



DISEÑO Y MODELACION DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL DE
FLUJO HORIZONTAL PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA
VEREDA MANCILLA DEL MUNICIPIO DE FACATATIVA, CUNDINAMARCA

Cristhian David Cuervo Aponte. Código 463212109
Miguel Ángel Hernández Espinoza. Código 463211245

Universidad de Cundinamarca
Facultad de Ciencias Agropecuarias, Ingeniería Ambiental
Facatativá, Colombia
Agosto de 2018

DISEÑO Y MODELACION DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL DE
FLUJO HORIZONTAL PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA
VEREDA MANCILLA DEL MUNICIPIO DE FACATATIVA, CUNDINAMARCA

Cristhian David Cuervo Aponte
Miguel Ángel Hernández Espinoza

Monografía presentada como requisito para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director:
Ing. Javier Guillermo Cristancho Segura

Universidad de Cundinamarca
Facultad de Ciencias Agropecuarias, Ingeniería Ambiental
Facatativá, Colombia
Agosto de 2018

Nota de aceptación

Jurado 1

Jurado 2

Facatativá (Cundinamarca), agosto de 2018

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia y al primero que queremos agradecerle es a Dios por bendecirnos y permitirnos llegar hasta donde hemos llegado.

A la UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA EXTENSION FACATATIVA por darnos la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

Agradecer a nuestro director de Investigación y de Tesis de Grado Javier Guillermo Cristancho Segura, por su visión crítica de muchos aspectos cotidianos de la vida, por su rectitud en su profesión como docente, por sus consejos, que ayudaron a formarnos como investigadores.

Agradecimiento a nuestras familias quienes nos han apoyó por todo este gran proceso

Ultimo, pero no menos importante agradecimiento, a todos y cada uno de los profesores de la Universidad de Cundinamarca, quienes nos ha aportado su conocimiento, y trabajan día a día para lograr que más jóvenes dediquen su tiempo a hacer el bien de una u otra forma.

RESUMEN

En los últimos años, las tecnologías alternativas ecológicas para el tratamiento de aguas residuales han mostrado tener un excelente potencial, a veces incluso mayor que las tecnologías habituales, los humedales artificiales se han convertido a nivel mundial en una de las mejores alternativas para tratar los residuos líquidos domésticos de pequeñas poblaciones. Estos sistemas se basan en los biofiltros, conteniendo en su interior un lecho suficientemente poroso que suele ser grava o arena. Además, se utilizan especies nativas como agentes fitorremediadores, que, para el caso de Facatativá, pueden ser, en su nombre común, los juncos, las espadañas y los carrizos, Los componentes del diseño de un humedal artificial logran simular los procesos físicos, químicos y biológicos de un humedal natural. En esta investigación se diseñó un humedal artificial de flujo subsuperficial con el fin de evaluar la eficiencia en la remoción de los parámetros demanda biológica de oxígeno (DBO), nitrógeno total (NT), fosforo total (PT) y solidos suspendidos totales (SST) a través de las ecuaciones de reacción de primer orden, y la simulación en un software computacional de modelamiento de aguas subterráneas llamado Modelmuse, el cual es un visualizador que incluye los paquetes modflow (Modelo de flujo) y MT3DMS (Transporte de contaminantes). En esta investigación se obtuvieron resultados satisfactorios a través de la modelación mediante software, donde se lograron rendimientos aceptables en cuanto a la eliminación de DBO, NT, PT Y SST.

Palabras clave: Agua residual, Simulación, Modelmuse, Modflow, Fitorremediadores

ABSTRACT

Last years, alternative ecological technologies for the treatment of wastewater have shown excellent potential, sometimes even greater than the usual technologies, artificial wetlands have become one of the best alternatives to treat waste worldwide domestic liquids of small populations. These systems are based on biofilters, containing in their interior a sufficiently porous bed that is usually gravel or sand. In addition, native species are used as phytoremediation agents, which, in the case of Facatativá, can be, in their common name, reeds, bulrushes and reeds, the design components of an artificial wetland manage to simulate the physical, chemical processes and biological of a natural wetland. In this research an artificial wetland of subsurface flow was designed in order to evaluate the efficiency in the removal of the parameters Biological Demand of Oxygen (BOD), Total Nitrogen (NT), Total Phosphorus (PT) and Total suspended solids (TSS) through the first-order reaction equations, and simulation in a groundwater modeling computer software called Modelmuse, which is a visualizer that includes the modflow (Flow Model) and MT3DMS (Pollutant Transport) packages. In this research, satisfactory results were obtained through software modeling, where acceptable yields were obtained regarding the elimination of BOD, NT, PT and SST.

Keywords: Wastewater, Simulation, Modelmuse, Modflow, Phytoremediators

CONTENIDO

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
LISTA DE ILUSTRACIONES	10
LISTA DE TABLAS	12
INTRODUCCIÓN	14
IDENTIFICACION DEL PROYECTO	17
Justificación	17
Definición del problema	19
Planteamiento del problema.	19
Formulación del problema.....	20
OBJETIVOS.....	21
Objetivo General.....	21
Objetivos Específicos.....	21
1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	22
1.1 Localización del área de estudio	22
1.2 Límites del municipio.....	22
1.3 Demografía	23
1.4 Condición Socioeconómica	23
1.5 Servicios Públicos	23
1.6 Marco legal	23
1.6.1 Normativa Colombiana de Vertimientos	23
1.7 Conceptos básicos sobre los humedales artificiales	25
1.8 Funciones de los humedales artificiales	26
1.8.1 Proceso de remoción físico	26
1.8.2 Proceso de remoción biológico	27
1.8.3 Proceso de remoción químico.....	27
1.9 Requerimientos energéticos de los humedales artificiales	29
1.10 Tipos de humedales artificiales	30

1.10.1	Humedales artificiales de flujo superficial (HAFS).....	30
1.10.2	Humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS).....	32
1.10.3	Mecanismos de remoción de contaminantes en los HAFSS	33
1.10.4	Tipos de HAFSS.....	34
1.10.5	Factores que influyen en el rendimiento de los HAFSS	37
1.10.6	Aplicación de los HAFSS	38
1.11	Características de las aguas residuales	40
2.	MODELOS PARA EL DISEÑO DEL HAFSSH	42
2.1	Definición y tipos de modelos.....	42
3.	METODOLOGIA	56
3.1	Diseño del sistema HAFSSH	57
3.1.1	Calculo del área superficial	60
3.1.2	Calculo del ancho	60
3.1.4	Longitud total del humedal	61
3.1.5	Determinación del tiempo de retención hidráulica	61
3.1.6	Determinación de las elevaciones del fondo del humedal	61
3.1.7	Calculo del nivel de agua	62
3.1.8	Número de macrófitas requeridas	63
3.1.9	Volumen de material de lecho filtrante necesario	63
3.2	Aplicación de las ecuaciones de primer orden	63
3.2.1	Constantes de reacción de primer orden.....	63
3.2.2	Cálculo de la DBO efluente del humedal artificial.....	64
3.2.3	Calculo de SST efluente del humedal artificial	65
3.2.4	Calculo del NT efluente del humedal artificial.....	65
3.2.5	Calculo de PT efluente del humedal artificial.....	67
3.3	Selección de la especie vegetal	68
3.3.1	Características de la especie <i>Typha latifolia</i>	68
3.4	Calculo del diámetro interno de la tubería	69
3.5	Resumen de los resultados del diseño.....	70
3.6	Modelo conceptual	72
3.7	Método de modelación	73
3.8	Descripción del software Modelmuse	74

3.8.1	Parámetros del modelo	74
	Construcción de la grilla y condiciones de borde en el modelo	75
	Condiciones iniciales y de borde	76
3.9	Validación del software	80
3.9.1	Validación con Modelmuse	81
3.9.2	Comparación de resultados	82
3.10	Algoritmos de solución del modelo en Modelmuse.....	83
3.10.1	Algoritmo de solución del modelo de flujo	83
3.10.2	Algoritmo de solución del modelo de transporte de contaminantes ..	84
4.	RESULTADOS Y ANALISIS	85
4.1	Resultados de los modelos mecanicistas.....	85
4.2	Resultados de los modelos no mecanicistas	86
4.2.1	Cabeza hidráulica	86
4.2.2	Modelo de transporte	88
4.2.3	Transporte y remoción de contaminantes	89
	Eficiencias del sistema	95
4.3	Análisis comparativo con la Normatividad Colombiana e internacional 96	
5.	ANÁLISIS DE COSTOS	98
5.1	Análisis económico comparativo entre los humedales artificiales y los sistemas de pozos sépticos	100
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	101
6.1	CONCLUSIONES	101
6.2	RECOMENDACIONES	102
	BIBLIOGRAFIA	103

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación (En rojo) del municipio de Facatativá en Cundinamarca .	22
Ilustración 2. Especies vegetales comunes en los humedales	26
Ilustración 3. Esquema del proceso biogeoquímico del nitrógeno en un humedal artificial de flujo superficial	28
Ilustración 4. Esquema del proceso biogeoquímico del fosforo en un humedal artificial de flujo superficial	28
Ilustración 5. Tipos de humedales artificiales	30
Ilustración 6. Esquema de un Humedal artificial de flujo superficial.....	31
Ilustración 7. Esquema de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal	36
Ilustración 8. Esquema de un humedal artificial de flujo subsuperficial vertical	37
Ilustración 9. Esquema de un HAFSS en un sistema de tratamiento doméstico ..	39
Ilustración 10. Tren de tratamiento de aguas residuales con un humedal artificial	39
Ilustración 11. Diagrama conceptual de los tipos de modelos	51
Ilustración 12. Ejemplo de un acuífero modelado con Modflow 6	52
El proceso de advección que se muestra se refiere al movimiento de las partículas o sustancias dentro de un sistema sin modificar su concentración, dicho movimiento depende únicamente de la velocidad y fuerza del flujo, como se muestra en la Ilustración 13 donde las partículas se mueven en dirección del flujo a través del espacio y el tiempo, hasta que pierdan fuerza por los efectos físicos del medio (Flechas, 2013).	53
Ilustración 14. Movimiento advectivo.....	53
Ilustración 15. Difusión.....	53
Ilustración 16. Transporte por advección y difusión.....	54
Ilustración 17. Movimiento dispersivo.....	55
Ilustración 18. Inyección continua de un contaminante y movimiento dispersivo..	55
Ilustración 19. Perfil hidráulico del humedal artificial de flujo subsuperficial	62
Ilustración 20. Características morfológicas de (A) raíz, (B) hojas y (C) flores de las plantas de Typha (domingensis y latifolia).....	68
Ilustración 21. Diseño del humedal artificial de flujo horizontal.....	72
Ilustración 22 Modelo conceptual de un humedal artificial.....	72
Ilustración 23. Paquetes activados en el software Modelmuse para la modelación del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal	73
Ilustración 24. Vista superior de la grilla definida para el HAFSS	75
Ilustración 25. Vista transversal de la grilla del HAFSS	76
Ilustración 26. Propiedades de la capa de grava en el software Modelmuse.....	76
Ilustración 27. Condición de borde CHD oeste (Rojo) y condición de borde CHD este en Azul.....	77
Ilustración 28. Definición de condiciones de borde para paquetes WEL Y DRN ..	77
Ilustración 29. Algoritmo de solución del modelo de flujo	83

Ilustración 30. Algoritmo de solución del modelo de transporte de contaminantes.	84
Ilustración 31. Cabezas hidráulicas en el HAFSSH.....	86
Ilustración 32. Perfil de la cabeza hidráulica modelada.....	86
Ilustración 33. Dirección del flujo en el HAFSSH.....	87
Ilustración 34. Balance de masa en el HAFSSH.....	88
Ilustración 35. Trayectoria de partículas modelada con MODPATH.....	88
Ilustración 36. Remoción de la DBO en función de la longitud total.....	90
Ilustración 37. Remoción del NT en función de la longitud total.....	92
Ilustración 38. Remoción del PT en función de la longitud total.....	93
Ilustración 39. Remoción de SST en función de la longitud total.....	95
Ilustración 40. Eficiencias en la remoción de los contaminantes modelados.....	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Normativa Colombiana Relacionada con la protección de los cuerpos de agua.....	24
Tabla 2. Requerimientos energéticos para diferentes tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales	29
Tabla 3. Ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo superficial (HAFS).....	32
Tabla 4. Ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo subsuperficial.....	33
Tabla 5. Mecanismos de remoción de contaminantes en los HAFSS.....	34
Tabla 6. Experiencia de tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales.....	40
Tabla 7. Características del agua residual según el tipo de tratamiento.....	41
Tabla 8. Parámetros para el diseño de humedales de flujo subsuperficial. ... ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 9. Datos para el cálculo del caudal de diseño	58
Tabla 10. Características del medio filtrante para HAFSS.....	59
Tabla 11. Datos iniciales para el diseño del HAFSSH.....	59
Tabla 12. Concentraciones de los contaminantes modelados.....	63
Tabla 13. Cálculo de las Constantes de reacción de primer orden (K_A)	64
Tabla 14. Características del agua residual tratada con la <i>Typha latifolia</i>	69
Tabla 15. Coeficiente de rugosidad de Manning	69
Tabla 16. Diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSSH)	71
Tabla 17. Remoción de DBO en función del coeficiente de dispersión.....	78
Tabla 18. Diseño hidráulico y características del agua residual López y Rodríguez (2016)	80
Tabla 19. Resultados obtenidos con el HAFSSH (López y Rodríguez (2016)	81
Tabla 20. Simulación con Modelmuse del HAFSSH de López y Rodríguez (2016)	81
Tabla 21. Resultados de la simulación vs resultados reales del HAFSSH López y Rodríguez (2016)	82
Tabla 22. Resultados obtenidos con los modelos mecanicistas	85
Tabla 23. Degradación bioquímica de la DBO expresado en mg/L en el HAFSSH vista superior y de perfil.	89
Tabla 24. Vista superior y de perfil. Remoción del Nitrógeno Total expresado en mg/L en el HAFSSH.....	91
Tabla 25. Vista superior y de perfil. Remoción del Fosforo total expresado en mg/L en el HAFSSH.....	92
Tabla 26 Vista superior y de perfil. Solidos suspendidos totales expresado en mg/L en el HAFSSH.....	94
Tabla 27. Resultados obtenidos Vs Normatividad vigente.....	97

