittaria montevidensis</i> , <i>Eleocharis intersticta</i> , <i>Elocharis nudipes</i> e <i>Hydrocotyle ranunculoides</i> .
Sustrato	En la parte inicial o primera etapa se empleó grava de aproximadamente 2.54 cm de diámetro con la intención de generar una biopelícula más amplia sobre el espacio intersticial para provocar una más pronta y eficaz descomposición orgánica. En una segunda etapa se pasa un sustrato donde predominara la acción filtrante y descomposición orgánica en un medio más denso mediante la utilización de arenas de tamaño medio y fino.

**Fuente: Adaptado de Monteiro, 2009, pp. 43–52**

En la Figura 17 se observa la configuración del sistema y la distribución hecha conforme el tipo de materiales. Vale la pena indicar que fueron agregados materiales más gruesos que los ya indicados para cada módulo, en la parte donde se localizó el mecanismo de distribución inicial y el de captación final.



**Figura 17 Humedal artificial de tratamiento de aguas grises**  
**Fuente: Adaptado y tomado de Monteiro, 2009, pp. 43–52**

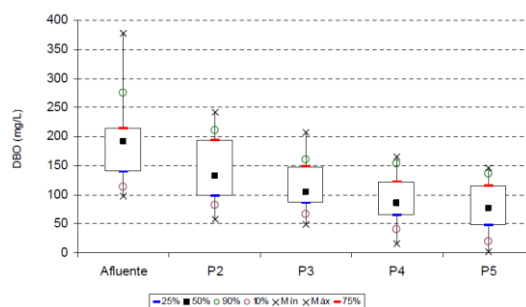
El análisis de calidad realizado sobre el afluente y el efluente del humedal se adelantó estudiando 4 tiempos de remoción diferente en 4 puntos del humedal; para estas condiciones fue valorado el potencial de remoción de los correspondientes tiempos de retención hidráulica, de manera que se recogieron eficiencias para dichos periodos en la estructura. Los tiempos de retención de cada punto fueron los indicados en la tabla 14.

**Tabla 12 Tiempos de retención establecidos para el análisis conforme a los puntos de análisis**

Condición de muestreo	Tiempo de retención (días)
1	1.06 ±0.18
2	2.25 ±0.38
3	2.91 ±0.51
4	3.74 ±0.64

**Fuente: Adaptado de Monteiro, 2009, p. 54**

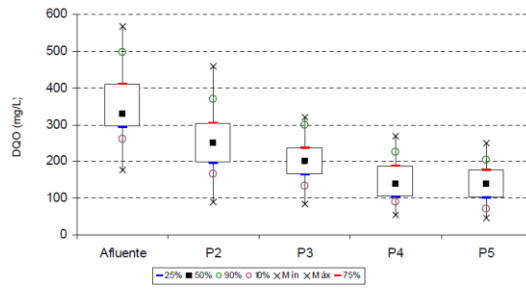
Las eficiencias resultantes se presentan en las Figuras 18 a 22.



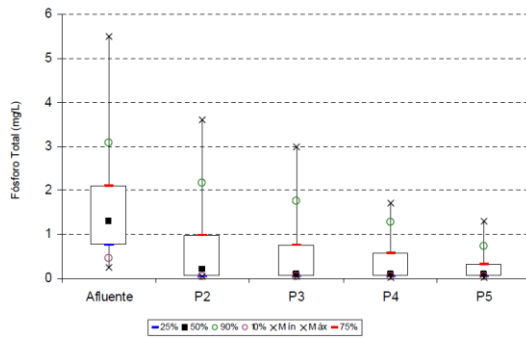
**Figura 18 Variación de la demanda biológica de oxígeno**

