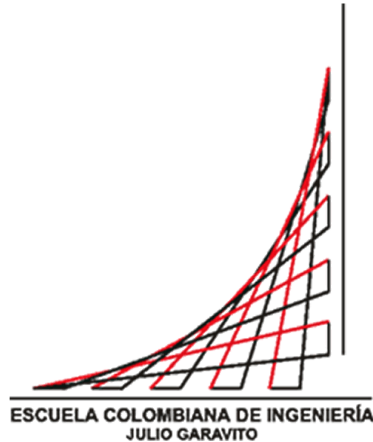


FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES MUNICIPALES DE 30.000 HABITANTES
CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTÍZ
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

**FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE 30.000
HABITANTES**



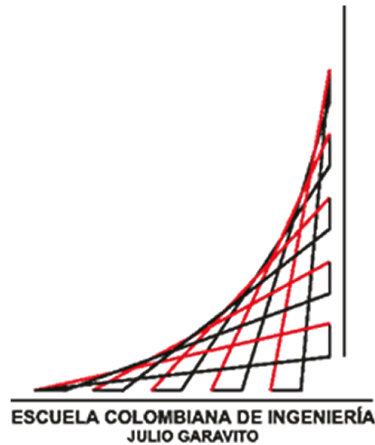
CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTIZ

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA - JULIO GARAVITO
MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE
BOGOTÁ D.C.
2014**



FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE 30.000 HABITANTES
CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTÍZ
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE 30.000 HABITANTES



CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTIZ

ING. JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS, I.C., MEEE

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA - JULIO GARAVITO
MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE
BOGOTÁ D.C.
2014



FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE 30.000 HABITANTES
CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTÍZ
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, Enero de 2014



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	9
1. ANTECEDENTES.....	11
2. CRITERIOS DE DISEÑO	29
2.1. DEFINICIÓN DE HUMEDAL.....	29
2.2. DEFINICIÓN DE HUMEDAL ARTIFICIAL.....	30
2.3. TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES	31
2.3.1. Humedal artificial de flujo superficial (surface flow constructed wetland).	31
2.3.2. Humedal artificial de flujo subsuperficial.....	34
2.3.2.1.Humedales subsuperficiales de flujo horizontal.....	36
2.3.2.2.Humedales subsuperficiales de flujo vertical.	37
2.3.3. Partes de un Humedal artificial de flujo subsuperficial.....	39
2.3.3.1.Agua residual.....	39
2.3.3.2.Vegetación.	41
2.3.3.3.Microorganismos.....	43
2.3.3.4.Sustrato (medio granular).....	45
2.3.3.5.Revestimiento.....	45
2.4. DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL	46
3. REQUISITOS AMBIENTALES	53
3.1. MARCO NORMATIVO	53
4. DISEÑO HUMEDAL ARTIFICIAL PARA 30.000 HABITANTES	59
4.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO	59
4.2 CAUDAL DE DISEÑO (Q_D).....	59
4.3 TANQUE SEDIMENTADOR PRIMARIO Y LECHO DE SECADO	63
4.4 DBO EN EL AGUA RESIDUAL CRUDA.....	66
4.5 CÁLCULO DEL HUMEDAL UTILIZANDO EL MODELO DE DISEÑO DE REED Y RAS 2000 ^(21, 25)	66
4.6 CÁLCULO DEL HUMEDAL UTILIZANDO EL MODELO DE DISEÑO DE KADLEC ⁽²²⁾	68
4.7 CÁLCULO DEL HUMEDAL UTILIZANDO EL MODELO DE DISEÑO EPA ⁽²³⁾	69



FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE 30.000 HABITANTES
CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTÍZ
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

4.8	CÁLCULO DEL HUMEDAL UTILIZANDO EL MODELO DE DISEÑO ROMERO (24).....	69
4.9	RESUMEN RESULTADOS DE DISEÑO	71
5	ANÁLISIS DE COSTOS	73
6	CONCLUSIONES	77
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78



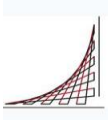
LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Humedal construido en la ciudad de Arcata, California, Estados Unidos.	14
Imagen 2. Humedal construido en la ciudad de Arcata, California, Estados Unidos.	15
Imagen 3. Vista aérea del humedal de la empresa Bahco.....	22
Imagen 4. Fotografía del humedal de la empresa Bahco.	23
Imagen 5. Esquema de un humedal artificial de flujo superficial.....	32
Imagen 6. Esquema de un humedal subsuperficial de flujo horizontal.	37
Imagen 7. Esquema de un humedal subsuperficial de flujo vertical (vista corte sección).	38
Imagen 8. Esquema típico de una planta emergente ⁽¹⁸⁾	42
Imagen 9. Sistema de tratamiento.	59
Imagen 10. Sistema de tratamiento mediante lagunas de estabilización.....	74



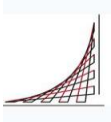
LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplos de humedales artificiales de flujo subsuperficial utilizados en Europa ⁽²⁾	18
Tabla 2. Desempeño del humedal artificial en Lacabamba ⁽⁸⁾	23
Tabla 3. Resultados muestreos en humedal artificial Botucatu, Brasil ⁽¹²⁾	25
Tabla 4. Resultados obtenidos en diferentes países mediante la utilización de humedales para el tratamiento de aguas residuales.....	27
Tabla 5. Ventajas y desventajas de un sistema de humedal artificial de flujo superficial ⁽²³⁾	33
Tabla 6. Ventajas y desventajas de un sistema de humedal de flujo subsuperficial ⁽²³⁾	35
Tabla 7. Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales ⁽²⁰⁾	40
Tabla 8. Contribución de las plantas en el tratamiento de aguas residuales a través humedales artificiales ⁽¹⁸⁾	41
Tabla 9. Plantas emergentes más utilizadas en humedales artificiales ⁽¹⁸⁾	44
Tabla 10. Ecuaciones para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial, con base en remoción de DBO ^(21, 22, 23, 24, 25)	47
Tabla 11. Parámetros de diseño humedales de flujo subsuperficial (Kadlec) ⁽²²⁾	48
Tabla 12. Características del medio para sistemas de flujo subsuperficial ⁽²³⁾	49
Tabla 13. Características típicas del medio para humedales de flujo subsuperficial. ⁽²⁴⁾	49
Tabla 14. Criterios para humedales de flujo subsuperficial ⁽²⁴⁾	50
Tabla 15. Norma para el vertimiento de residuos líquidos ⁽²⁷⁾	54
Tabla 16. Asignación del nivel de complejidad ⁽²⁵⁾	55



FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE 30.000 HABITANTES
CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTÍZ
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

Tabla 17. Aportes per cápita para aguas residuales domésticas ⁽²⁵⁾	57
Tabla 18. Caudales medios de entrada a la PTARM para poblaciones con menos de 20.000 habitantes ⁽²⁸⁾	60
Tabla 19. Estándares de diseño de sedimentadores primarios ⁽²⁴⁾	63
Tabla 20. Parámetros de diseño lechos de sacado ⁽²⁸⁾	65
Tabla 21. Aportes per cápita para aguas residuales domésticas ⁽²⁵⁾	66
Tabla 22. Dimensiones del humedal para el tratamiento de aguas residuales de 30.000 habitantes.	71
Tabla 23. Resumen resultados de diseño.	72
Tabla 24. Costos del humedal de flujo subsuperficial para 30.000 habitantes ⁽²⁹⁾ .	73
Tabla 25. Dimensiones del sistema de lagunas para el tratamiento de aguas residuales de 30.000 habitantes.	75
Tabla 26. Costos del sistema de tratamiento de aguas residuales para 30.000 habitantes, utilizando lagunas de estabilización.	75
Tabla 27. Costos de operación y mantenimiento ⁽³³⁾	76



INTRODUCCIÓN

Las diferentes características sociales, topográficas, tecnológicas, demográficas, económicas y climatológicas, entre otras, que presentan las pequeñas y medianas poblaciones en Colombia y América Latina representan un reto a la hora de seleccionar tecnologías sostenibles para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, creando la necesidad de desarrollar herramientas que faciliten la toma de decisiones para la implementación de estos sistemas ⁽³²⁾, basados en tecnologías naturales de depuración, como humedales artificiales.

La problemática planteada se basa teniendo en cuenta el acelerado crecimiento de la población y de los sectores agrícola e industrial en Colombia, los cuales demandan grandes cantidades de agua para el desarrollo de sus actividades y dado que de acuerdo con las cifras del Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico en Colombia, señalan que para el año 2011, efectivamente sólo el 9 % de las aguas residuales son tratadas, lo que evidencia el alto déficit de plantas de tratamiento que faltan por implementar en el país, generando problemas ambientales de saneamiento básico (salud, contaminación de suelos, aguas subterráneas, eutrofización de cuerpos de agua, etc.), principalmente en la conservación y protección de los ecosistemas acuáticos y del suelo en general. Así mismo, los altos costos que requiere la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales, ha sido uno de los principales obstáculos que se presentan para asumir dicha problemática ⁽³²⁾.

Teniendo en cuenta lo anterior se plantea si es factible económica y técnicamente hacer el tratamiento de aguas residuales para poblaciones con 30.000 habitantes, mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Inicialmente se recopilan algunos antecedentes de la utilización de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales principalmente en Estados Unidos, Suramérica y algunos países de Europa, donde los humedales de flujo libre utilizados en los Estados Unidos, son los que presentan una mayor extensión.



FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE 30.000 HABITANTES
CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTÍZ
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

Posteriormente se presenta la definición y clasificación de los humedales artificiales, principalmente para los humedales de flujo subsuperficial, donde se resaltan los principales criterios de diseño de acuerdo con los autores y normas consultadas.

En el capítulo cinco se presenta el diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial para 30.000 habitantes, utilizando diferentes ecuaciones de diseño.

En el capítulo seis se presenta el análisis de costos para la construcción del humedal artificial de flujo subsuperficial para 30.000 habitantes en comparación con los costos de sistemas convencionales de tratamiento y se determina la factibilidad de realizar la construcción del mismo.

Finalmente en el capítulo siete se formulan las conclusiones y recomendaciones pertinentes.



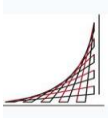
1. ANTECEDENTES

El término humedales construidos es relativamente nuevo; sin embargo, el concepto es antiguo, pues se tiene conocimiento de que antiguas culturas como la china y la egipcia utilizaban los humedales naturales para la disposición de sus aguas residuales ⁽¹⁾.

La utilización de humedales artificiales para la recepción de aguas servidas se remonta a comienzos del siglo XX; las ciénagas, humedales y turberas se concibieron como los mejores receptores de aguas servidas, además jugaban un papel purificador importante. Las primeras nociones científicas relacionadas con el uso de humedales para el tratamiento de aguas usadas remontan hasta la década de los 50, cuando Seidel y Kickuth hicieron un estudio sobre la eliminación de fenoles y tratamiento de aguas residuales de una lechería con humedales artificiales en 1952 en el instituto Max Plank, donde en aquella época éstos no fueron considerados como un sistema de depuración de aguas residuales ⁽²⁾.

El estudio de los humedales como sistemas de tratamiento comenzó con un estudio de las plantas deseables para el tratamiento de aguas residuales. Se encontró que las especies de plantas más adecuadas para el tratamiento son las que tienen raíces grandes, crecen rápidamente, transpiran grandes volúmenes de agua y tienen raíces adventicias, es decir que se desarrollan en un sitio distinto de su hábitat normal ⁽¹⁾.

El primer reporte científico en el que se señalan las posibilidades que tienen las plantas emergentes para la remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales pertenece a la Dra. Kathe Seidel del Instituto Max Plank, de Alemania. En el informe de sus investigaciones, ella plantea que mediante el empleo del junco común (*Schoenoplectus lacustris*) era posible la remoción de una serie de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, así como la desaparición de bacterias (Coliformes, Salmonella y Enterococo) presentes en las aguas residuales ⁽¹⁾.



Este método se aplicó por primera vez en Alemania en 1974 para tratar aguas residuales municipales y aguas residuales de la industria textilera, cervecera y de productos lácteos empleando plantas emergentes, convirtiéndose en una importante tecnología para el tratamiento de efluentes de tanques sépticos, de lagunas de estabilización y, en general, de efluentes de tratamiento biológico secundario⁽⁵⁾.

El Dr. Reinhold Kickuth de la Universidad de Hessen, en Alemania desarrolló un humedal para el tratamiento de aguas residuales denominado Método de la Zona de Raíz. Este sistema no se basa en la capacidad de la vegetación para asimilar los nutrientes, sino en la capacidad que tienen las plantas de pantano para el transporte de oxígeno a través de los tallos y las raíces a la tierra, proceso que se puede complementar con el tipo de suelo usado. En conclusión se trata de un medio ambiente adecuado para la desnitrificación, donde el crecimiento de las plantas también produce carbono que es una fuente de energía para las bacterias que son responsables de las transformaciones de nitrógeno⁽¹⁾.

El primer sistema de tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales inició su operación en Inglaterra en octubre de 1985, para una población de 1.260 habitantes y un caudal promedio de 189 m³/día. Así mismo entre 1983 y 1988 se construyeron en Dinamarca más de 130 sistemas de humedales artificiales, para poblaciones de hasta 7.100 habitantes con caudales del orden de 1065 m³/día; sin olvidar que también se encontraron funcionando humedales artificiales en Bélgica, Holanda, Hungría y Suecia⁽³⁾.

La utilización de humedales como depuradores naturales en Inglaterra, está ampliamente extendida por todo el territorio. En países con menos recursos económicos como la India o República Checa, este tipo de tratamiento parece tener cierta proliferación y aceptación, posiblemente por su eficacia a un costo muy por debajo de los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales⁽³⁾.

Existe una empresa llamada Severn Trent Limited, en el Reino Unido, que gestiona más de 1000 depuradoras de aguas residuales de pequeños núcleos de población (inferiores a 2.000 habitantes), sirviendo en total a 8,5 millones de consumidores, mediante “Contactores Biológicos Rotativos” y lechos de carrizo, con un mantenimiento mínimo y vida útil calculada de 20 años⁽³⁾.



En Europa, existen más de 200 sistemas de humedales naturales que se usan para el tratamiento de aguas residuales industriales y aguas residuales domésticas. En cuanto a humedales artificiales se han construido alrededor de 5.000 en el viejo continente ⁽³⁾.

En Estados Unidos, el desarrollo de humedales artificiales, se dio a partir de los avances dados en Europa y de experimentos llevados a cabo con humedales naturales. Al principio se tratan las aguas residuales utilizando estos sistemas, sin embargo, se dieron cuenta que modificando algunas de las características originales, se podían diseñar humedales artificiales con resultados óptimos ⁽³⁾.

A partir de 1970 se realizaron estudios en varias universidades y agencias del gobierno (EPA, Ejército, NASA y Departamento de Agricultura) con humedales artificiales como un método de tratamiento alternativo a los sistemas convencionales existentes ⁽³⁾.

