



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA DE
CONSTRUCCIONES**

**Análisis del estado del arte de humedales subsuperficiales de
flujo vertical para tratamiento de aguas residuales y lodos de
depuradoras**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE
CONSTRUCCIONES**

Autores:

**ADRIANA ESTEFANÍA PAZÁN TOLEDO
JORGE STEVEN TRELLES CALLE**

Director:

MARIA BELÉN ARÉVALO DURAZNO

CUENCA, ECUADOR

2018

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a Dios por acompañarme en todo momento, por ser mi fortaleza y brindarme una vida llena de aprendizaje y felicidad.

A mis padres Walter y Alexandra por apoyarme en todo momento, por ser quienes impulsan mis sueños y me inspiran a alcanzar mis metas. Sobre todo, por ser un excelente ejemplo de vida a seguir.

A mis hermanos Marcela y Alejandro por ser parte importante de mi vida, por su apoyo incondicional a lo largo de estos años, por llenar mi vida de alegrías y amor cuando más lo he necesitado.

A mis amigos por su apoyo y confianza, por su paciencia y motivación en los momentos más difíciles, gracias por haberme ayudado a crecer como persona.

A Jorge por haber sido un excelente compañero de tesis y amigo, por la paciencia necesaria y motivación de seguir adelante.

Adriana Estefanía Pazán Toledo.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a Dios en quien creo y confío, y a quien he acudido en cada momento de felicidad, decepción y duda.

A mis padres Jorge y Doris quienes han estado conmigo en todo momento apoyándome de todas las formas posibles y que hasta ahora lo siguen haciendo, por enseñarme a ser un hombre educado, respetuoso y conservar los valores de nuestro hogar.

A mi hermano Ariel Josué quien todo este tiempo ha sido y será mi razón de inspiración, esfuerzo, dedicación y decisión en esta etapa de vida.

A mi familia para quienes he sido un orgullo y ejemplo a seguir.

A mis amigos por cada momento vivido desde el inicio de esta hermosa aventura, pues han sido personas que han demostrado su desinteresado cariño y me han inspirado a seguir adelante.

A Adriana por ser mi mejor amiga y compañera de tesis, por todos y cada uno de los momentos inolvidables compartidos y por compartir, por ayudarme a crecer como estudiante, persona y amigo.

Jorge Steven Trelles Calle

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a nuestros padres por permitir que esta etapa de nuestra vida culmine con éxito, a nuestras familias que han estado en todo momento para nosotros, también queremos agradecer a nuestros amigos que han sido parte fundamental en nuestra vida universitaria para hacer de ésta única e inolvidable, agradecemos a Dios por permitirnos caminar de su mano centrados en nuestros objetivos.

Agradecemos de manera especial a nuestra directora de tesis Ingeniera Belén Arévalo por su guía, por todo el apoyo brindado, por su tiempo, amistad y los conocimientos y enseñanzas transmitidos a lo largo de este trabajo de titulación.

Agradecemos los maestros, en especial al Ing. Josué Larriva, que han formado parte de nuestra carrera universitaria impartiendo sus conocimientos y teniendo la paciencia adecuada para nuestro aprendizaje.

INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO	4
INDICE DE FIGURAS	8
INDICE DE TABLAS	8
Introducción	11
Justificación	12
Objetivos	12
Objetivo general	12
Objetivos específicos	12
CAPÍTULO I	13
1. GENERALIDADES DE HUMEDALES ARTIFICIALES	13
1.1 Historia de los humedales	13
1.2 Impacto de los humedales artificiales a nivel mundial	15
1.2.1 Impacto económico	16
1.2.2 Impacto social	17
1.2.3 Impacto ambiental	18
1.3 Tipos de humedales	18
1.3.1 Humedales artificiales de flujo superficial (HAFS)	21
1.3.2 Humedales Artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS)	22
1.4 Clasificación de los humedales artificiales de flujo subsuperficial	23
1.4.1 Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH)	23
Fuente (Vymazal, 2010).....	23
1.4.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical (HAFSSV)	25
Fuente (Vymazal, 2010).....	25
CAPÍTULO II	26
2 HUMEDALES ARTIFICIALES SUBSUPERFICIALES DE FLUJO VERTICAL (HAFSSV)	26
2.1 Aspectos generales de los humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical (HAFSSV)	26
2.1.1 Características de las aguas residuales	26
Fuente (Vymazal, 2010).....	28
2.1.2 Sustrato	29
Fuente (Pérez, Dominguez, Gonzales, Jimenez & Rosa, 2015).....	30
2.3.1 Impermeabilización	30

2.1.4	Vegetación.....	31
2.2	Parámetros de diseño de los HAFSSV.....	34
2.2.1	Área unitaria.....	34
2.2.2	Carga hidráulica y tiempo de retención hidráulico.....	35
2.2.3	Carga orgánica.....	36
2.2.4	Capacidad de transferencia de oxígeno.....	37
2.2.5	Estrategias de alimentación.....	37
2.2.6	Profundidad (d).....	37
2.3	Diseño y configuración de los HAFSSV.....	37
2.3.1	Dimensionamiento.....	38
2.4	Mecanismos de remoción de contaminantes.....	42
2.5	Eficiencias esperadas.....	44
2.5.1	Eficiencia de la remoción de la DBO y SST.....	47
2.5.2	Eficiencia en la remoción de nitrógeno.....	49
2.5.3	Eficiencia en la remoción de fósforo.....	49
2.5.4	Eficiencia en la remoción de metales pesados.....	50
2.6	Funcionamiento y operatividad.....	51
2.6.1	Concentración de metales.....	51
2.6.2	Clima.....	51
2.6.3	PH.....	52
2.6.4	Vegetación.....	52
2.6.5	Mosquitos.....	53
2.6.6	Peces.....	53
2.6.7	Supervisión.....	53
2.6.8	Estructuras.....	54
2.6.9	Malos olores.....	54
CAPÍTULO III.....		55
3	TRABAJOS REALIZADOS EN EL ÁREA.....	55
3.1	Nivel internacional.....	55
3.2	Nivel nacional.....	60
3.2.1	Organización estructurada de la literatura existente.....	62
CAPÍTULO IV.....		67
4	PARAMETRIZACIÓN DE HAFSSV EN ZONAS FRÍAS O TEMPLADAS.....	67
4.1	Área por persona en m ² /persona equivalente.....	68
4.2	Carga orgánica por área superficial en g DBO ₅ /m ² /d o g DQO/m ² /d.....	69
4.3	Carga hidráulica en mm/d o m ³ /m ² /d.....	70

4.4	Oxígeno disuelto (mg/l)	70
4.5	PH	71
4.6	Vegetación	72
4.7	Sustrato	73
4.8	Tiempo de retención hidráulico	75
4.9	Conductividad hidráulica	75
4.10	Viscosidad cinemática del agua	75
4.11	Comparación entre los parámetros dependientes de la temperatura para zonas de clima cálido y clima frío	76
	CONCLUSIONES	78
	BIBLIOGRAFIA	79

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas.....	20
Figura 1.2. Humedal artificial de flujo superficial.....	21
Figura 1.3. Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.	23
Figura 1.4. Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical.....	25

INDICE DE TABLAS

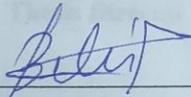
Tabla 2.1. Contaminantes principales presentes en el agua residual.....	27
Tabla 2.2. Materiales de relleno utilizados en la construcción de HAFSS.....	30
Tabla 2.3. Características de la vegetación utilizada en HAFSSV.	33
Tabla 2.4. Área superficial requerida por persona equivalente.	34
Tabla 2.5. Tasas de carga con mayor valor que se aplican en diferentes lugares del mundo.....	35
Tabla 2.6. Carga orgánica aplicada en diversos países.	36
Tabla 2.7. Propiedades físicas del agua.....	40
Tabla 2.8. Mecanismos de remoción de contaminantes.....	43
Tabla 2.9. Concentraciones de entrada y de salida en (mg/L) para cada tipo de humedal artificial, y valores de tasa de carga hidráulica en (cm/d).....	46
Tabla 2.10. Eficiencias de remoción de contaminantes mediante plantas acuáticas flotantes (A: afluente; E: efluente).	48
Tabla 3.1. Promedio de concentraciones de contaminantes en el sistema de tratamiento, Eslovenia.	58
Tabla 3.2. Eficiencia (2011).	58
Tabla 3.3. Organización de literatura internacional sobre HAFSSV.	62
Tabla 3.4. Organización de literatura nacional sobre HAFSSV.....	66

**Análisis del estado del arte de humedales subsuperficiales de flujo vertical para
tratamiento de aguas residuales y lodos de depuradoras**

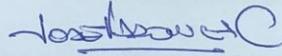
RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo analizar el estado del arte de los humedales de flujo subsuperficial vertical para el tratamiento de aguas residuales y lodos de depuradoras, se pretende realizar el estudio de los parámetros necesarios para su implementación en zonas de clima frío o templado. Además, realizar un análisis de cada parámetro, los efectos que se producen, y el impacto en el diseño. La información recopilada a nivel mundial y nacional se organiza y estructura de acuerdo al tipo de autor, año de publicación y aplicación, permitiendo el análisis y estudio de los factores necesarios según la zona. Finalmente se conocen los rangos de valores de los parámetros que influyen en el diseño de este tipo de humedales.

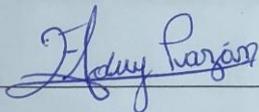
Palabra Clave: humedales artificiales, subsuperficial, parámetros



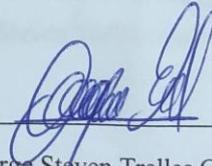
María Belén Arévalo Durazno
Directora del trabajo de titulación



José Fernando Vázquez Calero
Coordinador de Escuela



Adriana Estefanía Pazán Toledo



Jorge Steven Trelles Calle

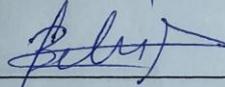
Autores

State-of-the-art analysis of vertical flow sub-surface wetlands for the treatment of wastewater and sewage sludge

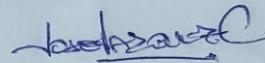
ABSTRACT

The objective of this research was to analyze the state of the art of vertical subsurface flow wetlands for the treatment of wastewater and sewage sludge. The aim was to study the necessary parameters for its implementation in cold or temperate zones. The analyzes of each parameter were performed. The effects produced and the impact on the design were determined. The information collected globally and nationally was organized and structured according to the type of author, year of publication and application. This allowed the analysis and study of the necessary factors according to the area. Finally, the ranges of values of the parameters that influenced the design of this type of wetlands were determined.

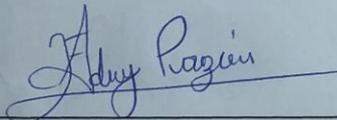
Keywords: artificial wetlands, subsurface, parameters



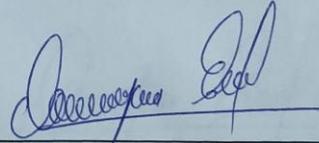
María Belén Arévalo Durazno
Thesis Director



José Fernando Vázquez Calero
Faculty Coordinator



Adriana Estefanía Pazán Toledo

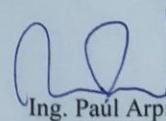


Jorge Steven Trelles Calle

Authors



Universidad del
AZUAY
Dpto. Idiomas



Ing. Paúl Arpi

Traductor

Pazán Toledo Adriana Estefanía

Trelles Calle Jorge Steven
Trabajo de Titulación
Ing. María Belén Arévalo Durazno.

Análisis del estado del arte de humedales subsuperficiales de flujo vertical para tratamiento de aguas residuales y lodos de depuradoras

Introducción

Los humedales artificiales son ecosistemas que actualmente generan un beneficio para toda la humanidad debido a su capacidad de depuración de aguas residuales. Los elementos que componen el sistema depurador como el sustrato, vegetación, sistemas de tuberías, vida bacteriana, etc. son parametrizados de modo que para su elaboración y puesta en práctica se deben tener criterios y rangos tanto de diseño como de construcción y mantenimiento.

El desarrollo de humedales artificiales tuvo su origen en Europa, el cual impactó de forma significativa a países de Latinoamérica, por lo que varios experimentos se han llevado a cabo para el estudio del rendimiento de los mismos y ha traído consigo la aplicabilidad en las zonas más lejanas de los centros urbanos debido a la poca complejidad de construcción y mantenimiento que se requiere.

Estos sistemas cumplen varias funciones además de las que fueron predeterminadas en su diseño, ya que con su capacidad depuradora aportan a la remoción de elementos tóxicos, conservación de la flora y fauna, conservación paisajística, entre otras.

Alrededor del planeta muchas investigaciones han sido grandes aportes para el desarrollo y diseño de este tratamiento de depuración. En la actualidad los humedales subsuperficiales de flujo vertical aún no han sido estudiados a profundidad, a diferencia de los de flujo horizontal que han sido los más aplicados.

Justificación

A nivel mundial se han implementado humedales que poco a poco se convirtieron en una solución viable para el tratamiento de aguas residuales, y son reconocidos como alternativas atractivas a los métodos convencionales de tratamiento. Los humedales artificiales representan soluciones innovadoras y emergentes para la protección del medio ambiente y la restauración, siendo así un sistema sostenible que sirve para cubrir las necesidades en los países en vías de desarrollo (Vymazal, 2010). En Ecuador existen diversas gamas de aplicaciones para eliminar contaminantes de las aguas residuales, los humedales subsuperficiales de flujo vertical han sido considerados como una opción primaria de tratamiento debido a su funcionalidad. Se pueden colocar en el contexto general de bajo costo, puesto que su construcción, operación y mantenimiento son simples (Vymazal, 2010). Son de gran utilidad para mitigar la contaminación ambiental, por la eliminación de una amplia variedad de contaminantes de aguas residuales, tales como: compuestos orgánicos, sólidos en suspensión, agentes patógenos, metales y nutrientes (Kadlec & Wallace, 2009).

Objetivos

Objetivo general

Analizar el estado del arte correspondiente a humedales de flujo subsuperficial vertical para el tratamiento de aguas residuales y lodos de depuradoras e identificar los factores relevantes para su implantación, conocer los efectos que produce y cuáles son los parámetros recomendados para zonas frías o templadas.

Objetivos específicos

- Analizar el estado del arte de los humedales sobre el manejo de aguas residuales y lodos de depuradoras.
- Identificar los factores relevantes para la implementación de humedales según la zona.
- Analizar cuáles son los parámetros que se deben usar en los humedales que se implementen en zonas frías o templadas.

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES DE HUMEDALES ARTIFICIALES

1.1 Historia de los humedales

El crecimiento de las ciudades y la costumbre de ensuciar los cauces más cercanos fueron fuentes de generación de epidemias, lo que causó las primeras preocupaciones por la contaminación del agua residual a los ríos a finales del siglo XIX (Londoño & Vanegas, 2009).

A lo largo de los años los seres humanos han utilizado sistemas convencionales de tratamiento de aguas servidas, entre estos los humedales naturales como receptáculos únicamente por su cercanía a los cauces mas no porque se conocieran sus propiedades para sistemas depuradores (Londoño & Vanegas, 2009).

Los humedales construidos resultaron ser los mejores receptores de aguas residuales a comienzos del siglo, siendo también purificadores importantes (Londoño & Vanegas, 2009). El tratamiento de aguas residuales por medio de humedales artificiales se ha realizado por más de 20 años a nivel mundial, eliminando sustancias contaminantes de las aguas residuales por medio de diversos procesos que no utilizan aditivos químicos ni energía externa (Guanuchi, 2012).

Las primeras nociones investigativas y científicas acerca de estos sistemas artificiales de depuración fueron en 1946 con un procedimiento llamado Max Plank Institute System cuyo desarrollo conlleva varias etapas sucesivas (Londoño); entre 1952 y 1956, se realizaron experimentos por parte de Seidel (1953) sobre la utilización de plantas de humedales para el tratamiento de aguas residuales. Seidel (1953) plantó macrófitas en zanjas poco profundas y nombró a este sistema *hydrobotanical*. Vymazal (1956) mejoró dicho proyecto mediante el uso de suelos arenosos con alta conductividad hidráulica, este método se denominó MPIP (Max Plank Institute Process) y es la base de los sistemas híbridos (Vymazal, 2010). En Europa las primeras investigaciones datan en la década de 1950, cuyos estudios demostraron la posible remoción de fenoles desde aguas residuales usando como sistema de tratamiento humedales artificiales (Vymazal, 2010).

A mediados de los años 60 el Dr. Kickuth (1969) desarrolló el método denominado FHSS de Flujo Horizontal Sub-Superficial), que rivalizó con el método desarrollado

por Seidel (1953) y creó grandes confusiones entre los técnicos y las autoridades por lo que no fueron reconocidos como métodos válidos en Alemania. Las construcciones a gran escala de estos sistemas fueron entonces realizadas en otros países, donde las macrófitas no fueron tomadas en consideración como posibles eliminadoras de sustancias tóxicas porque no se creía que podrían sobrevivir mucho tiempo en aguas contaminadas (Reed, 1991).

Los humedales construidos de flujo vertical (FV) fueron originalmente diseñados por Seidel en 1965 como un tratamiento previo a la depuración de aguas residuales. Seidel diseñó estos sistemas de tal manera que tengan un abastecimiento intermitente con las aguas residuales de percolación gradualmente hacia abajo, es decir realizó un diseño de humedales compuestos por varias etapas (Vymazal & Březinová, 2014).

A pesar de los muchos prejuicios entre los ingenieros sobre los malos olores y que por años habían prescindido del uso de las plantas en sus proyectos depuradores, se desarrollaron numerosos ejemplos de estos sistemas operativos. En la universidad de Kassel, Alemania, el profesor Kickuth diseñó en 1973 el primer humedal artificial para tratamientos de desagües, y ahora este es utilizado a nivel mundial con excelentes resultados (Doctoral, 2005).

En Dinamarca entre 1983 y 1988 se construyeron más de 130 sistemas de humedales artificiales, así como también han sido construidos en Holanda, Suecia, Bélgica y Hungría (Doctoral, 2005). Debido a su eficiencia y bajo costo en Europa se han desarrollado más de 200 sistemas de humedales naturales para el tratamiento de aguas residuales industriales y 5000 humedales artificiales (Estrada, 2010).