Tabla 28. Costos para la construcción del Humedal artificial Subsuperficial	98
Tabla 29. Costos de un sistema integrado de pozo séptico	99
Tabla 30 Costos totales del humedal artificial diseñado vs costos totales del sistema de pozo séptico.....	100

INTRODUCCIÓN

El elevado crecimiento de la población mundial junto con el déficit económico con el que cuenta la mayoría de los países ha provocado que día a día se incremente el número de personas y/o domicilios que no cuentan con un sistema de tratamiento para sus aguas residuales, generando vertimientos que afectan al medio ambiente y la salud humana, ya sea a un pozo séptico o directamente a una fuente hídrica. Está previsto según las Naciones Unidas, que la población mundial crecerá en 1000 millones durante los próximos 15 años, dato que se obtiene de la tasa de crecimiento de cada país registrada durante los últimos 60 años (United Nations, 2017). A pesar que Colombia se encuentra por debajo de la media del crecimiento poblacional mundial de 1.3% (United Nations, 2017), y que además ha bajado de 3% a 0.9% desde los años 60 (Banco Mundial, 2018), enfrenta una gran problemática, relacionada con el vertimiento de aguas residuales, dado que es una práctica generadora de altos impactos ambientales en el ecosistema, puesto que la carga orgánica presente en este tipo de aguas, originada principalmente de los desechos fecales de las personas, interactúa con las propiedades físico-químicas y microbiológicas del suelo y del agua provocando desordenes ecológicos cuyas consecuencias son difícilmente mitigables (Arias *et al.*, 2010).

Adicionalmente las aguas residuales domesticas (ARD) suelen contener otros compuestos orgánicos como los organometálicos y los tenso activos, que han tomado interés en los últimos años debido a que “sus espumas y la presencia de fosfatos favorecen la proliferación de microorganismos y algas que consumen el oxígeno disuelto en el agua e inhiben la oxidación química y biológica” (Espigares & Pérez, 1985; Leogón, 2018), razón por la cual desde hace más de un siglo, el tratamiento de aguas residuales ha desempeñado un papel importante y año tras año se han ido creando alternativas para el tratamiento, en pro de mejorar la eficiencia y accesibilidad.

En Colombia solo el 8% de las aguas residuales que se producen diariamente son tratadas (WSP *et al.*, 2007 como lo citó el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2011). En el año 2013 Colombia contaba con 562 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de las cuales fueron inspeccionadas 333, estando 89 fuera de servicio, solo en Cundinamarca habían 23 PTAR fuera de servicio de las aproximadamente 40 que tiene este departamento en sus 116 municipios (Superintendencia de servicios públicos domiciliarios, 2013).

En la Sabana de Occidente es importante generar conciencia sobre el uso eficiente y aprovechamiento del agua, dado que cuentan con problemas de abastecimiento de agua debido a sequias y a la falta de protección de las fuentes hídricas, considerándose una situación de riesgo.

Según datos de saneamiento básico del 2015 de la contraloría (Contraloría de Cundinamarca, 2015), de los principales municipios de Cundinamarca: Bojacá, Facatativá, Zipacón, Funza, Mosquera, El Rosal y Subachoque, sólo Facatativá y Subachoque no cuentan con un sistema de tratamiento de aguas residuales en funcionamiento. En Facatativá, en las últimas décadas la población rural ha empezado a aumentar, debido a la falta de proyectos de vivienda económicos, y a la migración de otros municipios (DANE, 2005; Consejo municipal de Facatativá, 2012). Por tales motivos se han incrementado el número de fincas y viviendas. Un ejemplo de esto ocurre en el sector Mancilla que presenta poca accesibilidad dificultando la construcción de un sistema de alcantarillado, y de manera que se hace necesaria la construcción de fosas sépticas para verter sus aguas residuales, o en casos extremos el vertimiento indirecto y directo a los cuerpos hídricos.

Debido a problemáticas asociadas a los sistemas actuales de tratamiento del agua residual, surge la necesidad de innovar con tecnologías alternativas que sean económicamente viables, permitir a los municipios su acceso y viabilizar financieramente la construcción de PTARs. Las plantas convencionales pueden tener hasta tres tipos de tratamiento que van desde la remoción de sólidos suspendidos y grasas mediante filtros y cribas, hasta la desinfección del agua (Lizaraso y Orjuela, 2013), sumado a los costos de adecuación del terreno, construcción de la planta, puesta en marcha, operación y mantenimiento, recalcando la necesidad de alternativas viables para tratar las ARD.

Considerando lo anterior, existen dos sistemas que cumplen estos requisitos como lo son: las lagunas de oxidación y los humedales artificiales, que tienen por principio básico de operación la eliminación de patógenos mediante la acción de poblaciones microbianas compuestas por bacterias aerobias y/o anaerobias y la fitorremediación a través de especies endémicas, respectivamente (Reutelshöfer, 2015; Kadlec & Wallace, 2009).

Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento que simulan las condiciones naturales de un humedal común, y mediante este, reducir los contaminantes que se vierten diariamente al agua. Esta investigación presenta la viabilidad técnica de la construcción de un humedal artificial en las fincas del área rural del municipio de Facatativá como alternativa eficiente en la remoción de contaminantes respecto al uso de otras tecnologías, para lo anterior se realizó el diseño y modelación de un humedal artificial, con base en los criterios de diseño proporcionados por los manuales de la EPA y estudios realizados Robert Kadlec y Scott Wallace quienes publicaron un manual para la construcción de humedales artificiales donde se encuentran modelados los comportamientos de cada parámetro físico-químico y biológico dentro del sistema (Kadlec & Wallace, 2009).

Inicialmente se realizó una recopilación histórica de los humedales artificiales que han sido construidos en Colombia, analizando su eficiencia en la remoción de

contaminantes y la posible aplicación de estos sistemas en municipios de la sabana de occidente.

Facatativá. Posteriormente, se presenta un marco teórico donde se muestra el estado del arte referente a los humedales artificiales, principalmente los de flujo subsuperficial vertical, los cuales son el objeto de estudio en esta investigación.

A continuación, se realizó la modelación hidráulica y de calidad de aguas residuales, de un humedal artificial de flujo subsuperficial. Se modeló el transporte y reacción de contaminantes a través del ajuste de los paquetes computacionales MODFLOW 2005 y el paquete de MT3DMS incluidos en el software con la interface MODEL MUSE. MODFLOW es un software desarrollado originalmente para su uso en aguas subterráneas, así como el modelado las interacciones con el medio. Es un software con una amplia variedad de aplicaciones, entre ellas la modelación de humedales y acuíferos.

Finalmente, se realizó un análisis de viabilidad, que aportará a futuras investigaciones en el campo del tratamiento de aguas residuales.

IDENTIFICACION DEL PROYECTO

Justificación

Este trabajo de investigación propone una alternativa de solución sostenible ambientalmente para la depuración de las aguas residuales domésticas rurales. Las cuales por sus características fisicoquímicas y microbiológicas no pueden ser vertidas en cuerpos hídricos ya que producen altos grados de contaminación, generando problemas en la salud humana y al medio ambiente.

Mediante la modelación de un humedal artificial subsuperficial se espera obtener el mejor diseño para el tratamiento de las aguas residuales domesticas rurales.

En el sector alto de la vereda Mancilla se encuentran aproximadamente 50 fincas las cuales cuentan con vivienda propia y servicio de acueducto rural, pero no cuentan con servicio de alcantarillado, por lo cual, los vertimientos de aguas residuales generados en la vivienda van a las fosas sépticas afectando el suelo, las fuentes hídricas subterráneas y la Quebrada Santa Ana, impactando negativamente al medio ambiente y a la salud pública. En promedio, hay un total de 4 habitantes por vivienda, con lo cual se estima una población de 200 habitantes quienes generan una cantidad media de 1.5 m³ habitante por mes de agua residual doméstica y un global de 300 m³ mensuales.

Considerando lo anterior, 300 m³ mensuales de agua residual doméstica se están vertiendo a fosas sépticas sin permeabilizar y que además por falta de mantenimiento y limpieza, sufren continuos desbordamientos, lo que pone en peligro directamente la salud de las personas al igual que impacta negativamente al entorno. Es por eso que los humedales artificiales son una de las mejores alternativas económicamente viables y ecológicas para el tratamiento de aguas residuales.

Adicionalmente, contribuye con el cumplimiento del objetivo 6 de desarrollo sostenible de la ONU, el cual garantiza la gestión sostenible del agua y el saneamiento básico para todos. El modelado matemático de los procesos químicos y físicos que ocurren en un humedal artificial es de importancia, dado que permite observar, explicar y predecir el comportamiento de las partes del humedal y así poderlo replicar en diferentes sectores.

Por otro lado, herramientas de modelación de la calidad de agua permite conocer el comportamiento de los contaminantes en los sistemas de tratamiento de aguas residuales o cuerpos de agua superficiales y subterráneas.

La modelación mediante software computacional no es comúnmente usada en Colombia, ya sea por la falta de apoyo de las Universidades, la accesibilidad de las

nuevas tecnologías o el desconocimiento de estas herramientas. Recientemente ha aumentado el número de software de modelación basados en sistemas de información geográfica (GIS), que permiten conocer el funcionamiento de cuencas hidrográficas, u otras formaciones terrestres, pero no se le ha dado relevancia al software de modelación de la calidad del agua, algo que los autores de esta investigación creen necesario para los ingenieros ambientales de Colombia.

Una de las ventajas más importantes de la modelación mediante software, es que permite conocer las condiciones hidráulicas o de calidad de agua de un sistema antes de llegar a construirlo, lo que reduce las contingencias en un proyecto de construcción, reduce los costos, dado que, al realizar un modelo matemático, se cuenta con la ventaja, de poder modificar cualquier variable, con el fin de aumentar la eficiencia de un sistema.

Los autores justifican el uso de un modelo matemático computacional para la modelación de humedales artificiales de flujo subsuperficial, debido a que hay pocas investigaciones relacionadas con la modelación de humedales, por lo tanto se espera que los resultados de esta investigación motiven a los futuros lectores, a seguir el campo de la modelación de procesos ambientales enfocados a la calidad del agua, para que de esta manera, en un futuro, más universidades integren este núcleo temático en el pensum.

Definición del problema

Alto impacto ambiental y sanitario en el área rural del municipio de Facatativá provocado por la falta de redes de alcantarillado, lo que genera vertimientos directos a los cuerpos hídricos y/o la construcción de pozos sépticos que presentan rebose por la falta de mantenimiento.

Planteamiento del problema

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) en su agenda de desarrollo post-2015 afirma que “tan solo el 20% de las aguas residuales mundiales reciben algún tipo de tratamiento” (ONU, 2012). Lo que trae consigo graves consecuencias ambientales y para la salud pública debido a la contaminación por bacterias, nitratos, fosfatos y disolventes en los cuerpos hídricos como ríos o quebradas y que finalmente desembocan en el mar. El problema se incrementa cuando el 17% de la población de Latinoamérica disponen sus aguas residuales en fosas sépticas y letrinas (UNESCO, 2017).

La contaminación de las fuentes hídricas es una problemática que aqueja a muchas ciudades y municipios de Colombia, Facatativá es un municipio que durante años ha estado contaminando sus fuentes hídricas, ya sea por la población rural o por la población urbana, que aun cuando se tiene una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) lleva fuera de servicio más de 5 años. Esa falta de compromiso por parte de los gobiernos locales, ha incrementado el número de investigaciones y estudios que se realizan anualmente, para evaluar el estado de las fuentes hídricas del municipio de Facatativá.

Para mitigar la cantidad de impactos ambientales provocados por las aguas residuales domésticas se ha establecido normatividad en el mundo al respecto. Colombia cuenta con la resolución 631 de 2015 que especifica los límites máximos permitidos en cuanto a vertimientos puntuales a cuerpos hídricos, sin abordar la normativa en cuanto al uso de fosas sépticas y/o letrinas, ya que los impactos ambientales al ecosistema suelo y subsecuentemente a la salud pública son altos. Como evidencia se tiene al sector Mancilla en el municipio de Facatativá donde actualmente se usan fosas sépticas como método de tratamiento de aguas residuales, que se usan para recolectar el agua residual de los inodoros contaminando el agua poco profunda, que es una fuente hídrica importante para las personas (UNESCO, 2017). El uso de este sistema de recolección de ARD hace que los contaminantes presentes en el agua interfieran directamente con el comportamiento de las características fisicoquímicas y microbiológicas del suelo y las fuentes hídricas.