**Fuente: Tomado de Monteiro, 2009, p. 65**

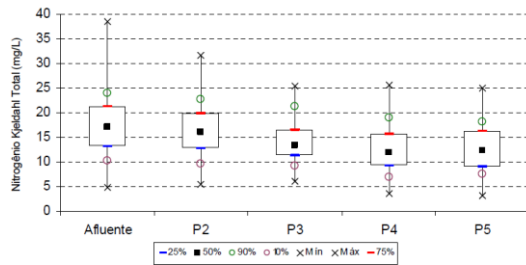




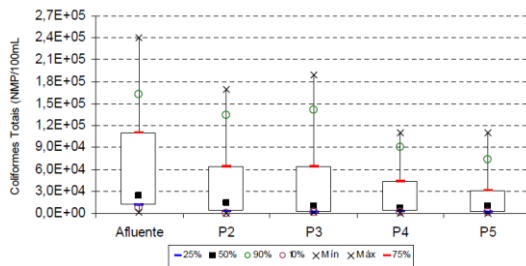
**Figura 19 Variación de la demanda química de oxígeno**  
**Fuente: Tomado de Monteiro, 2009, p. 64**



**Figura 20 Variación de fósforo total**  
**Fuente: Tomado de Monteiro, 2009, p. 68**



**Figura 21 Variación de nitrógeno total**  
**Fuente: Tomado de Monteiro, 2009, p. 68**



**Figura 22 Variación en el contenido de coliformes totales**  
**Fuente: Tomado de Monteiro, 2009, p. 74**

Las eficiencias de remoción encontradas para este humedal evidencian valores muy altos en la capacidad de eliminación de fósforo, pero muy bajos en remoción de nitrógeno. En cuanto a la demanda biológica y química de oxígeno, las eficiencias encajan dentro de los valores esperados para humedales artificiales de flujo horizontal de rendimiento bajo. En relación con los coliformes totales, la eficiencia de remoción de este agente se considera elevada frente a lo reportado para este mismo tipo de humedales.

**Tabla 13 Eficiencias de remoción del humedal artificial para el tratamiento de aguas grises con fines de reúso**

Contaminante / nutriente	% de remoción
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	59
DQO (mg/l)	60
SST	75
PT (mg/l)	83
NT (mg/l)	27
Coliformes	56-94

**Fuente: Tomado de Monteiro, 2009, p. 78**

El autor del estudio señala que la reducción del contenido de fósforo obedece a la presencia de óxidos de hierro en la arena del segundo módulo del humedal, los cuales pueden producir la adsorción de fosfatos en el sustrato. En este mismo sentido, el estudio advierte que la reducida remoción de nitrógeno respondería a la baja presencia de oxígeno producida en el módulo del sustrato de arena, circunstancia que redujo la actividad aerobia de las bacterias.

## 5.4 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE CAÑO GANDUL

El análisis y la evaluación del sistema de tratamiento de aguas de residuales Caño Gandul fue realizado en 2011 como tema de trabajo de grado de Alejandra Patricia Otálora Rodríguez, para la obtención del título de Magister en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia. En el trabajo en mención, se recopiló y analizó la información del sistema de aguas domésticas instalado en el centro de producción petrolera de Caño Gandul.

Desarrollado en el departamento de Casanare en el municipio de San Luis de Palenque para realizar el tratamiento de aguas residuales domésticas del centro de alojamiento de la estación de producción petrolera Caño Gandul, el sistema de tratamiento incorpora un pretratamiento a través de una cámara de aquietamiento de 0,58 m<sup>3</sup> en donde se realiza el cribado del afluente a través de una placa perforada y de rejillas. A continuación, el agua a tratar pasa a una trampa de grasas constituida por 3 cámaras de 0,38 m<sup>3</sup>, en las que se separa las grasas del afluente.

Posteriormente, iniciando el tratamiento primario, en donde las aguas entran a un sedimentador compuesto por 3 cámaras de 9,93 m<sup>3</sup> cada una e intercomunicadas a través de vasos comunicantes, reduciendo la presencia de partículas que puedan afectar el humedal artificial de flujo superficial que integra el tratamiento secundario, para terminar en un sistema de desinfección a través de un tanque de cloración y finalmente, entregar a un pozo artificial (Otálora Rodríguez, 2011, p. 61). En la Figura 23 se presenta el esquema de tratamiento de aguas residuales de Caño Gandul.