En América del Norte la tecnología de los humedales artificiales comenzó a finales de la década de los 60 y principios de la década de los 70. Esta ingeniería ecológica de los humedales tuvo una profunda investigación en la Universidad de Michigan en 1985 con el proyecto Houghton Lake, el primer estudio realizado sobre estos sistemas aplicados para una región de clima frío (Vymazal, 2010).

EE.UU ha tenido numerosos esfuerzos en cuanto a investigaciones acerca de estos procesos de tratamiento que aumentaron con la importante participación federal de Tennessee Valley Authority (TVA), cuyos documentos, textos y directrices de diseño fueron patrocinados por las distintas oficinas de la USPEA (United States Para-Equestrian Association) y se han publicado desde 1988 (Estrada, 2010).

Estadísticas realizadas en 1991 afirman que existen más de 200 sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales, industriales y agroalimentarias que en la actualidad son operados en Canadá, China, Egipto, India, Colombia y Sudáfrica (Doctoral, 2005). Este tipo de sistemas se aplica en diversos países, no solamente para tratar aguas residuales domésticas sino también para tratar afluentes con muy distintas características debido a su bajo costo y buen rendimiento (Londoño & Vanegas, 2009).

1.2 Impacto de los humedales artificiales a nivel mundial

Los humedales por su característica de ser pantanosos han sido vistos de una forma poco aceptable a nivel mundial, ya que se pueden interpretar como un ecosistema que es fuente de enfermedades de todo tipo y focos infecciosos (Estrada, 2010).

El principal impacto que se ha tenido desde que se descubrió el funcionamiento de los humedales es que se ha generado la construcción de muchos más sistemas de tratamientos de este tipo para que se pueda controlar la contaminación del agua, acompañado del desarrollo de tecnología en cuanto a tratamiento para que se pueda mantener la integridad del agua natural. Siendo así que durante los últimos 20 años se ha estado haciendo énfasis en la variedad de sistemas biológicos naturales y artificiales que sirven de aporte para la purificación del agua entre los cuales se tiene estanques, tratamiento de la tierra y humedales. El estudio de los humedales artificiales se interiorizó desde Europa generándose el conocimiento de diseño, funcionamiento, operación y mantenimiento y transmitiendo el interés a varios estados de EE.UU. Desde entonces los humedales artificiales han tenido una gran acogida, recibiendo financiamiento de diferentes entidades para su estudio, es así que alrededor de 1000 humedales están en funcionamiento en la actualidad volviéndose muy valiosos debido al clima que se tiene. Fundación Nacional de Ciencias, Departamento del Interior de Estados Unidos, National Aeronautics and Space Administration, Agencia de Protección Ambiental, Cuerpo de Ingenieros del Ejército, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y otros han desempeñado un papel importante en la estimulación del desarrollo de la información disponible y orientación sobre los sistemas de tratamiento de humedales construidos en los EE.UU (Agencia de protección del medio ambiente [EPA], 1993).

En la actualidad los HA han sido de gran utilidad para el tratamiento de lixiviados de

rellenos sanitarios en Eslovenia, Estados Unidos, Canadá, Inglaterra y Noruega (Estrada, 2010).

En países con escasos recursos económicos como la India o República de Checa la construcción de este tipo de tratamiento se ha convertido en una opción sostenible y muy conveniente. En Europa se han construido más de 50000 HA, en el Reino Unido se gestionan más de 1000 humedales construidos sirviendo a 8.5 millones de consumidores, con una vida útil calculada de 20 años (Vymazal & Březinová, 2014).

En San Andrés y Sauces, España se ejecutó un proceso de depuración mediante macrófitas para 250 habitantes equivalentes, tratando 18250 m³ de agua residual al año (Junio, 2016).

China mejoró sus servicios de aguas residuales para residentes de Ningbo. Gracias al respaldo del Banco Mundial los proyectos de HA garantizaron y aumentaron la cantidad de aguas residuales tratadas del 10% al 65.4% para un millón de residentes de la ciudad de Cixi (Estrada, 2010).

En México el tratamiento de AR se da por medio de 416 plantas que representa un 51.6% mediante lagunas de estabilización, 174 plantas de lodos activados con un 21,53%, tanques imhoff 7.30%, filtros biológicos 96%, zanjas de oxidación 2.53% y mediante humedales artificiales que representan un 13.37% (Se & Miranda, 2001).

En Colombia no se ha desarrollado una investigación profunda acerca de los HA para el tratamiento de aguas servidas, a pesar de que son tratamientos económicos y muy fácil de explotar (Estrada, 2010).

1.2.1 Impacto económico

Las inversiones de construcción de los HA no son de gran magnitud y de igual forma como ya se ha mencionado, el desarrollo y mantenimiento de los mismos hacen de la inversión económica un aspecto secundario, por esta razón es que al compararlos con otros sistemas tecnológicos generan valores más bajos (Ramsar, 2006).

Debido a que en el aspecto de tratamiento se debe considerar viabilidad, efectividad y economía, este sistema de tratamiento de aguas residuales ha sido catalogado como un método rentable por varias razones, entre ellas está el aporte al paisajismo y la conservación de sistemas de flora y fauna existentes en los medios en donde se construyen los humedales. Paralelamente a las consideraciones propuestas, al rededor del mundo varios expertos han desarrollado metodologías para la evaluación de

algunos de los aspectos intangibles respaldándose en la hipótesis de que ninguna entidad aprovecha el valor real de estos sistemas de tratamiento para generar una utilidad global para el manejo o gestión de los mismos (Ramsar, 2006).

Entre algunos de los elementos requeridos para la construcción y operación de los humedales artificiales que se deben tomar en cuenta para un análisis económico están: medio granular, costo del terreno, análisis del sitio, vegetación, limpieza y mantenimiento, cercas, estructuras de entrada y descarga, mano de obra, costos legales, gastos fijos y ganancia del contratista (EPA, 2000).

La grava y recubrimiento generalmente son los elementos más costosos, en los lugares donde este material no está disponible el costo de traslado representa alrededor del 50% del costo total de la construcción, caso contrario representa un 40% tomando en cuenta que se necesita una membrana de recubrimiento (Agencia de protección del medio ambiente [EPA], 2000).

Al realizar la comparación económica entre un tratamiento convencional como el reactor secuencial por tandas SBR con un sistema construido de un humedal artificial se obtiene que el costo de inversión del HA requiere un 57% menos que el tratamiento convencional y en cuanto a operación y mantenimiento se tiene un 94% menos por parte del HA (Agencia de protección del medio ambiente [EPA], 2000).

1.2.2 Impacto social

El uso que se le da a un humedal artificial de forma directa afecta a la sociedad debido a que las condiciones de conservación no son fáciles de tolerar ya que se presentan malos olores y otros efectos adversos a la salud en el caso de que no se utilice las medidas de prevención necesarias, por otra parte se generan formas de actividades como observación de aves, navegación, estudios científicos, etc (Ramsar, 2006).

Las diferentes concepciones sociales que se tienen a cerca de los HA pueden ir variando según la necesidad y el uso que se le dé, tal es el caso que para unos puede representar una oportunidad para el desarrollo comercial, como también un recurso vital que asegura la alimentación y trabajo, para otros son focos infecciosos o maneras erróneas de aprovechar las áreas de trabajo por parte de las entidades municipales. Es recomendable para evitar inconvenientes con la aceptación social, el sistema de

tratamiento no debe ser construido en áreas densamente pobladas (Barbier 2014; Hoffman, 2011).

La construcción de HA genera un gran riesgo de contacto con la piel y puede existir una transmisión de enfermedades a diferencia de otros procesos con avanzada tecnología. Es necesario que se apliquen medidas de seguridad para evitar dichos problemas tales como: vallas, señalización y diversos controles de diseño, operación y mantenimiento (Estrada, 2010).

1.2.3 Impacto ambiental

Existen varios procesos de tratamiento biológico que se realizan gracias a la implementación de los humedales construidos con los que se reduce la materia orgánica y sólidos en suspensión. Claramente se puede apreciar que el sistema de desarrollo de un humedal proyecta un bajo consumo de energía, desarrollo, y son de adhesión social (Yue, 2012).

La conservación de la flora y la fauna silvestre es uno de los aspectos más sobresalientes en los cuales un humedal artificial es partícipe. Debido al volumen de agua que requiere muchas de las veces ayuda a disminuir el caudal de ríos evitando la destrucción y las inundaciones, es así que se elabora la convención de Ramsar sobre los humedales la cual está fundamentada en la promoción de la conservación, al igual que su uso y su respectivo manejo (Ramsar, 2006).

Debido a que los HA generan una mayor actividad biológica tienen la capacidad de transformar los contaminantes presentes en nutrientes de gran ayuda para el sector agrícola o en subproductos inofensivos para el medio, también se genera energía que es muy necesaria para que se cumplan los objetivos de tratamiento (Vymazal, 2010).

1.3 Tipos de humedales

La interrelación entre el agua, suelo y vegetación forma un medio esencial que utilizan los humedales para depurar las aguas residuales. La combinación de los procesos físicos, químicos y biológicos que suceden paralelamente en este ecosistema permite aprovechar al máximo las propiedades de cada componente, tales como:

- Población microbiana: Es la encargada de la remoción de contaminantes, interactúa con las raíces de las plantas y desarrolla una capa de biopelícula (Coste & Para, 2016).
- Sustrato: Sirve de apoyo para la vegetación, la cual ayuda a que la población microbiana se fije en forma de biopelícula, para luego ser partícipe en la eliminación de contaminantes existentes en el agua (Coste & Para, 2016).
- Vegetación: Limita el alcance de la luz solar lo cual controla el crecimiento de las algas existentes, y a su vez brinda soporte mecánico para que se puedan formar las películas bacterianas. Ayudan también a la oxigenación del sustrato y a la filtración (Checa, & Checa, 2008) .
- Microfauna: Su abundancia está en dependencia de la composición de los humedales, y su existencia proporciona a los ecosistemas un mejor estado (Coste & Para, 2016).
- Agua residual: agua que se va a tratar y circula a través de la vegetación y del sustrato (Coste & Para, 2016).

La clasificación de los humedales se realiza en base a subsistemas y clases que se obtienen por medio de variables relacionadas con el tipo de vegetación, sustrato y condición hídrica.

Los humedales artificiales se clasifican de acuerdo a la presencia o no de una superficie libre de agua en contacto con la atmósfera, del sentido del flujo y de la variedad de plantas existentes denominadas macrófitas (Coste & Para, 2016).

En la figura 1.1 se puede observar la clasificación de HA según el sistema de macrófitas.

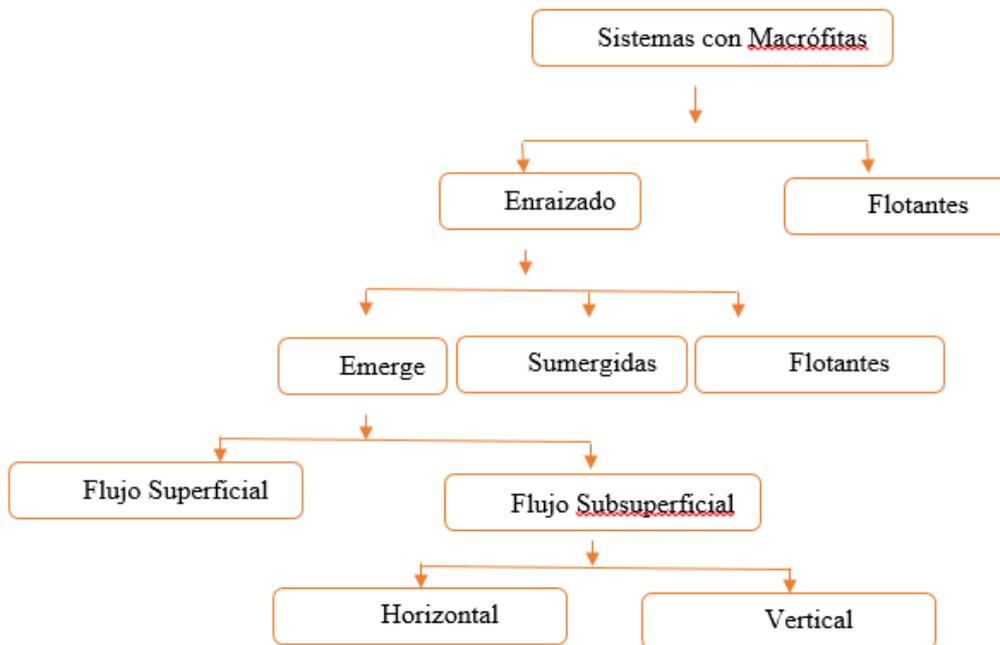


Figura 1.1. Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas.

Fuente(Vymazal,2010)

En base a la clasificación se describen los siguientes HA:

Humedales artificiales de macrófitas flotantes libres: sistemas acuáticos de tratamiento de AR en los que se utilizan plantas como lenteja de agua y jacinto de agua (Coste & Para, 2016).

Humedales emergentes enraizados: está formado por plantas perennes que tienen órganos reproductores aéreos (Vymazal & Březinová, 2014). El sustrato en el que están enraizadas las macrófitas no permite tener un flujo a través de la zona radicular por lo tanto tiene una baja conductividad. La eliminación de contaminantes se realiza mediante de reacciones que tienen lugar en la zona superior del sustrato y en el agua (González, 2002).

Humedales sumergidos enraizados: este sistema está conformado por varias angiospermas, carófitas, algunos helechos y musgos que se encuentran en la zona donde la luz solar llega, cuyos órganos reproductores son sumergidos, aéreos y flotantes (Vymazal & Březinová, 2014).

1.3.1 Humedales artificiales de flujo superficial (HAFS)

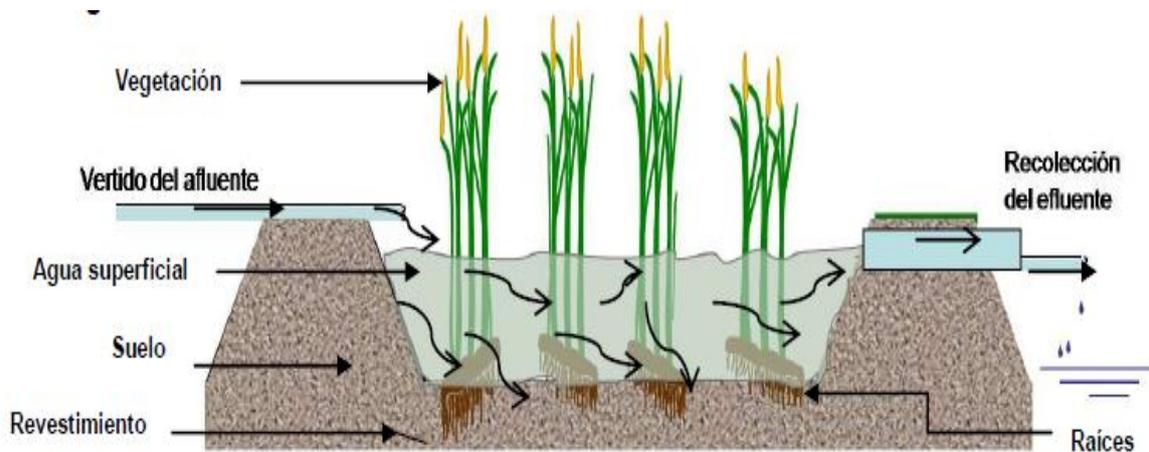


Figura 1.2. Humedal artificial de flujo superficial

Fuente(Vymazal, 2010)

En la Figura 1.2 se presenta el funcionamiento del HAFS que consiste de una cubeta con baja profundidad (0.1 a 0.6 m) y fondo constituido por suelo impermeable o membrana impermeable, proveniente de modificación de lagunas convencionales, que puede estar conformado por plantas acuáticas emergentes, sumergidas, flotantes o combinadas (Estrada, 2010). Dicha vegetación se encuentra sumergida en profundidades entre 10 y 45 cm. Las macrófitas se encuentran enraizadas en el fondo del humedal pero el agua fluye sobre la superficie del suelo con plantas desde un punto de entrada hasta un punto de salida (Estrada, 2010). El crecimiento de las microalgas está limitado gracias a las hojas que se encuentran por encima de la superficie, las cuales dan sombra al agua, a su vez el proceso de biodegradación está soportado por los tallos, raíces y hojas que caen y ayudan a la depuración mediante el tránsito de las mismas (Coste & Para, 2016).

La degradación microbiana y sedimentación eliminan de forma eficaz los contaminantes por medio de la densa vegetación existente (Vymazal, 2010).

En el ámbito paisajístico este tipo de sistemas tienen una gran acogida debido a su capacidad de alojar una variedad de especies de animales, lo que permite que sean construidos en lugares turísticos y de estudio por las interacciones biológicas generadas (Vymazal & Březinová, 2014).

Los humedales artificiales de flujo superficial son muy comunes para el tratamiento de AR debido a que sus requerimientos de capital, costos de construcción, operación y mantenimiento son favorables para la aplicación de los mismos en zonas rurales; sin embargo, la principal desventaja de los HFS es que necesitan una gran área de terreno en comparación con otros sistemas (Estrada, 2010).

1.3.2 Humedales Artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS)

Los HAFSS son zanjas o canales excavados con una pendiente de 0.5 a 1 % y rellenos con una cama de material poroso de grava, gravilla, roca o arena de adecuada permeabilidad y se encuentra en contacto con las raíces de las macrófitas y los rizomas. El nivel del agua se mantiene debajo del nivel del sustrato y no está en contacto con el aire, con una profundidad cercana a los 0.6 m (Estrada, 2010).

El recorrido del agua es permanente y va desde la parte superior de un extremo hasta que se recoge por un tubo de drenaje en la parte inferior opuesta (Estrada, 2010).

Este sistema de depuración tiene bajas profundidades cuya zona de plantación contiene grava de un solo diámetro de 3-32 cm, en donde el espacio entre sus poros permite el crecimiento de las raíces y rizomas de las plantas (Estrada, 2010).

Debido a los espacios delimitados del agua por los sustratos, es una buena opción para tratar aguas residuales con concentraciones de sólido bajas y flujo uniforme. Sirven para reducir la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) de las aguas servidas domésticas (Lincoln & Brooks, n.d.).