Como resultado de todas las investigaciones realizadas, en Estados Unidos, tanto a nivel piloto como pruebas a gran escala, se han desarrollado diferentes conceptos para el diseño de humedales artificiales. Según estadísticas realizadas en 1991 en los Estados Unidos de América (USA), se encontraban operando más de 200 humedales artificiales tratando aguas residuales municipales, industriales y aguas de las industrias agroalimentarias ⁽³⁾. Uno de los humedales más reconocidos fue el construido en la ciudad de Arcata, California, para una población cercana a los 19.056 habitantes y caudal de 8.706 m³/d, donde el sitio que se escogió para el proyecto fue una zona industrial abandonada que incluía un relleno sanitario, dos aserraderos abandonados y su estanque. Ingenieros de la Guardia Nacional se encargaron de volarlo y retirarlo; después, una excavadora le dio forma al terreno, haciéndolo similar a un humedal. Voluntarios de la comunidad plantaron varios tipos de plantas de humedal para tener zonas alternantes de agua y vegetación. Plantaron con mayor densidad en las orillas del humedal para filtrar cualquier sólido aún en el agua. En 1986, el proyecto se completó y entró en operación ⁽⁹⁾.

Actualmente el Santuario de Pantano y Vida Silvestre de Arcata cubre un área de 62 hectáreas de humedales de agua dulce y salada, marisma y pastizales. Las aguas residuales son bombeadas de casas y edificios a la entrada, donde se remueve el detrito sólido. Los sólidos son enviados a digestores para uso como



FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE 30.000 HABITANTES
CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTÍZ
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

abono en los bosques comunitarios. Las aguas residuales se envían a estanques de oxigenación antes de entrar una serie de humedales de tratamiento. Una serie de procesos naturales purifica el agua de manera progresiva, y dos tratamientos con cloro son utilizados para cumplir con los estándares legales antes de verter las aguas en la Bahía de Humboldt ⁽⁹⁾.

En 1978 se iniciaron estudios sobre tratamiento de aguas ácidas de minas de carbón mediante el uso de humedales artificiales. Los esfuerzos de investigación en los EE.UU. aumentaron durante los años 1970 y 1980, con la participación Federal importante de Tennessee Valley Authority (TVA) y el Departamento de Agricultura de EE.UU., a finales de 1980 y principios de 1990. En 1980, en las plantas piloto de los proyectos de Santee y Arcata en California, se llevaron a cabo investigaciones en tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales y se reporta que en los Estados Unidos de América se estaban operando más de 140 humedales construidos, utilizados en el tratamiento de aguas ácidas de minas ⁽³⁾.

Imagen 1. Humedal construido en la ciudad de Arcata, California, Estados Unidos.





Imagen 2. Humedal construido en la ciudad de Arcata, California, Estados Unidos.



A finales del año 1980 apareció el primer manual con criterios de diseño y construcción (EPA, 1988) y se realizó el primer simposio internacional sobre la tecnología en Chattanooga (EEUU), que se sigue repitiendo cada dos años. También se creó el grupo especializado en humedales de la International Water Association (IWA). Desde entonces han aparecido excelentes manuales científicos y técnicos, así como capítulos de libros que han ido recopilando el conocimiento y el estado del arte de la tecnología. Entre los más reconocidos se tienen los manuales emitidos por la EPA (Environmental Protection Agency) como por ejemplo, Manual de Diseño: Construcción de Humedales y Sistemas de Plantas Acuáticas para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales, Septiembre de 1988; Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial para el Tratamiento de Aguas Residuales. Una Evaluación de la Tecnología, Julio 1993; Humedales Construidos para el Tratamiento de Aguas Residuales y el Hábitat de la Vida Silvestre, Septiembre 1993; Humedales Superficiales de Agua Libre para el Tratamiento de Aguas Residuales, Junio 1999; Manual de Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas, Septiembre 1999; Guías de Principios para Construir Humedales para Tratamiento, Octubre 2006⁽¹¹⁾.

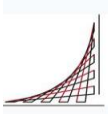


A partir de finales de 1999, más de 200 comunidades en los Estados Unidos fueron reportadas de estar utilizando humedales artificiales para tratar aguas residuales. La mayoría de estas comunidades usaban los humedales para el pulido de efluentes de laguna, como sistema de tratamiento secundario y terciario. Además, las comunidades en una amplia gama de tamaños utilizaban esta tecnología, incluyendo las grandes ciudades como Phoenix, Arizona, y el Condado de Orange, Florida⁽³⁾.

Hasta el año 2000, los países donde más se estaba trabajando en el campo del tratamiento de las aguas residuales con humedales artificiales eran: Inglaterra, Estados Unidos de América y Australia, debido a la mayor cantidad de recursos económicos que en estos países se destinaban ya sea para la investigación científica en general, o para la investigación relacionada con el tratamiento de aguas residuales en particular⁽³⁾.

En España se ha demostrado que los sistemas de depuración convencionales aplicados a municipios pequeños y medianos han tenido muchos problemas de funcionamiento, estando en la actualidad parados o abandonados en su gran mayoría. Esto debido, no a que los procesos no sean los adecuados, ya que se ha demostrado que son perfectamente válidos, sino a lo elevado de sus costos de explotación y mantenimiento. Como alternativa a estos sistemas de depuración convencionales, se están implantando en España los sistemas de depuración de bajo costo de explotación en pequeños y medianos municipios. El tratamiento de aguas residuales mediante sistemas naturales como son los humedales artificiales, está cada vez más extendido y es una opción para tener en cuenta por algunos municipios de España, debido a sus grandes ventajas derivadas de sus bajos costos de explotación y mantenimiento, gran calidad del efluente final, supresión completa de ruidos y también por su estética, que los hacen "invisibles" al integrarse perfectamente en el paisaje. Además se afirma que requieren una menor superficie que otros sistemas naturales como las lagunas, y que son más flexibles y menos susceptibles a fluctuaciones de la carga contaminante que los sistemas convencionales⁽¹⁰⁾.

En la actualidad, en comparación con otros países europeos y con Estados Unidos, donde esta técnica está más que consolidada, en España se puede considerar que es novedosa. Un estudio realizado en el año 2006 determinó que



más del 80 % de los humedales artificiales subsuperficiales existentes en España, usados para el tratamiento de aguas residuales urbanas, fueron construidos entre los años 2000 y 2005, siendo el de flujo horizontal el más implementado, obteniéndose rendimientos de eliminación entre 80 a 95 % para la DBO_5 y 70 a 95 % para SST, como también valores medios de 52 %, 40 % y 43 % para el nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal y fósforo total, respectivamente ⁽¹¹⁾.

Un ejemplo puntual en España es el del humedal como Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Los Gallardos, municipio de Almería, con una población de 1.200 habitantes y caudal de 155 m³/día. La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Los Gallardos, consta de un pretratamiento (tamiz de 3mm y desarenador), laguna anaerobia con un volumen de 1.500 m³, lechos de turba con área de 1.080 m², laguna de maduración con una capacidad de 1.470 m³ y un humedal artificial de flujo subsuperficial de 671 m². Para la implantación del humedal, se ocupó parte de la laguna de maduración preexistente, impermeabilizándola con polietileno de alta densidad de 1,5 mm de espesor.

Sobre el polietileno, se colocó una capa de arcilla rica en hierro de 10 cm de espesor y sobre la arcilla, 80 cm de grava procedente de depósitos fluviales. La granulometría de la grava está comprendida entre 30 y 70 mm de diámetro, con una composición heterogénea, correspondiendo el 35% a rocas carbonatadas (mármol, caliza y dolomía) y el resto a rocas silicatadas (cuarcita, micaesquistos, etc.). Así mismos se utilizaron plantaciones de Carrizo, sembrada en el año 1999 y que actualmente ocupan la totalidad del humedal. De acuerdo con el análisis de resultados se obtuvieron rendimientos aceptables en cuanto a DBO_5 , con valores de 25 mg/Ly valores de DQO de 125 mg/L, excepto en los meses invernales. En cuanto a la eliminación de sólidos en suspensión desde la puesta en marcha del humedal, se obtuvieron valores por debajo de 35mg/L, resultados que se ajustan a lo exigido por la normativa española. Sin embargo, la eliminación de nitrógeno y fósforo en el humedal de Los Gallardos es muy limitada debido a condiciones anaerobias que no hacen posible la nitrificación, obteniendo reducciones medias de 36% para el Nitrógeno y 40% para el Fósforo, las cuales no cumplen con la normativa española. De acuerdo con el análisis de resultados obtenido en el humedal Los Gallardos, se puede afirmar que los humedales artificiales de flujo subsuperficial son un tratamiento terciario apto para riego agrícola, ya que eliminan los sólidos y la materia orgánica que pueden obstruir los sistemas de riego por goteo. Así mismo el contenido de nitrógeno y fósforo es muy positivo en



agricultura, ya que son fertilizantes agrícolas; sin embargo, es necesaria una desinfección adicional para riego de ciertos cultivos ⁽⁴⁾.

En la tabla 1 se incluyen ejemplos de humedales artificiales de flujo subsuperficial utilizados en Europa.

Tabla 1. Ejemplos de humedales artificiales de flujo subsuperficial utilizados en Europa ⁽²⁾.

PAIS	MUNICIPIO	POBLACION EQUIVALENTE	AÑO DE ENTRADA AL SERVICIO	NIVEL DE TRATAMIENTO DEL AFLUENTE
Alemania	Gerneswang	500	1989	Secundario
Dinamarca	Borum	500	1987	Sin información
Dinamarca	Branderup, NorreRangstrup	500	1985	Sin información
Dinamarca	Dakaa.m.b.a., Hedensted	1820	1984	Sin información
Dinamarca	Egebaek - Hviding, Ribe	1500	1986	Sin información
Dinamarca	Egeskov, Fredericia	1200	1984	Sin información
Dinamarca	Ferring, Lemvig	500	1984	Sin información
Dinamarca	Fjilstervang, Videback	740	1987	Sin información
Dinamarca	Frostrup, Hanstholm	700	1985	Sin información
Dinamarca	GudumLemvig	413	1985	Sin información
Dinamarca	Hjordkaer, Rodekro	600	1984	Sin información
Dinamarca	Nordby, Samso	2000	1988	Sin información
Dinamarca	Sabro	2000	1986	Sin información
Dinamarca	Sejerslev, Morso	1500	1985	Sin información
Dinamarca	Stoholm, Fjends	6000	1985	Sin información
Dinamarca	Sundby, Thisted	490	1986	Sin información
Dinamarca	Unggerhalne,	400	1985	Sin información



Tabla 1. Ejemplos de humedales artificiales de flujo subsuperficial utilizados en Europa, continuación ⁽²⁾.

PAIS	MUNICIPIO	POBLACION EQUIVALENTE	AÑO DE ENTRADA AL SERVICIO	NIVEL DE TRATAMIENTO DEL AFLUENTE
	Alborg			
Dinamarca	Valsted	650	1986	Sin información
Dinamarca	Vogn	7100	1987	Sin información
Francia	Lallaing	15000	1992	Secundario
Francia	Panessiere	500	1987	Secundario (ninguno)
Inglaterra	Acle, Anglian	1260	1985	Secundario (aguas servidas crudas tamizadas)
Inglaterra	Camphill Village	300	1985	Secundario
Inglaterra	East Haddow, Anglian	550	1987	Secundario (aguas servidas crudas tamizadas)
Inglaterra	Gravesend, Southen	1000	1986	Secundario / lixiviado de lodos (aguas servidas crudas / aguas servidas decantadas)
Inglaterra	Kingstone and Madley, Welsh	1200	1987	Secundario (aguas servidas decantadas / aguas crudas tamizadas)
Inglaterra	Kirmintong, Anglian	550	1986	Secundario (aguas servidas brutas tamizadas)
Inglaterra	Lustleigh, Southwets	470	1987	Secundario (aguas usadas brutas)
Inglaterra	Mamhull, Wessex	375	1986	Secundario (aguas servidas crudas tamizadas / aguas servidas decantadas)

En Canadá también se vienen aplicando sistemas pasivos en el tratamiento de drenajes ácidos. Entre 1990 y 1993 se construyeron dos humedales anaerobios experimentales para tratar las aguas ácidas de la mina de cobre Bell Copper (British Columbia). En los dos sistemas se incrementó el pH desde 3 hasta 6-8 y se lograron reducciones del 40% y del 80% de cobre con un tiempo de retención de 12 y 23 días respectivamente. El rendimiento mejoraba al incrementarse el

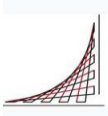


tiempo de retención y disminuía al descender la temperatura como reflejo de una menor actividad biológica ⁽⁶⁾.

En el norte de Australia (Darwin, Adelaide y Katherine), a inicios de los 90, se adelantaron estudios para mejorar la calidad de los drenajes ácidos provenientes de las minas de oro, uranio y polimetálicas, con humedales construidos por diferentes empresas mineras. Aunque en la mayoría de los casos no superaban los 10 años, se ha demostrado la viabilidad de la aplicación de estos sistemas en climas con marcados contrastes térmicos. En la mina de oro Tom's Gully se logró reducir en más del 90% las concentraciones de Arsénico, Hierro, Cobalto, Níquel, Cobre, Cinc, Plomo y Uranio, y cerca del 75% del Manganeso. ⁽¹³⁾ También en 1995 se construyeron humedales a escala piloto para tratar los drenajes ácidos de la mina de carbón Gregory, en Queensland. En esta región de moderada pluviometría (<650 mm/año) y alta evaporación (>2000 mm/año) se logró bajar los niveles de sulfato e incrementar el pH de 3,3 a 5,4 y 6,7, existiendo la necesidad de diseñar humedales de flujos subsuperficiales para maximizar la eliminación del sulfato y minimizar la evaporación ⁽⁶⁾.

En Argentina también se ha implementado el uso de estas tecnologías naturales para la depuración de aguas residuales. Uno de los proyectos más reconocidos en este país fue la construcción de un humedal artificial para realizar el pulido final de los vertimientos industriales y residuales provenientes de la empresa Bahco, ubicada en Santo Tomé, Provincia de Santa Fe. La idea de construir un humedal a cielo abierto con plantas de camalote, E. crasa pes, que se encargarán de absorber y depurar los residuos líquidos, surgió en el 2001, cuando Bahco Argentina decidió mejorar su estrategia de gestión ambiental, para así disminuir el impacto generado por los procesos de fabricación, decidiendo anexar una etapa de pulido final a su sistema de tratamiento de efluentes, utilizando humedales artificiales (figuras 3 y 4) ⁽⁷⁾.

Otra experiencia se tuvo en Lacabamba una población de 1300 habitantes ubicada en los Andes Centrales del Perú, para un caudal entre los 104 a 106 m³/día. Se hace un tratamiento primario en un tanque construido en concreto armado de 4,5 m de largo, 3,5 m de ancho y 4,0 m de profundidad. Cuenta con una tubería de entrada de 6" de diámetro de PVC y dos tuberías de salida en PVC de 6" de diámetro, las cuales hacen entrega a un lecho de secado de lodos localizado a 5 m de distancia del tanque. El lecho de secado de lodos tiene un área de 110 m²



con dimensiones de 10 m de ancho, 11 m de largo y 0,6 m de profundidad. La tubería de PVC de 6" de diámetro que interconexión el tanque con el lecho, se distribuye hacia éste en cuatro puntos de alimentación. El lecho consta de dos tuberías de salida que evacúan las aguas a un canal de riego colindante, con acumulación de lodo y crecimiento de vegetación, en malas condiciones de funcionamiento. Con el fin de implementar el tratamiento de aguas residuales mediante un humedal artificial, se modificaron las salidas del tanque para lograr almacenamiento de 23 m³ y permitir tratamiento primario de las aguas residuales mediante sedimentación y decantación de sólidos. Adicionalmente se realizó el retiro del lecho de secado de lodo y de la vegetación existente, para construir un humedal artificial de flujo subsuperficial. Se dimensionó un humedal de 6,5 m de ancho y 9,0 m de largo con una profundidad de 0,45 m. Inicialmente se procedió a la limpieza del sitio y al replanteo en el campo del área ocupada por el humedal. Como el terreno presentaba una pendiente del 12 %, el equipo técnico consideró excavar parcialmente la tierra y construir un terraplén con la tierra excavada, a fin de disminuir la pendiente hasta casi el 1 y 2 % ⁽⁸⁾.