No solo existen impactos ambientales provocados por las ARD, también se incluyen los impactos en la salud humana, dado que, por su naturaleza, estas aguas están cargadas con gran cantidad de microorganismos, de los cuales algunos pueden ser

patógenos, lo que genera problemas gastrointestinales o incluso problemas más graves dependiendo del tipo de residuo que se produzca. La problemática se agrava si se tiene en cuenta que toda comunidad genera residuos y produce vertimientos, y en el área rural de Facatativá para el año 2015 se registraron 15 centros poblados (Consortio GV-AQV, 2015), lo anterior contrastado con el hecho de que según la Gobernación de Cundinamarca en sus estadísticas 2011 – 2013 sobre la cobertura de los servicios públicos en Cundinamarca, solo el 19,22% del área rural tiene conexión con alcantarillado. Lo anterior indica que el 80,78% de la población rural de Facatativá realiza sus vertimientos a través de pozos sépticos, o los realiza directamente a las fuentes hídricas. En adición a lo anterior, según los cálculos realizados por los investigadores con los datos proporcionados por el censo DANE 2005, La población rural proyectada a 2018 de Facatativá es de 15.393 personas, las cuales, teniendo un promedio de generación de aguas residuales al mes por persona de $1,5\text{m}^3$, producen $23.098,5\text{ m}^3/\text{mes}$ de ARD.

Teniendo en cuenta los problemas e impactos ambientales de las aguas residuales domésticas que se están suscitando en el sector Mancilla por la descarga directa o el uso de fosas sépticas, los humedales artificiales de flujo subsuperficial son una alternativa ecológica y económica que reducen hasta en 50% las concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), patógenos, nitrógeno total y fósforo total (Delgadillo *et al.*, 2010; Espinosa, 2014; Zapata, 2014).

Formulación del problema

Pregunta de investigación: Los humedales artificiales son un sistema probado de tratamiento de aguas residuales para la remoción de carga orgánica contaminante, pero: ¿Son una alternativa a tener en cuenta para el tratamiento de los efluentes generados en los pozos sépticos de la zona rural del municipio de Facatativá?

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar y modelar un sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial para evaluar el tratamiento de aguas residuales veredales, y así determinar la viabilidad de su aplicación en el sector rural de la vereda mancilla Facatativá.

Objetivos Específicos

1. Describir la formulación matemática de un humedal artificial de flujo subsuperficial mediante la modelación.
2. Simular las condiciones hidráulicas del agua residual, dentro de un humedal artificial con flujos subsuperficiales, mediante la aplicación de un modelo matemático propuesto por la EPA, y el uso del software Modelmuse acoplado para el uso de modflow 2005.
3. Modelar los contaminantes DBO, Nitrógeno total, Fosforo total y Solidos suspendidos totales, a través de un modelo matemático de primer orden propuesto por Kadlec & Knight y simularlos en el software Modelmuse acoplado para el uso de MT3DMS.
4. Realizar el análisis técnico económico del diseño del humedal artificial.

1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

1.1 Localización del área de estudio

El municipio de Facatativá se ubica geográficamente al extremo occidental del departamento de Cundinamarca a 36 km de la sabana de Bogotá, sobre los cerros de Aserraderos y Santa Elena de la cordillera oriental (Consortio GV-AQV, 2015). Cuenta con una extensión territorial de 15.827 Ha dentro de las cuales, 583 pertenecen al área urbana y 15.240 al área rural.

1.2 Límites del municipio

Norte: Municipio de Sasaima, La vega y San Francisco.

Oriente: Municipio de Madrid y El rosal

Sur: Municipio de Zipacón y Bojacá

Occidente: Municipio de Anolaima y Albán

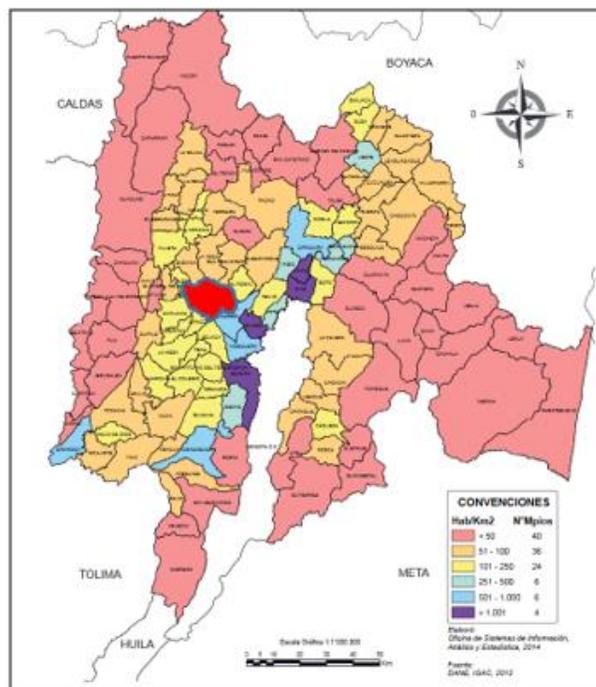


Ilustración 1. Ubicación (En rojo) del municipio de Facatativá en Cundinamarca

Fuente: (DANE; IGAC, 2012 como se citó en Gobernación de Cundinamarca, 2014)

1.3 Demografía

Teniendo en cuenta las proyecciones realizadas por el DANE y conglomerados consultados en las estadísticas de Cundinamarca 2011-2013 realizados por la gobernación de Cundinamarca, Facatativá para 2018 con un crecimiento poblacional de 1,90% tiene una población de 139.559 habitantes, con una densidad poblacional de 781 hab/Km².

1.4 Condición Socioeconómica

La principal actividad económica urbana en el municipio de Facatativá es la relacionada con el comercio, los servicios y el turismo, de las cuales se destaca el comercio (Consortio GV-AQV, 2015). En el sector rural se destacan las actividades productivas relacionadas con bienes y servicios agropecuarios y mineros de intervención directa sobre los ecosistemas (Consortio GV-AQV, 2015).

1.5 Servicios Públicos

Según las estadísticas de Cundinamarca 2011-2013, Facatativá para el año 2012 contaba con las siguientes coberturas:

Acueducto

- Cabecera: 99.71%
- Centros Poblados: 82.91%
- Rural: 40.38%

Alcantarillado

- Cabecera: 99.55%
- Centros Poblados: 58.98%
- Rural: 19.22%

Aseo

- Cabecera: 99.78%
- Centros Poblados: 91.34%
- Rural: 64.00%

1.6 Marco legal

1.6.1 Normativa Colombiana de Vertimientos

Para el desarrollo de esta investigación se tuvo en cuenta la normativa colombiana en cuanto al vertimiento de aguas residuales, y la importancia de los humedales, Debido a que el diseño de un sistema de tratamiento depende directamente de las

normas de cada país en cuanto a requisitos de calidad del agua que se vierte a un cuerpo hídrico. La tabla 1 presenta el marco legal vigente en Colombia.

Tabla 1. *Normativa Colombiana Relacionada con la protección de los cuerpos de agua*

Acto Legislativo	Artículo	Descripción
Constitución política de Colombia de 1991	Artículos 8, 79, 80	“Es deber del estado proteger los recursos culturales y naturales, así como también planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales”
Convención RAMSAR de 1971		Humedales de importancia internacional
Decreto-Ley 2811 de 1974	Art 3,7,8,9	“Código Nacional de recursos naturales renovables y de protección al Medio Ambiente”
Ley 9 de 1979	Art 10, Art 12, Art 36, Art 37, Art 38, Art 39	“Por la cual se dictan medidas sanitarias”
Decreto 1541 de 1978	Art 124, 205	Vertimientos a cuerpos de agua
Decreto 1594 de 1984		Usos del agua y residuos líquidos
Ley 142 de 1992		“Por la cual se establece el régimen de servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones”
Radicación 642 de 1994		Clasificación y tratamiento jurídico de los humedales
Ley 357 de 1997		Conservación de los humedales.
Resolución 1096 de 2000		“Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS.”
RAS 2000 título E		Se señalan características, Parámetros, instrumentos básicos de diseño para la construcción y manejo de sistemas de tratamiento de aguas residuales

Acto Legislativo	Artículo	Descripción
Decreto 3100 de 2003		“Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones”
Resolución 157 de 2004		“Por la cual se reglamentan el uso sostenible, conservación y manejo de los humedales, y se desarrollan aspectos referidos a los mismos en aplicación de la convención Ramsar”
Resolución 631 de 2015	Capítulo III Art 6 Capítulo V Art 8	“Por la cual se establecen los parámetros y valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.”

Fuente: Autores

1.7 Conceptos básicos sobre los humedales artificiales

Los humedales artificiales (HA) son sistemas que simulan las condiciones de un humedal natural, estos sistemas se encuentran en un medio semiterrestre con alto porcentaje de humedad y vegetación (Llagas y Gómez, 2006). Los humedales reúnen las características biológicas, físicas y químicas necesarias para ser considerados depuradores del agua.

Los humedales artificiales son extensiones de terreno de tamaño variable que en su mayoría se encuentran cubiertos por agua y por plantas emergentes, dentro de las cuales se suelen encontrar: Eneas (*Typha latifolia*), Juncos (*Juncus sp*), lentejas de agua (*Lemna minor*) y buchones de agua (*Eichhornia crassipes*) ilustración 2. La capa vegetal proporciona el ambiente perfecto para la formación de biopelículas, que ayudan en el tratamiento del agua. Además, la formación de la capa vegetal permite la transferencia de oxígeno entre el ambiente interno y externo (Silva y Zamora, 2005).

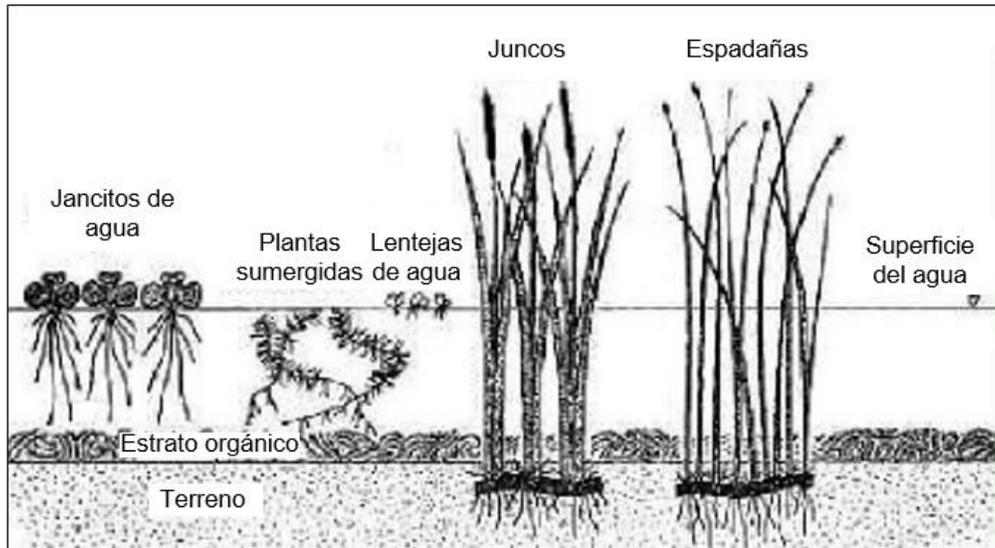


Ilustración 2. *Especies vegetales comunes en los humedales*

Fuente: METCALF & EDDY como se citó en Silva y Zamora, 2015

1.8 Funciones de los humedales artificiales

Todos los sistemas de tratamiento de aguas residuales se basan en el mismo modelo general o línea de procesos, existe una entrada de materia al sistema, que es el efluente o vertimiento de una vivienda, edificio, industria etc. Posteriormente se encuentra la etapa de tratamiento y finalmente la evacuación.

Los humedales artificiales son capaces de proporcionar diferentes niveles de tratamiento, a través de su capa vegetal, el sustrato y los microorganismos. Estos niveles de tratamiento se dividen en 3 procesos.

1.8.1 Proceso de remoción físico

El proceso de remoción físico ocurre en varias etapas, una de ellas se da cuando el agua intenta atravesar el sustrato de los humedales, lo que se conoce como filtración, El tipo de sustrato determina la eficiencia en la remoción de contaminantes como los sólidos suspendidos y sedimentables. En general, el agua se mueve muy lentamente a través de los humedales, debido a la poca pendiente y a la cantidad de especies vegetales presentes, que con sus raíces generan resistencia al paso del agua. Estos factores permiten que el agua mantenga un flujo laminar, lo que permite que los sólidos suspendidos y el material particulado se sedimenten por acción de la gravedad (Llagas y Guadalupe, 2006).

Además de la sedimentación, las raíces de las especies vegetales ayudan a evitar la re-suspensión de los sólidos sedimentados, atrapando en sus raíces los sólidos que vuelvan a flote.

1.8.2 Proceso de remoción biológica

La remoción biológica es uno de los procesos por los cuales los humedales artificiales son considerados como una tecnología viable, debido a la alta eficiencia que tienen los microorganismos y las plantas en la remoción de los contaminantes en el agua.

Mitchel (Como se citó en Wastewater Gardens, 2012) afirma que existen 6 subprocesos principales en la remoción biológica, que incluyen: Fotosíntesis, respiración, fermentación, nitrificación, desnitrificación y remoción.

La fotosíntesis es el proceso que realizan todas las plantas para obtener energía a través de luz solar, energía que se requiere en todos los procesos de la planta, en la cual la planta toma el CO₂ del ambiente, y mediante la oxidación produce oxígeno, el cual es transferido a las raíces de las plantas, a la zona conocida como rizosfera. El proceso anterior da como resultado que en el interior del humedal se generen condiciones óptimas para el correcto funcionamiento de los microorganismos (Wastewater Gardens, 2012).

Adicionalmente, en el interior de los humedales artificiales ocurren procesos de nitrificación y desnitrificación, el cual es en parte realizado por los microorganismos.

Finalmente ocurren los procesos de remoción, realizados por las plantas, en los que las mismas capturan los compuestos disueltos en el agua, y los usan como nutrientes para continuar con su crecimiento. Algunas plantas están predispuestas a capturar uno u otro compuesto más que otro.