Algunas de las ventajas de este sistema con respecto al sistema superficial son el requerimiento de menos área para su ubicación, y ya que su flujo es subterráneo, se evitan los malos olores y la aparición de mosquitos. Además, cuando la temperatura desciende se obtiene una mejor respuesta del humedal. Finalmente, el tratamiento del agua residual es mucho más rápido puesto que el medio poroso provee una mayor superficie de contacto (Coste & Para, 2016).

Entre las desventajas, estos tratamientos son más costosos de construir en comparación con los HAFS debido a que se debe realizar la compra y colocación de capa filtrante. Los sustratos que componen el sistema tienen grandes riesgos de colmatación (Coste & Para, 2016). Además su reparación y mantenimiento tienen mayores costos, con el riesgo de que ocurra afloramiento de las aguas residuales (Estrada, 2010).

1.4 Clasificación de los humedales artificiales de flujo subsuperficial

1.4.1 Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH)

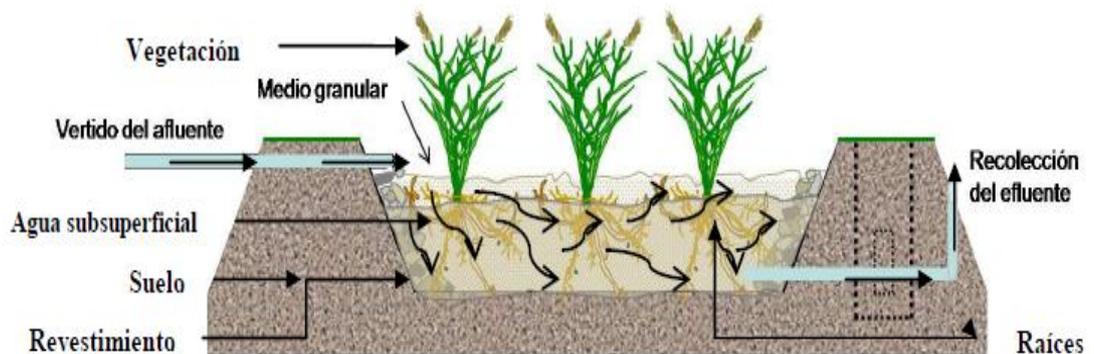


Figura 1.3. Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

Fuente (Vymazal, 2010)

Los HAFSSH son un tipo de HAFSS en los cuales, el flujo es horizontal. En estos humedales, el agua residual ingresa al tratamiento de forma continua, atraviesa el sustrato filtrante de grava que tiene de 0.3 a 0.6 m de espesor en el que consta la vegetación (Coste & Para, 2016).

El nivel del agua oscila entre 0.3 a 0.9 m y debido a que funcionan de manera inundada, el agua se encuentra por debajo de la superficie a una distancia de 0.05-0.1 m. El hecho de que el sustrato se encuentre por debajo hace que los efluentes se tornen de color blanquecino por la precipitación de carbonos y azufre. Generalmente la operación de la DBO máxima es de 2-6 gr DBO/ m²*día (Estrada, 2010).

Este sistema de tratamiento se diseña de tal manera que permita la circulación de las aguas servidas de forma horizontal a través de las macrófitas acuáticas, las cuales se hacen llegar hasta una arqueta que divide el caudal de forma equitativa para que se sirva el lecho mediante las tuberías. Cuando el agua residual pasa por el sistema radicular de las plantas, la materia orgánica se descompone biológicamente. Es indispensable realizar la impermeabilización de la parte inferior para que el sistema se

logre confinar y se pueda evitar la contaminación de las aguas subterráneas (García, 2008).

El medio granular, el cual no debe contener finos y debe ser duro, durable, homogéneo y mantener su forma por un tiempo prolongado, asegura la inacción de los microorganismos patógenos, por lo cual se puede dar la correcta transformación y asimilación de los nutrientes, la sedimentación de la materia en suspensión y su retención, y la degradación de la materia orgánica existente (García, 2008).

Generalmente las plantas utilizadas para este sistema de tratamiento son el carrizo (Phragmites), la espadaña (Typha) o los juncos (Scirpus), y el aporte que esta vegetación proporciona al HAFSSH es:

- Generación de ambientes aeróbicos, en donde se dan los procesos microbianos que usan oxígeno, para que la biopelícula crezca y se adhiera a las partes subterráneas de plantas y medio poroso lo cual también es posible ya que los rizomas y raíces proporcionan una superficie adecuada para el crecimiento de la misma (García, 2008).
- Protección ante los climas fríos es posible mediante las amortiguaciones a las variaciones del clima; al crecer las plantas no se tiene la misma intensidad de luz solar sobre el medio granular evitándose así alguna repercusión negativa.
- Capacidad de eliminar nitrógeno en un 10% y fósforo en un 20%, por lo cual se le denomina como una característica la absorción de nutrientes para su eliminación del ecosistema (García, 2008).

Es importante tener en cuenta los aspectos generales para escoger la vegetación adecuada de un sistema de depuración de aguas residuales por cual se plantea las recomendaciones generales que se hacen notar para considerar la vegetación:

- Buen sistema de transportación de oxígeno que promuevan degradación aeróbica y nitrificación (García, 2008).
- Fácil crecimiento de las especies, deben ser colonizadoras y poseer un potencial de extensión de rizomas (García, 2008).
- Tolerancia de contaminantes presentes en las aguas residuales, extensa superficie para el potenciamiento de biopelícula (García, 2008).

1.4.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical (HAFSSV)

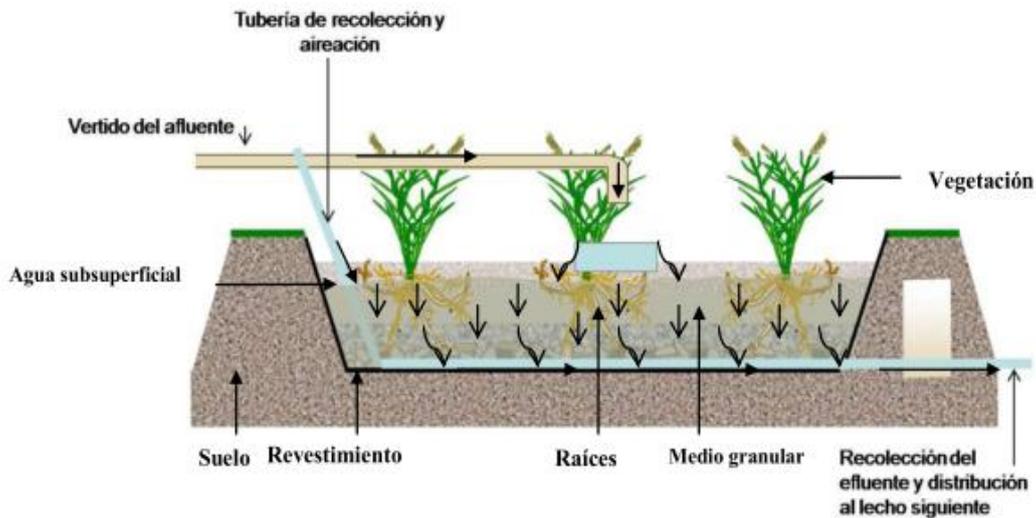


Figura 1.4. Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical

Fuente (Vymazal, 2010)

En el humedal FSSV el agua circula de forma vertical, a través de un sustrato de arena o gravilla de aproximadamente 1m de espesor en el cual está sujeta la vegetación componente, ayudada por sifones de descarga controlada (Estrada, 2010).

La dotación de agua en este caso es interrumpida cada cierto tiempo para preservar y estimular de gran manera las condiciones aerobias y luego se retoma de forma reiterada, por lo cual el medio granular no permanece inundado de forma permanente (Vymazal, 2010).

A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, este sistema está constituido por varias capas de material filtrante empezando desde la más fina en la parte superior y llegando a ser la más gruesa la de la parte inferior; adicionalmente a esto se pueden construir chimeneas como sistema de aireación lo cual consiste en un sistema de tuberías que están cribadas y tienen salida al exterior lo cual también contribuye a mantener las condiciones aerobias requeridas (Coste & Para, 2016).

Los HAFSSV son susceptibles a la colmatación. La tubería se encuentra en la parte más baja o puede no existir para que las condiciones insaturadas del medio poroso se mantengan, de tal forma que presentan un mejor rendimiento en la eliminación de DBO5 cuya capacidad de operación de cargas oscila entre los 20-40 gr DBO/ m²*día

y lo que hacen es producir efluentes con una oxigenación mayor y se encuentran libres de malos olores, nitrificación y control hidráulico (Estrada, 2010).

Entre los inconvenientes que se pueden presentar está la complejidad de su operación, el costo es un poco más elevado que el de los horizontales, y los estudios que se han realizado para este sistema de tratamiento no tiene la misma magnitud que para los horizontales (Coste & Para, 2016).

CAPÍTULO II

2 HUMEDALES ARTIFICIALES SUBSUPERFICIALES DE FLUJO VERTICAL (HAFSSV)

2.1 Aspectos generales de los humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical (HAFSSV)

Debido a que esta tipología de humedal se generó en Europa con el propósito de producir efluentes metrificados y que sean una alternativa para los de flujo horizontal, las partes componentes de impermeabilización y vegetación son muy similares a los horizontales (García, 2008).

2.1.1 Características de las aguas residuales

El agua residual es el componente que le da sentido a un humedal pues es, el elemento a tratar. El agua residual proviene de la utilización que las personas dan al agua potable, modificando su composición de múltiples formas, ya sea por el uso doméstico, comunitario, industrial. El agua residual se conduce a través del alcantarillado hasta llegar al lugar de tratamiento que es el humedal (Vymazal, 2010).

Esta agua resulta de la combinación de residuos y líquidos provenientes de edificios, lugares comerciales, oficinas, residencias, etc., a esto se le suma las de residuos de industrias y actividad agrícola (Vymazal, 2010).

Los contaminantes que generalmente se consideran como los principales se encuentran descritos en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Contaminantes principales presentes en el agua residual.

Contaminantes	Importancia
Sólidos suspendidos	Los depósitos de lodo se pueden generar debido a los sólidos suspendidos y a las condiciones anaerobias que se tiene, cuando se lanzan al medio acuático los residuos que no han sido tratados.
Materia orgánica biodegradable	Su principal composición está formada por: carbohidratos, proteínas y grasas. Su unidad de medida se expresa en términos de DBO Y DQO. Es necesaria una descarga que tenga tratamiento previo para que de esa forma su estabilización biológica no genere consumo de fuentes de oxígeno natural.
Microorganismos patógenos	Presentes en las aguas residuales, pueden transmitir enfermedades.
Nutrientes	Cuando son aplicados al suelo en grandes cantidades se puede contaminar el agua subterránea, y en el caso de ser lanzados al ambiente acuático aflora una vida acuática no deseada.
Compuestos tóxicos	Varios de estos compuestos están presentes en las aguas residuales y pueden ser de tipo orgánico e inorgánico, dependiendo de la toxicidad, carcinogenicidad, mutanogenicidad, teratogenicidad que se conozca o sospeche.

Materia orgánica refractaria	Son resistentes a detergentes, pesticidas y fenoles que son métodos de tratamientos convencionales.
Metales pesados	El ser humano a través de sus actividades añade estos metales pesados al agua, lo cuales tienen prolongada duración en el ambiente y aumentan la posibilidad de toxicidad.
Sólidos inorgánicos disueltos	Para reutilizar el AR se tiene que remover materia organiza como: sulfato, sodio y calcio que son potenciales degradadores del suelo.

Fuente (Vymazal, 2010)

Los diferentes contaminantes que se describieron en la Tabla 1, normalmente se encuentran representados por parámetros físicos, químicos y biológicos, algunos de los cuales se explican a continuación:

- Demanda bioquímica de oxígeno DBO
Mide la presencia de materia orgánica que puede ser tratada y oxidada por microorganismos. Es la cantidad de oxígeno que las reacciones energéticas consumen o que en condiciones aerobias las bacterias requieran para degradar dicha materia (Londoño & Vanegas, 2009).
- Demanda química de oxígeno DQO
Mediante la oxidación química este parámetro analítico de polución se mide la materia orgánica contenida en una muestra. Mide la cantidad de oxígeno consumido por el material orgánico necesario para descomponerlo sin necesidad de la participación de los microorganismos (Londoño & Vanegas, 2009).
- Nitrógeno total
Se presenta en las AR en cuatro estados de oxidación: nitritos, nitratos, nitrógeno orgánico y amoniacal. El nitrógeno total es la suma del amoniacal y el orgánico (Londoño & Vanegas, 2009).

- Fósforo total

Es de gran importancia para los estudios de contaminación de los cauces, lagos y otras fuentes hidrográficas y de purificación de AR. Se pueden formar más de 100 g de materia orgánica con una descarga de 1 g de fósforo (Londoño & Vanegas, 2009).

- Sólidos suspendidos totales SST

Factor de gran importancia para obtener la proveniencia de AR. El análisis de SST sirve para el control y evaluación de las unidades de tratamiento diseñadas (Oropeza, 2006).

- pH

En los procesos biológicos es en donde se presencia una gran influencia del pH puesto que controla la solubilidad de diversos sólidos disueltos y algunos gases. Existen algunas bacterias que no logran sobrevivir si éste no se encuentra comprendido entre 4 y 9.5, mientras que las des nitrificantes pueden operar con un pH entre 6.5 y 7.5 y las nitrificantes con un pH superior a 7.2 (Kadlec & Wallace, 2009).

2.1.2 Sustrato

Es conocido también como el medio granular que puede ser roca, grava, arena, sedimentos o restos de vegetación que resultan de la acumulación y descomposición de vegetación (Delgadillo, Camacho, & Serie, 2010).

Principalmente se debe pensar en una característica fundamental como lo es la permeabilidad para que el agua pueda atravesar dicho sustrato de forma correcta, por lo que se suele utilizar material granular de aproximadamente 5mm de diámetro acompañado de una cantidad baja de finos (Delgadillo, 2010).

La importancia del sustrato se puede sustentar en algunos razonamientos:

- La depuración se sustenta en que el sustrato da almacenamiento para muchos de los contaminantes presentes en el agua.
- Los procesos químicos y biológicos (microbianas) que se generan, tienen lugar dentro del sustrato.

- El sustrato por su composición da alojamiento y se pueden desarrollar varios de los organismos que se encuentran presentes en el humedal.

La vegetación que ayuda a desarrollar el sustrato causa un aumento en lo que es materia orgánica, de tal forma que esto representa una fuente de carbono por el intercambio de materia, lo que en conclusión es una fuente de energía para procesos biológicos.

El tamaño del material que se utilice para definirlo como sustrato es muy importante ya que afecta al flujo del humedal y a su vez al caudal, sin embargo se tiene una alta absorción y filtración por la utilización elevada de arcillas y limos, aunque este medio de tratamiento requiere velocidades bajas para su correcto funcionamiento lo cual limita el caudal a tratar (Oropeza, 2006).

De otra forma si el material componente del sustrato es de diámetro grande, se reduce la capacidad de adsorción y filtración, pero se eleva la conductividad hidráulica (Delgadillo, 2010).

Puede ser utilizado suelo ferralítico rojo o suelo pardo con carbonato mezclado con zeolita en polvo. Es necesario 0.15m de grava en el fondo y 0.60m de suelo ferralítico rojo que tiene gran contenido de hierro que ayuda a la remoción de fósforo en el humedal (Pérez, Dominguez, Gonzales, Jimenez & Rosa, 2015).

A continuación, en la tabla 2.2 se muestran algunos materiales de relleno que pueden ser usados en la construcción de estos sistemas depuradores.

Tabla 2.2. Materiales de relleno utilizados en la construcción de HAFSS.

Material	Tamaño efectivo	Porosidad (%)	Conductividad hidráulica
Arena gradada	2	23-32	100-1.000
Arena gravosa	8	30-35	500-5.000
Grava fina	16	35-38	1.000-10.000
Grava media	32	36-40	10.000-50.000
Roca pequeña	128	38-45	50.000-250.000

Fuente (Pérez, Dominguez, Gonzales, Jimenez & Rosa, 2015)

2.3.1 Impermeabilización

Es necesario asegurar la impermeabilidad del terreno para poder poner en funcionamiento el humedal, de forma que se debe observar si el terreno es lo

suficientemente impermeable, en este caso solamente se va a requerir una compactación adecuada con la que se asegure el trabajo de impermeabilización. En otros casos se puede requerir un relleno con arcilla o en otros casos se debe colocar láminas sintéticas. La razón por la que se toma mucha precaución en este aspecto es porque el agua subterránea estaría expuesta a contaminación si no se lo hiciera con la cautela necesaria (García, 2008 & Vymazal, 2010).

La impermeabilización del suelo se tiene que hacer en dependencia de las condiciones climáticas en las que se encuentre el lugar de construcción del sistema, por ejemplo existen algunos tipos de suelo en los cuales se necesita implementar la utilización de geo membranas (García, 2008 & Vymazal, 2010).

2.1.4 Vegetación

Prácticamente lo que define el trabajo de la vegetación en sí está representado por las raíces y rizomas que se encuentran enterrados. La principal característica de las plantas es que transforman el carbono inorgánico a carbono orgánico, gracias a que son organismos foto-autótrofos. La materia orgánica se degrada debido a que los organismos utilizan el oxígeno existente en las regiones aerobias que es atravesado mediante las raíces y tallos del mismo (Delgadillo, 2010).

La vegetación existente contribuye a la escorrentía que se genera y de manera indudable a la purificación del agua residual; los gases son transferidos entre la atmósfera y sustrato gracias a la vegetación. De igual forma se estabiliza el sustrato y se limita la canalización del flujo, las raíces son captadoras de nutrientes y carbono para transferirlos a los tejidos de las plantas (Delgadillo, 2010 & Vymazal, 2010).

En los sistemas de flujo subsuperficial vertical el agua circula a través del medio granular, en el cual la profundidad depende de la profundidad que pueden alcanzar las raíces de las plantas (Fonseca, n.d.). En los HAFSSV se utilizan plantas emergentes debido a sus características de gran crecimiento y capacidad de fotosíntesis (Gh & Pelhqwdo, n.d.).

Las más comunes son: tule (Typha), juncos (Scirup) y carrizos (Phragmites).

- Ineas-espadañas (Typha): Planta firme que puede crecer en diversas condiciones ambientales y se propaga fácilmente. Puede remover nitrógeno y fósforo, sus rizomas se plantan aproximadamente a 60 cm los cuales producen una cubierta espesa en un tiempo menor a un año (Fonseca, n.d.). Toleran bajos valores de pH,

y tienen la capacidad de acumular concentraciones altas de metales pesados en sus tejidos.