**Figura 23 Esquema del sistema de tratamiento en Caño Gandul**  
Fuente: Adaptado de Otálora Rodríguez, 2011, p. 65

El humedal artificial de este sistema fue construido de forma semienterrada con celdas separadas por tabiques que incrementa el tiempo de retención hidráulico de la estructura al obstaculizar el flujo normal del agua. La longitud de la estructura es de 18 m y tiene un ancho de 2.5 m. En la Tabla 14 se presentan las características generales de la estructura.

**Tabla 14 Características generales humedal artificial del sistema de tratamiento de Caño Gandul**

Departamento	Casanare
Municipio	San Luis de Palenque
Descripción	El sistema de depuración está localizado en la estación de producción petrolera Caño Gandul; el sistema recoge las aguas residuales provenientes de alojamientos y restaurante.
Población	12 personas son población fija y 7 personas son población flotante
Origen Efluente	Aguas residuales domesticas
Tipo de humedal	Humedal artificial de flujo superficial mejorado con soporte plásticos para el incremento del área de crecimiento de la película de tratamiento biológico.
Temperatura promedio	24°C
Precipitación media anual	2000 mm
Caudal de diseño	12 m <sup>3</sup> /d
Volumen	21.17 m <sup>3</sup>
Área	27 m <sup>2</sup> , 18 m de longitud y 1.5 m de ancho
Profundidad	0.8 m, toda la estructura.
Altura de lamina	Desconocida
Vegetación	Plantas de la especie Bidens Laegis
Sustrato	Suelo de la zona

**Fuente: Adaptado de Otálora Rodríguez, 2011, p. 65**

Los soportes incluidos en el humedal para incrementar el desempeño fueron colocados sobre la superficie de flujo antes de conseguir el establecimiento de la vegetación.



**Fotografía 4 Humedal artificial empleado en tratamiento de aguas residuales de Caño Gandul**

**Fuente: Tomado de Otálora Rodríguez, 2011, p. 65**

### 5.4.1 Desempeño del Humedal

La evaluación del humedal se realizó haciendo 3 muestreos en diferentes fechas y varios puntos del sistema entre los que se encuentran el afluente del humedal y 3 puntos dentro del humedal en el que se incluye el efluente de este. Los parámetros analizados fueron SST, DBO<sub>5</sub>, nitrógeno total, fósforo total y coliformes totales. El caudal del sistema también fue aforado determinando un caudal promedio de 7,655 m<sup>3</sup>/d y un tiempo de retención hidráulico promedio de 2,8 días.

Se encontró que los resultados no fueron satisfactorios porque en varios de los contaminantes se evidencia el incremento en las magnitudes de los parámetros dentro del humedal frente a las mediciones hechas en el afluente; sin embargo, la autora rescata las eficiencias de remoción de DBO<sub>5</sub>, que alcanzó un 45% para los muestreos que no fueron anómalos y de 92,5% para los SST. Los demás parámetros se comportaron de forma atípica, sin siquiera alcanzar eficiencias de remoción cercanas a las presentadas en la Tabla 5, pero evidenciando el mejoramiento progresivo en los valores medidos en fósforo total y coliformes en los nuestros 2 y 3, lo que sugeriría que la vegetación se encontraba en medio de fase de establecimiento durante el tiempo en que se llevaron a cabo los muestreos. Los resultados recogidos en las mediciones hechas para este seguimiento se muestran en la Tabla 15.