1.8.3 Proceso de remoción químico

En los humedales artificiales ocurren dos procesos químicos importantes para el tratamiento de aguas residuales, la absorción y la adsorción, estos dos procesos tienen en común la retención de los contaminantes, ya sea por la asimilación como nutriente, o por la adherencia de estos a las raíces y tallos de las plantas.

Los metales se pueden precipitar en el humedal artificial, ya que son compuestos insolubles, algunos pesticidas orgánicos pueden ser destruidos al ser expuestos a la luz y los gases atmosféricos (EPA, 1995).

El pH es una característica que determina muchos de los comportamientos de las reacciones químicas y procesos, como lo son la transformación biológica, el intercambio catiónico, la solubilidad de sólidos y gases, entre muchos otros (Wastewater Gardens, 2012).

La ilustración 3 muestra el proceso biogeoquímico del nitrógeno, en la cual se pueden observar los procesos de Nitrificación en zonas aerobias, Desnitrificación en zonas aerobias, liberación de Nitrógeno (N₂) y óxido de nitrógeno (N₂O), consumo de la planta, sedimentación, descomposición, hojarasca, volatilización del amonio y acumulación del nitrógeno orgánico (Wastewater Gardens, 2012).

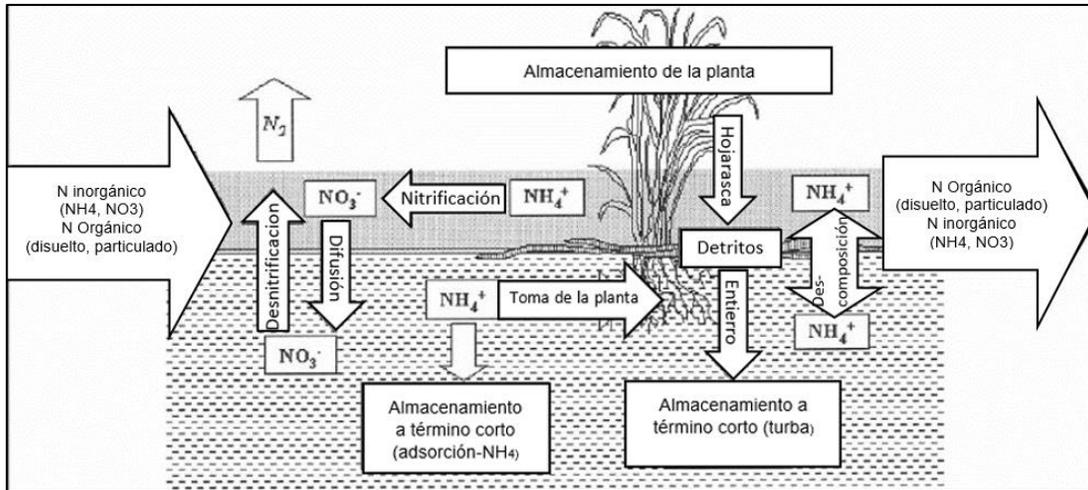


Ilustración 3. Esquema del proceso biogeoquímico del nitrógeno en un humedal artificial de flujo superficial

Fuente. Adaptado de Wastewater Gardens (2012)

La ilustración 4 muestra el proceso biogeoquímico del fósforo, la cual presenta un mecanismo o proceso distinto al del nitrógeno, esto debido a que el fósforo no presenta fases gaseosas, por lo tanto, no se volatiliza y tiende a acumularse en el suelo y las plantas (Wastewater Gardens, 2012).

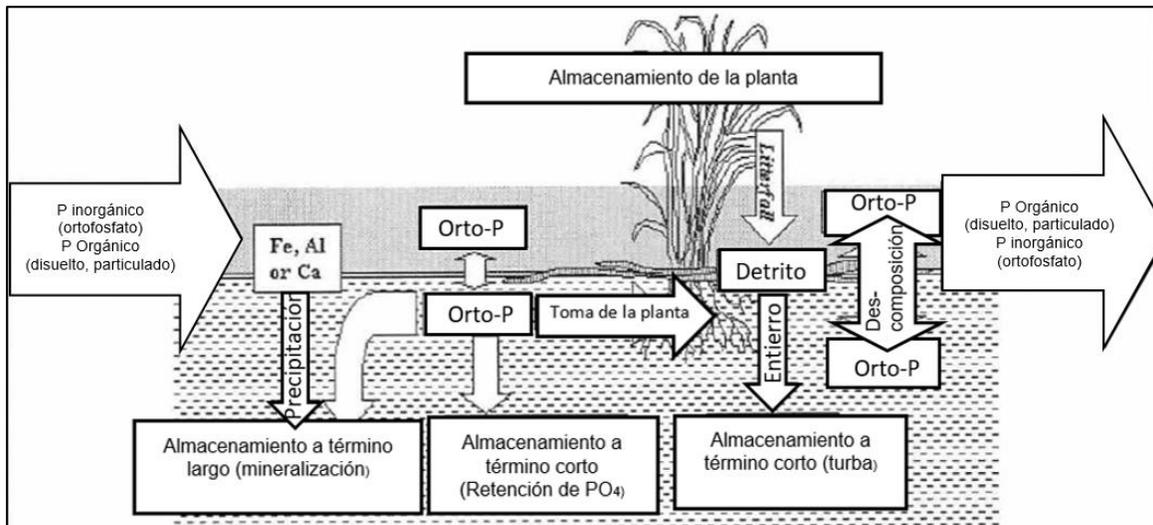


Ilustración 4. Esquema del proceso biogeoquímico del fósforo en un humedal artificial de flujo superficial

Fuente. Adaptado de Wastewater Gardens (2012)

1.9 Requerimientos energéticos de los humedales artificiales

La energía eléctrica que requieren los humedales artificiales es prácticamente nula. Al ser sistemas naturales, los humedales no requieren ayuda externa para funcionar, solo dependen de la eficiencia del diseño hidráulico, y la actividad vegetal y microbiana.

La tabla 2 muestra la comparación de los requerimientos energéticos de algunos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales existentes en el mundo, donde se ve claramente que los humedales artificiales tienen menor requerimiento energético que los demás sistemas listados en la tabla, esto se debe a que los humedales artificiales no requieren de energía eléctrica para su funcionamiento, dado que sus procesos simulan las condiciones de un humedal natural, donde no intervienen procesos humanos.

Tabla 2. *Requerimientos energéticos para diferentes tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales*

Sistema	Carga hidráulica m ³ /d	Utilización de energía Kwh/m ³	Referencia
Humedales de flujo superficial	-----	<0.1	Brix (1999)
Humedales de flujo subsuperficial	-----	<0.1	Brix (1999)
Laguna facultativa	3786	0.11	Campbell and Ogden (1999)
Humedales de flujo subsuperficial aireado	5500	0.16	Wallace <i>et al.</i> (2006)
Humedales de flujo de marea	1000	0.18	Maciolek and Austin (2006)
Zanjón de oxidación	3786	0.51	U.S EPA (1996)
Filtro de goteo	3786	0.61	Crites <i>et al.</i> (2006)
Lodo activado	3786	0.76	Campbell and Ogden (1999)
Reactor de secuencia	303	1.13	U.S EPA (1996)

Fuente: Adaptado de Kadlec & Wallace (2009).

1.10 Tipos de humedales artificiales

Como todo sistema de tratamiento de aguas residuales, existen variantes que se adecuan a las necesidades o expectativas de las personas, los humedales artificiales cuentan con 2 variantes principales (ilustración 5), que son los humedales artificiales de flujo superficial (HAFS) y los humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS), estos últimos se subdividen en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) y humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical (HAFSSV). Mena (2008) afirma que es posible combinar los 2 tipos de HA para obtener un sistema híbrido con las ventajas de cada uno.

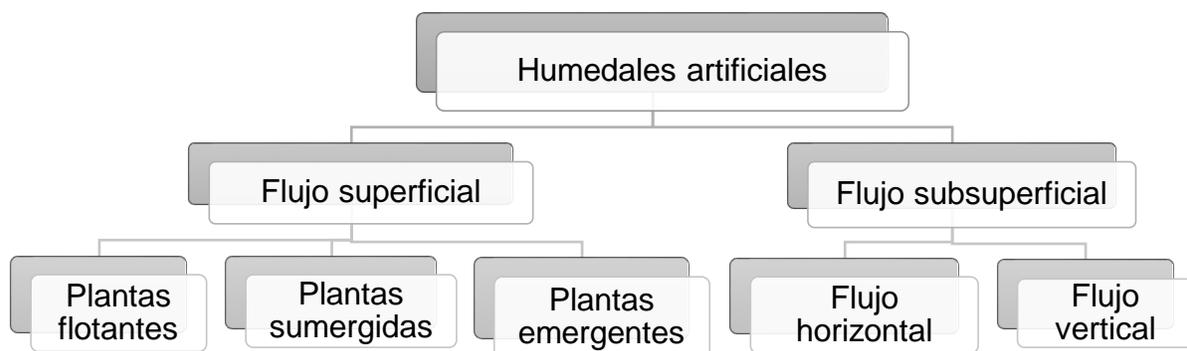


Ilustración 5. Tipos de humedales artificiales

Fuente: Adaptado de Kadlec & Wallace (2009).

1.10.1 Humedales artificiales de flujo superficial (HAFS)

Los HAFS son sistemas que consisten en canales de poca profundidad construidos sobre una superficie impermeabilizada que evita la filtración de agua a través del suelo (Mena, 2008), Los canales se construyen sobre un lecho de grava o arena que sirve de hábitat para especies vegetales, y por las cuales fluiría el agua.

Son los humedales artificiales que más se asemejan a los humedales naturales en apariencia y función (EPA, 2000), debido a que en los ecosistemas naturales casi que por regla general todos los humedales se encuentran con flujos superficiales (ilustración 6). Es por eso que los HAFS atraen la vida salvaje, insectos, peces, anfibios, reptiles, pájaros etc. (NADB data base, (1993) como se citó en Kadlec & Wallace (2009).

Los HAFS se diseñan y construyen por lo regular, para recibir efluentes primarios o secundarios, además que operan en casi todos los climas (Crites, Middlebrooks & Reed, 2006). El tiempo de retención hidráulico se encuentra alrededor de los 7 días,

se manejan profundidades de 0.3 m, el efluente esperado de la demanda biológica de oxígeno (DBO), Solidos suspendidos totales (SST) y nitrógeno (N) es menor 10 mg/L para los 3 parámetros, mientras que para el fosforo (P) es de > 5 mg/L. (Crites, Middlebrooks & Reed, 2006).

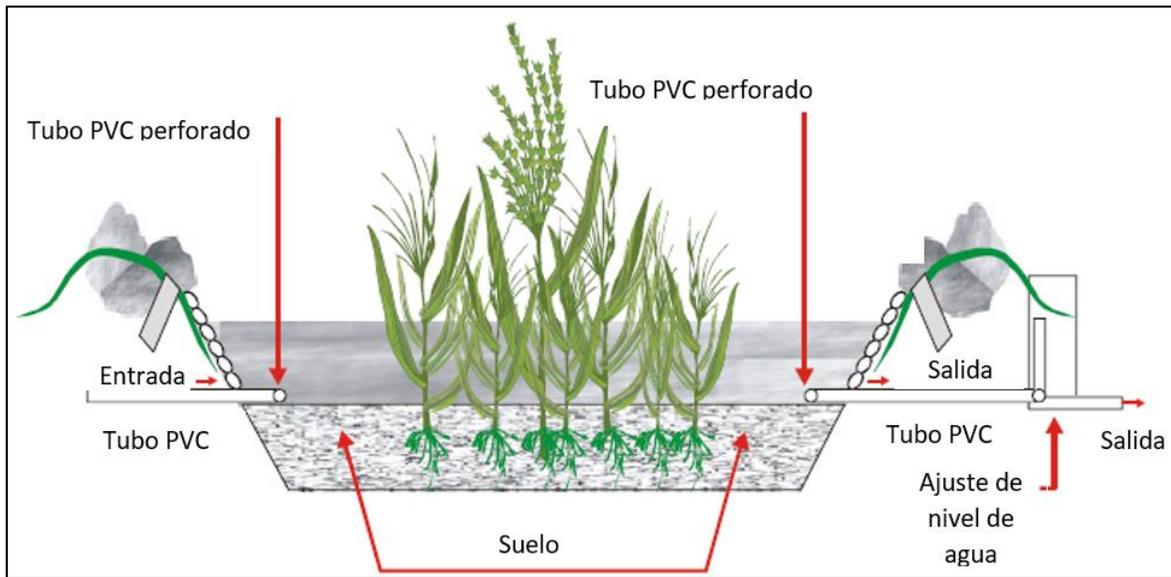


Ilustración 6. Esquema de un Humedal artificial de flujo superficial

Fuente: Ajustado de Llagas y Guadalupe, 2006

Como todo sistema de tratamiento de aguas residuales, los HAFS tienen ventajas y desventajas las cuales se presentan en la tabla 3. Un aspecto a favor de los HAFS es el costo asociado a su construcción, dado que cuesta menos que la construcción de un HAFSS, esto afecta mucho a la hora de decidir sobre uno u otro modelo, pero si se analizan las desventajas, los HAFS tienen menor eficiencia en el tratamiento del agua residual respecto a los HAFSS, debido a que no puede funcionar con altas cargas orgánicas. La carga orgánica medida en DBO_5 , es una de las características más relevantes en el agua residual doméstica (ARD), por lo tanto, un HAFS es poco viable cuando se tienen pequeños espacios, lo anterior sumado al hecho que, al ser un flujo superficial, el agua está expuesta al ambiente, por lo que los vectores como los mosquitos, pueden encontrar el ambiente propicio para procrear y perjudicar la salud humana.