- Juncos (*Scirup*): Son imperecederos y crecen en grupos diversos de pantanos, aguas costeras y humedales, tienen la capacidad de crecer en aguas residuales en un rango de 5cm a 3m. Pueden crecer en un ambiente que tenga una temperatura entre 16 y 27 °C. Generan un buen cubrimiento alrededor de un año y la separación de la siembra puede ser entre 30-40 cm, gran penetración en grava en profundidades de 60cm (Fonseca, n.d.). Toleran cargas de contaminantes que están presentes en aguas subterráneas contaminadas con petróleo y nitrato (Comisión Nacional del agua [CONAGUA], n.d).
- Carrizos (*Phragmites*): Son plantas con un rizoma imperecedero extenso, pueden lograr una buena cobertura con una separación de 60 cm en un año. En este sistema se tiene una buena transferencia de oxígeno debido a que los rizomas penetran de forma vertical y más que las espadañas aunque menos que los juncos (Fonseca, n.d.). Toleran soluciones de zinc y plomo que se encuentran en el agua residual y se desarrollan de gran manera en aguas residuales de naturaleza orgánica, alcalina o salina (Comisión Nacional del agua [CONAGUA], n.d).

En la tabla 2.3 se describen 3 tipos de plantas utilizadas para la construcción de HAFSSV con sus respectivas características y propiedades (Shiguango, 2014).

Tabla 2.3. Características de la vegetación utilizada en HAFSSV.

Nombre común	Características	Distancia de siembra	Penetración de raíces en grava	PH	Salinidad	Temperatura deseable
Ineas-tifas-espadañas	Capaz de producir una biomasa anual y con un pequeño potencial de remoción de N y P por la vía de la poda anual	0.6m	0.3	4.7-10	30	10-30
Totoras-juncos	Son perennes y crecen en grupo.	0.3m	0.6m	4-9	20	18-27
Carrizos	Más eficaces en la transferencia de oxígeno porque los rizomas penetran verticalmente.	0.6m	0.4m	2-8	45	12-23

2.2 Parámetros de diseño de los HAFSSV

En la actualidad, no se han determinado valores estándar de los parámetros influyentes para el uso de humedales artificiales. Su diseño es complejo debido al alto número de procesos y mecanismos utilizados para eliminar contaminantes considerando que no se ha generado un acuerdo claro con respecto los valores de los parámetros necesarios para el diseño de estos sistemas de tratamiento (Perez,2012).

Los humedales de flujo subsuperficial vertical se diseñan con funcionamiento intermitente, es por esta razón que pueden operar con cargas mayores a los horizontales (Pérez, 2015). En los HAFSSV el agua residual entra por uno de los extremos y es repartida por un tubo o canal con varias salidas, atravesando la zona de grava sembrada con macrófitas. En el otro extremo, se recoge el agua por medio de una tubería perforada situada en el fondo (Perez,2012).

2.2.1 Área unitaria

El dimensionamiento de estos sistemas de depuración se basa en los requerimientos de área unitaria, se selecciona el parámetro de diseño limitante y se escogerá la mayor de estas (Coste & Para, 2016).

En la tabla 2.4 se presentan algunos valores propuestos y aplicados de área superficial requerida por persona equivalente para HAFSSV.

Tabla 2.4. Área superficial requerida por persona equivalente.

País	Área requerida(m ² /persona)
Dinamarca	3,2
UK	1 -2
Austria	4-6 y valores bajos entre 0,75-4 están siendo investigados
República Checa	1,5
Alemania	1,6
	2,25
	3
	2-3
Bélgica	3,8

Francia	2-2,5
Grecia	1-1,5
	3
Italia	1,3-3,2
España	1-3,2
Islas Canarias	1,5

Fuente (Coste & Para, 2016)

2.2.2 Carga hidráulica y tiempo de retención hidráulico

Si la carga hidráulica es baja el tiempo de retención es elevado, pero si las cargas de agua son mayores entonces el agua pasa de manera más rápida hasta la salida del sistema (Kadlec & Wallace, 2009).

Los HAFSSV necesitan una carga hidráulica baja para que no se supere la capacidad de los mismos para realizar los procesos de nitrificación y des nitrificación (Kadlec & Wallace, 2009).

El tiempo de retención hidráulico (THR) es el tiempo en el que una unidad de fluido que entra en el HA tarda en salir del mismo. El THR es uno de los factores más importantes para el control de los sistemas construidos; los procesos de depuración y la transferencia de hidrógeno pueden verse afectados por el mismo (Kadlec & Wallace, 2009) .

A continuación, en la tabla 2.5 se muestran las tasas de carga con mayor valor que se aplican en diferentes lugares del mundo.

Tabla 2.5. Tasas de carga con mayor valor que se aplican en diferentes lugares del mundo.

País	Carga hidráulica (m/día)
UK	0.119
Alemania	0.25
Grecia	0.08-0.17
Dinamarca	0.520,1.37
Turquía	0.100
República Checa	0.038,0.181,0.295
Grecia	0.006
Costa de Marfil	0.10
China	0.10

Alemania	0.087-0.096
China	0.025
Italia	0.055-0.123
Egipto	0.044
China	0.8-1.2
México	0.04
Islas Canarias	0.083
Francia	0.38
Francia	0.14
Francia	1-1.4
Grecia	0.194-0.439

Fuente(Kadlec & Wallace, 2009)

2.2.3 Carga orgánica

Carga Orgánica es la cantidad de materia orgánica generalmente medida como DBO_5 , aplicada a un proceso de tratamiento dado, que se expresa como peso por unidad de tiempo por superficie (kg DBO_5 o $\text{DQO /m}^2/\text{día}$) (Stefanakis, 2014).

A continuación, en la tabla 2.6 se muestran las tasas de carga con mayor valor que se aplican en diferentes lugares del mundo:

Tabla 2.6. Carga orgánica aplicada en diversos países.

País	Carga orgánica	
	$\text{DBO}_5/\text{m}^2/\text{día}$	$\text{DQO}/\text{m}^2/\text{día}$
UK	56	26.1
Alemania	44	> 70
Austria	-	40
Dinamarca	3.75	-
Turquía	6.5	-
República Checa	-	193
Grecia	2.9	-
China	-	10
Italia	-	87
Egipto	7.65	-
México	4.6	-
Islas Canarias	20	-
Francia	55	300
Grecia	180.9	219.6

Fuente(Stefanakis, 2014)

2.2.4 Capacidad de transferencia de oxígeno

Las condiciones en el interior de los HAFSS son muy reductoras por lo que la capacidad de transferencia de oxígeno se encuentra entre 0-0.5 g O₂/m²/día (Estrada, 2010). En los HAFSS el medio poroso impide el paso libre de oxígeno por todo el humedal, por lo que se toman medidas de cambio en el diseño como los de flujo vertical que poseen una tubería de aireación en el fondo (Estrada, 2010).

Con los humedales subsuperficiales de flujo vertical se tiene mayor contacto entre el AR y el aire en los poros, por lo que se obtienen mejores rendimientos en los mecanismos aerobios gracias al mayor aporte de oxígeno (Estrada, 2010).

2.2.5 Estrategias de alimentación

La alimentación del sistema debe ser intermitente debido a que se requieren periodos temporales de inundación que favorezcan el predominio de condiciones aerobias. Esta alimentación se realiza mediante sifones autodescargantes, siempre y cuando la topografía lo permita o por bombeo en caso de ser necesario (Estrada, 2010).

2.2.6 Profundidad (d)

La profundidad en los humedales artificiales es un factor de gran importancia para el diseño ya que influye en la determinación del área del mismo. En los HAFSSV la profundidad se encuentra dentro de un rango entre 0.6 y 1m, se recomienda utilizar un valor de $d=0.8m$ (Kadlec & Wallace, 2009).

2.3 Diseño y configuración de los HAFSSV

Para realizar el proceso de depuración mediante este sistema construido se puede requerir un tratamiento primario y pretratamiento del agua residual a tratar.

Pretratamiento: Se usan rejillas y cribas que sirven para separar restos voluminosos como telas, botellas, palos, plásticos, etc. Su principal función es retirar de las aguas residuales todos los objetos de gran tamaño que puedan afectar el correcto funcionamiento del depurador (Perez,2012).

Tratamiento primario: Retiran los sólidos suspendidos que pasaron el pretratamiento para evitar su influencia en el siguiente tratamiento. Las operaciones que se realizan son de desaceitado y desengrase, sedimentación primaria, filtración y neutralización.

Está conformado por: una cámara de rejillas, tanque imhoff y un lecho de secado. Normalmente se utilizan fosas sépticas o tanques imhoff (Pérez,2012).

En el sistema francés no se aplica el proceso de pretratamiento para que se puedan aplicar cargas con mayor valor de forma directa. La investigación se centra en la aplicación de las cargas más altas posibles de carga orgánica y carga hidráulica, buscando de forma simultánea modificaciones de diseño y de configuración que generen eficiencias altas de tratamiento. Las condiciones de clima son de vital importancia debido a que en las zonas de clima frío se deben aplicar tasas de cargas menores (Stefanakis,2014).

2.3.1 Dimensionamiento

Se propone el siguiente dimensionamiento del humedal de acuerdo al diseño de un humedal vertical para la depuración de las aguas residuales de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas donde se determina el área requerida para la remoción de los diversos contaminantes presentes en el agua anteriormente mencionada y se escoge la mayor de estas (Pérez, 2012).

Área requerida

Cálculo del área requerida para la remoción de DBO

$$A_s = L * W \quad (1)$$

$$A_s = \frac{Q \ln(C_o/C_e)}{Kt \, dn} \quad [\text{m}^2] \quad (2) \quad (\text{Pérez, 2012})$$

$$Q = \frac{\beta \cdot P \cdot D}{1000} \quad [\text{m}^3/\text{d}] \quad (3) \quad (\text{Pérez, 2012})$$

$$KT = Kt \, 1.06^{T-20} \quad (4) \quad (\text{Pérez, 2012})$$

Q: Caudal de agua residual

P: población

D: Dotación de agua L/hab/d

β : Agua convertida en agua residual y se expresa en fracción decimal.

L: Longitud del humedal.

W: ancho del humedal.

Co: concentración del afluente.

Ce: concentración del efluente, cantidad de contaminantes que se encuentran en el flujo de salida del HA.

KT: Constante cinética, de primer orden d^{-1} , para Kt se asume el valor reportado por Reed, 1995 para humedales subsuperficiales que es $1.104 d^{-1}$ para una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Reed, 1995).

d= profundidad

n=porosidad, depende del tipo de sustrato utilizado.

Basándose en un cálculo y un análisis de regresión aplicando los valores obtenidos en diversos sistemas en Norte América que se encuentran en operación Knight 1993 propuso la siguiente ecuación:

$$C_e = (0,192) (C_0) + (0,097) (CH) \quad (5)$$

CH: velocidad de carga hidráulica (cm/d).

Cálculo del área requerida para la remoción de nitrógeno total

Se utiliza la misma fórmula (2) para el cálculo de área para la remoción de DBO, pero varía el valor de KT.

KT: Constante cinética, de primer orden d^{-1} . Se asume un valor de Kt $0.2497 d^{-1}$ para sistemas con el 50 % de la zona cubierta por las raíces de las plantas (Reed, 1995).

$$KT = Kt 1.048^{T-20} \quad (6)$$

Cálculo del área requerida para la remoción de fósforo

En este caso se utiliza la ecuación 7 para el cálculo del área superficial para la remoción de fósforo. Aquí aparece Kp que es la constante de mineralización.

$$A_s = \frac{bQ \ln(C_0/C_e)}{K_p} \quad [\text{m}^2] \quad (7)$$

b=100 cm/m

Kp: constante de mineralización $2.74 \text{ cm } d^{-1}$ (Reed, 1995).

Tiempo de retención THR

$$t = \frac{A_s * d * n}{Q} \quad [\text{días}] \quad (8) \quad (\text{Pérez, 2012})$$

Estas ecuaciones son válidas cuando el flujo que se tiene es laminar a lo largo de los espacios vacíos, dando como resultado un número de Reynolds (NR) menor a 10 (Mendoza & Ramos, 2012).

$$NR = \frac{V \cdot D}{\tau} \quad (9) \text{ (Pérez, 2012)}$$

D: diámetro de los vacíos del medio, se debe tomar el mismo valor del tamaño promedio del medio granular.

V: Velocidad según la ley de Darcy:

$$V = K_s * S \quad (10)$$

$$V = \frac{Q}{W \cdot d} \quad (11)$$

τ : Viscosidad cinemática del agua [m^2/s].

Debido a que la viscosidad cinemática depende directamente de la temperatura, se presenta en la tabla 2.7 los diferentes valores de τ para los diversos valores de temperatura.

Tabla 2.7. *Propiedades físicas del agua.*

Temperatura(°C)	Densidad(Kg/m ³)	Viscosidad dinámica	Viscosidad cinemática x10-6(m ² /s)
0	999.8	1.781	1.785
5	1,000.0	1.518	1.519
10	999.7	1.307	1.306
15	999.1	1.139	1.139
20	998.2	1.102	1.003
25	997.0	0.890	0.893
30	995.7	0.708	0.800
40	992.2	0.653	0.658
50	988.0	0.547	0.553
60	983.2	0.466	0.474
70	997.8	0.404	0.413
80	971.8	0.354	0.364
90	965.3	0.315	0.326
100	958.4	0.282	0.294

Fuente(Lara, 1999)

En el caso de que se presente un flujo turbulento la conductividad hidráulica efectiva va a ser menor que la predicha por la ley de Darcy (Lara, 1999).

Diseño hidráulico de los HASSFV

Los HAFSSV deben alimentarse por medio de lotes con un determinado volumen de AR, a esto se le llama sistema de alimentación intermitente. El agua tiene que distribuirse sobre toda la superficie del filtro para evitar sobrecargas en algunas zonas específicas del sistema (Kadlec & Wallace, 2009).

El agua será distribuida por medio de una tubería en toda la celda que será colocada a lo ancho de todo el humedal, estas tuberías sirven de alimentación y distribución de aguas residuales (Stefanakis, 2014).

Dichas tuberías se colocan cada metro, la recolección de agua residual efluente se realiza a través de tuberías perforadas (Stefanakis, 2014).

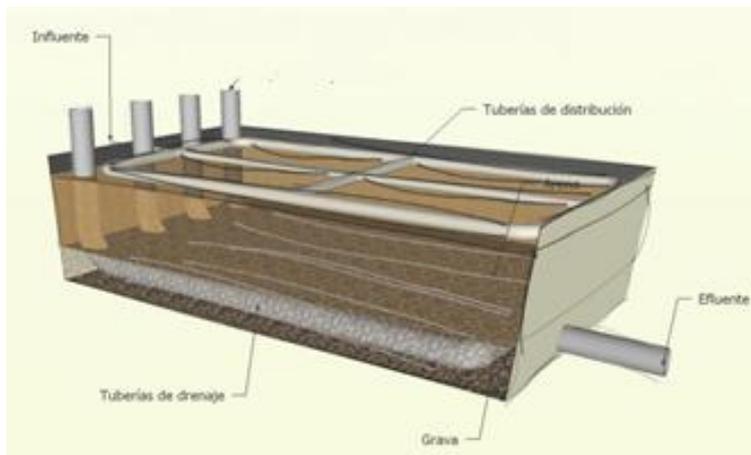


Figura 2.1. Configuración y distribución de tuberías de HAFSSV.

Fuente (Stefanakis, 2014)

-Tuberías de alimentación y distribución

Es de vital importancia realizar una distribución y captación uniforme del agua en todo el sistema, siendo así que para la distribución se pueden utilizar tuberías a lo largo del lecho, pero al considerar un clima frío es habitual hacerlas enterradas de 0,05m a 0,1m por debajo de la superficie para que de esa forma se pueda evitar la congelación. Por otro lado la recolección del agua está determinada por una red de tuberías perforadas que se sitúan en la parte profunda del lecho y a lo largo del mismo (García, 2008).

El diámetro de las tuberías se calcula mediante la siguiente expresión (Pérez , 2015).

$$A = \frac{Q}{v} \text{ [m}^2\text{]} \quad (10)$$

Q: caudal promedio a través del humedal [m^3/d]

Velocidad para la tubería de alimentación: 0.7 m/s (Pérez, 2012).

Velocidad para la tubería de distribución: 0.3 m/s (Pérez, 2012).

Se requiere variar el gasto de los orificios para distribuir de mejor manera y uniforme el agua residual a lo largo del humedal (Pérez, 2015).

$$q_0 = \alpha * A_0 \sqrt{2} * g * h \quad [\text{l/s}] \quad (11)$$

q_0 : gasto del orificio en l/s.

α : coeficiente de gasto, 0.6.

g : aceleración de la gravedad, 9.81 m/s^2 .

h : pérdidas, para el primer orificio es la suma del diámetro de la tubería y las pérdidas de la tubería de distribución, para el último orificio es el diámetro de la tubería en metros (Pérez, 2012).

Distribución de los orificios

La distribución uniforme del agua residual en todo el humedal se logra mediante una adecuada colocación de los orificios de la tubería perforada (Oropeza, 2006).

Los diámetros de los mismos varían de acuerdo al gasto, teniendo en cuenta que el gasto total de los orificios debe ser menor que el caudal suministrado al humedal para que el agua residual pueda ser correctamente distribuida (Oropeza, 2006).

Número de macrófitas requeridas para la instalación (Nm)

$$Nm = \left(\frac{L}{dm} - 1 \right) \left(\frac{W}{dm} - 1 \right) \quad (12)$$

dm : distancia entre macrófita y macrófita

2.4 Mecanismos de remoción de contaminantes

Debido a los diferentes procesos químicos, físicos y biológicos que suceden en un humedal, se han desarrollado diferentes procesos de remoción de los contaminantes existentes en el agua (Delgadillo, 2010).

Principalmente los sistemas de depuración de aguas residuales han sido creados para la remoción de materia en suspensión y materia orgánica, también se ha añadido la eliminación de nutrientes, de nitrógeno, fósforo y organismos fecales.