El humedal artificial construido en la comunidad urbana de Lacabamba, de flujo horizontal subsuperficial, consta de un área total de 58,5 m², con un medio filtrante de 0,45 m y borde libre de 0,33 m, pendiente descendente en el sentido del flujo de 1 % para asegurar una buena capacidad hidráulica. La base y los taludes del humedal están revestidos con geomembrana de PVC de color negro, de 0,5 mm de espesor, como capa impermeable, recubierta con un geotextil Pavco NT 3000 como refuerzo para la distribución de cargas del medio filtrante. Teniendo en cuenta los criterios de diseño, el medio poroso por donde circularía el agua está constituido por un substrato de grava y arena usando tres tamaños de material, dispuestos desde el fondo hacia arriba de la siguiente manera: piedra (1" de Ø) con una altura de 0,15 m; grava (3/8") con una altura de 0,10 m; arena gruesa con una altura de 0,15 m y grava (3/8") con una altura de 0,05 m. En la cabecera del humedal se instaló un sistema de ingreso de agua a través de un codo y una tubería de PVC transversal perforada, con el objetivo de distribuir el agua de modo uniforme. Esta tubería se cubrió con una capa de grava de 1/2" de diámetro. Igualmente la tubería de PVC de 2" de diámetro con perforaciones de 10 mm de diámetro, que recoge el agua residual tratada se encuentra recubierta con una capa de grava de 1" de diámetro. La entrada de agua residual al humedal se reguló por medio de una llave de compuerta de 2" de diámetro, teniendo condiciones de alimentación continua con un caudal promedio de 3 m³/día. La



FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE 30.000 HABITANTES
CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTÍZ
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

carga hidráulica o tasa de aplicación hidráulica en el humedal artificial es de 0,051 m/día, con una capacidad de almacenamiento de 12,84 m³ de agua residual. Para implantar la cobertura vegetal en los humedales se procedió al trasplante de rizomas de carrizo o caña brava los cuales se obtuvieron en los alrededores del lugar. Para la siembra de carrizo se tomó una tasa de trasplante de rizomas de 5 plantas/m² para que garantice una buena cobertura a los tres o cuatro meses de sembrado ⁽⁸⁾.

Imagen 3. Vista aérea del humedal de la empresa Bahco.





Imagen 4. Fotografía del humedal de la empresa Bahco.



Tabla 2. Desempeño del humedal artificial en Lacabamba ⁽⁸⁾.

PARÁMETRO	AFLUENTE	EFLUENTE	REMOCIÓN
Sólidos suspendidos mg/L	58,5 ± 14,5	5,7 ± 4,19	90,26%
DBO ₅ mg/L	57,7 ± 33,72	30 ± 19,19	48%
Nitrógeno Amoniacal mg/L	4,83 ± 0,07	5,45 ± 2,06	-0,13%
Fósforo Total mg/L	2,2 ± 0,18	1,2 ± 0,35	45,45%
Coliformes fecales NMP/100mL	4,02E+06	1,50E+06	62,70%



El humedal artificial (tabla 2) demostró tener una buena capacidad para eliminar sólidos en suspensión por filtración por parte del suelo. La remoción de DBO_5 , 48 %, no cumple con la normativa, se espera mejorar este valor en el transcurso de los meses, cuando se alcance una cobertura vegetal total en el humedal, y, por tanto, una densidad de raíces más amplia para favorecer el crecimiento de microorganismos que degraden la materia orgánica y favorezcan su mineralización ofreciendo estos minerales para el consumo de las plantas. Además, la actividad de los microorganismos es muy lenta en climas fríos, por lo que la remoción de DBO_5 tiene tendencia a disminuir. La remoción del fósforo puede implicar dos fenómenos diferentes: la absorción por el suelo y el consumo de las plantas. Considerando el desarrollo vegetativo incompleto del carrizo durante el periodo de monitoreo, la eliminación del fósforo se debió principalmente por capacidad de absorción del medio filtrante. Cuando se alcance una cobertura vegetal adecuada, las plantas podrán intervenir en la eliminación del fósforo ya que consumen una cantidad apreciable durante su crecimiento. El nivel de eficiencia en la remoción de coliformes fecales en el humedal no fue significativo alcanzando una remoción del 62,70%. De acuerdo con las normas sanitarias para el reuso de aguas residuales de la Organización Mundial de la Salud, el agua tratada no sería apta para el reuso agrícola, dado que recomienda una media geométrica de 1000 coliformes fecales por cada 100 mL para riego sin restricción de todos los cultivos y para reuso en agua de estanques con peces ⁽⁸⁾.

A finales de los 80 e inicios de los 90, en Brasil, era de amplio conocimiento la crisis por la que atravesaba el saneamiento, de acuerdo con las investigaciones realizadas por la ABES (Associação Brasileira de Engenharia Sanitaria e Ambiental), donde el porcentaje de municipios que poseen plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) era inferior al 10%. Adicionalmente, estas plantas de tratamiento de aguas residuales atendían sólo a una parte de la población, muchas veces con problemas operacionales y eficiencias de tratamiento muy bajas ⁽¹²⁾.

En el Estado Brasileiro de Mato Grosso do Sul, el tipo de tratamiento correspondía en su mayoría a lagunas de estabilización, biodiscos, métodos de infiltración en suelos, tanques Imhoff y reactores anaeróbicos de flujo ascendente (RALF- Reactor Anaeróbico de Leito Fluidificado), siendo estos últimos los más utilizados, representando cerca de un 77 %, seguido de la combinación RALF más biodiscos. Sin embargo estas tecnologías no siempre habían dado los resultados esperados,



por lo que se generó la necesidad de innovar con tecnologías de tratamiento de diseño simple, eficientes, con bajo costo de mantenimiento y operación. Por esta razón se decidió implementar y considerar tecnologías blandas basadas en los humedales artificiales, iniciando en una pequeña comunidad rural perteneciente al municipio de Botucatu, Brasil. El sistema consiste en: una red de alcantarillado, pretratamiento compuesto por tanques sépticos para la decantación del material grueso, tratamiento compuesto por lechos de piedra para ser utilizado como pre-filtro y plantas acuáticas en medio filtrante compuesto por una mezcla de suelo, cáscara de arroz y Junco ⁽¹²⁾.

Los parámetros analizados durante un año, a intervalos de un mes, en los diferentes puntos que conforman el sistema de tratamiento, se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados muestreos en humedal artificial Botucatu, Brasil ⁽¹²⁾.

Parámetro	Punto de toma de muestras				
	Afluente Crudo	Entrada Tanque Gravas	Salida Tanque Gravas	Capa Arroz	Junco
pH	6,7	6,5	6,7	6,9	6,8
DQO (mg/L)	945	962	261	135	141
Conductividad (MS/cm)	498	693	782	770	745
Turbidez (NTU)	112	92	64	26	27
Sólidos Suspendidos (mg/L)	1290	159	86	37	47
Sólidos Totales (mg/L)	1630	496	421	379	353
Sólidos Fijos (mg/L)	326	199	191	231	290
Sólidos Volátiles (mg/L)	1304	297	230	148	163
Detergentes (mg/L)	5,7	4,4	1,9	1,3	1,3
Aceites y Grasas (mg/L)	0,1	0,03	0,05	0,03	0,03



De acuerdo con los resultados obtenidos el pH se mantiene prácticamente constante a lo largo del tratamiento, en tanto que la DQO sufre reducciones significativas, del orden de 85%. Para la conductividad eléctrica se tiene un aumento en los valores, mientras que los sólidos fijos disminuyen producto de la remoción de componentes inorgánicos del agua. El resto de las variables sufre también reducciones considerables, demostrando el potencial del sistema, sobretodo en comunidades rurales ⁽¹²⁾.

En Colombia se han tenido algunas experiencias con la utilización de humedales artificiales, relacionadas principalmente con pruebas piloto para poblaciones muy pequeñas.

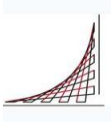
Se presenta la experiencia sobre la evaluación de un sistema de postratamiento de aguas residuales doméstica, tratada previamente en un reactor anaerobio UASB, conformado por un humedal artificial de flujo subsuperficial, perteneciente a la Universidad de Boyacá. El sistema fue construido en el año 1997 y evaluado hasta el mes de febrero de 1999. Las características más relevantes del sistema son los tiempos de retención en los espacios intersticiales del material de soporte, variados entre 0,9 días y 3 días, caudal promedio de 2,2 m³/d, utilizando para el tratamiento junco (*Typhadomingueis*), donde las eficiencias promedio de remoción encontradas durante toda la evaluación, estuvieron alrededor de los siguientes valores: demanda química de oxígeno (DQO), 51,7 %; demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), 45,1 %; nitrógeno total, 15,0 %; fósforo total, 31,0 %, sólidos suspendidos totales (SST), 88,6 % y sólidos totales (ST), 22,5 %. Como algunos de los valores mencionados no cumplen con la normativa vigente, se tuvo que modificar los tiempos de retención ⁽¹³⁾.



Tabla 4. Resultados obtenidos en diferentes países mediante la utilización de humedales para el tratamiento de aguas residuales.

PAÍS	CIUDAD	POBLACIÓN (Hab.)	CAUDAL (m ³ /d)	TIPO DE AFLUENTE	REMOCIÓN DBO5 (%)	REMOCIÓN DQO (%)	REMOCIÓN SST (%)
E.U.	California	30000	9464	Secundario	82	-	77,6
E.U.	Arcata	19056	8706	Secundario	-	-	-
España	Los Gallardos	1200	155	Secundario	75,5	-	96
España	Bustillo de Cea	400	66	Sin información	65,95	57,34	67,34
Perú	Lacabamba	1300	106	Secundario	48	-	96
Brasil	Botucatu	-	-	Secundario	-	88	80
Colombia	Tunja (prueba piloto)	-	2,2	Secundario	45,1	51,7	88,6
Colombia	Cogua, Cundinamarca (prueba piloto)	6	1,34	Secundario	80	-	44
Colombia	Escuela Colombia de Ingeniería Julio Garavito (prueba piloto) ⁽¹⁶⁾	-	0,096	Secundario	52	70	-

En Cogua, Cundinamarca, la Universidad Javeriana construyó en agosto de 2004, un humedal piloto de flujo subsuperficial con pretratamiento con un tanque séptico prefabricado, de doble cámara. El tanque séptico utilizado es de 2 m³ de capacidad, con un tiempo de retención de 1,5 días. El humedal artificial fue diseñado para cinco habitantes fijos y una población flotante promedio de 5,2



FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE 30.000 HABITANTES
CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTÍZ
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

habitantes, que aportan un caudal promedio de 1,34 m³/d y una DBO₅ esperada a la entrada de 132 mg/L y una descarga prevista de 44 mg/L. El diseño arrojó una celda de 2 m de ancho por 5,8 m de largo para un tiempo de retención hidráulica de 1,6 días, con una profundidad efectiva de 0,6 m, área del humedal de 11,6 m² y carga hidráulica de 0,23m/d. Se realizaron muestreos durante los meses de septiembre a noviembre de 2004, con una muestra de control en marzo de 2005, obteniendo remoción promedio de DBO₅ en el sistema del 66 %, durante la primera toma de muestras, en la muestra control, tomada tras cinco meses de operación, eficiencia del 80 %. Los rendimientos obtenidos para la remoción de nitrógeno total se encontraban dentro de los rangos establecidos por las bibliografías consultadas (30 a 70 %), con un valor promedio de 43 %. Para el fósforo, la eficiencia encontrada ronda el 28 %. La remoción promedio de sólidos suspendidos totales del humedal fue de 44 %, aunque en la muestra de control, se obtuvo una eficiencia del 90 % ⁽¹⁴⁾.



2. CRITERIOS DE DISEÑO

2.1. DEFINICIÓN DE HUMEDAL

Existe un gran número de definiciones de humedal debido a la gran diversidad de hábitats acuáticos y a sus peculiaridades en diferentes partes del mundo; por otra parte, la pluralidad de criterios y opiniones sobre lo que debe ser considerado como humedal hace difícil la existencia de una única definición. Algunas definiciones, como la del Convenio de Ramsar, tienen un carácter genérico y pretenden incluir un amplio espectro de ambientes acuáticos ⁽¹⁷⁾.

El convenio de Ramsar, aprobado en el año 1971 en la ciudad iraní de este nombre, establece en sus dos primeros artículos una definición de humedal de ámbito mundial ⁽¹⁷⁾:

"...Artículo 1.1. Se consideran humedales las extensiones de marismas, pantanos, turberas o superficies cubiertas de agua, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salubres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros..." ⁽¹⁷⁾.

"...Artículo 2.1. Además podrán comprender zonas de bordes fluviales o de costas adyacentes al humedal, así como las islas o extensiones de agua marina de una profundidad superior a los seis metros en marea baja, cuando se encuentren dentro del humedal..." ⁽¹⁷⁾.

Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración que permitan mantener saturado el terreno. Suelen tener aguas con profundidades inferiores a 60 cm, con plantas emergentes tales como espadañas, carrizos y juncos. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de



oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar ⁽¹⁸⁾.

Por definición del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos, los humedales son las áreas que existen entre tierras altas y los ambientes acuáticos. Se componen de los hábitats de transición donde la capa freática está sobre ó cerca de la superficie de la tierra e incluye zonas que tienen aguas poco profundas de la tierra, hasta una profundidad de 2 m. La vegetación está dominada por hidrófitas, es decir plantas de agua, que pueden vivir en zonas frecuentemente saturadas. Los suelos asociados con estos hábitats, por lo menos temporalmente, si no continuamente, permanecen cubiertos por agua, lo que produce condiciones anaeróbicas dentro de la columna de suelo ⁽¹⁹⁾.

2.2. DEFINICIÓN DE HUMEDAL ARTIFICIAL

Los sistemas diseñados para imitar las características y procesos (físicos, químicos y biológicos) de un humedal natural son comúnmente conocidos como “humedales artificiales” o “humedales construidos”. Los humedales artificiales son sistemas complejos e integrados en los que tienen lugar interacciones entre el agua, plantas, animales, microorganismos, energía solar, suelo y aire; con el propósito de mejorar la calidad del agua residual y proveer un mejoramiento ambiental ⁽¹⁾.

El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de plantas acuáticas (macrófitas) enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado, poco profundo (normalmente menos de 1 m de profundidad). La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente ^(14, 20).

Los humedales artificiales se diferencian de los pantanos naturales, en que son diseñados, construidos y operados para el uso y el beneficio humano. Se construyen en áreas donde un humedal antes no existía. Por tanto, a través del diseño y la construcción, es posible mantener un control significativo sobre el sustrato, la vegetación y el régimen hidráulico del humedal; con adecuado control



de estos parámetros, es posible diseñar un humedal para desempeñar eficazmente las tareas de tratamiento de aguas residuales ⁽¹⁹⁾.