Tabla 3. *Ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo superficial (HAFS)*

HAFS	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Se pueden controlar los olores con sistemas tecnificados o artesanales.	Producción de olores ofensivos por exposición del agua residual al medio ambiente externo.
Menor costo en relación con el HAFSS.	Creación de hábitats propicios para la proliferación de vectores.
Mayor valor ecosistémico para la vida salvaje, principalmente por el fácil acceso al agua.	El control de vectores resulta costoso.
Se puede usar como zona de restauración y creación de nuevos ecosistemas.	No existe protección térmica.
	Requiere mayor área para el tratamiento
	Tratamiento de flujos secundarios
	Opera con baja carga orgánica

Fuente: Adaptado de Delgadillo, 2010

1.10.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS)

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial son sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes (Cricyt, 2007).

La característica principal de los HAFSS es el flujo de agua, debido a que en este tipo de sistemas el agua fluye a través de un lecho o medio granular que sirve de filtro.

Se caracterizan por tener un medio granular con una profundidad media de 0.6 metros (Delgadillo *et al.*, 2010), que cumple la función de soporte para el crecimiento de especies vegetales o macrófitas, además permite el crecimiento de biopelículas microbiales, las cuales cumplen una función determinante en el tratamiento de aguas residuales (OSNAYA, 2012).

Los HAFSS consisten en canales superficiales que tienen una barrera o lecho filtrante y una estructura de entrada y salida de agua. La cama o la estructura del humedal se llena con un medio poroso, que generalmente es arena o grava, la cual sirve para la posterior plantación de especies vegetales, además de permitir el crecimiento microbiano (Kadlec & Wallace).

Los HAFSS requieren menos área para la misma velocidad de flujo que los HAFS, el tiempo de retención hidráulico es de alrededor de 3 días. La profundidad del agua que se maneja es de 0,3 a 0,6 m con una media de 0.45 m, el efluente esperado es

similar al esperado en los HAFS (Crites, Middlebrooks & Reed, 2006). La tabla 4 muestra las ventajas y desventajas de los humedales artificiales, y muestra a priori, superioridad respecto a los HAFS, debido a que no existe generación alguna de olor o vectores, además requieren menos área para el tratamiento, lo cual es uno de los factores más importantes, dado que muchas veces no se cuenta con mucho espacio para la implementación de sistemas de tratamiento.

Tabla 4. *Ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo subsuperficial*

HAFSS	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Puede tratar flujos primarios (pozos sépticos)	Mayor costo debido a la cantidad de lecho filtrante, capas impermeables que pueden ser desde, estructuras de concreto hasta geomembranas)
Opera con altas tasas de carga orgánica	Menor valor ecosistémico para la vida salvaje, debido a que el agua no es accesible
No se generan olores	La remoción de N es menor que en los HAFS debido a que el agua no está en contacto con el aire, por lo cual hay muy poca volatilización del N
No se generan vectores	No es viable para el tratamiento de aguas residuales urbanas con poblaciones elevadas, debido que a mayor población implica mayor caudal, y este a su vez determina el área necesaria para el tratamiento.
Requiere superficies de menor tamaño respecto a los HAFS	
Buena protección térmica gracias al lecho, a la capa vegetal y al flujo del agua	
Tratamiento de aguas residuales principalmente para casas aisladas y núcleos menores de 200 habitantes	

Fuente. Delgadillo. 2010

1.10.3 Mecanismos de remoción de contaminantes en los HAFSS

La tabla 5 muestra los diferentes procesos que ocurren en los humedales artificiales de flujo subsuperficial, en los cuales los que más predominan son los procesos

físicos como la sedimentación y la filtración, aparte de procesos químicos como la asimilación.

Tabla 5. *Mecanismos de remoción de contaminantes en los HAFSS*

Contaminante	Mecanismo
Materia orgánica (medida como DBO, DQO o COT*)	La materia orgánica particulada es eliminada por la sedimentación y filtración, luego convertidas a DBO Soluble. La materia orgánica soluble es fijada y asimilada por la biopelícula y degradada por las bacterias adheridas en esta.
Sólidos suspendidos totales	Sedimentación filtración. Descomposición durante largos tiempos de retención por bacterias especializadas en el lecho de arena.
Nitrógeno	Nitrificación-desnitrificación en la biopelícula. Asimilación de las especies vegetales (influencia limitada).
Fósforo	Retención en el lecho de arena. Precipitación con aluminio, hierro y calcio. Asimilación de las especies vegetales (influencia limitada).
Patógenos	Sedimentación filtración. Asimilación en la biopelícula. Depredación por protozoarios.
Metales pesados	Precipitación y Asimilación. Asimilación de las especies vegetales (influencia limitada).
Contaminantes orgánicos	Asimilación por la biopelícula y partículas de arena. Descomposición debido a lo largo del tiempo de retención hidráulica y a las bacterias especializadas del suelo (no calculable).

Fuente. Conagua, 2012

1.10.4 Tipos de HAFSS

Como se menciona y se muestra en la ilustración 5, los HAFSS se dividen en 2 tipos, en función de la forma de aplicación y flujo del agua en el sistema (Delgadillo

et al., 2010): (a) Los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) y (b) los humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical (HAFSSV).

Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal HAFSSH.

Los HAFSS de flujo horizontal se caracterizan principalmente por la ubicación del medio granular en la estructura del humedal, y la dirección del flujo.

Consiste en una estructura cubierta con una capa impermeable (concreto o polímeros) que previene filtraciones hacia el suelo, sobre la cual se deposita un medio o lecho filtrante y se planta vegetación de humedales nativos. Con esto se busca tener unas condiciones similares a las que se encuentran en la naturaleza, aunque en general, los humedales naturales que existen en el mundo son de carácter superficial, es poco probable encontrar humedales naturales con flujo subsuperficial debido a sus características, por lo cual, este tipo de humedales simula los procesos naturales de fitorremediación y filtración en medios porosos mas no las condiciones hidráulicas en las que se encuentra.

Este tipo de humedales se diseña principalmente para tratar efluentes primarios para posteriormente verter el agua a una fuente hídrica superficial (Kadlec & Wallace).

En este tipo de humedales el agua ingresa permanentemente desde la parte superior a un extremo del humedal, para luego salir en la parte inferior del otro extremo (Delgadillo *et al.*, 2010).

La ilustración 7 muestra la estructura general de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, en la cual se muestra como el agua entra por una tubería en la parte superior, y cae directamente a un lecho que generalmente es grava de mayor tamaño, esto con el fin de retener las partículas más grandes que puedan obstruir el paso del agua al lecho filtrante principal. Después de pasar el primer filtro, el agua entra al lecho principal que puede ser de grava, arena y/o antracita, en la cual se da la mayor parte del proceso de remoción. El agua pasa por el lecho filtrante de manera horizontal, haciendo contacto con la rizosfera. En este punto ocurren los procesos físicos, biológicos y físicos descritos anteriormente, así como también los procesos biogeoquímicos presentados en la ilustración 3 e ilustración 4.

Finalmente, el agua tratada es recogida por una tubería en la parte inferior del extremo opuesto a la entrada del agua, esta tubería debe contar con cribado, además debe estar rodeada por la misma grava y en la misma proporción que la inicial.

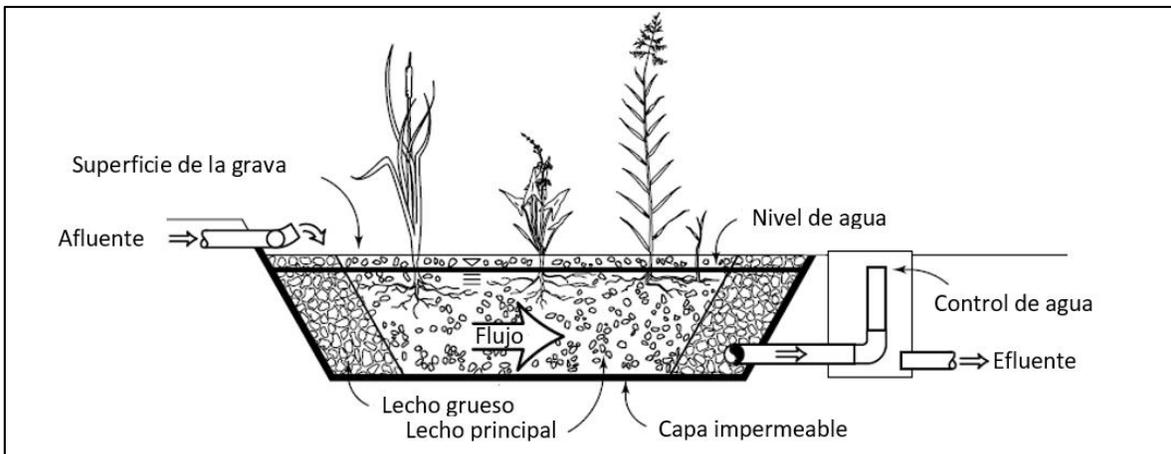


Ilustración 7. Esquema de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal
 Fuente: Adaptado de Wallace & Knight (2006) como se citó en Kadlec & Wallace (2009).

Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical HAFSSV.

Los HAFSS de flujo vertical al igual que los de flujo horizontal cuentan con lecho filtrante, pero la diferencia principal es que los HAFSSV manejan varias capas de lechos filtrantes con diferentes tamaños de partícula.

Como se muestra en la ilustración 8, el agua ingresa al sistema mediante una tubería que se inserta por la parte superior del lecho filtrante que suele ser de arena. Luego inicia el proceso de infiltración de manera vertical y a través de un lecho inerte de arena y/o grava, donde ocurren procesos similares a los del HAFSSH (Filtración, sedimentación, absorción, adsorción, asimilación y degradación) Finalmente llega a una tubería dispuesta en la parte inferior de la estructura, por la cual se recoge el agua tratada. Otra característica importante en este tipo de humedales es que el paso de agua es discontinuo o intermitente, dado que si se realiza de manera continua el sistema se satura, disminuyendo el oxígeno en el humedal.

La operación y mantenimiento es mucho más fácil en los humedales superficiales, dado que el agua fluye en la superficie, no se requieren sistemas para el control del nivel del agua, además como estos sistemas no contienen lechos filtrantes, hay poca saturación de contaminantes. Los 2 tipos de HAFSS requieren de mantenimiento con personal capacitado, dado que dependiendo de la carga contaminante que se inyecta en el humedal, este necesitara una cierta frecuencia de retro lavado (Inyección de agua en sentido contrario al flujo), para mantener el sistema en óptimas condiciones, dicho retro lavado aumenta los costos de mantenimiento, dependiendo del área del humedal.

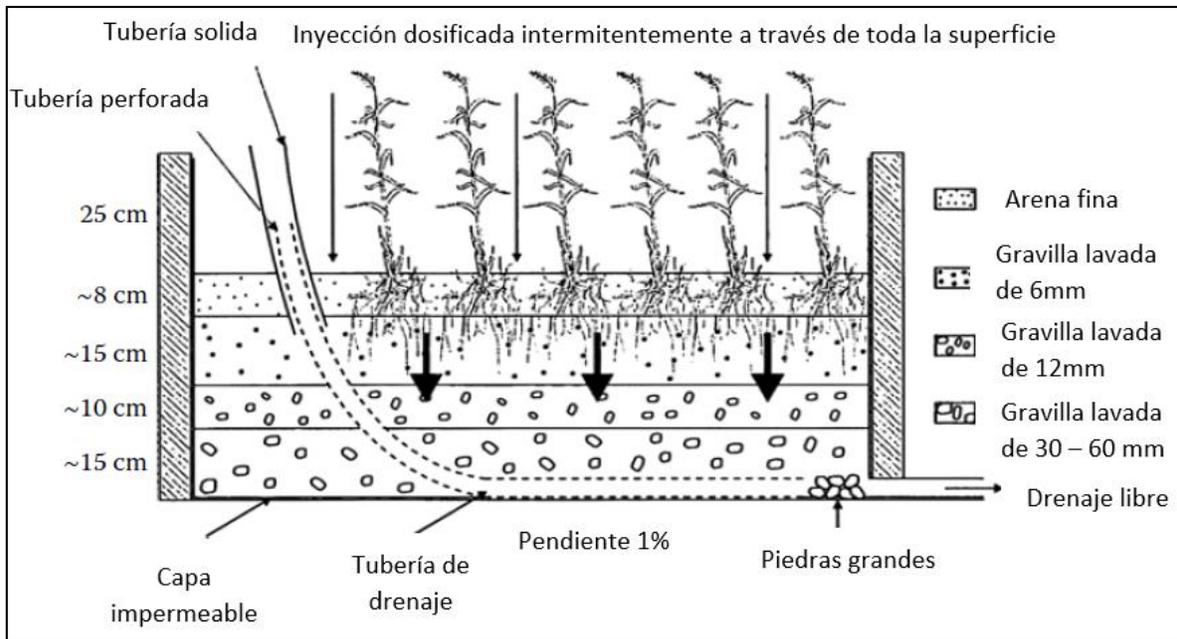


Ilustración 8. Esquema de un humedal artificial de flujo subsuperficial vertical

Fuente. Cooper. (1996) como se citó en Kadlec & Wallace (2009).

1.10.5 Factores que influyen en el rendimiento de los HAFSS

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en humedales artificiales funcionan como un todo, si una parte del humedal falla o no es la adecuada, todo el sistema se ve afectado y no funciona de la manera correcta, por lo tanto, cada variable afecta al rendimiento del humedal.

Temperatura

La temperatura es un factor importante en los humedales artificiales, dado que afecta al crecimiento de las plantas (Zapata, 2014). Así mismo, es un factor determinante en la desnitrificación (Delgadillo *et al.*, 2010).