A continuación, en la tabla 2.8 se dan a conocer los mecanismos de remoción que se dan en los humedales construidos:

Tabla 2.8. *Mecanismos de remoción de contaminantes.*

Mecanismo	Contaminante
Sedimentación	Sólidos en suspensión y material particulado, material en suspensión.
Remoción química	Nutrientes presentes en el agua
Biodegradación	Materia orgánica
Coagulación y floculación	Partículas suspendidas
Nitrificación/desnitrificación	Nitrógeno
Remoción de fósforo	Fósforo
Adsorción	Fósforo, metales pesados

Fuente (Paredes, 2014).

Sedimentación: es el proceso mediante el cual la materia sólida se deposita en el fondo del humedal artificial, este tipo de proceso de remoción de contaminantes es principalmente para los sólidos en suspensión y material particulado debido a las características que tiene su forma de transportarse de un lugar a otro esta sedimentación se genera debido a la velocidad que tiene el flujo del agua en el humedal, y la resistencia que presentan las raíces de la vegetación existente (Paredes, 2014).

Remoción química: la absorción es uno de los procesos químicos más relevantes en el proceso de remoción ya que en el mismo se transfieren iones a partir de la fase líquida que es el agua hasta la sólida (suelo). La absorción engloba a un conjunto de procesos y adsorción los cuales describen la unión de iones por intercambio catiónico o absorción química (Paredes, 2014).

Coagulación y floculación: este proceso físico químico requiere de la dosificación de sustancias químicas para que las partículas que están suspendidas y tienen cargas similares se estabilicen, lo cual va a permitir que se unan las partículas aglomeradas en la coagulación y se proceda a la formación de flóculos mas grandes lo cual ya es parte

de la floculación que se superpone a la coagulación. Las partículas por gravedad irán al fondo del sistema de tratamiento lográndose alcanzar el objetivo del proceso (Paredes, 2012)

Biodegradación: es el proceso mediante el cual se realiza la disolución de materiales gracias a la acción de bacterias o medios biológicos. Con la presencia del oxígeno la materia orgánica se degrada de forma aeróbica o en el caso de que no se cuente con oxígeno el proceso sería anaerobio (Paredes, 2014).

La población bacteriana que trabaja en la biodegradación requiere de luz solar, agua y oxígeno ya que de esa forma los microorganismos se reproducen con mayor rapidez debido a que perciben condiciones más cálidas (Paredes, 2014).

Nitrificación/desnitrificación: la remoción del nitrógeno se da debido a la oxidación del nitrógeno del amoníaco a nitrato, de modo que, a través de la reducción, el nitrato se convierte en gas nitrógeno, el cual se desprende a la atmósfera. (Pedrero, 1998). Estos procesos requieren de sumo cuidado debido que se debe conservar la formación correcta de las comunidades biológicas. Por otra parte, los filtros, lagunas y camas de lámina pueden ser una opción mediante la cual se reduce el nitrógeno (Rojas, Díaz, Medina & Rodríguez, 2012).

Remoción del fósforo: se efectúa mediante el retiro biológico realizado del fósforo. Este es un proceso bacteriano en el que se acumulan organismos y se enriquecen de forma selectiva acumulando cantidades considerables de fósforo dentro de sus células (Rojas, Díaz, Medina & Rodríguez, 2012).

Adsorción, precipitación: consiste en la acumulación de una sustancia en la fase líquida o gaseosa sobre la superficie de un sólido adsorbente. De gran importancia para la remoción de fósforo presente en el agua residual y su capacidad depende de la presencia de hierro, aluminio o calcio, arcilla o materia orgánica en el agua a tratar (Silva, 1993).

2.5 Eficiencias esperadas

La eficiencia respecto a la remoción de contaminantes se evalúa respecto a comparaciones del afluente y efluente del sistema, que es mayor cuando se cuenta con sistemas de aireación y circulación adecuados, o sea bajo condiciones aerobias. Las plantas macrófitas son las que trasiegan el oxígeno que es utilizado con el fin de

mantener las condiciones correctas para la remoción a través de sus hojas que pasa a las raíces y luego al agua (Estrada, 2010; Junio, 2016).

Los conocimientos y la información acerca del funcionamiento de los HA no son entendidos completamente a pesar de los múltiples estudios e investigaciones realizadas a lo largo de los años, debido a que estos sistemas depuradores dependen de interacción de varios componentes a diferencia de otro procesos tecnológicos (Estrada, 2010).

Los humedales construidos deben tener estructuras de entrada y salida muy bien diseñadas, con el fin de alcanzar las eficiencias esperadas (Oropeza García, 2006). A su vez, estas eficiencias dependen de diversos factores como: el clima, el tipo y calidad del AR, carga hidráulica, carga orgánica y otras características físicas de los mismos (Estrada, 2010).

Los humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical alcanzan mayores rendimientos de eliminación, debido a que prevalecen las funciones anaerobias (Pérez, 2015).

Los parámetros primordiales para medir el rendimiento del sistema son: estructura hidráulica, DBO, fósforo, Nitrógeno, Sólidos suspendidos Totales, bacterias y metales pesados.

En la tabla 2.9 se pueden apreciar las concentraciones de entrada y de salida en (mg/L) para cada tipo de humedal artificial, y los valores de tasa de carga hidráulica en (cm/d) que se han analizado en cierto número de humedales (N) (Vymazal, 2010).

Tabla 2.9. Concentraciones de entrada y de salida en (mg/L) para cada tipo de humedal artificial, y valores de tasa de carga hidráulica en

Tipo de humedal artificial	DBO ₅				SST			
	Entrada	Salida	Tasa de carga hidráulica	N	Entrada	Salida	Tasa de carga hidráulica	N
Flujo superficial	166	42	4.1	50	185	43	4.8	52
Flujo horizontal	170	42	11.8	438	141	35	15.4	367
Flujo vertical	274	28	8.2	125	163	18	9.7	98

(cm/d).

2.5.1 Eficiencia de la remoción de la DBO y SST

Los sistemas de humedales artificiales verticales son más eficaces para la eliminación de materia en suspensión que para DBO_5 , de forma que si el diseño se ha realizado en función de la eliminación de DBO_5 a su vez también se va a reducir sólidos en suspensión de forma suficiente. Varios estudios realizados han comprobado que la eficiencia de la eliminación de DBO no cambia de forma significativa si se tuviera invierno o verano, de tal forma que, según Arrhenius, no se propone realizar corrección alguna para la temperatura mediante la expresión que engloba los valores de las constantes cinéticas de primer orden (Junio, 2016).

La eliminación de compuestos orgánicos y sólidos en suspensión es alta en todos los tipos de humedales artificiales, y la eficiencia del tratamiento es mayor en un humedal artificial de flujo vertical que en uno de flujo horizontal ya que las concentraciones de entrada son mayores (Vymazal, 2010).

El rendimiento es óptimo en humedales verticales si éstos están correctamente diseñados y construidos. Para el DBO se alcanzan rendimientos de 94% y para DQO 75% (Estrada, 2010).

No se ha encontrado un modelo cinético para la remoción de los sólidos suspendidos por lo que se sigue el mismo patrón que para DBO, entonces si se diseña el sistema para una remoción de DBO se puede esperar una remoción de sólidos en suspensión (Civil, 2006). En los sistemas verticales el rendimiento de los sólidos en suspensión es muy alto, generalmente es más del 90% originando menores concentraciones (Estrada, 2010).

En la tabla 2.10 se tienen los resultados de las eficiencias de remoción de contaminantes mediante plantas acuáticas flotantes (Silva, 2005).

Tabla 2.10. Eficiencias de remoción de contaminantes mediante plantas acuáticas flotantes (A: afluente; E: efluente).

Planta	DBO (mg/L)		Nitrógeno (mg/L)		Fósforo (mg/L)	
	A	E	A	E	A	E
Salvinia	94	22	29	13	-	-
Pistia	94	18	29	8	-	-
Azolla	92	28	21	10	2	0.8
Lemna	92	27	21	7	2	0.8
Azolla	87	41	24	15	3	2.1
Lemna	87	34	24	16	3	1.9
Laguna	141	23	29	13	5	2.6
Jacinto	141	15	29	8	5	1.2
Laguna	120	36	24	17	4	2.2
Jacinto	120	16	24	14	4	1.5
Laguna	121	43	25	16	6	2.9
Jacinto	121	36	25	15	6	2.4

Fuente (Silva, 2005)

2.5.2 Eficiencia en la remoción de nitrógeno

Se tiene una eficiencia de eliminación de nitrógeno mejor en los humedales de flujo superficial debido a la volatilización que se genera en la superficie libre. En cuanto a los de flujo subsuperficial no se puede asegurar que la volatilización sea de total ayuda para generar de forma correcta este proceso (Vymazal, 2010).

Es importante tener en cuenta, en el aspecto de diseño, que para la eficiente nitrificación se debe tener una profundidad del humedal igual a la potencial penetración de las raíces para que se tenga la transferencia de oxígeno atmosférico adecuada (Estrada, 2010).

Para poder conseguir una eliminación eficaz del nitrógeno se propone como alternativa la combinación de humedal de flujo vertical y el de flujo horizontal, o a su vez expandir el área de diseño del humedal, ya que con esto se lograría reducir el nitrato que se forma durante la nitrificación (Estrada, 2010; Vymazal & Březinová, 2014).

2.5.3 Eficiencia en la remoción de fósforo

La eliminación de nutrientes como el fósforo por ejemplo, es bajo en todos los tipos de humedales, por lo cual es un objetivo importante su remoción para el correcto funcionamiento del humedal (Vymazal & Březinová, 2014).

Para potenciar de mejor manera la eliminación de fósforo presente en el agua residual y debido a que los materiales que se usan en la construcción de estos humedales, grava lavada o roca triturada, no tienen gran capacidad de adsorción y precipitación en la actualidad se recurre a materiales de filtración como: LECA(agregados de arcilla de peso ligero) (Vymazal, 2010).

De esta forma la eliminación de fósforo presenta altos índices al usar este medio pero es necesario recordar que los mecanismos de remoción de este componente van disminuyendo con el tiempo (Abdelhakeem, Aboulroos, & Kamel, 2016; Vymazal, 2010)

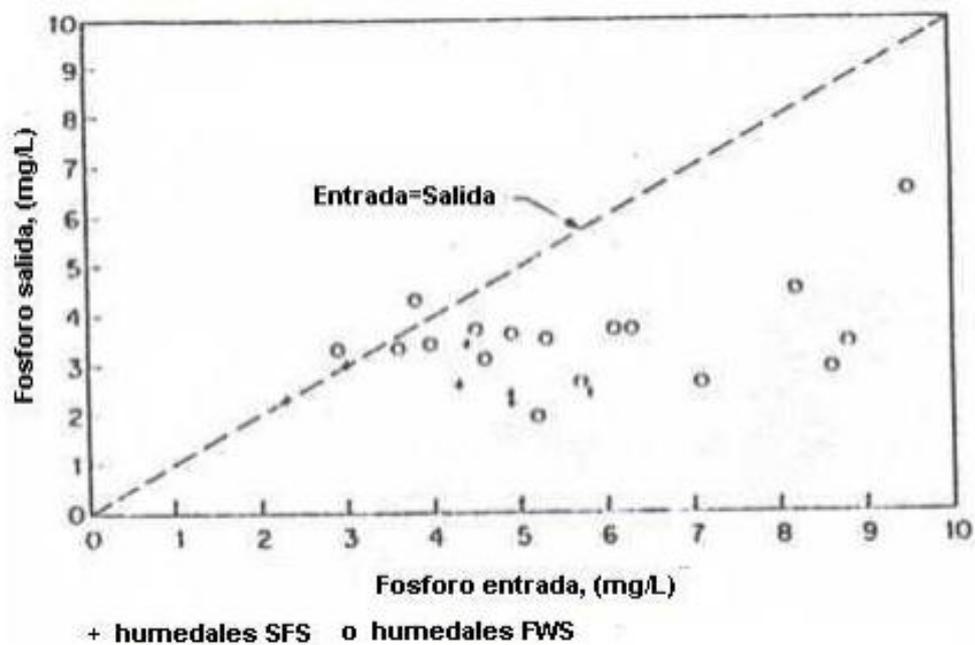


Figura 2.2. Entrada vs salida de fósforo en humedales artificiales.

Fuente (Vymazal, 2010)

Un rendimiento de valor cero se representa con la línea que aparece inclinada, la cual nos indica que la entrada es igual a la salida, los puntos que se encuentran por encima de la línea entrecortada indican un porcentaje de remoción aproximadamente del 30% y 50% con una esperanza de que estas eficiencias permanezcan durante todo el periodo para el cual fue diseñado el humedal (Figura 6) (Estrada, 2010; Wang, Zhang, Dong, & Tan, 2017).

Los cambios climáticos influyen para la remoción en general de los contaminantes y puede disminuir su eficiencia (Delgadillo, 2010; Estrada, 2010; Vymazal, 2010).

2.5.4 Eficiencia en la remoción de metales pesados

Para hacer un análisis sobre la eficiencia de la remoción de metales pesados en humedales artificiales se debe hacer referencia a los principales mecanismos mencionados anteriormente que son adsorción, precipitación y absorción de las plantas, que son procesos que suceden en la eliminación de fósforo (Estrada, 2010).

En la actualidad se ha recopilado información necesaria para asegurar que en los humedales de flujo superficial gracias a las condiciones anaeróbicas se puede retener la mayoría de los metales con los sólidos en suspensión (Estrada, 2010).

Para la remoción de metales pesados presentes en el agua residual se ha explorado un método conocido como adsorción química y ha mostrado muy buenos resultados, en la cual se emplean diversos materiales naturales y sintéticos para recolectar el elemento contaminante, ayudando así a remover el contaminante del medio acuoso (Rojas, Díaz, Medina & Rodríguez, 2012).

2.6 Funcionamiento y operatividad

La operación del humedales artificial es muy importante si el objetivo que se tiene es generar buenos resultados de depuración de AR, de forma que debe organizarse un plan de operación y mantenimiento en el cual se analicen los factores más relevantes para el rendimiento del tratamiento como son (Estrada, 2010; Lincoln & Brooks, n.d.):

- Mantener un crecimiento adecuado y vigoroso de la vegetación existente.
- Generar y mantener un ambiente saludable para los microbios
- Asegurar que todas las partes del humedal puedan ser alcanzadas por el flujo.
- Propiciar la oportunidad de que se tenga contacto entre el agua y la comunidad microbiana, así como también con la capa de vegetación y sedimento.

2.6.1 Concentración de metales

La concentración de los metales pesados puede afectar la operatividad del sistema si no se realiza un seguimiento de control de su descarga al humedal para que no excedan los límites de tolerancia (Estrada, 2010).

2.6.2 Clima

Es necesario buscar especies de plantas resistentes al clima de las zonas de construcción del sistema depurador debido a que el clima es un factor limitante en cuanto al manejo de la población vegetal (Estrada, 2010).

2.6.3 PH

Para que los metales pesados sean sedimentados de manera sencilla dentro del reactor y no salgan móviles por el efluente, es necesario tener un adecuado control de pH (Estrada, 2010).

2.6.4 Vegetación

En el humedal se tiene una capacidad limitada de retener biomasa, por lo cual se deben hacer retiros de forma constante para que de esa forma puedan crecer las plantas emergentes, y se pueda realizar la captura de los componentes del agua residual de forma eficiente (Junio, 2016).

La densidad de la vegetación necesaria para cumplir los procesos de tratamiento se obtiene mediante algunas estaciones de crecimiento, cuya duración es dependiente de la densidad de siembra al inicio de la construcción del humedal y de la temporada estacional en la que se encuentra (Estrada, 2010).

Es necesario hacer un control de la densidad de las raíces de las macrófitas de manera que la conductividad eléctrica que poseen no se vea disminuida, y no se modifiquen las condiciones de diseño hidráulico iniciales respecto al caudal diario depurado (Junio, 2016; Wang et al., 2017).

La vegetación existente en los humedales tiene un límite de tolerancia para los cambios de nivel de agua de manera que no se debe exceder los mismos en periodos de tiempo prolongados (Lincoln & Brooks, n.d.).

Debido a la oxidación que experimenta la materia orgánica por los cambios de flujo se genera el reclutamiento de plantas nuevas en el humedal. La buena cobertura vegetal se genera con sistemas grandes de raíces que sean resistentes a la erosión, con lo cual evitan que los árboles y arbustos predominen en el área ya que éstos pueden generar canales que luego dan paso a la fuga mediante la berma existente (Estrada, 2010; Lincoln & Brooks, n.d.).

Con el fin de contrarrestar la acción de las especies invasoras, se debe evitar de forma estricta el uso de herbicidas a menos que las circunstancias sean extremas, entonces se realizará la aplicación de forma muy cuidadosa ya que de no tener cautela en la acción se puede causar daños severos a la vegetación emergente (Lincoln & Brooks, n.d.). Adicionalmente a esto, la vegetación debe ser inspeccionada de forma regular (Estrada, 2010).

2.6.5 Mosquitos

Una alternativa para el control del desarrollo de larvas generadas por los mosquitos es crear condiciones que no sean atractivas para los mismos (Lara Borrero, 1999). Puesto que en los lugares abiertos que poseen agua estancada se tiene la mayor probabilidad de que se convierta en un hábitat para los mosquitos, se debe minimizar el riesgo de su desarrollo mediante el movimiento del agua. La aplicación de insecticidas o aceites es ineficaz debido a que son absorbidos por la materia orgánica, diluidos o degradados por el agua y potenciales contaminantes de no ser usados con la precaución debida (Lara Borrero, 1999).

2.6.6 Peces

Existen algunas especies de peces que se alimentan en el fondo de los humedales artificiales subsuperficiales arrancando la vegetación desde la raíz, provocando un aumento de los sólidos en suspensión y del resto de contaminantes en el agua (Estrada, 2010).

Se debe realizar un control adecuado acerca del ingreso de diversos animales basándose en la ubicación geográfica, las posibles especies existentes en la zona y el diseño de los sistemas de depuración. Dichas medidas de control se tomarán en la planificación y operación del humedal (Estrada, 2010).

2.6.7 Supervisión

La supervisión es una medida control operacional mediante la cual se pueden identificar problemas que estén afectando al humedal, de manera que se obtengan datos que ayuden a mejorar el rendimiento del tratamiento; se puede llevar un listado de sustancias que son tóxicas y determinar el cumplimiento de requisitos (R. & Z., 2005).