Los humedales artificiales, al igual que los naturales, pueden reducir una amplia gama de contaminantes del agua tales como: sólidos en suspensión DBO, nutrientes, metales, patógenos y otros productos químicos. Esta eliminación se da por una variedad de procesos que incluyen la sedimentación, filtración, metabolismo microbiano (aeróbico y anaeróbico), absorción de la planta y respiración. La principal diferencia entre un humedal natural y un humedal artificial es que éste último permite el tratamiento de aguas residuales bajo diseños que se basan en objetos específicos de calidad del efluente ⁽¹⁾.

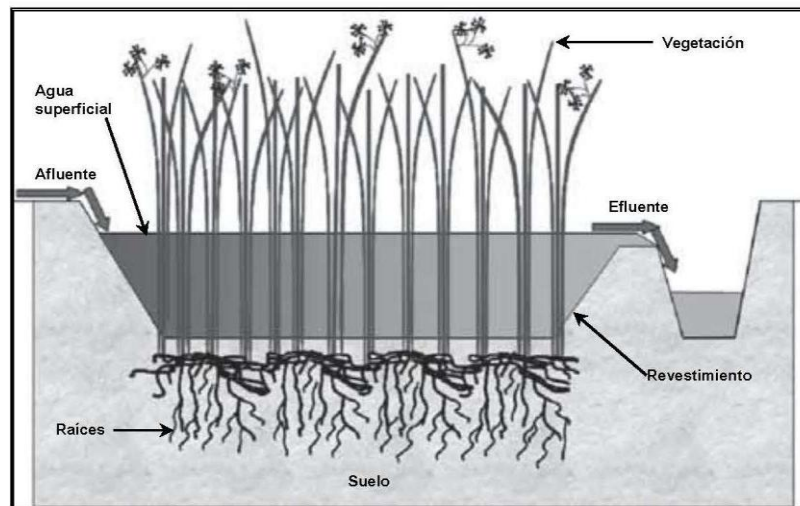
El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: (1) La actividad bioquímica de los microorganismos, (2) El aporte de oxígeno a través de las plantas durante el día y (3) El apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de las plantas, además de funcionar como material filtrante ⁽¹⁾.

2.3. TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

2.3.1. Humedal artificial de flujo superficial (surface flow constructed wetland). Se definen como humedales artificiales de flujo libre superficial aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. Los humedales artificiales de flujo libre consisten normalmente de una o más cuencas o canales de poca profundidad que pueden o no tener un recubrimiento de fondo para prevenir la percolación al agua freática susceptible a contaminación y una capa sumergida de suelo para soportar las raíces de la vegetación macrófita emergente. Cada sistema tiene estructuras adecuadas de entrada y descarga para asegurar una distribución uniforme del agua residual ⁽¹⁾. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, los humedales tienen menor profundidad, no más de 0,6 m, y plantas ⁽²⁰⁾.



Imagen 5. Esquema de un humedal artificial de flujo superficial.



La vegetación en este sistema está parcialmente sumergida en el agua, cuya profundidad varía entre 0,1 a 0,45 m. La vegetación más usada para los humedales de flujo libre incluye éneas, carrizos, juncias y juncos ⁽¹⁾, es común que sólo se seleccionen una o dos especies para la siembra ⁽³⁾. El agua residual normalmente se alimenta en forma continua y el tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente ⁽¹⁾, en algunos casos, el agua se pierde completamente por evapotranspiración y percolación en el humedal ⁽³⁾.

A los sistemas de flujo superficial normalmente se les alimenta agua residual pretratada, con algún tipo de tratamiento físico, de forma continua, siendo utilizados principalmente para tratamientos terciarios y, en algunos casos, para secundarios ⁽¹¹⁾.

Además de las aguas residuales domésticas, los sistemas de flujo superficial son usados para tratamiento del drenaje de minas, escorrentía pluvial urbana, desbordes de drenajes combinados, escorrentía agrícola, desechos ganaderos y avícolas, lixiviados de rellenos sanitarios y para efectos de mitigación ⁽³⁾.



Tabla 5. Ventajas y desventajas de un sistema de humedal artificial de flujo superficial ⁽²³⁾.

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

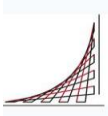
Los humedales artificiales de flujo libre son probablemente los más comunes en las aplicaciones para el tratamiento de agua residual tanto en Estados Unidos como en Canadá. Los requerimientos de terreno y los costos tienden a favorecer la aplicación de ésta tecnología en áreas rurales. En su mayor parte, sin embargo, la tecnología de flujo superficial ha sido utilizada por pequeñas y medianas



comunidades que van desde 5.000 a 50.000 habitantes ⁽³⁾. En términos de paisaje, este sistema es bastante recomendable por su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, etcétera. Pueden constituirse, en lugares turísticos y en sitios de estudio de diferentes disciplinas por las complejas interacciones biológicas que se generan y establecen ⁽²⁰⁾. Así mismo, el adecuado diseño de estos sistemas es crucial para evitar problemas derivados de una posible sobrecarga del sistema, tales como aparición de olores y plagas de insectos ⁽¹¹⁾.

2.3.2. Humedal artificial de flujo subsuperficial (subsurface flow constructed wetland). Los sistemas de flujo subsuperficial están contruidos típicamente en forma de un lecho o canal que, al igual que el sistema de flujo libre, puede o no tener una barrera que impida la percolación del agua hacia el subsuelo, además contiene un medio apropiado (grava, arena u otro material) que soporta el crecimiento de las plantas; la vegetación emergente es la misma que en el sistema de flujo libre. La profundidad del medio en estos humedales de flujo subsuperficial tiene un rango de 0,3 a 0,9 metros, siendo el valor más común el de 0,6 metros ⁽³⁾. El nivel del agua está por debajo de la superficie del soporte y fluye únicamente a través del medio que sirve para el crecimiento de la película microbiana, que es la responsable en gran parte del tratamiento que ocurre al agua residual, en donde las raíces penetran hasta el fondo del lecho ⁽¹⁾, para lo cual el material que conforma el lecho filtrante deber ser suficientemente grande para permitir un flujo subterráneo a largo plazo sin obstrucciones. Las raíces y tubérculos (rizomas) de las plantas crecen en los espacios de poros de la grava ⁽³⁾.

Durante el paso del agua residual a través del lecho poroso, se produce un contacto con zonas aerobias, anóxicas y anaerobias. La zona aerobia se encuentra muy cercana a la superficie y alrededor de las raíces y rizomas de las plantas. Los microorganismos que degradan la materia orgánica se encuentran formando una biopelícula alrededor de la grava y de las raíces de las plantas. Por tanto, cuanto mayor sea la superficie susceptible de ser ocupada por la biopelícula, mayor será la densidad de microorganismos y mayor el rendimiento del sistema. Este hecho hace que el área requerida sea menor que en los humedales de flujo superficial pero con un mayor costo debido al uso de una mayor cantidad de medio poroso. Además, con este sistema, se evitan problemas como posibles plagas de insectos, olores y, en climas fríos, aportan una mayor protección térmica ⁽¹¹⁾.



Estos sistemas se pueden combinar con cualquier otro método de depuración, consiguiendo la eliminación complementaria de nutrientes. El nivel mínimo aceptable de tratamiento preliminar previo a un sistema de humedales de flujo subsuperficial es el equivalente al tratamiento primario. Esto puede lograrse con tanques sépticos o tanques Imhoff para los sistemas más pequeños, o lagunas profundas con un tiempo corto de retención para los sistemas de mayor tamaño ⁽³⁾.

Tiene especial importancia en este tipo de sistemas que se lleve a cabo un tratamiento previo de las aguas residuales para remover sólidos gruesos, con la finalidad de evitar problemas de obstrucción al medio de soporte granular y la consecuente afectación que esto pueda tener sobre el funcionamiento del sistema ⁽¹⁾.

Tabla 6. Ventajas y desventajas de un sistema de humedal de flujo subsuperficial ⁽²³⁾.

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



Los sistemas de flujo subsuperficial más comunes en los Estados Unidos tratan efluentes de fosas sépticas y de lagunas diseñadas para la eliminación de DBO y SST. En Europa, los sistemas de flujo subsuperficial son los más utilizados para tratar los efluentes de fosas sépticas, aunque también se han utilizado extensamente en el Reino Unido para el pulido de lodos activados y de los efluentes RBC (reactores biológicos rotativos de contacto), y para el tratamiento de los caudales derivados de alcantarillados combinados ⁽³⁾.

Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos, según la forma de aplicación de agua al sistema.

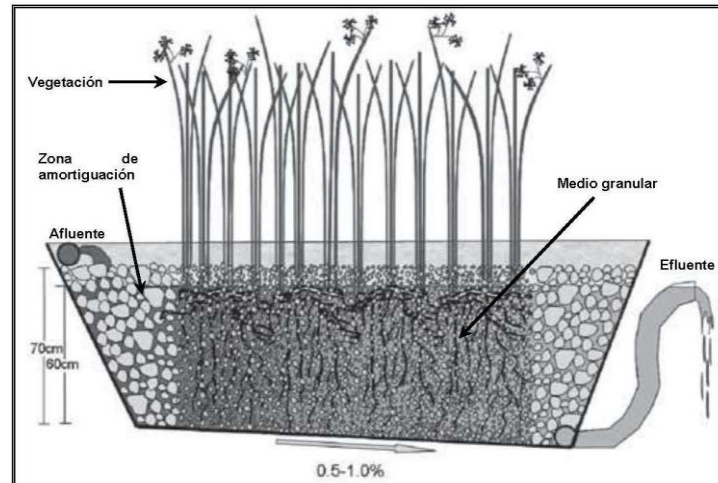
2.3.2.1. Humedales subsuperficiales de flujo horizontal. Son los sistemas más utilizados en Europa y tienen su origen en la investigación de Seidel en 1967 y Kickuth en 1977 ⁽²⁰⁾. El diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas, en la mayoría de los casos con la caña común o carrizo (*Phragmites australis*). Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo ⁽²⁰⁾.

El agua circula horizontalmente a través del medio granular, los rizomas y raíces de las plantas ⁽¹⁾, ingresando en forma permanente. Es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0,5 % a 1 % ⁽²⁰⁾.

El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal, sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño ⁽²⁰⁾.



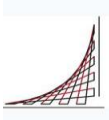
Imagen 6. Esquema de un humedal subsuperficial de flujo horizontal.



El sistema de recogida consiste en un tubo de drenaje cribado, rodeado con grava de igual tamaño que la utilizada al inicio. El diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm. La zona de plantación está constituida por grava fina de un solo diámetro, entre 3 mm a 32 mm ⁽²⁰⁾.

Es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie (5 a 10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento ⁽²⁰⁾. Usualmente operan con un máximo de 2 a 6 g DBO/m² d ⁽³⁾. Son eficientes en la remoción de DBO y SST y poco eficientes en la remoción de nutrientes. Generalmente las eficiencias logradas son de: 91 % para SST, 89 % para la DBO, 33 % para nitrógeno total y 32 % fósforo total ⁽¹⁾.

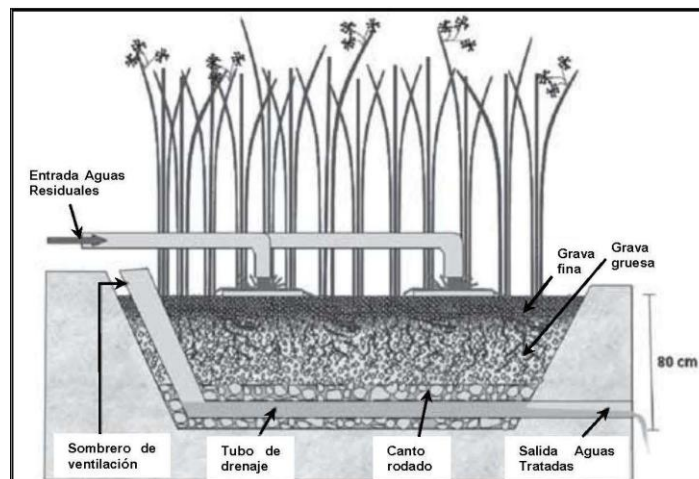
2.3.2.2. Humedales subsuperficiales de flujo vertical. Esta tipología de humedales fue desarrollada en Europa como alternativa a los humedales horizontales para producir efluentes nitrificados. En general los sistemas verticales se combinan con horizontales para que se sucedan de forma progresiva los procesos de nitrificación y desnitrificación y se consiga así eliminar nitrógeno ⁽³⁾.



Los sistemas verticales con flujo subsuperficial son cargados intermitentemente. De esta forma, las condiciones de saturación con agua en la cama matriz son seguidas por períodos de insaturación, estimulando el suministro de oxígeno. Hay muchas posibilidades de variar la distribución de intervalos, la composición de la cama matriz, etcétera, y los resultados que se han obtenido son promisorios ⁽²⁰⁾.

También conocidos como filtros intermitentes, este tipo de humedales reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua. Las aguas infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (arenas, gravas) y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. La vegetación emergente se planta también en este medio granular ⁽²⁰⁾. La profundidad del medio granular está entre 0,5 y 0,8 m y operan con cargas de alrededor de 20 a 40 g DBO/m² d, produciendo efluentes de mayor oxigenación y están libres de malos olores ⁽³⁾.

Imagen 7. Esquema de un humedal subsuperficial de flujo vertical (vista corte sección).



Los sistemas verticales tienen una mayor capacidad de tratamiento que los horizontales, requieren de menor superficie para tratar una determinada carga orgánica. Por otra parte, son más susceptibles a la colmatación ⁽³⁾.



Adicionalmente, para favorecer las condiciones aerobias del medio poroso, se suele colocar un sistema de aeración con chimeneas, que son tuberías cribadas con salidas al exterior. A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo ⁽²⁰⁾.

2.3.3. Partes de un Humedal artificial de flujo subsuperficial

2.3.3.1. Agua residual. Las aguas residuales municipales son las que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población. Después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias, son recogidas por una red de alcantarillado que las conducirá hacia el humedal ⁽²⁰⁾.

Según su uso precedente, estas aguas resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos que provienen de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con residuos de industrias, de actividades agrícolas, así como las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación ⁽²⁰⁾.

El agua es la fase móvil dentro del humedal, la encargada del transporte de los contaminantes y en la cual se van a producir la mayoría de las reacciones responsables de la depuración. Las condiciones hidrológicas son extremadamente importantes para el mantenimiento estructural y funcional del humedal. Éstas afectan a muchos factores abióticos, incluyendo el estado oxidativo del lecho, la disponibilidad de los nutrientes y la salinidad. Estos factores abióticos, a su vez, determinan qué seres vivos van a desarrollarse en el humedal. Finalmente y para completar el ciclo, los componentes bióticos actúan alterando la hidrología y otras características fisicoquímicas del humedal ⁽¹¹⁾.