En países con clima templado la efectividad de depuración de estos sistemas disminuye en la época de invierno, sobre todo en la eliminación de nitrógeno (Mena, 2008), en países y ciudades con clima frío, se requiere menor área superficial que en países con clima cálido, aun así, para un adecuado diseño y de acuerdo con EPA (2000), el área superficial debe calcularse con base en las temperaturas mínimas y máximas seleccionando el resultado con mayor área.

Tipo de lecho filtrante

El lecho es la parte más importante en los humedales artificiales subsuperficiales, dado que de él depende la mayor parte del tratamiento, e indirectamente del resto

del tratamiento, el lecho sirve de sustrato para la vegetación y para los microorganismos (Delgadillo *et al.*, 2010).

Si se selecciona un lecho inadecuado, el agua puede pasar muy rápido o demasiado lento, o puede que no crezcan especies vegetales.

Tipo de Macrófitas

La selección de especies vegetales adecuadas es muy importante en los humedales artificiales, dado que no todas las especies absorben los mismos nutrientes, algunas están predispuestas a absorber un compuesto más que otro, y bajo esta premisa se debe hacer una correcta selección para el tipo de contaminante que se quiera remover.

Dimensiones

Otro aspecto importante son las dimensiones y la variable que se deriva de ello que es el tiempo de retención hidráulico, este es el tiempo que dura el agua dentro del humedal. Las plantas y los microorganismos necesitan de cierto tiempo para actuar de la manera más efectiva posible, por eso es necesario garantizar que el agua estará dentro del humedal el tiempo necesario para que se den los procesos físicos, químicos y biológicos de remoción de contaminantes.

1.10.6 Aplicación de los HAFSS

Estos humedales artificiales son sistemas idóneos para tratar aguas residuales rurales como los centros poblados veredales o las fincas (Mena, 2008).

Cumplen los estándares para ser una tecnología apropiada en el tratamiento de aguas residuales para pequeñas comunidades. Según EPA (2000) dichos estándares son:

- Asequible – Los costos totales anuales, incluyendo capital para operación, mantenimiento y depreciación están dentro de la capacidad económica del usuario
- Operable – La operación del sistema es posible con mano de obra local y adecuado asesoramiento
- Confiable – Los requisitos para la calidad del agua residual se pueden cumplir consistentemente

Teniendo en cuenta los requisitos para ser una tecnología apropiada, los humedales artificiales son una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales rurales para áreas donde no se cuenta con sistemas de alcantarillado, ni con ningún otro sistema tecnificado de tratamiento de aguas. Es apropiado para usarse en zonas rurales donde se hace uso de pozos sépticos. En la ilustración 9 (EPA, 2000) se presenta el esquema de un HAFSS como sistema de tratamiento de aguas residuales rurales.

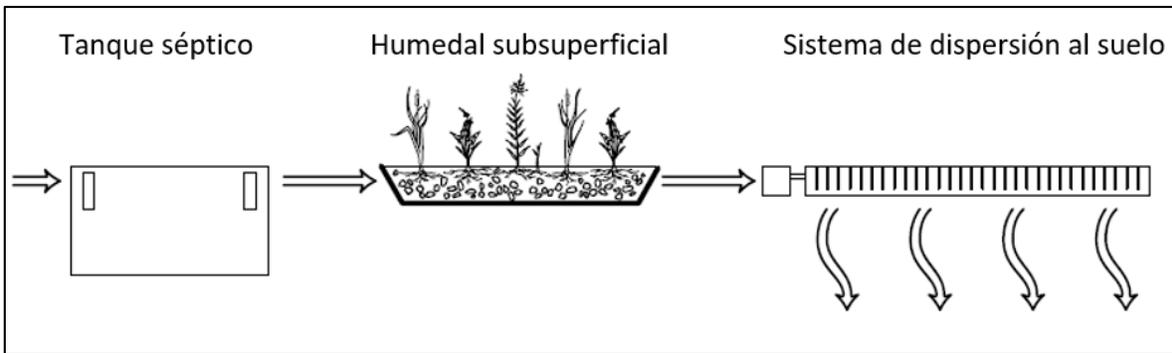


Ilustración 9. Esquema de un HAFSS en un sistema de tratamiento doméstico

Fuente. Adaptado de Kadlec & Wallace (2009).

La ilustración 10 muestra un tren de tratamiento convencional usando humedales artificiales, a la izquierda se puede observar un tanque séptico donde el agua residual se almacena y es pre-tratada, allí la materia orgánica más grande tiene tiempo de disolverse antes de entrar al humedal. Seguidamente viene el humedal artificial que en lo posible debe estar precedido por un sistema de cribado con rejillas, para evitar el paso de sólidos de gran tamaño que obstruyan el paso del agua, finalmente el agua tratada sale del humedal y puede ser dispuesta en el suelo o directamente en fuentes hídricas. Dependiendo de la calidad final del agua tratada que requiera un usuario, los humedales artificiales pueden requerir un sistema de post-tratamiento que mejore la calidad de esta (ilustración 10).

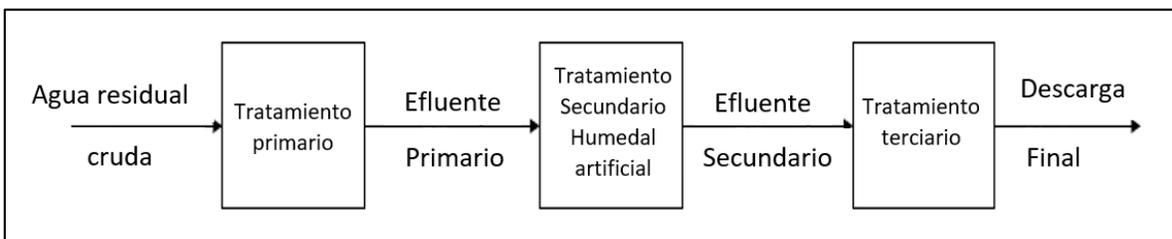


Ilustración 10. Tren de tratamiento de aguas residuales con un humedal artificial

Fuente. EPA, 2000

La tabla 6 muestra algunas experiencias alrededor del mundo con humedales artificiales, allí se evidencian altos porcentajes de eficiencia en la remoción de SST y moderados en Fosforo total (PT) y Nitrógeno total (NT).

Tabla 6. *Experiencia de tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales*

Origen del agua	Tipo de HA	Área (m ²)	Profundidad (m)	Rendimiento (%)			Referencias
				SST	PT	NT	
Lago de apopka (EE. UU.)	HAFS	7.3*10 ³	1.6	89-99	30-67	30-52	Coveney <i>et al.</i> (2002)
Lago Taihu (China)	HAFS	30	0.8		35	20	Li <i>et al.</i> (2008)
	HAFSSV	30	1		64	52	
	HAFSSH	30	1		66	52	
Rio Qingyuan (China)	HAFSSH (Grava)	17	0.8	79	22	8-34	He <i>et al.</i> (2007)
	HAFSSH (Zeolita)	17	0.8	78	41	22-63	
Rio Jinhe (China)	HAFSSV Gravas y esquistos	0.2	1.3		56-78	68-85	Tang <i>et al.</i> (2009)
Lago Albufera (España)	HAFS	4*10 ³	0.2	57	57	52	Martin <i>et al.</i> (2013)
	HAFSSH	3.3*10 ³	0.5 (HAFSSH)	79	45	55	
	+ HAFS		0.33 (HAFS)	70	6	29	

Fuente. Gargallo, 2016

1.11 Características de las aguas residuales

Las características típicas del agua residual municipal que más a menudo se tratan en humedales artificiales se describen en la tabla 7, donde se presenta el efluente de agua residual proveniente de fosas sépticas.

Los humedales artificiales se enfocan en el tratamiento de agua residual de pequeños centros urbanos de menos de 200 personas, como lo evidencia la baja carga orgánica representada en DBO en la tabla 7 comparado con las altas cargas orgánicas que se manejan en industrias como la láctea (cargas mayores a 1000 mg/L). Los pozos sépticos funcionan como sistemas de pretratamiento, donde el agua se acumula, dando tiempo a reacciones químicas y procesos de sedimentación hasta que entre a un sistema de tratamiento primario. Los humedales artificiales tienen la capacidad de funcionar como sistema de tratamiento primario y secundario.

Tabla 7. Características del agua residual según el tipo de tratamiento

Parámetro	Efluente del tanque séptico (mg/L)	Efluente primario (mg/L)	Efluente de estanque (mg/L)
DBO	129-147	40-200	11-35
DBO soluble	100-118	35-160	7-17
SST	44-54	55-230	60-100
NT	41-49	20-85	8-22
NH ₃	28-34	15-40	0.6-16
NO ₃	0-0.9	0	0.1-0.8
PT	12-14	4-15	3-4
Orto-P	10-12	3-10	2-3
Coliformes fecales (log/100ml)	5.4-6.0	5.0-7.0	0.8-5.6

Fuente: EPA, 1978; Metcalf & Eddy, 1991; EPA, 1980

2. MODELOS PARA EL DISEÑO DEL HAFSSH

2.1 Definición y tipos de modelos

El tratamiento o depuración de aguas residuales se debe principalmente a los procesos físicos como la sedimentación y la filtración y a los procesos biológicos y químicos como la descomposición, la asimilación, absorción, adsorción etc.

Rivas *et al.*, 2008 y Samsó *et al.*, 2014 como se citaron en Gargallo, 2017 piensan que el estudio del funcionamiento de los procesos en un humedal artificial y en cualquier sistema, permite por una parte aumentar el conocimiento sobre la tecnología y, por otra parte, optimizar su diseño y gestión con el fin de obtener la mejor eficiencia en la remoción de los componentes deseados.

El estudio de los procesos que ocurren dentro de un humedal artificial no es tan fácil como puede parecer, esto se debe principalmente a que los procesos no ocurren en secuencia, ocurren a la vez e interactúan unos con otros (Gargallo, 2017) es por eso que resulta complicado estudiar estos procesos dado que cada variable de cada proceso influye en cierta medida sobre otra variable y para plantear un modelo asertivo se tienen que conocer estas variables, así como la magnitud del impacto o estímulo que realiza sobre otra variable.

2.1.1 Tipos de modelos

Existen 2 tipos de modelos, los modelos no mecanicistas o modelos tipo “caja negra” (Gargallo, 2017) y los modelos mecanicistas.

Modelos No mecanicistas

Este tipo de modelos se basan en datos empíricos de sistemas que ya se han construido en la realidad y con base en esos sistemas construidos se obtienen fórmulas matemáticas que representan de una manera simplificada el funcionamiento de un humedal artificial.

“Estos modelos permiten simular la calidad del efluente de un humedal artificial sin prestar atención a los procesos internos” (Gargallo, 2017).

Algunos de los modelos no mecanicistas lo consideran como un reactor de flujo pistón con una reacción de primer orden, modelo que según Kadlec & Knight (1996) se denomina modelo K-C o K-C*.

La modelación de humedales artificiales se realiza habitualmente tomando como base que funcionan como reactores químicos basados en ecuaciones cinéticas de primer orden (Kadlec y Knight, 1996; Mena, 2008), las cuales, en caso de estado estacionario y funcionamiento en flujo pistón ideal, predicen un perfil exponencial de las concentraciones de los contaminantes, modelo K-C (ecuación 1) (Mena, 2008):

$$\frac{C_e}{C_o} = \text{Exp}(-K_t \cdot t_n) \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

K_T : Constante de reacción de primer orden en base volumétrica, que depende del contaminante d^{-1} ,

t_n : Tiempo de retención hidráulica TRH nominal, d

C_e : Concentración del contaminante efluente, mg L^{-1}

C_o : Concentraciones del contaminante afluente, mg L^{-1}

Este modelo se ve modificado habitualmente al introducir un nuevo parámetro que tenga en cuenta que, aunque el TRH sea infinito, la concentración de salida del humedal nunca será cero. Este parámetro se denomina concentración residual o de fondo (C^*).

Este nuevo modelo, denominado $K-C^*$, es el dado por la ecuación 2.

$$\frac{C_e - C^*}{C_o - C^*} = \text{Exp}(-K_{v,t} \cdot t_n) \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

C^* : Concentración residual o de fondo mg L^{-1}

El parámetro C^* no indica únicamente materia inerte que no ha sido degradada. Por ejemplo, si el contaminante es DBO, la DBO final efluente se ve influida por la producción de DBO residual en el sistema, producto de la descomposición de los detritos de las plantas y de otras sustancias orgánicas presentes de manera natural (Mena, 2008). Esta DBO residual (C^*) está típicamente en el rango de 2 a 7 mg L^{-1} (Kadlec y Knight, 1996). La tabla 8 muestra las concentraciones de fondo para los parámetros DBO, SST, NT Y PT.

Modelos de primer orden.

Las ecuaciones derivadas del modelo de cinética de primer orden son las más utilizadas para la modelación de humedales artificiales. Los más utilizados con frecuencia son los de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA, 1993a) y, el modelo de Kadlec and Knight (1996).

Para un mejor entendimiento del funcionamiento de un humedal artificial, es necesario conocer el balance de agua el cual se puede expresar de la siguiente forma:

$$Q_i - Q_e + P - ET = \frac{dv}{dt} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

Q_i : Afluente de agua residual, L/s
 Q_e : Caudal del efluente, L/s
 P : Precipitación, L/s
 ET : Evapotranspiración, L/s
 V : Volumen de agua, L
 T : Tiempo, s

Por otro lado, la remoción de materia orgánica en un humedal puede ser descrito como un modelo cinético de primer orden (considerando un flujo pistón).