El adecuado control determina si el humedal alcanza los objetivos propuestos al inicio del proyecto y mide su integridad biológica (García, 2008). Al tener una intervención eficaz se pueden identificar los problemas presentes antes de que se desarrollen por completo mediante la toma de muestras (fotografías) que verifiquen alguna afección (García, 2008)

El detalle de la inspección toma fuerza cuando el humedal madura por completo de modo que solamente se requiere verificar el correcto funcionamiento del mismo una vez al mes o cuando se tenga una tormenta, los sistemas que contengan grandes cargas deberán tener una supervisión más frecuente (Lara, 1999).

2.6.8 Estructuras

Los diques, vertederos, y estructuras de control de agua deben tener una inspección periódica luego de que se haya presentado algún fenómeno que altere el estado natural del flujo (Lara Borrero, 1999). El estado de los humedales debe ser supervisado luego de que se haya generado una subida de gran magnitud en el caudal o después de que se haya formado hielo, puesto que, esto podría afectar a las estructuras de salida (Lara, 1999).

Cualquier anomalía que se encuentre como daño, bloqueo o afección a la estructura debe tratar de corregirse lo antes posible con el fin de que la eficiencia no se vea afectada y evitar reparaciones costosas posteriormente (Lara, 1999).

2.6.9 Malos olores

La descomposición en estos sistemas de tratamiento se produce en zonas muy grandes por lo que son liberados olores anaeróbicos alrededor de la tubería de entrada, para que este factor no influya de manera importante en la operación del mismo, es necesario aplicar un plan de control y limpieza en diversos periodos de tiempo (Estrada, 2010).

Adicional a esto, es de gran importancia recordar que los tratamientos previos también deben tener un control y mantenimiento adecuado para su correcto funcionamiento, deben ser revisados como mínimo dos veces por semana incluyendo la actividad de extracción de lodos. Este proceso empieza después de que el sistema haya estado en funcionamiento por lo menos un año (Oropeza, 2006).

Lo mencionado anteriormente debe tener un calendario para la limpieza rutinaria de los sistemas de distribución y vertederos, cegar dique, inspección y control del

sistema y especificación del número de personas que realizan el trabajo de mantenimiento (Lincoln & Brooks, n.d.).

CAPÍTULO III

3 TRABAJOS REALIZADOS EN EL ÁREA

Una noción más clara acerca de los trabajos que se han realizado en el área se obtiene por medio de la presentación de diversas experiencias elaboradas a nivel internacional y nacional, cuya ejecución ha generado buenos resultados en cuanto a la eficiencia de los diversos niveles de experimentación y de las condiciones en las cuales se han evaluado.

En base a los diferentes estudios que se han realizado sobre los sistemas de tratamiento de aguas residuales 4% hace referencia a los humedales y de éstos 90% a humedales artificiales (Pérez, Olmedilla & Rojo, 2000).

3.1 Nivel internacional

México: en el centro de investigación de la universidad autónoma del estado de México se efectuó el proceso de remoción de carga orgánica, mediante la propuesta del diseño de HA, mediante el cual se propone un sistema diseñado con 3 módulos de forma secuencial; en donde el primero está compuesto por la especie *PHRAGMITES AUSTRALIS*, en el segundo se tienen organismos de la especie *TYPHA DOMINGUENSIS* y en el tercero se propone la combinación de las dos especies. Dichos módulos han sido instalados en la salida del tratamiento primario el cual recibe el agua residual municipal que proviene de un edificio que es un centro de investigaciones (Romero, 2009).

El análisis realizado se basó en 3 parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), iones de nitrógeno y fósforo total, adicionalmente a esto se practicó también un análisis de bacterias que estén asociadas al sistema (Romero, Colín, Sánchez, & Ortiz, 2009).

El estudio se llevó a cabo mediante dos etapas: la primera fue la evaluación del tiempo de retención hidráulica que se desarrolló en una temporada de lluvia y

estiaje, la segunda consiste en evaluar la eficiencia de carga orgánica, nitrógeno y fósforo (Romero, 2009).

Esta aplicación dio como resultado de acuerdo con la remoción de fósforo, nitrógeno y DQO que el tiempo de retención hidráulico óptimo para los sistemas en donde las plantas se encuentran instaladas por separado es de 5 días, mientras que para el sistema en donde se encuentran combinadas se requirió un tiempo menor con un porcentaje de remoción de contaminantes más alto (Romero, 2009).

Colombia: en la ciudad de Cali el 26% de sus sistemas de tratamiento funcionan de manera deficiente y en zonas rurales no se han desarrollado alternativas de saneamiento. Es por esta razón que algunas universidades han puesto gran atención a esta situación realizando sistemas sostenibles como medidas de solución (Bernal, Mosquera, 2002) La universidad de Villa tuvo la idea de construir un humedal artificial subsuperficial vertical teniendo en cuenta investigaciones realizadas tanto internacional como nacionalmente acerca de los mismos para explorar las ventajas que los HAFSS brindan. El sistema depurador piloto fue construido sobre el nivel del suelo con un flujo subsuperficial y opera con AR almacenada en un tanque de alimentación de 1000 litros recogida del alcantarillado municipal, la misma que es distribuida por una flauta, con un caudal de 0.33 m³/d; el humedal tiene un THR de 6 días, una profundidad 0.57m y un área superficial de 8m². Fue puesto en marcha en febrero del 2013 y se tomaron datos hasta julio (Bernal, Mosquera, 2002).

La construcción del humedal artificial de flujo subsuperficial ha funcionado de manera correcta con respecto a la remoción de contaminantes, lo que permite afirmar que este sistema es favorable y sostenible para poblaciones pequeñas con disponibilidad de terreno y para las condiciones ambientales de dicha ciudad (Bernal, Mosquera, 2002).

España: Sevilla: la fundación Centro de las nuevas tecnologías del agua (Centa) realiza proyectos para el tratamiento de agua residual en Sevilla con la idea de desarrollar alternativas donde no hay recursos (Delgadillo, 2010). Se construyeron 6 humedales artificiales con un área de 1500 m² con diversas tecnologías como: H. de flujo libre, subsuperficial horizontal y vertical, lo que permitió una investigación más amplia sobre este sistema de tratamiento.

En los dos primeros meses se pudo observar que los humedales de flujo horizontal presentaron mejores resultados en la remoción de contaminantes que los de flujo vertical, a pesar de que operaba con mayor cantidad de carga orgánica (Rodríguez, 2005).

Almería: entre 1996 y 1997 se desarrolló un proyecto de investigación acerca del uso de los humedales artificiales en la depuración de aguas residuales. Para esto, la Gestión de Aguas del Levante Almeriense (Galasa, 1971), construyó una planta experimental donde se realizó un ensayo en cuanto al tipo de flujo, capacidad orgánica, sustrato, tiempos de retención y vegetación (Galasa, 1971). También se tomaron muestras de agua en diversos intervalos de tiempo con el fin de analizar la capacidad de remoción de contaminantes como DBO, DQO, nitrógeno, sólidos en suspensión, fósforo y coliformes fecales (Galasa, 1971).

Para poder implantar el HA fue necesario utilizar parte de la laguna de maduración preexistente, polietileno y lechos de turba. Este sistema de depuración ha estado en operación de 1999 y ha cumplido con su función principal que es complementar a los lechos de turba para alcanzar con los valores de vertido de los parámetros obtenidos (Galasa, 1971). El sistema cumplió con el objetivo propuesto que era complementar a los lechos de turba para de esta manera alcanzar los valores de vertido de los parámetros recogidos por la Directiva (Galasa, 1971).

Eslovenia: en este país opera un sistema de tratamiento desde 1959, el cual cubre una superficie de 40 hectáreas y está conformado por un humedal de flujo subsuperficial vertical y uno horizontal, los cuales están conectados entre sí.

El sistema opera una carga intermitente de $0.5 \text{ cm } d^{-1}$, esto permite que se obtenga un efluente que pueda ser utilizado para riego (Galasa, 1971).

Como se puede observar en la Tabla 11 las eficiencias de remoción son considerablemente elevadas lo que permite obtener la caracterización adecuada para el uso de riego.

Tabla 11. Promedio de concentraciones de contaminantes en el sistema de tratamiento, Eslovenia.

Parámetro	Media del afluente	Media del efluente	Límite permitido OGRS	Eficiencia %
SS(mg/L)	38.3	26.2	60	33
DQO(mg/L)	485	240	300	50
DBO ₅ (mg/L)	76	28	30	59
Sulfatos(mg/L)	16.3	17.5	300	Negativa
pH	7.3	7.6	6.5-9.0	NA
NH ₃ -N(mg/L)	496	297	50	51
Temperatura(°C)	15.3	13.4	0	NA

Fuente (Galasa, 1971)

Alemania:

Silkerode: entre el 2006 y 2007 se realizó la construcción de un humedal de flujo subsuperficial vertical que fue diseñado para unos 500 habitantes equivalentes, se realizó un fortalecimiento de un sistema de lagunas no aireadas ya existentes para el tratamiento de aguas residuales mediante HAFSSV con una superficie de 6800 m², dando como resultado el cumplimiento de todos los requerimientos establecidos (Peine, 2011).

Se puede observar en la Tabla 12 las eficiencias de remoción obtenidas en el año 2011.

Tabla 12. Eficiencia (2011).

Parámetro	Influente	Efluente
DQO	369 mg/l	43 mg/l
DBO ₅	209 mg/l	8 mg/l
NHA-N	55 mg/l	3 mg/l
NO ₃ -N	3 mg/l	4 mg/l
N _{tot}	n.b mg/l	7 mg/l
P _{tot}	12 mg/l	3 mg/l

Fuente (Peine, 2011)

Berel: se realizó el fortalecimiento y la mejora de un sistema de lagunas anaerobias las cuales sirven para el tratamiento de las AR municipales a través de humedales artificiales, para lo cual se asumió 700 habitantes equivalentes. Dicha construcción fue realizada entre 2008 y 2009. La propuesta de renovación consistió en una nueva criba, nuevo y mejorado sistema de medición y control, 2 HA de flujo vertical subsuperficial que constan de una estación de bombeo, nuevas islas flotantes, un nuevo medidor de flujo e instalaciones nuevas para su mantenimiento y control. Aplicando lo mencionado anteriormente se obtuvo una mejora en el efluente en cuanto a DQO con una disminución en su remoción de 8 veces en relación con el afluente, y para DBO y nitrógeno 10 veces menor a la del afluente (Peine, 1989).

Irán: en la ciudad de Mahshahr en el año 2004 la petroquímica ubicada en la zona del Golfo Pérsico construyó una planta de tratamiento mediante humedales artificiales para depurar aguas residuales domésticas que provenían de un campamento de obreros. Para el diseño de la misma se tomó en cuenta a 4000 habitantes equivalentes, constando con un pretratamiento de criba, estación de bombeo, silo de lodos separados, tanque de sedimentación, y su distribución realizada mediante un sifón de vacío (Peine, 2006).

En cuanto al tratamiento secundario se decidió realizar 8 humedales artificiales de flujo vertical subsuperficial. El objetivo principal fue reutilizar el agua tratada para riego.

La construcción de este sistema depurador ha dado como resultado el mejoramiento de los parámetros del efluente obteniéndose así la concentración de DQO por debajo de los 30 mg /l para DBO por debajo de 18 mg/l, nitrógeno por debajo de 5 mg/l y sólidos suspendidos por debajo de los 3mg/l (Peine, 2002).

China: el en el año 2013 el instituto de planeación y diseño de Shenyang implantó en una zona de desarrollo urbano un tratamiento de AR con un total de habitantes equivalentes igual a 6000, el cual consta de un pretratamiento compuesto por criba y edificio de operación, tanque de sedimentación, un respectivo silo de lodos, y el filtro de pretratamiento mecánico.

El proyecto consta de 3 HA de flujo vertical y un sistema de distribución en el subsuelo con una descarga conducida a un humedal de tratamiento de aguas pluviales.

Los resultados que se obtuvieron para DQO, DBO, nitrógeno y fósforo permiten ver que el efluente es 10 veces menor que el influente (Peine, 2015).

3.2 Nivel nacional

Santo Domingo: en el año 2011 se realizó una investigación por la escuela politécnica del ejército que tenía como objetivo el tratamiento de aguas residuales domésticas de la hacienda Zoila Luz por medio de un humedal artificial de flujo vertical subsuperficial con vegetación herbácea. El cumplimiento de este trabajo dio como resultado disponer de un diseño de los sistemas depuradores mencionados para disminuir los contaminantes en los cuerpos receptores y determinar los costos de construcción y operación (Agencia de protección del medio ambiente [EPA], 2013).

Esmeraldas: se realizó el rediseño de la planta de tratamiento de AR mediante HA para mejorar el rendimiento de la extractora de palma de aceite teobroma, de modo que se disminuya el impacto ambiental que se genera por la descarga de los residuos líquidos que provienen de dicha industria. Los análisis correspondientes de las concentraciones de los contaminantes se realizó en la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo y se obtuvieron un DBO₅ de 200mg/l, DQO 4500 mg/l, SST 494.5 mg/l, nitrógeno 125 mg/l, coliformes fecales 4200 UFC/100ml, dichos parámetros están fuera de los límites que permite la norma ambiental del texto unificado de legislación secundaria del medio ambiente (Manzano, 2015)

El porcentaje de remoción para cada contaminante es: DBO₅ 99.9%, DQO 99.9%, nitrógeno 57.9% y sólidos en suspensión 99.9%.

El proyecto consta de tratamiento primario, secundario y terciario incluyendo sistemas de depuración respectivos donde se implementó a la totora como la responsable de la depuración (Manzano, 2015).

Quito: en el 2011 se realizó en la universidad San Francisco de Quito un diseño de una planta de tratamiento piloto de aguas residuales domésticas para el conjunto residencial Matisse utilizando un humedal artificial. El proyecto fue

elaborado con el fin de promover la implementación de tecnologías ecológicas como los HA en el campo de la construcción. Lamentablemente este sistema de depuración no es utilizado en la ciudad de Quito por tal razón es que se efectuó la propuesta del diseño del mismo que busca recuperar el agua a un punto que pueda ser usada para riego o para que tenga una descarga segura en zonas cercanas (González ,2011).

Gracias a la investigación se pudo conocer que la eficiencia del sistema sube de nivel cuando son utilizados en serie para tratar el AR, y que los HAFSS son de gran utilidad para la remoción de DBO y SST, pero deficiente para la remoción de amoníaco y fósforo (González,2011).

El proyecto consta de dos fases principales y la descarga final; de manera que en la primera parte se puede realizar el cribado para eliminar de un 5% hasta 25% de los sólidos que se encuentran suspendidos, el desarenado que remueve arena, grava y partículas, la sedimentación en la cual se separan los sólidos en suspensión, y a eso se agregan la sedimentación discreta, con floculación, por zonas, que hacen más fino el proceso de tratamiento primario (González ,2011).

Orellana: en el centro del pueblo de Tiputini en el cantón Aguarico se ha diseñado una planta que sirve de tratamiento para aguas residuales (Medina, 2011).

Se llevó a cabo la caracterización física, química y microbiológica del agua. Se analizaron sólidos suspendidos 120mg/L, sólidos totales 808,71 mg/L, sólidos sedimentables 34mg/L, sulfatos 9,5 mg/L, nitritos 0,03mg/L, nitratos 8,73mg/L, fosfatos 7,84 mg/L, DQO 436,05 mg/L, DBO 244,4 mg/L, grasas y aceites 12,72 mg/L (Medina,2011).

En base a las recomendaciones técnicas que existen para poblaciones pequeñas, y teniendo el conocimiento de la carga contaminante existente en el afluente se pensó en un canal de llegada, canaleta Parshal, rejillas, desarenador, lecho de secado y humedal artificial de flujo subsuperficial. Básicamente el humedal se diseñó para 20 años, de dimensiones largo 87,12m y ancho 43,56m, con una capacidad de 0,813m³/día, y con una eficiencia de remoción de contaminantes del 85% (Medina 2011).

3.2.1 Organización estructurada de la literatura existente

La presente investigación muestra los trabajos y proyectos que se han realizado sobre los humedales artificiales, especialmente los de flujo vertical. La noción más detallada se obtiene por la prestación de experiencias tanto a nivel internacional como nacional.

Por tal motivo, se presenta de manera estructurada en las tablas 13 y 14 los diversos estudios y proyectos realizados en el área.

- Internacional

Tabla 13. Organización de literatura internacional sobre HAFSSV.