Tabla 7. Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales
(20)

Contaminantes	Importancia
Sólidos suspendidos	Los sólidos suspendidos pueden llevar al desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias, cuando los residuos no tratados no lanzados al ambiente acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas. Por lo general, se mide en términos de DBO y DQO. Si es descargada sin tratamiento al medio ambiente, su estabilización biológica puede llevar al consumo de las fuentes de oxígeno natural y al desarrollo de condiciones sépticas.
Microorganismos patógenos	Los organismos patógenos existentes en las aguas residuales pueden transmitir enfermedades.
Nutrientes	Cuando son lanzados en el ambiente acuático, pueden llevar al crecimiento de vida acuática indeseable. Cuando son aplicados al suelo en cantidades excesivas, pueden contaminar también el agua subterránea.
Compuestos tóxicos	Compuestos orgánicos e inorgánicos seleccionados en función de sus conocimientos o sospecha de carcinogenicidad, mutuanogenicidad, teratogenicidad o elevada toxicidad. Muchos de estos compuestos se encuentran en las aguas residuales.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Ejemplos típicos incluyen detergentes, fenóles y pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son normalmente adicionados mediante actividades humanas. Tienen una alta persistencia en el ambiente, lo que incrementa su posibilidad de acumulación y toxicidad.
Sólidos inorgánicos disueltos	Componentes inorgánicos, como calcio, sodio y sulfato, deben ser removidos si se va usar nuevamente al agua residual, por ser potencialmente degradadores del suelo.



2.3.3.2. Vegetación. El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (tallos, raíces y rizomas) permite la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporta el oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión. Lo más importante en los humedales artificiales es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos muertos se degradan y se convierten en lo que hemos llamado restos de vegetación, que sirve como substrato para el crecimiento de la película microbiana fija que es la responsable de gran parte del tratamiento que ocurre ⁽¹⁸⁾.

Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras.

Tabla 8. Contribución de las plantas en el tratamiento de aguas residuales a través humedales artificiales ⁽¹⁸⁾.

Principales funciones
<ul style="list-style-type: none">• Estabilizan el substrato y limitan la canalización del flujo.• Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.• Estabilizan el substrato y limitan la canalización del flujo.• Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.• Toman el carbono, nutrientes y los incorporan a los tejidos de planta.• Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.• El escape de oxígeno, desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del substrato.• El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.• Cuando se mueren y se deterioran dan lugar a restos de vegetación.

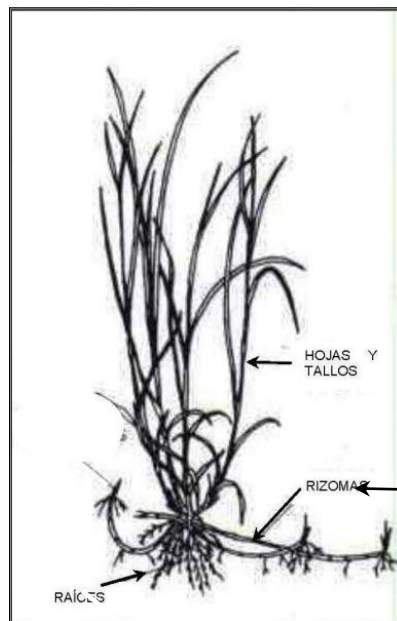


Las plantas emergentes que frecuentemente se encuentran en la mayoría de los humedales para aguas residuales son las espadañas, carrizos, juncos y juncos de laguna. Los juncos de laguna y las espadañas o una combinación de estas dos especies, son las dominantes en la mayoría de los humedales artificiales en los Estados Unidos. También existen algunos sistemas con carrizos, siendo esta especie la dominante en los humedales artificiales europeos ⁽¹⁸⁾.

Typha

La Espadaña es una planta robusta, capaz de crecer bajo diversas condiciones medio ambientales, de fácil propagación, por lo que representa una planta ideal para un humedal artificial. También es capaz de producir una biomasa anual grande y tiene un potencial pequeño de remoción de nitrógeno y fósforo. Los rizomas de Espadaña plantados a intervalos de aproximadamente 0,6 m pueden producir una cubierta densa en menos de un año. Tiene una relativamente baja penetración en grava aproximada a los 0,3 m, por lo que no es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial ⁽¹⁸⁾.

Imagen 8. Esquema típico de una planta emergente ⁽¹⁸⁾.





Scirpus

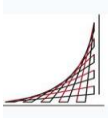
Son de la familia de las ciperáceas y crecen en grupos, generalmente en aguas interiores y costeras, pantanos salobres y humedales. Los juncos son capaces de crecer bien en agua desde 5 cm a 3 cm de profundidad. Las temperaturas deseables son entre 16 a 27° C. Se encuentran juncos creciendo en un pH de 4 a 9, donde la mayoría de las especies tienen un crecimiento moderado y pueden lograr un buen cubrimiento en alrededor de un año con separaciones cercanas a 0,3 m. Penetra en grava aproximadamente 0,6 m por lo que son muy usadas en humedales de flujo subsuperficial, existiendo en la actualidad muchas variedades de *Scirpus* ⁽¹⁸⁾.

Phragmites

Son plantas de crecimiento anual, con rizomas extensos, logrando un buen recubrimiento en un año, con separación de 0,6 m. En Europa se han usado carrizos y han sido las plantas acuáticas emergentes más extensas. Los sistemas que utilizan carrizos pueden ser más eficientes en la transferencia de oxígeno porque penetran verticalmente y a mayor profundidad que las espadañas, pero menos que los juncos en aproximadamente 0,4 m. Son muy usados para humedales artificiales debido a la ventaja de tener un bajo valor alimenticio y por tanto, no se ven atacadas por animales como sucede con otros tipos de plantas ⁽¹⁸⁾.

2.3.3.3. Microorganismos. Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predominarán los microorganismos anaerobios. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes, elementos traza y la desinfección ⁽²⁰⁾.

Los principales microorganismos presentes en la biopelícula de los humedales son: bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono y muchos nutrientes. La actividad microbiana tiene la



función de transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles y alterar las condiciones de potencial de reducción y oxidación del sustrato afectando así a la capacidad de proceso del humedal. Así mismo, gracias a la actividad biológica, muchas de las sustancias contaminantes se convierten en gases que son liberados a la atmósfera ⁽²⁰⁾.

Tabla 9. Plantas emergentes más utilizadas en humedales artificiales ⁽¹⁸⁾.

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

(*) Especie más utilizada



2.3.3.4. Sustrato (medio granular). En los humedales el sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico. La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con pocos finos⁽²⁰⁾.

El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por ende en el caudal de agua a tratar. Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Pero también este medio presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal a tratar. Por el contrario, si el lecho granular está formado por gravas y arenas, disminuye la capacidad de adsorción y el poder filtrador del medio, pero aumenta la conductividad hidráulica⁽²⁰⁾.

La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal⁽²⁰⁾.

2.3.3.5. Revestimiento. El requisito de revestimientos en los humedales artificiales depende de los requerimientos reglamentarios y de cada lugar de las características de la superficie y el subsuelo. En general, si los suelos son porosos (por ejemplo, arena), bien drenados, y contienen pequeñas cantidades de margas, arcillas y limos, el revestimiento es probable que sea un requisito para los humedales construidos⁽³⁾.

Por otra parte, si los suelos son de drenaje pobre y compuesto principalmente de arcillas, entonces, el revestimiento no será probablemente necesario. Estos sistemas tienden a producir una capa de turba en el fondo, lo que reduciría la infiltración con el tiempo. El concepto de un humedal de "fugas", que puede tomar ventaja de los procesos naturales de purificación de aguas residuales, ya que se



mueve hacia abajo a través del suelo para recargar las aguas subterráneas, puede considerarse como un beneficio potencial en algunas áreas ⁽³⁾.

2.4. DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

En la tabla 10 se compilan las principales ecuaciones de diseño para el dimensionamiento de humedales artificiales de flujo subsuperficial, con base en remoción de DBO.

Donde:

- C_e : Concentración de DBO en el efluente, (mg/L)
- C_o : Concentración de DBO en el afluente, (mg/L)
- C^* : Concentración de fondo, (g/m^3)
- A_s : Área superficial del humedal, (m^2)
- T : Temperatura ($^{\circ}C$)
- K_T : Constante de primer orden dependiente de la temperatura, (d^{-1})
- $\eta = e$: Porosidad promedio del sistema, en fracción decimal
- h : Profundidad promedio del sistema, (m)
- CH : Carga hidráulica, ($m^3 / ha. d$)
- Q : Caudal (m^3/d)
- K_A : Constante de primer orden dependiente de la temperatura, (d^{-1}) ⁽¹⁰⁾
- A_t : Área de la sección transversal del lecho, (m^2)
- K_s : Conductividad hidráulica, (m/d)
- S : Pendiente del lecho, (fracción)
- a : Ancho del humedal, (m)
- l : Longitud del humedal, (m)
- y : Profundidad del agua, (m)
- t : Tiempo de retención hidráulico, (d)
- V : Volumen humedal, (m^3)
- V_v : Volumen de vacíos, (m^3)
- K_R : Constante de remoción, (d^{-1})
- K_{20} : Constante de primer orden a $20^{\circ}C$, (d^{-1})



Tabla 10. Ecuaciones para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial, con base en remoción de DBO ^(21, 22, 23, 24, 25).

Autor / Referencia	Remoción de DBO
Reed ⁽²¹⁾	$A_s = \frac{Q \text{Ln} \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T(h)(\eta)}$
Kadlec ⁽²²⁾	$A_s = \frac{Q}{K_A} \text{Ln} \left(\frac{C_o - C^*}{C_e - C^*} \right)$
EPA, 1988 ⁽²³⁾	$A_s = \frac{Q \text{Ln} \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T(h)(\eta)}$ $A_t = \frac{Q}{K_s * S} ; \text{ (Ley de Darcy)}$ $a = \frac{A_t}{h} ; l = \frac{A_s}{a}$ $t = \frac{V_v}{Q} = \frac{l * a * h}{Q}$
Romero ⁽²⁴⁾	$C_e = C_o * e^{(-K_R * t)}$ $A_s = \frac{V}{y} ; \quad V = Q * t$ $A_t = \frac{Q}{K_s * S} ; \text{ (Ley de Darcy)}$ $a = \frac{A_t}{y} ; \quad l = \frac{A_s}{a}$
RAS 2000 ⁽²⁵⁾	$A_s = \frac{Q \cdot (\text{Ln} C_o - \text{Ln} C_e)}{(K_T \cdot h \cdot n)}$ $A_s \leq 0,032 \text{ m}^2/(\text{L/d})$ $A_t = \frac{Q}{K_s * S} ; \text{ (Ley de Darcy)}$



- *Cálculo de K_T según Reed ⁽²¹⁾:*

$$K_{20} = 1,104 \text{ d}^{-1}$$

$$K_T = K_{20}(1,06)^{(T-20)} \text{ (Para remoción de DBO)}$$

- *Cálculo de K_A según Kadlec ⁽²²⁾:*

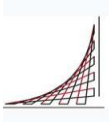
$$K_A = (K_{A,20}) \theta^{(T-20)}$$

$K_{A,20}$: constante de reacción a 20°C, según tabla 11

- factor de corrección por temperatura, según tabla 11

Tabla 11. Parámetros de diseño humedales de flujo subsuperficial (Kadlec) ⁽²²⁾.

Parámetro	$K_{A, 20}$, m/año	θ	Concentración de fondo, C^* , mg/L
DBO	117	1,057	3
SST	43,4	1	6
Nitrógeno orgánico	35	1,05	1,5
Nitrógeno amoniacal	34	1,05	0
Nitrógeno NOx	50	1,05	0
Nitrógeno total	10	1,05	1,5
Fósforo total	9,1	1,09	0
Coliformes totales	100	1,003	200 cfu/100 mL



- Valores K_T , K_s y η para ecuaciones de la EPA ⁽²³⁾:

$$K_T = K_{20} (1,1)^{(T-20)}$$

K_{20} : Se determina mediante la tabla 12 ⁽²³⁾.

Tabla 12. Características del medio para sistemas de flujo subsuperficial ⁽²³⁾.

Tipo de Medio	Tamaño del grano, mm	Porosidad (η)	Conductividad Hidráulica (K_s), m/d	K_{20}
Arena Media	1	0,42	420	1,84
Arena Gruesa	2	0,39	480	1,35
Gravilla Arenosa	8	0,35	500	0,86

- Valores de K_R , K_s y η , además de criterios de diseño según Romero ⁽²⁴⁾:

$$K_R = K_0 (37,31 * \eta^{4,4172})$$

$K_0 = 1,839 \text{ d}^{-1}$ para aguas residuales municipales

$K_0 = 0,198 \text{ d}^{-1}$ para aguas residuales industriales con DQO alta

$$C_e = C_0 * e^{(-K_R * t)}$$

Los valores de conductividad hidráulica K_s y la porosidad η , además de algunos criterios de diseño, se determinan utilizando las tablas 13 y 14.

Tabla 13. Características típicas del medio para humedales de flujo subsuperficial ⁽²⁴⁾.

Medio	Tamaño efectivo, mm	Porosidad (η)	Conductividad Hidráulica (K_s), m/d
Arena media	1	0,30	500
Arena gruesa	2	0,32	1.000
Arena y grava	8	0,35	5.000
Grava media	32	0,40	10.000
Grava gruesa	128	0,45	100.000



Tabla 14. Criterios para humedales de flujo subsuperficial ⁽²⁴⁾.

Criterio	Valor
Tiempo de retención (t), d	3 – 4 (DBO), 6 – 10 (N); 4 – 15
Carga hidráulica superficial (CH), m ³ /ha. D	470 – 1.870
Carga orgánica (CO), kg DBO/ha.d	< 112
Carga SST, kg/ha.d	390
Profundidad del agua (y), m	0,3 – 0,6
Profundidad del medio (h), m	0,45 – 0,75
Control de mosquitos	No requiere
Programa de cosecha	No requiere
Calidad esperada del efluente DBO/SST/NT/PT/, mg/L	< 20/20/10/5

- *Cálculo de K_T según RAS 2000* ⁽²⁵⁾:

El diseñador debe seleccionar una metodología de diseño que garantice el correcto funcionamiento del sistema teniendo en cuenta los siguientes criterios: conductividad hidráulica, granulometría y flujo sumergido para todas las condiciones de caudales ⁽²⁵⁾.

El valor de K_T se puede calcular por la ecuación siguiente ⁽²⁵⁾:

$$K_T = 1,104 \cdot (1,06)^{T-20}$$

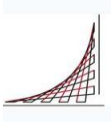
Así mismo el RAS 2000 establece:

- Los humedales artificiales de flujo subsuperficial deben localizarse aguas debajo de un tanque séptico ⁽²⁵⁾.
- La conductividad utilizada para el diseño nunca puede ser mayor que la del medio de soporte. Se debe reducir dicha conductividad en un orden de magnitud para tener en cuenta los efectos de atascamiento asociados a la retención de sólidos en los humedales ⁽²⁵⁾.



FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE 30.000 HABITANTES
CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTÍZ
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

- Se recomienda no usar la pendiente de fondo para ganar cabeza pues se corre el riesgo de dejar la entrada seca cuando hayan condiciones de bajo caudal. Usar máximo 1% de pendiente ⁽²⁵⁾.
- Usar piedra entre 50 y 100 mm para una longitud de 0,6 m alrededor del influente distribuidor y de las tuberías colectoras del efluente para reducir el taponamiento ⁽²⁵⁾.
- Usar solo sustrato lavado para eliminar los granos finos que puedan taponar los poros del sustrato y, posiblemente, causen flujo superficial ⁽²⁵⁾.
- Construir la berma al menos 150 mm por encima del sustrato y al menos 150 mm por encima de la superficie de la tierra ⁽²⁵⁾.
- Pendiente exterior 3H:1V ⁽²⁵⁾
- Pendiente interior 2H:1V ⁽²⁵⁾
- Ancho mínimo de la berma = 0.60 m ⁽³⁾
- Carga orgánica máxima = 4 m²/(kg de DBO₅/día) ⁽²⁵⁾
- Tiempo de llenado del lecho con agua = 1 - 2 días ⁽³⁾
- Profundidad. Se recomienda que la profundidad media del lecho sea 0,6 m y que la profundidad en la entrada no debe ser menor de 0,3 m. Con profundidades mayores a 0,6 m, las raíces más profundas y los rizomas empiezan a debilitarse. Se recomienda que los lechos se construyan con al menos 0,5 m de cabeza sobre la superficie del lecho. Para lechos pequeños, esta puede reducirse ⁽²⁵⁾.
- Medio. Cuando se utilice grava como medio que carece de nutrientes, se recomienda que las semillas se planten en un medio fértil con el fin de evitar problemas posteriores ⁽²⁵⁾.



FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE 30.000 HABITANTES
CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTÍZ
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

Para la operación y mantenimiento se recomienda que la superficie del humedal se cubra con vegetación. La elección de la vegetación depende del tipo de residuos, de la radiación solar, la temperatura, la estética, la vida silvestre deseada, las especies nativas y la profundidad del humedal. Se deben usar dos celdas en serie. Las celdas deben ser impermeabilizadas para evitar la infiltración. Es esencial que las raíces tengan siempre acceso a agua en el nivel de los rizomas en todas las condiciones de operación. Para medios muy permeables con alta conductividad hidráulica (tales como la grava), se recomienda que el nivel de agua se mantenga alrededor de 2 a 5 cm por debajo de la superficie del lecho ⁽²⁵⁾.



3. REQUISITOS AMBIENTALES

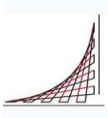
3.1. MARCO NORMATIVO

La Ley 99 de 1993 reorganizó el sistema nacional encargado de la gestión ambiental; dicha Ley, en su artículo 5, numeral 24, establece como responsabilidad del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, en relación con los humedales, regular las condiciones de conservación y manejo de ciénagas, pantanos, lagos, lagunas y demás ecosistemas hídricos continentales ⁽²⁶⁾.

Teniendo en cuenta lo anterior, con el fin de conservar y aprovechar sosteniblemente los ecosistemas formados por los humedales, se formuló la Política Nacional de Humedales Interiores y el Programa Nacional de Páramos, los cuales son la base para la gestión nacional, regional, local y para la consecución de cooperación internacional para el logro de estos objetivos. Estas Políticas de carácter específico reconocen las responsabilidades gubernamentales en torno a estos ecosistemas, los problemas que los afectan y plantean acciones para solucionarlos; en este sentido sus estrategias, líneas programáticas y acciones, tienen como propósito considerar a los humedales dentro de los procesos de planificación y ordenamiento ambiental territorial del país, con el fin de garantizar su conservación y uso racional ⁽²⁶⁾.

En este mismo sentido, el Ministerio realizó en 1999 un estudio que identificó las prioridades de gestión ambiental de varios ecosistemas, entre ellos los humedales y realizó la publicación "Humedales Interiores de Colombia, Bases Técnicas para su Conservación y Desarrollo Sostenible" ⁽²⁶⁾.

En el plano internacional, el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, realizó desde su creación las gestiones políticas y técnicas para que el Congreso de la República y la Corte Constitucional aprobaran la adhesión del país a la Convención RAMSAR (Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional, especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas), produciéndose la



adhesión protocolaria el 18 de junio de 1998 durante la reunión Panamericana de la Convención celebrada en Costa Rica y entrando en vigencia para el país a partir del 18 de octubre de 1998, mediante la Ley 357 del 21 de enero de 1997 ⁽²⁶⁾.

Dando cumplimiento a la Ley 357 de 1997, el Ministerio expidió la Resolución 157 de 2004, "por la cual se reglamentan el uso sostenible, conservación y manejo de los humedales, y se desarrollan aspectos referidos a los mismos en aplicación de la Convención RAMSAR.", igualmente expide la Resolución 0196 del 1 de febrero de 2006, "Por la cual se adopta la guía técnica para la formulación de planes de manejo para humedales en Colombia" ⁽²⁶⁾.

El decreto 1594 de 1984, en el artículo 72, estipula los requisitos mínimos que deben cumplir los vertimientos de residuos líquidos en Colombia, y en el artículo 66, aclara que las normas de vertimiento serán fijadas teniendo en cuenta los criterios de calidad establecidos para el uso o los usos asignados del recurso ⁽²⁷⁾:

Tabla 15. Norma para el vertimiento de residuos líquidos ⁽²⁷⁾.

Parámetro	Valor
pH	5 a 9 unidades
Temperatura	< 40° C
Material Flotante	Ausente
Grasas y Aceites	Remoción > 80%
Sólidos suspendidos (domésticos o industriales)	Remoción > 80%
DBO (desechos domésticos)	Remoción > 80%
DBO (desechos industriales)	Remoción > 80%

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS - 2000, en la Sección II, Título E, como lo dice su alcance, tiene el propósito de fijar los criterios básicos y requisitos mínimos que deban reunir los diferentes procesos involucrados en la conceptualización, el diseño, la construcción, la supervisión



técnica, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales que se desarrollen en la República de Colombia, con el fin de garantizar su seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad, eficiencia, sostenibilidad y redundancia dentro de un nivel de complejidad determinado, el cual se determina de acuerdo con lo establecido en el Capítulo A.3.

Definido el nivel de complejidad del proyecto se debe realizar la justificación del sistema de tratamiento de agua residual, identificando un problema de salud pública, del medio ambiente o de bienestar social, el cual deberá tener solución con la ejecución del sistema propuesto, definiendo previamente el alcance del mismo ⁽²⁵⁾.

Tabla 16. Asignación del nivel de complejidad ⁽²⁵⁾.

Nivel de complejidad	Población en la zona urbana* (habitantes)	Capacidad económica de los usuarios**
Bajo	< 2500	Baja
Medio	2501 a 12500	Baja
Medio Alto	12501 a 60000	Media
Alto	> 60000	Alta

- Proyectado al periodo de diseño, incluida la población flotante.
- Incluye la capacidad económica de la población flotante. Debe ser evaluada según metodología del DNP.

Debe presentarse un estudio sobre el impacto ambiental generado durante las etapas de construcción y/o operación del proyecto, ya sea negativo o positivo en el cual se incluyan una descripción de las obras y acciones de mitigación de los efectos en el medio ambiente propios del proyecto, en el marco de los planes de ordenamiento territorial y desarrollo urbano previstos para la zona donde se realizara el proyecto, estableciendo la implicaciones que el sistema de tratamiento de agua residual tendría dentro de la dinámica del desarrollo urbano ⁽²⁵⁾.



Posteriormente se debe realizar estudios de factibilidad y estudios previos, para los niveles de complejidad medio, medio alto y alto, según se indica en el Capítulo A.8 del Título A, basados en una evaluación socioeconómica, a través de un Análisis de Costo Eficiencia o un análisis de Costo Mínimo de Expansiones de Capacidad ⁽²⁵⁾.

De acuerdo con la norma el Análisis de Costo Eficiencia se basa en realizar una comparación de los costos de varias alternativas factibles de proyectos, con el fin de seleccionar aquella que tenga el menor valor presente de los costos de inversión, operación y mantenimiento, a partir de la siguientes suposiciones: 1) Que debe utilizarse la tasa social de descuento establecida, 2) que los beneficios derivados de las alternativas estudiadas son los mismos y 3) que los beneficios son mayores que los costos en cada alternativa ⁽²⁵⁾.

Finalmente el análisis debe seleccionar el proyecto que presente valor presente neto entre las alternativas posibles.

En el Análisis de Costo Mínimo de Expansión de Capacidad, el periodo óptimo de expansión de capacidad para un sistema debe ser definido con base en los siguientes criterios:

- a. Debe buscarse el equilibrio entre el periodo de expansión fijado por las economías de escala que prefieren un periodo largo, buscando componentes de capacidad grande, y el periodo determinado por el costo de oportunidad de capital que tiende a ser un periodo corto con componentes de poca capacidad, buscando la inversión inmediata de los recursos en otros proyectos ⁽²⁵⁾.
- b. El periodo de expansión debe escogerse para todo el sistema global y no para cada componente particular, de tal forma que se minimice el impacto causado por las ampliaciones puntuales de cada componente, evitando sobrecostos administrativos ⁽²⁵⁾.
- c. El periodo seleccionado puede ajustarse en cada etapa de expansión cuando existan estudios de demanda realizados durante dos expansiones sucesivas que demuestren cambios en las funciones de demanda, y en general, en las condiciones bajo las cuales se formuló el periodo de expansión inicialmente previsto ⁽²⁵⁾.



El diseño hidráulico de la planta debe hacerse para el caudal máximo horario. Los caudales industriales deben calcularse para los periodos críticos de producción. Para comunidades sin alcantarillado debe determinarse el caudal medio de diseño con base en la dotación de agua potable multiplicada por la población y un factor de retorno entre 0,70 y 0,80, más los caudales de infiltración, conexiones erradas y aportes institucionales comerciales e industriales ⁽²⁵⁾.

Deben hacerse estimativos de carga unitaria de origen doméstico con base en las jornadas de mediciones de caudales y concentraciones de sustancias contaminantes. En caso de no contar con mediciones, porque no existen sistemas de alcantarillado, deben utilizarse los valores de la tabla 17.

Tabla 17. Aportes per cápita para aguas residuales domésticas ⁽²⁵⁾.

Parámetro	Intervalo	Valor sugerido
DBO 5 días, 20°C, g/hab/día	25 – 80	50
Sólidos en suspensión, g/hab/día	30 – 100	50
NH3-N como N, g/hab/día	7,4 – 11	8,4
N Kjeldahl total como N, g/hab/día	9,3 - 13,7	12
Coliformes totales, #/hab/día	2×10^8 - 2×10^{11}	2×10^{11}
Salmonella Sp., #/hab/día	-	1×10^{11}
Nematodos intes., #/hab/día	-	4×10^{11}

En la RAS 2000, los humedales artificiales utilizados para el tratamiento de aguas residuales, son clasificados como sistemas de postratamiento en el sitio de origen, los cuales se utilizan en lugares aislados, donde no existen redes de alcantarillado, o donde se requiere remover la cantidad de sólidos suspendidos antes de verter el agua residual al sistema de alcantarillado. Para comunidades de más de 200 habitantes se deben hacer estudios y recopilar información necesaria como, cantidad y calidad del agua residual, tipo de suelo y permeabilidad, temperatura (media mensual y anual), uso de la tierra, zonificación, prácticas agrícolas, requerimientos de calidad para descargas superficiales y subsuperficiales, nivel freático e información de los cuerpos de agua de la zona,



FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE 30.000 HABITANTES
CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTÍZ
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

donde es necesario realizar mínimo estudios basados en inspecciones visuales, estudio de suelos para definir humedad, permeabilidad, granulometría y conductividad hidráulica saturada, estudios topográficos que indiquen la pendiente del terreno, estudios hidrológicos de precipitación (promedio máximo mensual), evapotranspiración y evaporación (promedio mensual), estudios de vulnerabilidad sísmica e inundaciones⁽²⁵⁾.

El RAS 2000 establece que los humedales artificiales de flujo subsuperficial deben localizarse aguas abajo de un tanque séptico. Para esto, debe hacerse una evaluación de las características del suelo, localización de cuerpos de agua, topografía, localización geográfica, líneas de propiedad y vegetación existente para localizar adecuadamente el humedal⁽²⁵⁾.

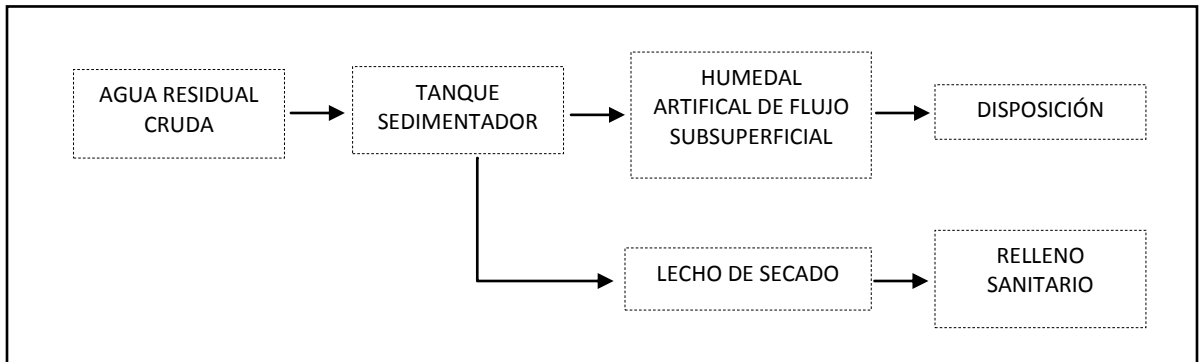


4. DISEÑO HUMEDAL ARTIFICIAL PARA 30.000 HABITANTES

De acuerdo con los principios de diseño los humedales artificiales son utilizados para efluentes secundarios y terciarios. Por ello, se supone para el presente diseño, que el agua a tratar corresponde a residuos líquidos municipales con tratamiento primario, a través de un sedimentador.

4.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

Imagen 9. Sistema de tratamiento.



4.2 CAUDAL DE DISEÑO (Q_D)

Como caudal de diseño, se supone el caudal afluente promedio a la PTARM de municipios con aforos conocidos relacionados en la tabla 18.



Tabla 18. Caudales medios de entrada a la PTARM para poblaciones con menos de 20.000 habitantes, ⁽²⁸⁾.

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	PROYECCIÓN URBANA PROYECTADA A 2012	CAUDAL MEDIO DE ENTRADA PTARM, (L/s)	CAUDAL / HABITANTE, L/d*Hab
Antioquia	Aleandría	1.830	3,5	165
Antioquia	Santafé Antioquia	15.054	29,7	170
Antioquia	Betulia	5.631	12,0	184
Antioquia	Ciudad Bolívar	16.238	18,1	96
Antioquia	Cocorná	3.968	11,0	240
Antioquia	Granada	3.727	15,0	348
Antioquia	Jardín	7.154	14,8	179
Antioquia	Jericó	8.276	16,0	167
Antioquia	Necoclí	14.250	25,0	153
Antioquia	Peñol	8.941	9,0	87
Antioquia	Retiro	9.430	20,0	183
Antioquia	San Carlos	6.096	4,9	70
Antioquia	San Francisco	2.415	5,7	204
Antioquia	San Pedro de Uraba	13.414	5,0	32
Antioquia	Venecia	6.678	10,0	129
Arauca	Fortul	12.122	33,0	235
Arauca	Tame	19.638	28,0	123
Boyacá	Nobsa	6.101	7,0	99
Boyacá	Paipa	17.954	28,0	135
Caldas	Norcasia	4.267	6,0	121
Caldas	Victoria	3.673	4,8	113
Casanare	Orocué	4.951	16,0	279
Casanare	Paz de Ariporo	18.635	27,0	125
Casanare	Tauramena	13.414	47,0	303
Casanare	Villanueva	19.799	65,0	284



Tabla 18. Caudales medios de entrada a la PTARM para poblaciones con menos de 20.000 habitantes, ⁽²⁸⁾.