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_T \theta H) \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

C_o = Concentración materia orgánica afluente, mg/L
 C_e = Concentración materia orgánica efluente, mg/L
 K_T = Constante de reacción de primer orden y dependiente de la temperatura, d^{-1}
 θH = Tiempo de residencia hidráulica, d

Modelo utilizado por la EPA

La ecuación utilizada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estado Unidos (EPA, 1993a) es una ecuación derivada del modelo de cinética de primer orden. La mayor remoción de materia orgánica se lleva a cabo en el fondo del humedal artificial, es decir, no es posible la remoción del cien por ciento de la DBO, por lo que permanece un remanente denominado concentración del fondo del lecho. En la ausencia de pruebas de tratabilidad, generalmente el valor asignado a los coeficientes es a criterio del diseñador y el valor seleccionado modifica sensiblemente el área resultante. El área superficial está dada por la ecuación 5.

$$A_s = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_e)}{K_{v,T} D_m n} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

A_s : Área superficial del humedal, m^2
 Q : Caudal del afluente, L/s
 $K_{v,T}$: Constante cinética de primer orden, d^{-1}
 D_m : Propuesta de profundidad de lecho, m
 n : Porosidad, Adimensional

La corrección por temperatura de la constante cinética de primer orden se realiza mediante la ecuación de Arrhenius (ecuación 6) cuya constante de Arrhenius se encuentra en la tabla 8.

$$K_{v,t} = K_{v,20} \theta^{T-20} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde:

T: Temperatura promedio del agua, °C

θ : Coeficiente de Arrhenius, adimensional

Tabla 8. *Parámetros para el diseño de humedales de flujo subsuperficial.*

Parámetro	$K_{A,20}$ (m/año)	θ (Coeficiente de Arrhenius)	Concentración de fondo C^*
DBO	117	1.057	3
SST	43.4	1	6
NT	10	1.05	1.5
PT	9.1	1.09	0

Fuente: Kadlec & Knight (1996)

Para humedales de flujo subsuperficial: $K_{v,20}$ es igual a 1.104 d^{-1} , con θ igual a 1.06; para los humedales de flujo superficial, se utiliza el mismo valor de q , con $K_{v,20}$ igual a 0.678 d^{-1} (Reed & Brown, 1995).

La ecuación para la determinación el área superficial en los humedales de flujo superficial es la misma; solamente no se toma en cuenta los valores de porosidad (n) y el valor de la constante K_{20} es diferente (Reed.,1995).

Modelo de Kadlec & Knight

Kadlec y Knight (1996) proponen una ecuación derivada del modelo de cinética de primer orden para el cálculo del área necesaria, para el caso de condiciones constantes de caudal del afluente, concentraciones y comportamiento de flujo pistón, se deduce la siguiente ecuación:

$$\ln \left(\frac{C_e - C^*}{C_o - C^*} \right) = \frac{-K_{AT}}{q} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde:

C^* : Concentración en el fondo del humedal, mg/L

$K_{A,T}$: Constante cinética de primer orden, m/año

Q : Carga hidráulica, m/año

La constante de reacción cinética de primer orden se calcula con la ecuación 7.1, esta constante depende del tipo de contaminante (tabla 8) y de la temperatura.

$$K_A = K_{A,20} \theta^{(T-20)} \quad \text{Ecuación (7.1)}$$

Donde:

K_A : Constante de reacción cinética de primer orden, adimensional

Determinación de las condiciones hidráulicas del humedal artificial

Los humedales artificiales se dividen en 2 zonas, una zona inicial de tratamiento, que equivale al 30% del humedal, y una zona de tratamiento final que equivale al 70% del humedal, para el cálculo del área inicial (A_i) se utiliza el área superficial calculada en la ecuación 5, pero ya que se calcula el área superficial para el clima frío y para el clima caliente, siempre se utiliza el resultado que tenga mayor área. El área inicial se calcula con la ecuación 8.

$$A_i = \% \text{ de la zona inicial} * A_s \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

A_i : zona inicial de tratamiento, m^2

%: Al porcentaje de la zona inicial de tratamiento

A_s : Área superficial, m^2

Para el cálculo de la zona final de tratamiento (A_f), que equivale al 70% del humedal, se usa la ecuación 9.

$$A_f = \% \text{ de la zona final} * A_s \quad \text{Ecuación (9)}$$

Donde:

A_f : Zona final de tratamiento, m^2

%: porcentaje de la zona final de tratamiento

A_s : área superficial, m^2

Para mantener el flujo de agua por debajo de la superficie y determinar la altura de salida del efluente. Se determina el ancho mínimo teórico (W), utilizando la ecuación de Darcy (ecuación 10):

$$W = \left(\frac{Q \cdot A_i}{K_{s,1\%} \cdot dh_i \cdot D_{w,0}} \right)^{0.5} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde:

Q : Caudal del afluente, L/s

A_i : zona inicial de tratamiento, m^2

$K_{s,1\%}$: 1% de la conductividad hidráulica total, $m^3/m^2 \cdot d$

dh_i : Perdida de carga máxima en zona inicial, m

$D_{w,0}$: Propuesta de profundidad del agua en zona inicial de tratamiento, m

La longitud de la zona inicial de tratamiento (L_i) se calcula por medio de la ecuación (11).

$$L_i = \frac{A_i}{W} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde:

A_i : Área inicial de tratamiento, m^2
 W : ancho mínimo teórico, m

La pérdida de carga es la energía o altura que pierde el agua durante su recorrido por el humedal, la pérdida de carga en la zona de tratamiento inicial se calcula usando la ecuación 12.

$$dh_i = \frac{Q \cdot L_i}{K_{s,1\%} \cdot W \cdot D_{w,0}} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde:

Q : Caudal, m^3/s
 L_i : Longitud de la zona inicial de tratamiento, m
 D_{hi} : Pérdida de carga en la zona inicial de tratamiento, m
 W : Ancho mínimo necesario, m
 $K_{s,1\%}$: 1% de la conductividad hidráulica total, $m^3/m^2 \cdot d$
 $D_{w,0}$: Profundidad propuesta en la zona inicial, m

La longitud de la zona final (L_f) de tratamiento se determina con la ecuación (13):

$$L_f = \frac{A_2}{W} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde:

A_2 = Área de la zona final, m^2
 W = ancho mínimo necesario, m

La pérdida de carga en la zona final (dh_f) de tratamiento se calcula con la ecuación 14:

$$dh_f = \frac{Q \cdot L_f}{K_{s,10\%} \cdot W \cdot D_{w,f}} \quad \text{Ecuación (14)}$$

Donde:

Q : Caudal, m^3/s
 L_f : Longitud de la zona final de tratamiento, m
 $D_{w,f}$: Propuesta de profundidad del agua en zona final de tratamiento, m
 W : Ancho mínimo necesario, m
 A_i : Área inicial de tratamiento, m^2
 $K_{s,10\%}$: 10% de la conductividad hidráulica total, $m^3/m^2 \cdot d$

Longitud total del humedal

$$L = L_i + L_f \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde:

L_i : Longitud de la zona inicial, m

L_f : Longitud de la zona final, m

Cuando la longitud y ancho del humedal es muy extensa, se recomiendan al menos dos celdas de tratamiento para facilitar las actividades de operación y mantenimiento. Ahora bien, se deben considerar las recomendaciones de la relación largo-ancho (2:1 a 4:1), las cuales pueden estar separadas por una geo membrana, o lamina impermeable. El ancho de cada celda se calcula con la ecuación 16.

$$W_{\text{celda}} = \frac{W}{N} \quad \text{Ecuación (16)}$$

Donde:

W = ancho mínimo necesario, m

N = número de celdas

Determinación de las elevaciones del fondo

Teniendo en cuenta que el humedal artificial debe tener una pendiente del 0.5%, es necesario calcular la altura que tendrá el humedal en las dos zonas de tratamiento.

La elevación a la salida del efluente (E_{be}) se asume cero, dado que está a la altura del suelo. La elevación a la entrada de la zona final de tratamiento (E_{bF}) se calcula usando la ecuación 17.

$$E_{bF} = L_F \cdot S_F \quad \text{Ecuación (17)}$$

Donde:

L_F = Longitud de la zona final de tratamiento, m

S_F = Pendiente del fondo del humedal, adimensional

La elevación a la entrada de la zona inicial de tratamiento (E_{b0}) se calcula usando la ecuación 18.

$$E_{b0} = L \cdot S_F \quad \text{Ecuación (18)}$$

Donde:

L = Longitud total del humedal, m

S_F = Pendiente del fondo del humedal, adimensional

Determinación de las elevaciones de la superficie del agua

La elevación del agua es la altura desde la base del humedal, dicha altura depende de la pendiente del sistema, y de la profundidad del lecho filtrante. La elevación del agua al inicio de la zona final de tratamiento (E_{WF}) se calcula con la ecuación 19.

$$E_{WF} = E_{BF} + D_{WF} \quad \text{Ecuación (19)}$$

Donde:

E_{BF} = Elevación a la entrada de la zona final de tratamiento, m

D_{WF} = Propuesta de profundidad del agua en zona final de tratamiento, m

La elevación de la superficie del agua a la salida (E_{WE}) se calcula con la ecuación 20.

$$E_{WE} = E_{wf} - dh_f \quad \text{Ecuación (20)}$$

Donde:

E_{wf} = Elevación del agua al inicio de la zona final de tratamiento, m

dh_f = La pérdida de carga en la zona final (dh_f) de tratamiento, m

La elevación de la superficie del agua a la entrada (E_{W0}) se calcula usando la ecuación 21.

$$E_{W0} = E_{WF} - dh_i \quad \text{Ecuación (21)}$$

Donde:

E_{WF} = Elevación del agua al inicio de la zona final de tratamiento, m

dh_i = Verificación de la pérdida de carga, m

Determinación del tiempo de residencia hidráulica (TRH) nominal

$$\text{TRH}_{\text{nominal}} \frac{n D_{\text{wf}}}{\left(\frac{Q}{A}\right)} \quad \text{Ecuación (22)}$$

Donde:

n: porosidad, adimensional

D_{wf} : Profundidad al inicio de la zona final de tratamiento, m

Q: Caudal, m³/s

A: Área total, m²

Concentración de nitrógeno total esperada en el efluente (C_e, N)

$$C_{e,N} = (0.52C_{0,N}) + 3,1 \quad \text{Ecuación (23)}$$

Donde:

$C_{e,N}$: Concentración Nitrógeno afluente, mg/L

$C_{0,N}$: Concentración Nitrógeno efluente, mg/L

Concentración de SST esperada en el efluente (C_e, SST)

Se considera una ecuación de regresión propuesta por Reed and Brown (1995), para la estimación de la concentración de salida para los SST. La ecuación aplica para un rango de concentración de entrada ($C_{0,SST}$) mayor a 22 mg/L.

$$C_{e,SST} = C_{0,SST} \left(0.1058 + 0.0011 \frac{100Q}{A} \right) \quad \text{Ecuación (24)}$$

Donde:

Q: caudal, m³/s

A: área total, m²

$C_{e,SST}$: Concentración SST afluente, mg/L

$C_{0,SST}$: Concentración SST efluente, mg/L

Número de macrófitas requeridas para la instalación (N_V)

$$N_V \left(\frac{L}{d_{m-m}} - 1 \right) \left(\frac{W}{d_{m-m}} - 1 \right) \quad \text{Ecuación (25)}$$

Donde:

d_{m-m} : Distancia entre macrófita y macrófita, m

L: longitud total, m

W= Ancho mínimo, m

Volumen estimado de material de lecho (V)

$$V = AD_{me} \quad \text{Ecuación (26)}$$

Donde:

A= área total, m²

D_{me} = Profundidad del medio a la salida, m

Modelos Mecanicistas

Gargallo (2017) afirma que “Los modelos mecanicistas describen el comportamiento de los sistemas representando los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren dentro del HA y los factores que influyen sobre estos”.

Los modelos mecanicistas están divididos en varias partes, pero los más importantes son el submodelo hidrodinámico y el submodelo reactivo (Gargallo, 2017). El submodelo hidrodinámico simula el movimiento o flujo del agua, y el transporte de componentes a través de esta, y el submodelo reactivo simula los procesos biogeoquímicos.

La ilustración 11 muestra una figura representativa de la diferencia entre un modelo no mecanicista o de caja negra y los modelos mecanicistas.

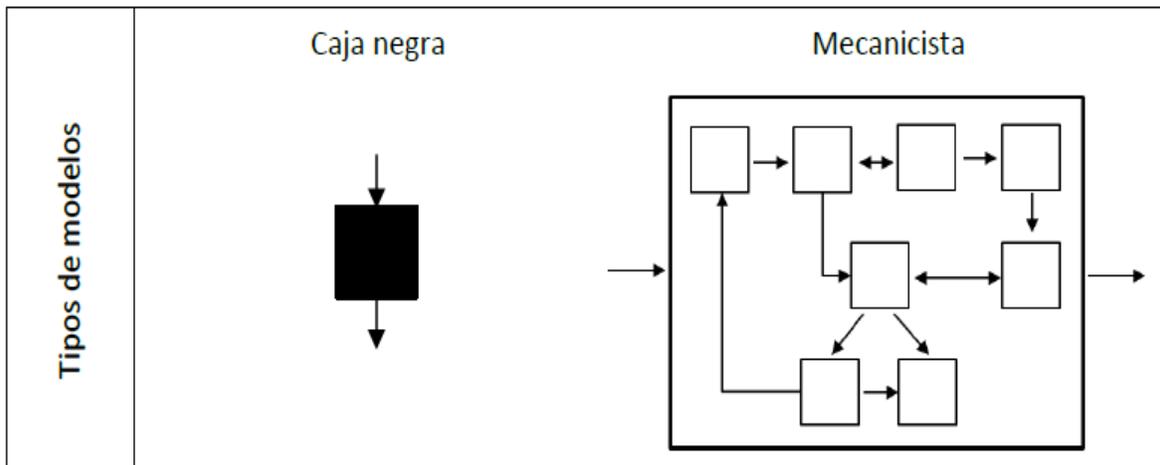


Ilustración 11. *Diagrama conceptual de los tipos de modelos*

Fuente: Gargallo, 2017

Modelo mecanicista para la simulación de humedales artificiales

MODFLOW 2006

MODFLOW es un modelo hidrológico modular de la U.S Geological Survey (USGS). Modflow es considerado un estándar internacional para la simulación y predicción de las condiciones de flujo subterráneo y las interacciones del agua subterránea con el agua superficial (USGS, 2016).