**Tabla 15 Eficiencias de remoción según resultados del análisis de calidad de agua del humedal**

Muestreo	DBO <sub>5</sub> (mg/l)			SST (mg/l)			PT (mg/l)			NT (mg/l)			Coliformes (UFC/100 ml)		
	Afluente	Efluente	% de remoción	Afluente	Efluente	% de remoción	Afluente	Efluente	% de remoción	Afluente	Efluente	% de remoción	Afluente	Efluente	% de remoción
1	2190	1030	53	2230	270	88	90	110	-22	60	30	50	1300000	3000000	-131*
2	330	210	36	880	30	97	70	80	-14	140	130	7	320000	160000	50
3	1380	2880	-109*				110	100	9	560	470	16	21000000	1000000	95
Promedio	1260	620	45	1555	150	92				0.10	0.08	29	10660000	580000	73

Fuente: Adaptado de Otálora Rodríguez, 2011, p. 65

\*Mediciones descartadas para la determinación de eficiencias

La evaluación del sistema de depuración completo arroja eficiencias de remoción acordes con las disposiciones normativas para el vertimiento seguro previsto en el pozo artificial final. Para la DBO<sub>5</sub>, la eficiencia del sistema es de 89%, mientras que para SST la reducción es de 95%. En relación con la eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo totales de todo el sistema, los valores promedio son 74 y 60%, respectivamente.

## **5.5 USO DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE OTRO TIPO DE VERTIDOS**

### **5.5.1 Aguas residuales de refinerías**

Las aguas residuales generadas en la refinería de petróleo son sometidas a procesos de tratamiento para la eliminación de aceites y grasas mediante mecanismos de separación por gravedad, clarificación en tanques sedimentadores de sólidos, y en tanques de flotación con aplicación de aire disuelto. En el tratamiento secundario, estas aguas son depuradas utilizando lagunas de oxidación, sistemas de depuración con lodos activados, filtración con carbono activado, entre otros procesos para la reducción de carga biológica. La reducción de contaminantes en el tratamiento primario y secundario de aguas residuales mediante estos tratamientos es significativa, y puede mostrar eficiencias de remoción promedio de 68% para DBO<sub>5</sub>, 65% en DQO, 80% en SST, 85% en NH<sub>4</sub>, 80% de reducción en Grasas y aceite, y 55% en la de fenoles.

Los humedales artificiales se han implementado como tratamiento secundario avanzado y terciario con el fin de retener otros componentes de estas aguas y reducir aún más los remanentes de contaminantes que no se hayan logrado captar en los otros componentes de las plantas de tratamiento. Experiencias como la de Eke Emeka (Eke, 2008, p. 166), en la que empleo humedales artificiales de flujo vertical en ambientes aislados al interior de espacios cerrados y otros al aire libre en Edimburgo, demostraron eficacia en la reducción de BTEX (Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno). Los humedales que fueron operados mediante la modalidad de ciclos presentaban concentraciones altas de benceno en la entrada (1000 mg/l), registraron concentraciones en el efluente de 37-87 mg/l para aquellos localizados al aire libre (91-96%de eficiencia).

### **5.5.2 Tratamiento de lixiviados con humedales artificiales**

Como respuesta a la problemática que envuelve el manejo de los lixiviados producidos en los rellenos sanitarios, los humedales artificiales han sido considerados en el tratamiento de estas aguas, cuya toxicidad amenaza ecosistemas acuáticos y terrestres por igual. La implementación de estas estructuras en el tratamiento de lixiviados requiere rigurosidad en la caracterización de las concentraciones de los contaminantes del

efluente, puesto que en función de estos contenidos se seleccionarán los materiales del sustrato y la vegetación, que no puede ser genérica y que puede llegar a afectar el potencial de remoción requerido en el humedal.

Para garantizar el buen desempeño de los humedales se emplean, usualmente, las tipologías de flujo vertical y horizontal con diseños que busquen extender el tiempo de retención mediante utilización de material granulares como gravas de tamaño pequeño a mediano para la eliminación de sustancia volátiles. Aunque los humedales de flujo superficial también proporcionan buenos resultados en la depuración de lixiviados, la superficie de tratamiento puede llegar a ser varias veces superior a las requeridas por los otros tipos (Crites et al., 2014, p. 291)

Con objeto de reconocer el potencial de los humedales en el tratamiento de lixiviados en clima tropical, se revisó un caso de estudio en el que se evaluó el desempeño de 6 estructuras a escala piloto para el efluente generado en el relleno sanitario “El Ojito” de la ciudad de Popayán, Cauca. Las características más importantes de las condiciones del tratamiento en esta investigación se presentan en la Tabla 16.