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	PROYECCIÓN URBANA PROYECTADA A 2012	CAUDAL MEDIO DE ENTRADA PTARM, (L/s)	CAUDAL / HABITANTE, L/d*Hab
Cauca	Corinto	12.646	36,0	246
Cesar	Pailitas	12.891	84,0	563
Córdoba	Purísima	6.330	20,9	285
Córdoba	Valencia	14.553	15,0	89
Cundinamarca	Agua de Dios	8.664	0,3	3
Cundinamarca	Anapoima	5.443	21,7	344
Cundinamarca	Bojacá	8.505	5,6	57
Cundinamarca	Chocontá	11.761	41,8	307
Cundinamarca	Cogua	6.475	31,0	414
Cundinamarca	Cucunubá	1.313	2,0	132
Cundinamarca	El Rosal	11.430	14,1	106
Cundinamarca	Fomeque	4.629	12,5	233
Cundinamarca	Gachala	2.002	22,2	958
Cundinamarca	Gachancipá	7.622	24,1	274
Cundinamarca	Gama	787	2,5	274
Cundinamarca	Guatavita	1.907	5,0	227
Cundinamarca	La Calera	11.211	34,9	269
Cundinamarca	La Mesa	16.558	20,0	104
Cundinamarca	La Vega	5.088	16,0	272
Cundinamarca	Macheta	1.496	5,0	289
Cundinamarca	Nemocón	5.479	5,0	79
Cundinamarca	Nocaima	1.809	3,2	153
Cundinamarca	Pulí	642	1,0	135
Cundinamarca	Subachoque	5.722	12,6	190
Cundinamarca	Suesca	7.963	16,5	179
Cundinamarca	Tabio	12.056	24,7	177
Cundinamarca	Tenjo	9.082	17,0	162
Cundinamarca	Tocancipá	12.391	37,4	261
Huila	Palermo	14.815	3,2	19
Huila	Tarqui	4.841	15,0	268



Tabla 18. Caudales medios de entrada a la PTARM para poblaciones con menos de 20.000 habitantes, ⁽²⁸⁾.

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	PROYECCIÓN URBANA PROYECTADA A 2012	CAUDAL MEDIO DE ENTRADA PTARM, (L/s)	CAUDAL / HABITANTE, L/d*Hab
La Guajira	Albania	12.554	20,0	138
La Guajira	Distracción	4.929	11,0	193
La Guajira	El Molino	5.826	7,9	117
La Guajira	Hatonuevo	12.345	9,0	63
La Guajira	Villanueva	19.077	22,0	100
Magdalena	Pivijay	19.195	40,0	180
Quindío	Salento	3.755	14,8	341
Santander	Curití	3.523	11,0	270
Santander	Ocamonte	667	3,0	389
Santander	Palmas del Socorro	672	2,5	321
Santander	Páramo	1.315	1,8	118
Santander	Pinchote	1.415	2,3	138
Santander	Valle de San José	1.905	6,5	295
Tolima	Guamo	16.630	4,9	25
Tolima	Lérida	14.639	35,0	207
Tolima	Piedras	1.725	5,5	275
Tolima	Purificación	17.199	7,4	37
Tolima	Suaréz	2.115	6,0	245
Valle del Cauca	Ginebra	9.498	22,0	200
Valle del Cauca	Toro	9.334	22,0	204
Promedio				202

Para una población de 30.000 habitantes el caudal de diseño será:

$$Q_D = (202 \text{ L/hab.d})(30.000 \text{ hab}) = 6.060 \text{ m}^3/\text{d}$$



4.3 TANQUE SEDIMENTADOR PRIMARIO Y LECHO DE SECADO

El diseño se realiza para caudal promedio y para caudal pico suponiendo una relación de 3, es decir:

$$\text{Caudal Promedio} = 6.060 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{Caudal Pico} = (6.060 \text{ m}^3/\text{d}) (3) = 18.180 \text{ m}^3/\text{d}$$

Tabla 19. Estándares de diseño de sedimentadores primarios⁽²⁴⁾.

Tipo de tratamiento	Carga superficial, m/d		Profundidad, m	Carga sobre el vertedero, L/sm	Tiempo de retención, h	% remoción	
	Caudal promedio	Caudal pico				DBO	SS
Primario seguido de tratamiento secundario	32 - 49	80 - 122	3 - 5	1,4 - 4,3	1,5 - 2,5	-	50 - 70
	33 - 49	81 - 122	-	< 5,8	-	35 - 45	50 - 60
	32 - 49	81 - 122	3 - 3,7	1,4 - 5,7	1,5 - 2,5	-	-
Primario con lodo activado de desecho	24 - 33	48 - 70	3 - 5	1,4 - 4,3	1,5 - 2,5	-	50 - 70
	24 - 33	49 - 69	-	< 5,8	-	35 - 45	50 - 60
	24 - 32	49 - 61	3,7 - 4,6	1,4 - 5,7	1,5 - 2,5	-	-
Primario	30 24 - 33	45	> 1,5 2,1 - 3,6	< 5,2 1,4 - 2,2	2 1 - 2	35 - 40 -	50 - 70 -

La carga superficial de diseño para el caudal promedio y para el caudal pico será de 32 y 80 m/d respectivamente, una profundidad de agua de 3 m y carga de rebose sobre el vertedero de 4,5 L/s.m.



- Área requerida para el caudal promedio.

$$A = \frac{6.060 \text{ m}^3/d}{32 \text{ m}/d} = 189 \text{ m}^2$$

- Área requerida para el caudal pico.

$$A = \frac{18.180 \text{ m}^3/d}{80 \text{ m}/d} = 227 \text{ m}^2$$

Se adopta como área del sedimentador el área mayor, es decir 227 m².

- Diámetro del sedimentador.

$$\phi = \sqrt{\frac{4(227 \text{ m}^2)}{\pi}} = 17 \text{ m}$$

- Longitud del vertedero perimetral.

$$L = \pi(17 \text{ m}) = 53 \text{ m}$$

- Carga de rebose sobre el vertedero.

$$CV = \frac{Q}{L} = \frac{\left(18.180 \text{ m}^3/d\right)(1000)}{(53 \text{ m})(86.400)} = 4,0 \text{ L/s} \cdot \text{m} < 4,5$$



- Volumen del tanque.

$$V = 227 \text{ m}^2 * 3 \text{ m} = 682 \text{ m}^3$$

- Se adopta un tanque de diámetro igual a 17 m y 3 m de profundidad.
- El área y características del lecho de secado con cobertura, se definen de acuerdo con los parámetros de diseño de la tabla 20.

Tabla 20. Parámetros de diseño lechos de sacado ⁽²⁸⁾.

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

- El área requerida para el lecho de secado, de acuerdo con la tabla 20, es 0.05 m²/c, siendo para una población de 30.000 habitantes:

$$\text{Área de lechos} = \left(0,05 \frac{\text{m}^2}{\text{c}}\right) (30.000 \text{ c}) = 1.500 \text{ m}^2 = 0,15 \text{ Ha}$$



4.4 DBO EN EL AGUA RESIDUAL CRUDA

Se suponen los valores de la tabla 21, tomada del título E (Tabla E.2.6) del RAS-2000.

Tabla 21. Aportes per cápita para aguas residuales domésticas ⁽²⁵⁾.

Parámetro	Intervalo	Valor sugerido
DBO 5 días, 20°C, g/hab/día	25 - 80	50

$$DBO = \frac{\left(50 \frac{g}{hab \cdot día}\right)(30.000 \text{ hab})}{6.060 \frac{m^3}{d}} = 248 \frac{mg}{L} O_2$$

Para una remoción de DBO del 40% en el sedimentador primario la DBO afluyente al humedal será:

$$DBO = \left(248 \frac{mg}{L}\right) \cdot (0,6) = 149 \frac{mg}{L}$$

Para el diseño del humedal se supone que la remoción de DBO debe ser del 80%.

4.5 CÁLCULO DEL HUMEDAL UTILIZANDO EL MODELO DE DISEÑO DE REED Y RAS 2000. ^(21, 25)

- Área superficial del humedal (A_s):

$$A_s = \frac{Q \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_T(h)(\eta)}$$



- Se supone una temperatura promedio favorable para el tratamiento del agua residual de 25°C.

Para remoción de DBO:

$$K_T = K_{20}(1,06)^{(T-20)} = (1,104)(1,06)^{(25-20)} = 1,49 d^{-1}$$

- Se supone la porosidad del medio $\eta = 0,39$ (tabla 12) escogiendo como material del lecho arena gruesa, con altura promedio del sistema (h) 0,6 m.
- El área superficial para 80% de remoción de DBO en la PTAR es:

$$A_s = \frac{(6.060 \frac{m^3}{d}) \ln \left(\frac{149 \frac{mg}{L}}{30 \frac{mg}{L}} \right)}{(1,49 d^{-1})(0,6 m)(0,39)} = 28.049 m^2 = 2,8 Ha$$

- Para el cálculo del área transversal del humedal (A_t), se supone una pendiente del lecho (S) del 1% y un valor para la conductividad hidráulica (K_s) de 480 m/d (tabla 12):

$$A_t = \frac{Q}{K_s * S} = \frac{6.060 \frac{m^3}{d}}{(480 \frac{m}{d})(0,01)} = 1263 m^2$$

- Se calcula el ancho del humedal:

$$a = \frac{A_t}{h} = \frac{1.263 m^2}{0,6 m} = 2.104 m$$



- Se calcula el largo del humedal:

$$l = \frac{A_s}{a} = \frac{28.049 \text{ m}^2}{2.104 \text{ m}} = 13,3 \text{ m}$$

4.6 CÁLCULO DEL HUMEDAL UTILIZANDO EL MODELO DE DISEÑO DE KADLEC ⁽²²⁾

- Cálculo del área superficial del humedal (A_s), con una concentración de fondo $C^* = 3 \text{ mg/L}$ (tabla 11):

$$A_s = \frac{Q}{K_A} \text{Ln} \left(\frac{C_o - C^*}{C_e - C^*} \right)$$

Se determina el valor de la constante de reacción K_A (m/d) para una temperatura de 25°C , donde el factor de corrección por temperatura (θ) y la constante de velocidad de reacción a 20°C ($K_{A,20}$), según la tabla 11:

$$K_A = K_{A,20} \cdot \theta^{(T-20)} = \left(\frac{117 \text{ m}}{365 \text{ d}} \right) (1,057)^{25-20} = 0,42 \frac{\text{m}}{\text{d}}$$

Se calcula el área superficial del humedal, requerida para remoción de DBO:

$$A_s = \frac{6.060 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{0,42 \frac{\text{m}}{\text{d}}} \text{Ln} \left(\frac{149 - 3}{30 - 3} \right) = 24.290 \text{ m}^2 = 2,43 \text{ Ha}$$

- El área transversal y el ancho del humedal se mantienen, dado que no cambia el valor de la conductiva hidráulica K_s .
- Se calcula el largo del humedal:

$$l = \frac{A_s}{a} = \frac{24.290 \text{ m}^2}{2.104 \text{ m}} = 11,54 \text{ m}$$



4.7 CÁLCULO DEL HUMEDAL UTILIZANDO EL MODELO DE DISEÑO EPA ⁽²³⁾

- Cálculo del área superficial del humedal (A_s):

$$A_s = \frac{Q \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_T(h)(\eta)}$$

- Se determina la constante K_T , para una temperatura de 25°C del agua residual, tomando el valor de K_{20} (tabla 12) de 1,35, como también el valor de la porosidad (η) para el lecho filtrante de 0,39, suponiendo que es arena gruesa:

$$K_T = K_{20}(1,1)^{(T-20)} = (1,35)(1,1)^{(25-20)} = 2,17 d^{-1}$$

$$A_s = \frac{(6.060 \frac{m^3}{d}) \ln\left(\frac{149 \frac{mg}{L}}{30 \frac{mg}{L}}\right)}{(2,17 d^{-1})(0,6 m)(0,39)} = 19.171 m^2 = 1,92 Ha$$

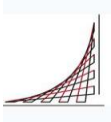
- El área transversal y el ancho del humedal se mantienen, dado que no cambia el valor de la conductiva hidráulica K_s .
- Se calcula el largo del humedal:

$$l = \frac{A_s}{a} = \frac{19.091 m^2}{2.104 m} = 9,1 m$$

4.8 CÁLCULO DEL HUMEDAL UTILIZANDO EL MODELO DE DISEÑO ROMERO ⁽²⁴⁾

- Cálculo del área superficial del humedal (A_s):

$$A_s = \frac{V}{y}$$



- Se calcula el volumen requerido, tomando como tiempo de retención 4 días y altura promedio del sistema de 0,6 m:

$$V = Q \cdot t = \left(6.060 \frac{m^3}{d}\right)(4 d) = 24.240 m^3$$

$$A_s = \frac{24.240 m^3}{0,6 m} = 40.400 m^2 = 4,04 Ha$$

- El área transversal y el ancho del humedal se mantienen, dado que no cambia el valor de la conductiva hidráulica K_s , es decir $A_t = 1.263 m^2$.

- Se calcula el ancho del humedal:

$$a = \frac{A_t}{h} = \frac{1.263 m^2}{0,6 m} = 2.104 m$$

- Se calcula el largo del humedal:

$$l = \frac{A_s}{a} = \frac{40.400 m^2}{2.104 m} = 19,2 m$$

- Se verifica la calidad del efluente para DBO:

$$C_e = C_o \cdot e^{-K_R \cdot t}$$

La porosidad del lecho filtrante se determina mediante la tabla 13, siendo para arena gruesa $n = 0,32$ y se toma como valor para la constante óptima de remoción $K_o = 1,839 d^{-1}$, con un tiempo de retención hidráulico de 4 días.

$$K_{20} = K_o \cdot (37,31) \cdot n^{4,172} = (1,839 d^{-1})(37,31)(0,32)^{4,172} = 0,59 d^{-1}$$

$$K_R = K_{20} \cdot 1,1^{T-20} = 0,591 \cdot (1,1)^{(25-20)} = 0,95 d^{-1}$$

$$DBO_e = \left(150 \frac{mg}{L}\right) (e)^{(-0,95)(4)} = 3,4 \frac{mg}{L} < 30 \frac{mg}{L}$$



4.9 RESUMEN RESULTADOS DE DISEÑO

En la tabla 22 se incluyen las dimensiones del humedal seleccionado y en la tabla 23 se presenta el resumen comparativo de los resultados del diseño.

El diseño más económico corresponde al que conforma los criterios de diseño de la EPA, razón por la cual se selecciona esta alternativa para el análisis de factibilidad.

Tabla 22. Dimensiones del humedal para el tratamiento de aguas residuales de 30.000 habitantes.

Parámetro	Valor
Caudal, Q (m ³ /d)	6.060
Área superficial, A _s (Ha)	1,91
Área transversal, A _t (m ²)	1.263
Ancho, m (a)	2.104
Largo, l (m)	9,10
Altura, h (m)	0,6
Pendiente del lecho, S (m/m)	0,01
Material lecho filtrante	Arena gruesa

Para el humedal diseñado se recomienda sembrar juncos (*Scirpus*), dado que son plantas capaces de penetrar hasta 6 cm el lecho filtrante del humedal, donde la mayoría de las especies tienen un crecimiento moderado y pueden lograr un buen cubrimiento en alrededor de un año con separaciones cercanas a 0,3 m ⁽¹⁸⁾.