Fecha de publicación	Título	Autor (es)	Cita bibliográfica
Ene-2004	Medios de soporte alternativos para la remoción de fósforo en humedales artificiales	Luna Pabello Víctor Manuel, Ramírez Carrillo Héctor Faustino.	(Luna & Ramirez, 2004)
Ene-2005	Implantación y evolución de un humedal artificial de flujo subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia	Lara Borrero Jaime Andrés, Vera Puerto Ismael Leonardo.	(Lara & Vera, 2005)
Feb-2005	Danish Guidelines for small-scale constructed wetland system for onsite treatment of domestic sewage.	Brix Hans, Arias Carlos.	(Brix & Arias, 2005)
2005	Humedales artificiales de flujo vertical para mejorar la calidad del agua del río	Rodríguez Chaparro, Ospina Ivonne Maritza.	Rodríguez & Ospina, 2005)
2005	Los humedales ante el cambio climático	Moya Bárbaro, Hernández Ana, Elizalde Borrell Héctor	(Moya, Hernández, & Elizalde Borrell, 2005)
2006	Alternativa innovadora de bajo costo para depurar aguas residuales en países en vías de desarrollo.	Sanbra Artunduaga Alfonso.	(Sanbra,2006)

2006	Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM	Gómez Enrique Guadalupe, Llagas Chafloque Wilmer Alberto.	(Gómez & Llagas, 2006)
Ene-jun-2006	Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales Artificiales de flujo vertical a escala de banco.	Rodríguez Momroy Jesús, Durán-de-Bazúa Carmen.	(Rodríguez & Durán,2006)
Jun-2008	Remoción de contaminantes en un sistema modelo de humedales artificiales a escala de laboratorios	Zárate Guido Alejandro, Durán de Bazua Carmen.	(Zárate & Durán, 2008)
Ene-2009	Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de carga orgánica.	Romero Mariana, Sánche Enrique, Ortiz Laura.	(Romero & Ortiz , 2009)
2009	Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la acuicultura	Ramírez Carrillo Héctor, Luna Pabello Víctor, Arredondo Figueroa.	(Ramírez-Carrillo, Luna-Pabello, & Arredondo-Figueroa, 2009)
2010	Remoción de Cd y Zn de una corriente acuosa de una empresa minera usando humedales artificiales	Ruiz-López, Vianey; González-Sandoval, María del Refugio; Barrera-Godínez, José Antonio; MoellerChávez, Gabriela; Ramírez- Camperos, Esperanza; Durán-Domínguez-de- Bazúa, María del Carmen	(Ruiz-López et al., 2010)
Feb-2011	Comunidades	Pérez Peláez Norma,	Pérez-Peláez, Peña-Varón, &

	bacterianas involucradas en el ciclo del nitrógeno en humedales construidos	Peña Varón Miguel, Sanabria Janeth	Sanabria, 2011)
01-jul-ago-2011	Humedales Artificiales como un método viable para el tratamiento de drenes agrícolas.	Susana Silva	(Silva-, 2011)
Abr-2012	Metabolismo del azufre de aislados bacterianos provenientes de un humedal artificial empleado para el tratamiento de efluentes de la industria curtidora.	Maldonado María, Peña Juan José.	(Maldonado & Peña , 2012)
2012	Humedal subsuperficial vertical para el tratamiento de aguas residuales: diseño, construcción y evaluación.	Pérez-Villar, Maira M.; Domínguez, Elena R.; Cachaldora, Isidro J.	(Pérez, Dominguez, & Cachaldora, 2012)
01-ene-2013	Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales	Pérez Salazar Roy, Alfaro chinchilla Carolina, Sasa Marín Jihad, Agüero Pérez Juan	(Pérez, Alfaro, Sasa & Agüero, 2013)
Jun-2013	Saneamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales en el Museo de Cultura Popular de la Universidad Nacional.	Alfaro Carolina, Pérez Roy, Solano Mayela.	(Alfaro, Pérez & Solano, 2013)
2014	Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón.	Luna Pabello Victor Manuel, Castañeda Aburto.	(Luna & Castañeda, 2014)
2014	Evaluación de un humedal de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la institución universitaria colegio	Bedoya Pérez Juan Carlos, Ardila Arias Alba Nelly, Reyes Calle Juliana	(Bedoya et al., 2014)

	mayor de Antioquia, Colombia		
Mar-2015	Remoción de mercurio, cromo y plomo por humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes	Amabilis Sosa Leonel, Siebe Christina, Moeller Chávez Gabriela, Duran Domínguez De Bazua María del Carmen	(Amabilis, Siebe, Moeller- Chávez, & Durán- Domínguez-De-Bazúa, 2015)
Abr-2015	Diseño de un humedal subsuperficial vertical para la depuración de las aguas residuales de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas	Pérez Villara Maira María , Domíngueza Elena Rosa , Yaribey M. Gonzalez Rochea , Jimenez Llanob Taimy	(Pérez et al., 2015)
2015	Remoción de mercurio por <i>Phargmites australis</i> empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes a metales pesados	Amabilis Sosa Leonel, Siebe Christina, Moeller Chavez Gabriela, Duran Dominguez De Bazua Maria del Carmen	(Amabilis et al., 2015)
Ene-2016	Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes e aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita	Solís Silvan Rudy, López Ocaña Gaspar, Bautista Margulis Raul German, Hernández Barajas, José Roberto, Romelion Cerino Mario José	(Solis, López, Bautista, Hernández, & Romelion , 2016)
2016	Remoción de contaminantes de aguas residuales por medio de humedales artificiales establecidos en el municipio de Actopan, Veracruz, México	Marín Muñoz J.L.	(Muñiz, 2016)

Fuente (Autores, Pazán, Trelles)

- Nacional*Tabla 14. Organización de literatura nacional sobre HAFSSV.*

Fecha de publicación	Título	Autor (es)	Cita bibliográfica
Dic-2011	Diseño de una planta de tratamiento piloto de aguas residuales domesticas para el conjunto residencial	González Escobar Fernando David	(González ,2011)
Dic-2012	Instalación de un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de un reservorio en la granja de la universidad de San Francisco de Quito	Guerra Flores Luis Esteban	(Guerra, 2012)
2013	Tratamiento de aguas residuales domesticas mediante un humedal artificial de flujo subsuperficial con vegetación herbácea	Cueva Torres Edison Yasmany, Rivadeneira Bravo Fidel Alfonso	(Cueva & Rivadeneira, 2013)
Abr-2014	Diseño de un sistema de pantanos artificiales para el tratamiento de aguas negras y grises del campo base y área de mantenimiento el Coca de la empresa Triboilgas	Vinueza Estévez Juan Sebastián	(Vinueza, 2014)
2014	Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para el centro poblado de la parroquia de Tiputini del cantón Aguarico en la provincia de Orellana	Shiguango Chanaluisa Nelson Alexander	(Shiguango, 2014)

2015	Rediseño de la planta de tratamiento de agua residual, aplicando un sistema de humedal artificial con flujo subsuperficial vertical en la extractora Teobroma	Lalangui Delgado Darwin Antonio	(Lalangui, 2015)
Oct-2016	Plan de reutilización de las aguas residuales, Universidad Técnica de Machala, El Cambio, El Oro	Carrillo Landín Ángel Antonio	(Carrillo, 2016)
2017	Diseño de un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la comunidad del Tabacay, cantón Azoques, provincia del Cañar	Ludizaca Viracocha Wilson Esteban	(Ludizaca, 2017)

Fuente (Autores, Pazán, Trelles)

CAPÍTULO IV

4 PARAMETRIZACIÓN DE HAFSSV EN ZONAS FRÍAS O TEMPLADAS

Para el diseño de los humedales se debe tener en cuenta las circunstancias que existen a nivel local específicamente como la temperatura, la disponibilidad de área y el destino que va a tener el efluente (Lector, 2010).

Aunque no todas las condiciones que aportan para el funcionamiento de un humedal, han sido completamente investigadas y comprendidas, los múltiples experimentos realizados a nivel mundial han permitido un entendimiento más

claro a cerca de la influencia de los factores en la eficiencia y el diseño de los HAFSSV (Lector, 2010).

En el sistema, las condiciones de temperatura que se presentan afectan a las actividades tanto físicas como biológicas, de forma que en un caso extremo en el cual se tenga temperaturas bajas conllevarían a una formación de hielo provocando una falla física del mismo. Por otra parte también dependen de la temperatura las reacciones biológicas responsables de remoción de la DBO, nitrificación y desnitrificación (Lara Borrero, 1999).

Las bajas temperaturas en climas fríos en época de invierno disminuyen la tasa de remoción de NO_3 , NH_3 y DBO. Para compensar la disminución de las tasas se presenta un aumento en el tiempo de retención, pero el incremento del tamaño de este sistema en lugares con una temperatura extremadamente baja, no resulta muy factible con respecto al tema económico. Sin embargo, los HAFSSV aportan una mayor protección térmica en dichos casos (Londoño & Vanegas, 2009).

En zonas de clima frío o templado los parámetros de diseño varían con respecto a las zonas de clima cálido, empezando desde el dimensionamiento se tienen ya variaciones, hasta llegar a la vida microbiana existente y las remociones que se generan en los ecosistemas destinados para dicha actividad. La dependencia de la temperatura ha sido un factor bastante importante debido a que es directamente proporcional al rendimiento que se espera del sistema depurador, por lo cual se ha realizado una recopilación cautelosa sobre los parámetros de diseño de un humedal vertical.

Debido a que son fundamentales las circunstancias que existen a nivel local, la presente investigación pretende dar a conocer los rangos de diseño de los parámetros que se deben considerar para las zonas frías o templadas.

4.1 Área por persona en m^2 /persona equivalente

En HAFSSV el área depende de la temperatura, en las zonas con climas tropicales o cálidos el área es minimizada a causa de la existencia de mayor actividad biológica durante el año, por tal motivo, un humedal construido en una zona caliente será más pequeño que uno en un lugar frío o templado para una misma cantidad de contaminantes (Lector, 2010).

El tamaño del HAFSSV tiene que ser orientado con respecto a la idea de que si se tiene una menor área, la probabilidad de una sobre carga es mayor, lo cual puede generar problemas de funcionamiento y pérdida de eficiencia en el tratamiento (Lector, 2010).

Los humedales de flujo vertical se recuperan durante un periodo de 14 días porque es el tiempo en que el filtro puede secar, sin embargo esto no funciona en lugares de temperatura baja ($0-8^{\circ}\text{C}$), por tal motivo es que dichos sistemas deben ser diseñados con tamaños mayores en climas fríos (Lector, 2010).

Un método simple para el diseño de HAFSSV es utilizando el parámetro de área requerida por persona con lo cual se puede comprobar la disponibilidad general del espacio, pero no se debe utilizar sin el debido control de la carga hidráulica y el cálculo hidráulico (Lector, 2010).

El área está limitada en climas cálidos por la demanda de oxígeno, mientras que para climas fríos está limitado por la carga orgánica y de sólidos suspendidos, es así que la actividad biológica está aún limitada por la temperatura del suelo y la obstrucción (Lector, 2010).

El tamaño superficial en las regiones frías para muchos autores varía entre 2 a 4 m^2 / PE , pero esto puede cambiar según la opción de reutilización. Sin embargo, según un ejemplo realizado en Alemania establece que para zonas frías o templadas el tamaño mínimo no debe ser inferior a 5 m^2/pe (Lector, 2010).

4.2 Carga orgánica por área superficial en $\text{g DBO}_5/\text{m}^2/\text{d}$ o $\text{g DQO}/\text{m}^2/\text{d}$

En esta tecnología de tratamiento la velocidad de los procesos de remoción de contaminantes se ve directamente afectada por la temperatura del agua residual a tratar y de la temperatura del ambiente. Es importante conocer, que la velocidad de las reacciones se duplica con cada incremento de temperatura de 10 C dentro del aspecto térmico en el que se desarrollan los microorganismos (Pidre Bocado, 2010). En lugares con climas templados o fríos la tasa de remoción de la DBO es reducida, así como también las reacciones biológicas responsables de la nitrificación y desnitrificación (Lector, 2010).

Con respecto al diseño y operación de HAFSSV en lugares fríos se conoce que soportan menores cargas orgánicas e hidráulicas en comparación con aquellos sistemas que se encuentren en climas tropicales (Lector, 2010).

En zonas templadas o frías debido a que no se cuentan con las temperaturas suficientes para que el agua se evapore lo cual significa que la evapotranspiración será mínima disminuyendo los problemas que este fenómeno conlleva como por ejemplo el aumento de concentraciones y tiempo de retención hidráulico del humedal (Lector, 2010).

En los HAFSSV que sean construidos en zonas con climas fríos o templados se recomienda una carga orgánica de 20 g DQO m²/día, así como también para aguas residuales y grises. Para muchos autores debido a su experiencia en el diseño de estos sistemas depuradores en climas cálidos se recomienda de 60-70 g DQO m²/día que es más o menos de un 30-35g DBO/ m².día (Lector, 2010). Para comunidades pequeñas es recomendable utilizar un valor de 60 g DBO/hab.día (Ambiental, 2017).

4.3 Carga hidráulica en mm/d o m³/m²/d

Los HAFSSV con respecto a la pluviometría, pueden tener variaciones pasajeras de cargas hidráulicas producidas por precipitaciones de corta duración, para zonas que generalmente sean pluviosas, la estimación del caudal para el tiempo de lluvia es crucial para la base del dimensionamiento (Pidre, 2010).

Según la experiencia de muchos autores con aguas residuales para los HAFSSV que se encuentren en climas fríos la carga hidráulica no debe ser mayor a los 100-120 mm/d, según algunos proyectos con aguas pre tratadas con más de 200 mm/d dieron resultados negativos (Lector, 2010).

4.4 Oxígeno disuelto (mg/l)

Las plantas tienen la capacidad de inyectar oxígeno a sus raíces el cual es aprovechado por los microorganismos, los cuales se adhieren a la raíz y posteriormente se encargan de la metabolización de los contaminantes presentes en el humedal. Este oxígeno no solamente sirve para satisfacer demandas

respiratorias de los tejidos que están enterrados, sino que también suministra oxígeno a la rizósfera desde las raíces (Suárez, Agudelo, Rincón, & Millán, 2014). El oxígeno que liberan las macrófitas desde sus raíces hasta la rizósfera tiene influencia en los ciclos biogeoquímicos del sustrato de forma que se muestra a través del efecto que se produce sobre el estado redox (Suárez et al., 2014).

El porcentaje de liberación de oxígeno está en dependencia de la concentración de oxígeno interno, la demanda de oxígeno del medio circundante y de la permeabilidad que tienen las paredes de la raíz. Las plantas que se encuentran presentes en el humedal tienden a conservar el oxígeno interno por las capas impermeables que son suberizadas y lignificadas de la hipodermis y a la corteza exterior. Varios estudios que se han realizado sobre las variaciones de oxígeno disuelto en las raíces de las macrófitas muestran que las velocidades de liberación de oxígeno varían desde -10 hasta 160 kg O₂/cm² min y esto depende de la especie que se esté tratando (Suárez et al., 2014).

Dentro de los procesos que se ven afectados por la temperatura se tiene la solubilidad del oxígeno en el agua, donde los valores de concentración de saturación del mismo serán presentados posteriormente (Lector, 2010).

Para zonas de climas fríos o templados con una temperatura inferior a 9°C la concentración de oxígeno es de 11.6 mg/l, y para temperaturas de 18°C la concentración es de 9.6 mg/l (Lector, 2010).

Para poder obtener una buena oxigenación del suelo y así conseguir un correcto funcionamiento del humedal vertical, se recomienda tener una óptima aireación del suelo (Lector, 2010).

4.5 PH

El pH es un parámetro muy importante debido a la influencia que tiene en la efectividad de los procesos de bioremediación. Los valores de pH óptimos que se consideran están entre el intervalo de 6-8 generalmente, siendo así que los valores menores a 6 unidades (ácidos) no permiten el crecimiento de muchos de los grupos microbianos, y los valores mayores a 8 unidades (alcalinos) inhiben de igual forma el crecimiento. Con la aplicación de cargas contaminantes bajas el pH tiende a disminuir debido al proceso de mineralización de la materia orgánica que se genera por acción de microorganismos y plantas, los cuales dan lugar a que se

formen compuestos intermedios (ácidos orgánicos) del agua residual a tratar. Por otro lado, cuando se tiene un incremento en la carga contaminante aplicada, se presenta un aumento del pH debido a una disminución de la actividad biológica (Delgadillo et al., 2010).

En las plantas de tratamiento que conllevan procesos biológicos se debe controlar que el pH este en un rango favorable para los organismos que habitan el mismo, ya que al tener un pH neutro se genera un ambiente adecuado para la vida de microorganismos degradadores de materia orgánica, así como también esta condición neutra ayuda a que niveles de fósforo y nitrógeno se estabilicen y a que los ciclos de dichos nutrientes se regulen.

A continuación en la tabla 15 se tienen valores aproximados para clasificar el pH en el agua residual (Delgadillo et al., 2010).

Tabla 4.1. Clasificación del pH del agua residual.

Ácido		Neutro	Alcalino	
Fuerte	Medio		Medio	Fuerte
0-4.3	4.3-7	7	7-8.2	8.2-14

Fuente (Delgadillo et al., 2010)

El efecto indirecto que tiene el pH es el de influenciar la toxicidad de algunas sustancias en especial en aquellas en las que la toxicidad depende del grado de disociación (García ,Ludisaca , 2017).

Para el correcto desarrollo de la vegetación es recomendable tener un adecuado pH, en este caso para la ciudad de Cuenca, Ecuador que es una zona de clima frio o templado tenemos un pH que está dentro de un rango de 6.67-7.9 con un valor promedio de 7.23 (Mejia, Pino, 2010).

4.6 Vegetación

Los HAFSSV utilizan una vegetación de plantas emergentes que cumplen un papel fundamental para el proceso de remoción de contaminantes, éstas generalmente provienen de la misma zona climática en la cual se va a construir el sistema depurador, o caso contrario deben estar adaptadas a las condiciones climáticas del lugar (Hoffman, 2011). La temperatura afecta directamente el

comportamiento de la vegetación utilizada en el sistema depurador. A continuación en la tabla 16 se presentan diversos tipos de macrófitas más utilizadas para HAFSSV en países con clima frío como Australia, Estados Unidos y Europa (Hoffman, 2011).

Tabla 4.2. Características de especies vegetales emergentes para flujo subsuperficial.

Nombre científico	Nombre Común	Clima	Temperatura ambiental óptima para su desarrollo
Glyceria máximos	Gramínea glicería acuática	Frío	-
Iris pseudacorus	Lirio amarillo	Frío	Soporta temperaturas hasta de -8 °C.
Scirpus sp.	Junco	Templado	16°C-27°C.2
Phragmites australis	Carrizo	Frío	12-23 °C, tolera hasta -5 °C.
Typha angustifolia	Totora, espadaña	Templado-frío	10°C - 30°C

Fuente (Hoffman, 2011)

La vegetación que se utiliza generalmente en la ciudad de Cuenca que puede tolerar los rangos de pH del agua residual del lugar es:

Carrizo: con una tolerancia de pH entre 4.5-7.5 (Hoffman, 2011).

Totora: con una tolerancia de pH entre 4-9 (Ambiental, 2017).

4.7 Sustrato

El material de relleno o sustrato en un HAFSSV generalmente está conformado por arena, grava, roca y sedimentos. El tamaño que contenga cada uno de estos componentes va a afectar de forma significativa al flujo hidráulico y el caudal de

agua próximo a depurar, siendo así que, si el sustrato se compone en su mayoría de cantidades elevadas de arcilla y limo, se tiene una capacidad mayor de absorción, y la filtración se torna mejor debido a que la adsorción es elevada y el diámetro de los huecos pequeños. Este sistema presenta una resistencia hidráulica elevada y se requieren velocidades de flujo muy bajas, lo cual también limita el caudal que se va a tratar. Por otra parte si el lecho filtrante está formado por diámetros grandes la conductividad hidráulica aumenta pero la capacidad de adsorción disminuye (De, En, & Familiares, 2013).