**Tabla 16 Características de los humedales artificiales para el manejo de lixiviados a escala piloto**

Departamento	Cauca
Municipio	Vereda Cajete, Popayan
Descripción	Se diseño un sistema de manejo de lixiviados provenientes del ya clausurado relleno sanitario del Ojito, el cual recibía 210 toneladas diarias de basura.
Origen Efluente	Lixiviados
Tipo de humedal	Subsuperficiales de flujo horizontal (3 sembrados con <i>H. psittacorum</i> y 3 con <i>C. haspan</i> )
Temperatura promedio	18°C
Precipitación media anual	2040 mm
Caudal de diseño	0,012 m <sup>3</sup> /día en cada uno de los humedales
Volumen	0,36 m <sup>3</sup> cada humedal (2.16 m <sup>3</sup> )
Área	0,60 m <sup>2</sup> , 1 m de longitud y 0.60 m de ancho
Profundidad	0.60 m (0.20 m de altura de la lámina)
Vegetación	<i>Heliconia psittacorum</i> y <i>Cyperus haspan</i> , especies típicas de la zona con resistencia a las inundaciones y potencial de remoción comprobada previamente.
Sustrato	Gravas (55% del material con tamaño de una pulgada)
Porosidad teórica	40%
Tiempo de retención hidráulico	4 días

Fuente: Adaptado de Jiménez-Cerón et al., 2018

Los resultados obtenidos en la evaluación, después de llevar a cabo muestreos del afluyente y el efluente de los humedales cada 15 días por un periodo de 4 meses, se muestran en la Tabla 17.

**Tabla 17 Eficiencias de remoción en humedales artificiales a escala piloto para el tratamiento de lixiviados**

Parámetro	Afluente	Efluente humedales con H. psittacorum	Efluente humedales con C. haspan	Eficiencia humedales con H. psittacorum	Eficiencia humedales con C. haspan
OD (mg/l)	0,35	1,01	1,26		
DQO (mg/l)	1494	716	533	52,07%	64,32%
N-NO <sub>3</sub> (mg/l)	123,15	68,82	62,79	44,12%	49,01%
P - PO <sub>4</sub> (mg/l)	12,33	5,02	4,05	59,29%	67,15%
Pb <sup>+2</sup> (mg/l)	0,122	0,115	0,104	5,74%	14,75%

Fuente: Adaptado de Jiménez-Cerón et al., 2018

De acuerdo con la información presentada, el oxígeno disuelto aumenta en el humedal como consecuencia de la translocación de oxígeno producido en la fotosíntesis hacia las raíces de las plantas. La reducción de la DQO es mayor en los humedales artificiales sembrados con *C. haspan*, lo que sugiere un mejor establecimiento de las comunidades bacterianas que degradan la materia orgánica. En relación con la remoción de nitratos, los 2 humedales mostraron una tasa de remoción constante en el tiempo en la que la desnitrificación predomina sobre el consumo vegetal. Las eficiencias obtenidas indican un mejor desempeño en aquellos humedales sembrados con *C. haspan*. Igual que en la remoción de nitratos y en la reducción de DQO, la mayor tasa de remoción se experimentó en los humedales en los que se utilizó *C. haspan* como material vegetal; estas tasas mejoraron con el transcurso del tiempo en los 4 meses del ciclo de monitoreo, como respuesta al desarrollo de la vegetación. El desempeño de los humedales en remoción de plomo fue mejorando a lo largo del periodo de monitoreo, alcanzando en los últimos muestreos tasas de remoción del 41% frente a una muy baja tasa al comienzo del análisis.