Tabla 23. Resumen resultados de diseño.

PARÁMETRO	Reed ⁽²¹⁾ , RAS 2000 ⁽³⁾	Kadlec ⁽²²⁾	EPA, 1988 ⁽²³⁾	Romero ⁽²⁴⁾
	Remoción de DBO $A_s = \frac{Q \operatorname{Ln} \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T(h)(\eta)}$	Remoción de DBO $A_s = \frac{Q}{K_A} \operatorname{Ln} \left(\frac{C_o - C^*}{C_e - C^*} \right)$	Remoción de DBO $A_s = \frac{Q \operatorname{Ln} \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T(h)(\eta)}$	Remoción de DBO $A_s = \frac{V}{y} \quad V = Q * t$
Área superficial del humedal, (m ²)	A _s = 28049	24290	19171	40400
Área de la sección transversal del lecho, (m ²)	A _t = 1263	1263	1263	1263
Ancho del humedal, (m)	a = 2104	2104	2104	2104
Longitud del humedal, (m)	l = 13,3	11,54	9,1	19,2
Concentración de DBO en el efluente, (mg/L)	C _e = 30	30	30	3,3
Concentración de DBO en el afluente, (mg/L)	C _o = 149	149	149	149
Profundidad promedio del sistema, (m)	h = 0,6	0,6	0,6	0,6
Constante de remoción, (d ⁻¹)	K _R = 1,49	0,42 m/d	2,17	0,95
Conductividad hidráulica, (m/d)	K _s = 480	480	480	480
Porosidad promedio del sistema	η = 0,32	0,32	0,32	0,32
Caudal (m ³ /d)	Q = 6060	6060	6060	6060
Pendiente del lecho, (fracción)	S = 0,01	0,01	0,01	0,01
Temperatura (°C)	T = 25	25	25	25
Tiempo de retención hidráulico, (d)	t = 2,8	2,4	1,9	4
Volumen humedal, (m ³)	V = 16829	14574	11503	24240
Carga orgánica, (kg/ha.d)	900	900	900	900
COS, (kg/ha.d)	321	371	469	223



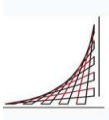
5 ANÁLISIS DE COSTOS

Los principales elementos que se incluyen en los costos de inversión de los humedales de flujo subsuperficial son similares a los requeridos para los sistemas de lagunas. Estos incluyen el costo del terreno, la evaluación del sitio, la limpieza del sitio, la movilización de suelos, el recubrimiento, el medio de grava, las plantas, las estructuras de entrada y descarga, las cercas, tuberías misceláneas, la ingeniería, los costos legales, las contingencias, los gastos fijos y ganancia del contratista ⁽²⁹⁾.

Tabla 24. Costos del humedal de flujo subsuperficial para 30.000 habitantes ⁽²⁹⁾.

ELEMENTO	VALOR ⁽³⁰⁾	
TANQUE SEDIMENTADOR ⁽³⁰⁾	Movimiento de tierra	\$ 5.675.000
	Concreto f'c = 17,5 Mpa	\$ 31.780.000
	Acero de refuerzo	\$ 27.300.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$15.000.000
HUMEDAL ARTIFICIAL ⁽³⁰⁾	Costo Terreno	\$ 267.000.000
	Evaluación del sitio (Topografía, Geotecnia)	\$58.000.000
	Limpieza en el sitio	\$5.000.000
	Movimiento de tierra	\$ 229.200.000
	Recubrimiento	\$ 286.500.000
	Medio de grava	\$ 916.000.000
	Plantas	\$22.920.000
	Sembrado	\$ 7.400.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$20.000.000
LECHO SECADO DE LADOS ⁽³⁰⁾	Costo Terreno	\$ 21.000.000
	Movimiento de tierra	\$ 56.250.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$ 10.000.000
TOTAL	\$ 1.979.025.000	

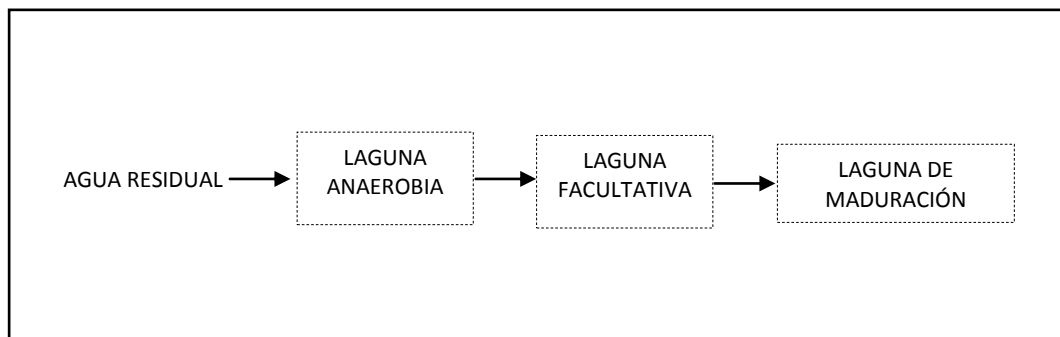
- Valor promedio de la hectárea \$140'000.000, Departamento de Cundinamarca ⁽³⁰⁾.



El medio de grava y el recubrimiento pueden ser los elementos más costosos de esta lista. En las zonas donde los suelos son arcillosos a menudo eliminan la necesidad del recubrimiento. El costo de la grava puede representar el 50 por ciento del costo de construcción. En aquellas zonas en donde la grava está disponible localmente, pero se requiere una membrana de recubrimiento, el costo de ésta puede ser cerca del 40 por ciento del costo de construcción. En muchos casos la compactación en el sitio de los suelos naturales proporciona una barrera suficiente para prevenir la contaminación del agua freática ⁽²⁹⁾.

La tabla 24 presenta los principales costos para la construcción del humedal artificial de flujo subsuperficial diseñado para 30.000 habitantes, con caudal de 6060 m³/día, de acuerdo con las dimensiones de la tabla 23, como también para el tanque sedimentador primario y el lecho de secado de lodos, basados en los costos de Construdata ⁽³⁰⁾.

Imagen 10. Sistema de tratamiento mediante lagunas de estabilización.



En la tabla 26 se presentan los principales costos de inversión que requiere un sistema de lagunas convencional (figura 10), cuantificando los valores para 30.000 habitantes, de acuerdo con las dimensiones obtenidas según se muestra en la tabla 25, basados en los costos de Construdata ⁽³⁰⁾, a fin de hacer la comparación con los costos que requiere el humedal artificial.



Tabla 25. Dimensiones del sistema de lagunas para el tratamiento de aguas residuales de 30.000 habitantes.

PARÁMETROS DE DISEÑO	LAGUNA ANAEROBIA	LAGUNA FACULTATIVA	LAGUNA DE MADURACIÓN
Tiempo de Retención, (d) (³⁴)	5	10	5
Profundidad, (m) (³⁴)	3	2	1,5
Volumen, (m ³) (³⁴)	30300	60600	30300
Área, (m ²) (³⁴)	10100	30300	20200
COS, kg/Ha. d	1485	200	22

Tabla 26. Costos del sistema de tratamiento de aguas residuales para 30.000 habitantes, utilizando lagunas de estabilización.

	ELEMENTO	VALOR ⁽³⁰⁾
LAGUNA ANAEROBIA	Costo Terreno	\$ 141.400.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$ 7.500.000
	Costo Excavación	\$ 250.000.000
LAGUNA FACULTATIVA	Costo Terreno	\$ 424.200.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$ 7.500.000
	Costo Excavación	\$ 500.000.000
LAGUNA DE MADURACIÓN	Costo Terreno	\$ 282.800.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$ 7.500.000
	Costo Excavación	\$ 250.000.000
TOTAL		\$ 1.870.900.000



Los costos de operación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento basados en el humedal artificial de flujo subsuperficial y lagunas de estabilización se muestran a continuación en la tabla 27.

Tabla 27. Costos de operación y mantenimiento ⁽³³⁾.

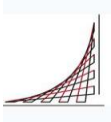
SISTEMA DE TRATAMIENTO	COSTO OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (\$/año·habitante) ⁽³³⁾	COSTO OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PARA 30.000 HABITANTES (\$/año) ⁽³³⁾
Sistema de lagunas de estabilización	760	22.800.000
Humedales artificiales de flujo subsuperficial	2.850	85.500.000

El costo evaluado de construcción de un sistema de tratamiento de aguas residuales para 30.000 habitantes mediante lagunas de estabilización es de 1.871 millones de pesos, mientras que el costo del humedal artificial de flujo subsuperficial es de 1.979 millones de pesos es decir, superior en 108 millones de pesos. El costo anual de operación del humedal será de 86 millones de pesos y el de lagunas de estabilización de 23 millones (tabla 24, 26 y 27).



6 CONCLUSIONES

- De acuerdo con los antecedentes relacionados, los humedales artificiales con espejo de agua predominan en los Estados Unidos, en poblaciones de hasta 20.000 habitantes, debido a que requieren un menor costo de inversión que los humedales de flujo subsuperficial.
- Los humedales artificiales de flujo subsuperficial, han sido utilizados principalmente en Europa y Estados Unidos, sin embargo, en Colombia es una tecnología nueva, y sólo se conocen experiencias de su utilización en el municipio de Macanal.
- Los humedales artificiales son utilizados como tratamiento secundario o terciario de aguas residuales municipales, lo que hace necesario implementar previamente tratamiento primario (sedimentadores, otros), a fin de garantizar su adecuado funcionamiento y prevenir en el largo plazo problemas de colmatación.
- Los modelos para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial, presentan diferencias en el cálculo del área superficial de diseño y, por tanto, en el tiempo de retención y en la carga superficial orgánica aplicada.
- Los costos de inversión que requiere la construcción de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales de 30.000 habitantes, en comparación con un sistema de tratamiento convencional de lagunas de estabilización son superiores en un 6 %.
- El costo de operación y mantenimiento del humedal es superior en un 273 % al sistema de lagunas de estabilización.
- La diversidad en los criterios de diseño de humedales para el tratamiento de aguas residuales indica la necesidad de adelantar estudios que contribuyan a definir con mayor perfección sus valores.



7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. OSNAYA Maricarmen. Propuesta de Diseño de un Humedal Artificial para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Universidad de la Sierra Juárez. Universidad del Sierra Juárez. México 2012.
2. <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc13072/doc13072-2.pdf>. Historia humedales artificiales. 2000.
3. ESTRADA Islena. Monografía de sobre Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) para remoción de Metales Pesados en Aguas Residuales. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Colombia 2010.
4. LAHORA Agustín. Depuración de Aguas Residuales Mediante Humedales Artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería). Gestión de Aguas del Levante, S.A., GALASA.
5. MEDINA Víctor Manuel. Implementación de una Planta de Tratamiento para el Manejo de las Aguas Residuales en el Municipio de San Martin Cesar. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.
6. LOPEZ E, ADUVIRE O, BARETTINO D. Tratamientos pasivos de drenaje ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero. Vol.113, No.1; p. 3-21. 2002.
7. FRERS Cristian. El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. Técnico Superior en Gestión Ambiental. Consultor Ambiental.
8. LOVERA Dávila Daniel, QUIPUZCO Ushñahua Lawrence, VALENTÍN Gaudencio Laureano, MARTÍNEZ Becerra Carolina, VALENCIA Pereda

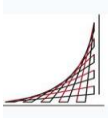


Nadezhda Dora. Adaptación de Un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales en la Comunidad Urbana de Lacabamba, Región Ancash, Perú; Usando Tecnologías de Humedales Artificiales. Universidad Nacional Mayor de San Marcos (IIGEO – UNMSM), Municipalidad Distrital de Lacabamba (Perú).

9. <http://www.ecoinflexiones.org/historias/detallados/eua-california-arcata-humedal-artificial.html>. Marzo 2001.
10. CORTIJO Rubén y otros. Aplicación de tecnologías de bajo costo para la depuración integral de agua residual en pequeños municipios de la comunidad de Castilla y León. Jornadas técnicas de ciencias ambientales. Instituto de medio ambiente Universidad de León. Madrid. Noviembre 2004.
11. SANZ Mena Javier. Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. ALQUIMIA SOLUCIONES AMBIENTALES.
12. DUNNER Ignacio. Evaluación Integral de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas y Alternativas de Tratamiento en Localidades Rurales Concentradas. Aplicaciones en las Regiones R.M. y VII. Tesis para optar al grado de Magister de la Ingeniería, Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Enero 2004.
13. LARA Carlos, y otros. Postratamiento del efluente de un reactor UASB por medio de un humedal artificial. Universidad de Boyacá. Boyacá 1997.
14. LARA Borrero Jaime. Implantación y Evolución de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia.
15. EPA. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Wildlife Habitat: 17 Case Studies. Septiembre 1993.
16. ECI – Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería No. 89. Enero – Marzo de 2013.



17. GOBIERNO ESPAÑOL. La Convención sobre los Humedales Plan Estratégico Español para la Conservación y el Uso Racional de los Humedales. España 2002.
18. BORRERO L. Jaime A. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Trabajo final (Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental). Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona 1999.
19. KOSTINEC, Robert. Constructed wetland use for treatment of dairy milkhouse wastewaters in maine. Tesis (Master de ciencias en Ingeniería Civil). Universidad de Maine. Mayo 2001.
20. DELGADILLO Oscar, CAMACHO Alan, PEREZ Luis F., ANDRADE Mauricio. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia.
21. REED, S.C., Crites, R.W., Middlebrooks, E.J. Natural Systems for Waste Management and Treatment. Second Edition. New York: McGraw-Hill, 1995.
22. KADLEC, R.H., Knight, R.L. Treatment Wetlands. Boca Raton: Lewis, 1996.
23. USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). Design Manual, Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment. Septiembre 1988.
24. ROMERO R. Jairo A. Tratamiento de aguas residuales; Teoría y principios de diseño. Tercera Edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004.
25. Ministerio de Desarrollo Económico República de Colombia. Resolución No. 1096/2000 de Noviembre de 2000, por la cual se adopta el Reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. RAS 2000.



26. <http://www.minambiente.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=1068&conID=5088&pagID=4935>.
27. MINISTERIO DE AGRICULTURA. Decreto 1594 de junio de 1984. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.
28. GALVIS, A. Alternativas de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales (PTARM) para ciudades con población menor o igual a 20.000 habitantes. Tesis de Grado Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente. Escuela Colombiana de Ingeniería – Julio Garavito. Agosto 2012.
29. EPA. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales humedales de flujo subsuperficial. Septiembre 2000.
30. <http://www.construdata.com>. Octubre de 2013.
31. <http://www.dane.gov.co/index.php/construccion-enindustria/construccion/indice-de-costos-de-la-construccion-pesada-iccp>. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Agosto 2013.
32. Bernal D.P. Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por medios naturales. Universidad del Valle / Instituto Cinara 2000.
33. Libmaber M. y Orozco A. Sustainable Treatment of Municipal Wastewater. Water 21. IWA. Octubre 2013.
34. ROMERO R. Jairo A. Lagunas de Estabilización de Aguas Residuales. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008.