Debido a las variaciones de temperatura es importante colocar un material de relleno que no se fragmente ni se degrade debido a dichos cambios y por el paso del tiempo, por lo cual para los humedales de flujo vertical se emplean varias capas de material de relleno. En el fondo se dispone de una capa de grava de 20 cm de espesor, con un diámetro que oscila entre 20-40 mm, la cual recubre las tuberías de drenaje-ventilación. Es recomendable generar otra capa de 70 cm de espesor de gravilla con un diámetro de 3-8 mm y por ultimo una capa de arena de 10 cm de espesor con un diámetro de 1-2 mm (De et al., 2013).

Todas estas consideraciones son importantes ya que cuando se va a seleccionar el sustrato filtrante es necesario que se disponga de un material homogéneo de forma, tamaño y que sea limpio, además se debe tomar en cuenta respecto al ámbito económico tratar de escoger un material cercano a la zona de construcción del sistema depurador (De et al., 2013).

El medio granular puede variar en un rango de 0.2-0.8 m, el cual puede ser el resultado de una combinación de materiales como arena cuyo espesor se recomienda mayor a 30 cm y su diámetro debe estar en un rango de 0.25-0.4 mm, grava con un espesor entre 10-20 cm y un diámetro entre 3-10 mm y grava con un espesor entre 10-20 cm con un diámetro entre 20-40 mm (García, 2008).

En este medio granular es recomendable que se implementen tuberías verticales de aireación que favorecen al proceso de degradación aeróbica y nitrificación por lo cual se recomienda instalar una tubería por cada $4m^2$, conociendo que estos humedales deben ser alimentados de manera intermitente (4-12 veces/d) (García, 2008).

4.8 Tiempo de retención hidráulico

El tiempo de retención hidráulico del humedal subsuperficial vertical puede ser reducido al presentarse tasas altas de precipitación pluvial ya que pueden diluir la concentración de contaminantes. Estos aspectos no influyen en el desempeño de sistema en climas fríos o zonas templadas, solo deben ser considerados en lugares que presenten valores altos de evapotranspiración, los cuales se dan generalmente en zonas tropicales, o valores mayores de precipitación (Lector, 2010).

4.9 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica se relaciona de forma directa con la capacidad de infiltración que tiene el sustrato, por ende se relaciona también con los factores que influyen en la infiltración que son: intensidad de lluvia, calidad del efluente, estado de humedad del suelo, características hidráulicas del medio filtrante, cubierta vegetal y formación de costras subsuperficiales (Forero, 2009).

La conductividad hidráulica varía directamente con la viscosidad del agua, conociendo que esta depende principalmente de la temperatura, y a su vez varía también con respecto al número y tamaño de vacíos en el medio que se utilizado para el sistema depurador. Se recomienda que sea medida en el terreno o en el laboratorio antes de que se realice el diseño final (Lector, 2010).

4.10 Viscosidad cinemática del agua

En los humedales subsuperficiales de flujo vertical los efectos de la viscosidad resultan muy significativos especialmente en climas fríos. Es por esta razón que la conductividad hidráulica del agua a 5°C es el 66% de la de que se encuentre a 20°C, lo que es tomado en cuenta para el factor de seguridad con una viscosidad $\leq 1/3$ de la viscosidad efectiva (Lector, 2010).

Según la tabla 6 para zonas de clima frío o templado considerando un rango de temperatura entre 10-25°C se tienen valores de viscosidad de: 1.306 1.139 1.003 y 0.893 x10⁻⁶(m²/s) (Romero-Aguilar, 2009).

4.11 Comparación entre los parámetros dependientes de la temperatura para zonas de clima cálido y clima frío.

Tabla 4.3. Comparación entre los parámetros dependientes de la temperatura para zonas de clima cálido y clima frío.

Parámetro	Clima	Temperatura	Valor	Unidad
Área por persona equivalente	Cálido	-	1-2	m ² /persona
	Frío	-	2-4	equivalente
			5	
Carga orgánica por área superficial	Cálido	-	60-70	g DQO/m ² /d
	Frío	-	20	
Carga hidráulica	Frío	-	100-120	mm/d
Oxígeno disuelto	Frío	9°C	11,6	mg/l
	Templado	20°C	8,84	
	Cálido	30°C	7,53	
Vegetación				
Espadañas		10-30°C	-	-
Totoras		18-27°C	-	
carrizos		12-23°C	-	
Viscosidad cinemática del agua	Frío	10°C	1,306	x10-6(m ² /s)
	Templado	20°C	1,003	
	Cálido	30°C	0,8	

Fuente (Autores, Pazán, Trelles)

Tiempo de retención hidráulico: el tiempo de retención hidráulico TRH se relaciona directamente con el área superficial del sistema por ende se relaciona también con el valor establecido de la constante cinética de primer orden que varía de acuerdo a la temperatura, es por esta razón que los valores de TRH aumentan en lugares fríos

ya que se requiere de mayor área en comparación con los humedales verticales construidos en zonas de clima cálido.

Carga Hidráulica: velocidad que relaciona el caudal de entrada y el área superficial del sistema de tratamiento, por tal motivo en zonas de clima frío los valores de carga son más pequeños ya que se requiere de mayor área como se mencionó anteriormente, mientras que, para zonas de clima tropical, donde es clave dimensionar con la disponibilidad de oxígeno, los valores de carga aumentan.

CONCLUSIONES

Se realizó un análisis del estado del arte de los humedales artificiales verticales de flujo subsuperficial mediante la recopilación de la información de diferentes fuentes bibliográficas incluyendo tesis de pregrado, maestría y doctorado, artículos de revistas científicas para fortalecer la veracidad de la información propuesta en este trabajo de tal modo que se ha creado una base de datos en la que constan los trabajos a nivel nacional e internacional.

Se dieron a conocer los aspectos en los que se basa el diseño de un humedal artificial (HSSFV), de forma que se pudo analizar correctamente las ecuaciones necesarias y los factores que intervienen en el diseño, por lo que se puede decir que el factor más relevante para el diseño es la temperatura del medio en el que se va a trabajar debido a que la vegetación, el funcionamiento del humedal, tiempos de retención hidráulico, etc. son dependientes de este factor.

Se estableció que para la implementación de los humedales (HSSFV) en zonas frías o templadas el área unitaria, carga hidráulica y tiempo de retención hidráulico, carga orgánica, capacidad de transferencia de oxígeno, estrategia de alimentación, profundidad, plantas y sustrato son los parámetros que se tienen que analizar y en función de los mismos se han establecido los valores adecuados para este tipo de zona.

Hemos recopilado los datos que corresponden a los parámetros de diseño que dependen de la temperatura, de forma que se ha resumido en una tabla en donde se comparan los valores para clima cálido y clima frío.

BIBLIOGRAFIA

- Abdelhakeem, S. G., Aboulroos, S. A., & Kamel, M. M. (2016). Performance of a vertical subsurface flow constructed wetland under different operational conditions. *Journal of Advanced Research*, 7(5), 803–814. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.12.002>
- Alberto, W., & Chafloque, L. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *A design of an artificial marsh for treating waste water in the UNMSM*, 15, 85–96.
- Arias I., C. A., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13(1), 17–24. <https://doi.org/10.18359/rcin.1321>
- Barbier, E. B., Acreman, M., Knowler, D., Bejarano Mora, P. A., Groot, R. De, Stuij, M., ... Naredo, J. M. (2014). Aguas saludables para el desarrollo sostenible. Estrategia operativa del PNUMA para el agua dulce (2012-2016). *Convención de Humedales Ramsar*, 14(99), 1–50. <https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2002.tb00005.x>
- Bernal, F Mosquera, D. (2002). Humedales Artificiales Para El Tratamiento De Las Aguas Residuales En La Corporación Universitaria De La Costa. *Seminario Internacional Sobre Metodos Naturales Para El Tratamiento de Aguas Residuales*, 149–155.
- Bolaños-Cerdas, R. (2013). Saneamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales en el Museo de Cultura Popular de la Universidad Nacional, 45(1), 63–71.
- Borrero, L., Andrés, J., Puerto, V., Leonardo, I., Evolución, I. Y., Humedal, D. E. U. N., Borrero, L. (2005). Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47720781003>.
- Brix, H. (2005). Danish Guidelines for Small-Scale Constructed Wetland System for Onsite Treatment of Domestic Sewage, (May 2014).
- Comisión Nacional del agua (n.d.). *Manual de Agua Potable , Alcantarillado y*

Saneamiento Manual de Agua Potable , Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento.

- Coste, D. E. B., & Para, A. (2016). Aguas Residuales Con Sistemas Alternativos Reducida .
- Curtido, I. (2012). (Recibido marzo 2011, aceptado abril 2012), 28(3), 195–201.
- Durán Carmen & Zárata Guido (2008). Humedales Artificiales. *PhD Proposal*, 1, 100. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Delgadillo, O., Camacho, A., & Serie, M. A. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Retrieved from http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf%5Cnhttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales
- Doctoral, P., Medio, E. N., Terciario, T., Efluente, D. E. L., Planta, D. E. L. A., Aguas, T. D. E., Interamericano, C. (2005). *U n i v e r s i d a d n a c i o n a l d e t r u j i l l o*.
- EPA-832-F-00-024. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. *United States Environmental Protection Agency, (Us Epa)*, 13.
- EPA (2013). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. *United States Environmental Protection Agency, (Us Epa)*.
- Estrada, I. (2010). Monografía Sobre Humedales Artificiales De Flujo Subsuperficial (Hafss) Para Remoción De Metales Pesados En Aguas Residuales, 178.
- Eucalipto, P. D. E., & Pino, Y. (2010). Universidad del Azuay Facultad de Ciencia y Tecnología Escuela de Biología del Medio Ambiente.
- Galasa, S. A. (1971). Depuración De Aguas Residuales Mediante Humedales Artificiales : La Edar De Los Gallardos (Almería). *Environmental Protection*, 99–112. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2244838.pdf>
- González Escobar Fernando David (2011). Diseño de una Planta de tratamiento Piloto de aguas residuales domésticas para el conjunto residencial Matisse utilizando un humedal atrificial .

- González, J. F. (2002). Humedales artificiales para depuración. *Manual de Fitodepuración. Filtros de Macrofitas En Flotación.*, 79–80.
- Guanuchi, A. (2012). Título Del Trabajo De Fin De Máster : Diseño De Sistema De La Comunidad De Cochapata.
- Hernández-Ruiz, Juan M.; Pérez-Villar, Maira M.; Domínguez, Elena R.; Cachaldora, Isidro J. (2012). Redalyc.humedal subsuperficial vertical para el tratamiento de aguas residuales: diseño, construcción y evaluación.
- Hoffmann, H. (2011). Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. *GIZ y*
- Junio, A., Soto, L., Tutor, F., Mart, M., Co-tutora, M., Hern, C., ... Polit, U. (2016). la mejora de la calidad de las aguas en los meandros abandonados del río Segura Índice.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands, Second Edition. Treatment Wetlands, Second Edition.* <https://doi.org/10.1201/9781420012514>
- Knight, R.; Kadlec R., and Reed, S. 1993. Database: Northamerican Wetland for Water Quality Treatment, US Environmental Protection Agency, Risk Reduction Environmental Laboratory, Cincinnati, OH.
- Lara Borrero, J. A. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales, 122.
- Lector, Q. (2010). Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas grises y aguas residuales domésticas en países en desarrollo Borrador, (March), 1–27.
- Lincoln, U. N., & Brooks, N. E. R. (n.d.). A manual de.
- Londoño, L. A., & Vanegas, C. (2009). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética, 212.
- Luna Pabello Victor (2014). Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43230982003>.
- Manzano, U. (2015). Escuela superior politecnica del chimborazo residual , aplicando un sistema de humedal.
- Marín José Luis (. 2016)Artificiales, H., Removal of Wastewater Pollutant in Artificial Wetlands.
- Mendoza Ortega, A. daniel, & Ramos Escorza, C. G. (2012). Diseño y construcción a escala piloto de un humedal de flujo subsuperficial para el

- tratamiento de aguas residuales porcícolas . Apaxtla de Castrejón , Guerrero, 90.
- Moya, B. V, Hernández, A. E., & Elizalde Borrel, H. (2005). Los Humedales Ante El Cambio Climático. *Investigaciones Geográficas*, 37, 127–132. Retrieved from <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/273>
- Oropeza García, N. (2006). Lodos residuales : estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 1(figura 1), 51–58.
- Peine, D.-. (1989). Tratamiento por humedales artificiales de flujo vertical y lagunas no aireadas en la comunidad de Berel , Alemania Humedales artificiales con carrizo de flujo subsuperficial vertical para el tratamiento de aguas residuales en Shenyang , norte de China.
- Pérez Villar, Maira M. 2006. Evaluación preliminar del uso de filtros de suelo en la depuración de aguas residuales urbanas en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Tesis de Maestría. UCLV. Cuba
- Pérez M & Dominguez, E. (2015). Diseño de un humedal subsuperficial vertical para la depuración de las aguas residuales de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. *Afinidad LXXII*, 569(53), 37–41.
- Pérez-olmedilla, M., & Rojo, C. (2000). Función depuradora de los humedales I : una revisión bibliográfica sobre el papel de los macrófitos.
- Pérez, B., Nelly, A., Arias, A., & Calle, R. (2014). 2 Grupo de Investigación en Química Básica y Aplicada (QUIBA). Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid de Investigación en Biociencias (GIB), Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia papyrus Key words : subsurface flow , wastewater , ph.
- Pérez-Peláez, N. R., Peña-Varón, M. R., & Sanabria, J. (2011). Comunidades bacterianas involucradas en el ciclo del nitrógeno en humedales construidos. *Ingeniería y Competitividad*, 11(2), 83–92. Retrieved from <http://redalyc.org/articulo.oa?id=291323530006>
- Pidre Bocado, J. R. (2010). Influencia del Tipo de Granulometría del Sustrato en la Depuración de las Aguas Residuales por el Sistema de Humedales Artificiales de Flujo Vertical y Horizontal. *Tesis Doctoral*, (May). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4562.0640>
- Politécnico, C., Esteban, L., Flores, G., & Peñafiel, R. (2012). Universidad San

Francisco De Quito.

- Ramírez-Carrillo, H. F., Luna-Pabello, V. M., & Arredondo-Figueroa, J. L. (2009). Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la acuicultura. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8(1), 93–99.
- Ramsar, S. de la C. de. (2006). Manual de la Convención de Ramsar, 4a. edición. *Secretaría de La Convencion de Ramsar*, 4(4), 93–99. <https://doi.org/10.1080/10256016.2013.831089>
- Reed, S. C. (1991). Constructed Wetlands for Waste-Water Treatment. *Biocycle*, 32(1), 44–49. <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- Reed S.C., Crites R.W. y Middlebrooks E.J. 1995. Natural Systems for Waste Management and Treatment. 2nd Edition. McGraw-Hill, New York, 431 pp.
- Rodríguez Chaparro, T., & Ospina, I. M. (2005). Humedales artificiales de flujo vertical para mejorar la calidad del agua del río Bogotá. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 15(34), 74–84.
- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., & Laura Ortiz-Hernández, M. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 25(3), 157–167. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v25n3/v25n3a4.pdf>
- Ruiz-López, V., González-Sandoval, M. R., Barrera-Godínez, J. A., Moeller-Chávez, G., Ramírez-Camperos, E., & Durán-Domínguez-de-Bazúa, M. C. (2010). Remoción de Cd y Zn de una corriente acuosa de Cadmium and zinc removal from a mining. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*, 25(1), 27–34.
- Sanabria Artunduaga Otoniel Alfonso. (2006). Innovative alternative of low cost to purify wastewater in countries in via of development.
- Serrano, A. C. H. (2008). Depuración con Humedales Construidos. *Universidad Politecnica de Cataluña*, 1–96. Retrieved from http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2474/JGarcía_and_ACorzo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Se, M., & Miranda-ríos, M. (2001). Estado del arte y perspectivas de aplicación de los humedales artificiales de flujo horizontal en, (January).
- Sistemas, D. B. De, Checa, A. D. C., & Checa, R. (2008). (*Phragmites australis*

- Caña común), *Scirpus* (*Schoenoplectus*) *lacustris* ; Norteamérica : *Typha*, 965–980.
- Shiguango, N. (2014). Diseño De Una Planta De Tratamiento De Aguas Residuales Para El Centro Poblado De La Parroquia Tiputini Del Cantón Aguarico En La Provincia De Orellana.
- Silva, P., & Universidad, P. (1993). No Title.
- Silva-, S. (2011). Humedales artificiales como un método viable para el tratamiento de drenes agrícolas* artificial wetlands as a viable treatment method for agricultural drains, 97–111.
- Silván, R. S., Ocaña, G. L., Margulis, R. G. B., Barajas, J. R. H., & Cerino, M. J. R. (2016). Evaluación De Humedales Artificiales De Flujo Libre Y Subsuperficial En La Remoción De Contaminantes De Aguas Residuales Utilizando Diferentes Especies De Vegetación Macrófita. *Interciencia*, 41(1), 40–47.
- Sosa, L. E., Siebe, C., Moeller-Chávez, G., & Durán-Domínguez-De-Bazúa, M. D. C. (2015). Remoción de mercurio, cromo y plomo por humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 6(2), 21–34.
- Suárez, A., Agudelo, N., Rincón, J., & Millán, N. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Mutis*, 4(1), 8–14. Retrieved from <http://revistas.utadeo.edu.co/index.php/mutis/article/view/905>
- Vinueza, J. (2014). Diseño De Un Sistema De Pantanos Artificiales Para El Tratamiento De Aguas Negras Y Grises Del Campo Base Y Área De Mantenimiento El Coca De La Empresa Triboilgas.
- Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2(3), 530–549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- Vymazal, J., & Březinová, T. (2014). Long term treatment performance of constructed wetlands for wastewater treatment in mountain areas: Four case studies from the Czech Republic. *Ecological Engineering*, 71, 578–583. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.075>
- Wang, M., Zhang, D. Q., Dong, J. W., & Tan, S. K. (2017). Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate — A review. *Journal of*

Environmental Sciences (China), 57, 293–311.
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.12.019>

Yue, Z. (2012). Diseño de un humedal construido para el tratamiento de aguas residuales y su reutilización en Mount Pleasant , Utah.

Zárate, A., & Durán-de-bazúa, C. (2008). Remoción de contaminantes en un sistema modelo de humedales artificiales a escala de laboratorio Pollutants removal in a lab-scale constructed wetlands model system. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 23(01), 15–22.