## CONCLUSIONES

Los humedales artificiales exhiben una serie de atributos que validan su adopción como mecanismo natural de depuración de efluentes de distintos orígenes.

Los criterios de diseño y las pautas en su operación constituyen la base para obtener buenos desempeños en la remoción de contaminantes.

Los humedales artificiales son estructuras altamente sensibles a las variaciones en las concentraciones de contaminantes del afluente.

La mala selección de materiales en el sustrato o la falta de mantenimiento puede provocar baja eficiencia operacional o corta vida de funcionamiento.

El nivel de desarrollo de la vegetación del humedal es determinante para la degradación de materia orgánica.

De acuerdo con la información reportada en los casos de estudio, las características en efluentes con desempeños bajos o anómalos estuvieron ligadas a la etapa de desarrollo de la vegetación de los humedales monitoreados.

Los humedales artificiales pueden ser una alternativa en el tratamiento de aguas residuales en zonas montañosas o alejadas con limitaciones para establecer plantas de tratamiento convencionales.

## BIBLIOGRAFIA

1. Alarcón Herrera, M. T., Zurita Martínez, F., Lara-Borrero, J. A., & Vidal Sáez, G. C. (2018). *Humedales de tratamiento: Alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*. Pontificia Universidad Javeriana. <http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/34519>
2. American Association of State Highway and Transportation Officials. (1996). *Guide to Wetland Mitigation Issues for Transportation Designers*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
3. Armengol, A. T. (2016). *Subsurface flow constructed wetlands for the treatment of wastewater from different sources. Design and operation* [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universitat de Barcelona]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=79356>
4. *Constructed wetlands: Blumberg Engineers, Germany*. (s/f). Recuperado el 6 de septiembre de 2020, de <https://www.blumberg-engineers.com/en/ecotechnologies/constructed-wetlands>
5. Crites, R. W., Middlebrooks, E. J., & Bastian, R. K. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems* (2a ed.).
6. Davidsson, T., Kiehl, K., & Hoffmann, C. C. (2000). Guidelines for monitoring of wetland functioning. *Ecosys*, 5–50.
7. Delgadillo, O., Camacho, A., Perez, L. F., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Universidad Mayor de San Simón.
8. Díaz Espinosa, A., Díaz Triana, J., & Vargas, O. (Eds.). (2012). *Catálogo de plantas invasoras de los humedales de Bogotá*. Grupo de Restauración Ecológica de la Universidad Nacional de Colombia y Secretaría Distrital de Ambiente.
9. Eke, P. E. (2008). *Hydrocarbon removal with constructed wetlands* [Tesis Doctoral]. University of Edinburgh.
10. Ellis, J. B., Shutes, R. B. E., & Revitt, D. M. (2003). *Guidance manual for constructed wetlands*. <https://www.gov.uk/government/publications/guidance-manual-for-constructed-wetlands>
11. EPA. (1995). *A Handbook of Constructed Wetlands: General considerations*. U.S. Government Printing Office.

12. EPA. (2000a). *Constructed Wetlands Treatment of municipal Wastewaters*. [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?dirEntryId=64144&Lab=NRMRL](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=64144&Lab=NRMRL)
13. EPA. (2000b). Wastewater Technology Fact Sheet—Free Water Surface Wetlands. *EPA 832-F-00-024*. <https://sswm.info/node/3875>
14. Gauss, M. (2008). *Constructed Wetlands: A Promising Wastewater Treatment System for Small Localities: Experiences from Latin America*.
15. HYDRYC, & EPA. (1998). *Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Water Treatment. Design Manual*. [http://www.hydrick.com/downloads/WetlandsDesign\\_Hydrick.pdf](http://www.hydrick.com/downloads/WetlandsDesign_Hydrick.pdf)
16. Jackson, E. F., & Jackson, C. R. (2008). Viruses in wetland ecosystems. *Freshwater Biology*, 53(6), 1214–1227. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2007.01929.x>
17. Jiménez-Cerón, Y. F., Delgado-Calvache, L. I., Fernández-Tulande, C., Pino-Alegría, H. M., Casas-Zapata, J. C., Madera-Parra, C. A., Lara-Borrero, J. A., Morató-Farreras, J., & Rengifo-Canizales, E. (2018). TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS UTILIZANDO HUMEDALES CONSTRUIDOS Y DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS EN CLIMA TROPICAL. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 543–552. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.979>
18. Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). *Treatment Wetlands* (Edición: 2). CRC Press.
19. Koob, T., Barber, M. E., & Hathorn, W. E. (1999). Hydrologic Design Considerations of Constructed Wetlands for Urban Stormwater Runoff1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 323–331. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03593.x>
20. Lara Borrero, J. (1998). *Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales*. <https://sites.google.com/site/humedalesartificiales/home>
21. Mahmood, Q., Pervez, A., Zeb, B. S., Zaffar, H., Yaqoob, H., Waseem, M., Zahidullah, & Afsheen, S. (2013). Natural Treatment Systems as Sustainable Ecotechnologies for the Developing Countries. *BioMed Research International*, 2013, 796373. <https://doi.org/10.1155/2013/796373>
22. Monteiro, R. C. de M. (2009). *Viabilidade técnica do emprego de sistemas tipo “wetlands” para tratamento de água cinza visando o reúso não potável*. [Mestrado em Engenharia Hidráulica, Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.3.2009.tde-09032009-110147>

23. Mueller, B., Payer, F., Goswami, D., Kastury, S., Kornuc, Jo., Harman, C., Eger, P., Patel, M., Cates, D., & Talkington, D. (2003). *Technical and Regulatory Guidance Document for Constructed Treatment Wetlands*. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=AV20120131292>
24. Otálora Rodríguez, A. P. (2011). *Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandúl* [Universidad Nacional de Colombia]. <http://www.bdigital.unal.edu.co/5044/1/292544.2011.pdf>
25. Patiño Gomez, J. M. (2012). *Costos de Inversión Inicial, Operación y Mantenimiento de Tratamientos Naturales de Aguas Residuales para Pequeñas Comunidades En Colombia*. [Pregrado]. Pontificia Universidad Javeriana.
26. Persson, J., Bendoricchio, G. B., & Dal Cin, L. (2000). Guidelines for free water surface wetland design. *Ecosys*, 8. [https://www.researchgate.net/publication/268441082\\_Guidelines\\_for\\_free\\_water\\_surface\\_wetland\\_design](https://www.researchgate.net/publication/268441082_Guidelines_for_free_water_surface_wetland_design)
27. Rabat Blázquez, J. (2016). *Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración* [Tesis de Maestría, Universidad de Alicante]. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/57213>
28. Scholz, M. (2016). *Wetland Systems to Control Urban Runoff* (Edición: 2). Elsevier Science.
29. Stefanakis, A., Akrotos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2014). *Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*.
30. UN-HABITAT. (2008). *Constructed Wetlands Manual*. [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/UN%20HABITAT%202008%20Constructed%20Wetlands%20Manual.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/UN%20HABITAT%202008%20Constructed%20Wetlands%20Manual.pdf)
31. *Vertical Flow Constructed Wetland | SSWM - Find tools for sustainable sanitation and water management!* (s/f). Recuperado el 22 de septiembre de 2020, de <https://sswm.info/taxonomy/term/3934/vertical-flow-constructed-wetland>
32. Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (Eds.). (2008a). The Use of HF Constructed Wetlands in the World. En *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow* (pp. 355–432). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8580-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8580-2_7)
33. Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008b). *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8580-2>

34. Williams, J. B., Zambrano, D., Ford, M. G., May, E., & Butler, J. E. (1999). Constructed wetlands for wastewater treatment in Colombia. *Water Science and Technology*, 40(3), 217–223. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00413-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00413-8)