La estructura modular de MODFLOW ha proporcionado un marco sólido para la integración de capacidades de simulación adicionales que se basan y mejoran su alcance original. La familia de programas relacionados con MODFLOW ahora incluye capacidades para simular sistemas acoplados de agua subterránea / agua superficial, transporte de solutos, flujo de densidad variable (incluido el agua salada), compactación del sistema acuífero y subsidencia de la tierra, estimación de parámetros y gestión del agua subterránea (USGS, 2016)

Los usuarios pueden definir la grilla del modelo usando una rejilla MODFLOW regular que consiste en capas, filas y columnas, una grilla en capas definida por (x, y) pares de vértices, o una grilla no estructurada general basada en conceptos desarrollados para MODFLOW-USG.

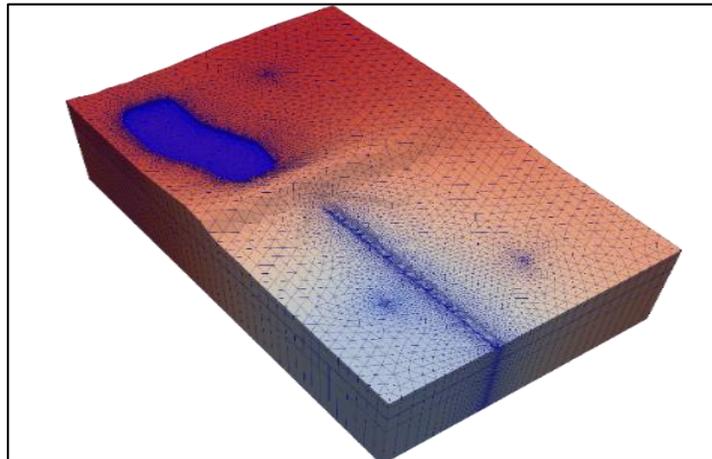


Ilustración 12. *Ejemplo de un acuífero modelado con Modflow 6*

Fuente: USGS.

Modelo de transporte de contaminantes

Cuando un contaminante entra en el agua, sea agua superficial o agua subterránea, y esta disuelto, se producen varios procesos que se dividen en 2 grupos.

- Contaminantes reactivos
- Contaminantes no reactivos o conservativos

Cuando se tiene un contaminante no reactivo, o cuando se quiere evaluar el comportamiento de este sin tener en cuenta las reacciones químicas, se estudian

los procesos de advección, difusión y dispersión, a estos últimos se les conoce como procesos de transporte.

Advección

El proceso de advección que se muestra se refiere al movimiento de las partículas o sustancias dentro de un sistema sin modificar su concentración, dicho movimiento depende únicamente de la velocidad y fuerza del flujo, como se muestra en la ilustración 13 donde las partículas se mueven en dirección del flujo a través del espacio y el tiempo, hasta que pierdan fuerza por los efectos físicos del medio (Flechas, 2013).

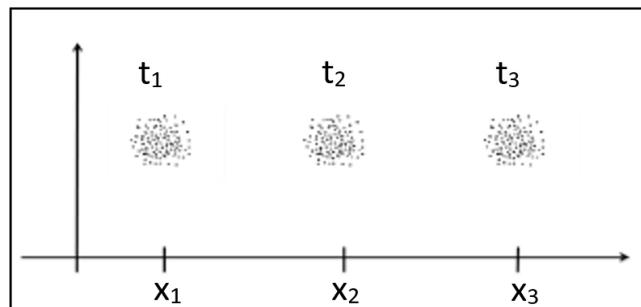


Ilustración 14. *Movimiento advectivo*

Fuente: Adaptado de Bendoricchio and Jorgensen como se citó en Flechas, 2013

Difusión

Difusión es el proceso en el cual las partículas se mueven de un medio de mayor concentración a uno de menor concentración. En la ilustración 14 se muestra la difusión se expresa mejor en medios inmóviles, donde la concentración de una sustancia disminuye a través del tiempo mientras ocupa un espacio más amplio (Flechas, 2013).

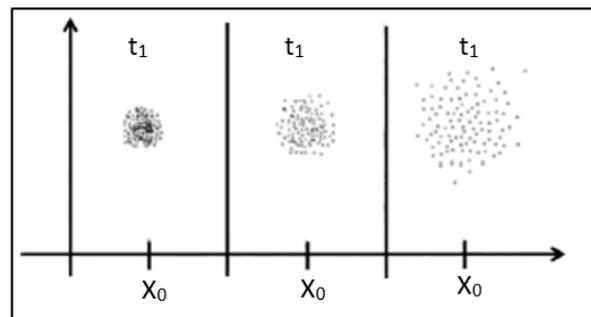


Ilustración 15. *Difusión*

Fuente: Adaptado de Bendoricchio and Jorgensen como se citó en Flechas, 2013

La difusión es un proceso extremadamente lento (Sánchez, 2013), por lo que, para evaluar su efecto en un contaminante, en el sistema que se quiera evaluar solo debe

haber difusión, pues, si existen procesos advectivo y dispersivos, la difusión no se va a notar.

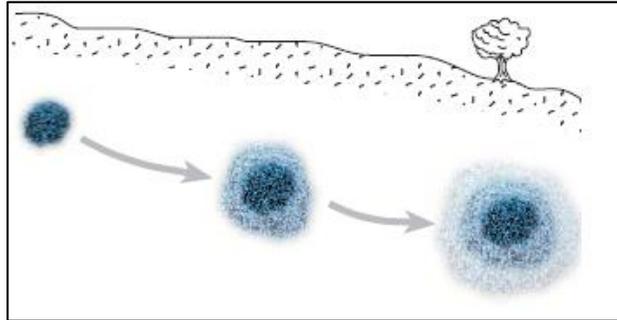


Ilustración 16. Transporte por advección y difusión

Fuente: Sánchez, 2012

Sorción

Es la retención de una sustancia por otra cuando están en contacto; incluye las operaciones de absorción, adsorción, intercambio iónico y diálisis.

La absorción contraria a la adsorción, es la asimilación de una partícula o sustancia dentro de otro sistema, este proceso se evidencia en las especies vegetales que absorben sustancias, como es el caso la bioacumulación de metales.

Dispersión

La dispersión es un proceso mediante el cual el contaminante se desplaza en el sentido del flujo, pero también hacia los laterales y de manera vertical. Determinar los coeficientes de dispersión en campo es difícil y costoso, por lo que se usan expresiones empíricas (Flechas, 2013). La ilustración 17 muestra 3 formas de dispersión.

La ilustración muestra las distintas formas de dispersión, a la izquierda se muestra la dispersión longitudinal por la tortuosidad, en la cual las moléculas se retrasan más debido a que no hay caminos directos dentro del lecho filtrante, por lo que el contaminante busca la entrada. En el centro de la figura se observa la dispersión por la amplitud de los canales, esta es frecuente cuando el medio es muy poroso, y por lo tanto las partículas están más separadas entre sí, permitiendo que el contaminante atraviese el lecho más rápido, por último, a la derecha de la imagen se observa la dispersión transversal, que se debe a la bifurcación de los caminos dentro del lecho.

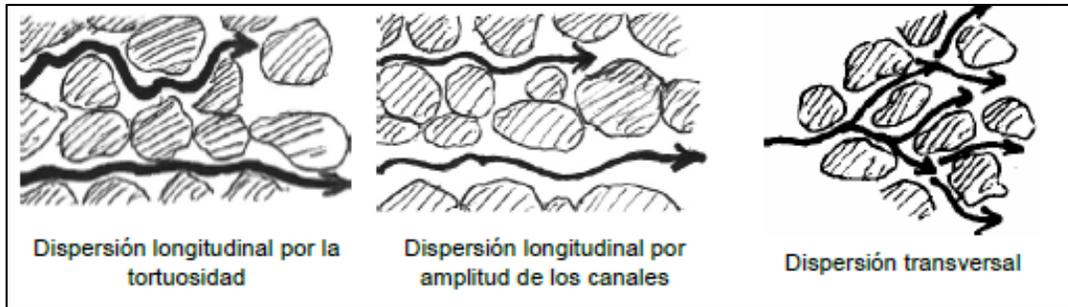


Ilustración 17. *Movimiento dispersivo*

Fuente: Sánchez, 2012 como se citó en Flechas, 2013

La dispersión longitudinal siempre será mayor que la transversal, por lo que, en un diagrama de dispersión, el contaminante será más largo que ancho (ilustración) (Sánchez, 2012)

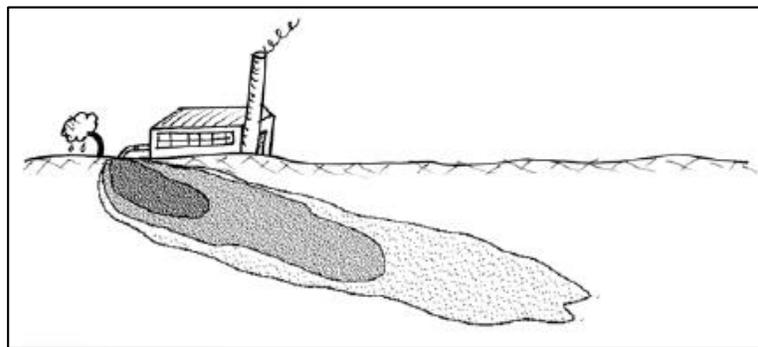


Ilustración 18. *Inyección continua de un contaminante y movimiento dispersivo*

Fuente: Sánchez, 2012

Cuando se producen interacciones entre las sustancias contenidas en el agua y el medio, se producen los procesos de adsorción, precipitación y diversas reacciones químicas, en este caso estudiar el fenómeno se vuelve más complejo, debido a que se combinan los procesos advectivo, difusivos y dispersivos con los procesos de adsorción, precipitación y de reacción química.

Degradación

Los procesos de degradación dependen de muchos factores, dentro de los cuales se encuentran los contaminantes, el pH, la temperatura, la presencia de microorganismos etc.

3. METODOLOGIA

Esta investigación contó con un enfoque cuantitativo dado que recolecta datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis, con base en mediciones numéricas y el análisis estadístico para establecer su comportamiento (Sampieri, Collado y Lucio, 2003, p.8).

El diseño consta de un sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, el cual será modelado mediante los softwares MODFLOW 6 y MT3DMS utilizando el visualizador Modelmuse.

El diseño del humedal artificial se hizo con base a las normativas o manuales internacionales para el diseño y construcción de humedales artificiales, se usó el manual que publicó la EPA en 1988 y sus respectivos revisiones y ajustes hechas hasta el año 2017, y también el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico-RAS en su título J Alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural.

El alcance de esta investigación se enfocó en el diseño hidráulico y modelación del flujo del agua en un medio subterráneo semiconfinado, y la calidad del agua en función de la DBO, SST, NT y PT, mediante el uso de modelos mecanicistas y no mecanicistas.

Para el diseño hidráulico del humedal artificial de flujo subsuperficial se usaron las ecuaciones propuestas por la EPA (1999); EPA (2000), además se usaron las ecuaciones de reacción de primer orden propuestas por Kadlec & Knight y Reed & Brown, las cuales permiten conocer el comportamiento de un contaminante en el humedal artificial asumiendo que este funciona como un flujo a pistón. Para el diseño hidráulico se usaron las ecuaciones propuestas por los manuales de la EPA.

La metodología se dividió en varias fases:

Formulación del modelo conceptual

La primera fase consistió en la recopilación de toda la información necesaria, con el fin de aclarar los conceptos sobre el funcionamiento de los humedales artificiales, y así identificar los procesos que se pueden modelar con el software seleccionado.

Diseño del humedal artificial y modelación mecanicista

La segunda fase inició con el diseño del humedal, mediante el uso de las ecuaciones propuestas por la EPA. Después se resolvieron las ecuaciones de primer orden propuestas por Kadlec, y también ecuaciones de regresión propuestas por Reed & Brown.

Análisis del software de modelación de cuerpos hídricos

En esta etapa se buscaron, identificaron y analizaron los diferentes softwares existentes para la modelación de cuerpos hídricos. Se encontraron limitantes para la selección del modelo, entre ellas estaba el alcance del software en cuanto a modelación de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, otro limitante es que la mayoría de software no son de uso libre, por lo que algunos de los más precisos y funcionales tienen costo, mismo que en algunos casos superaba los 1000 dólares. Se seleccionó un software de uso libre, que para el caso es uno realizado por el departamento del interior de los Estados Unidos de América, a través de la entidad U.S Geological Survey (USGS), la cual es una de las principales entidades norteamericanas encargadas de proporcionar información científica de calidad al público en cuanto a terremotos, cuerpos de agua, satélites, deslizamientos de tierra y volcanes a través de varios productos. Uno de ellos son los softwares libres, que para esta investigación se seleccionó MODFLOW, visualizado mediante el software Modelmuse.

Aplicación de Modelmuse, MODFLOW 6 y MT3DMS en humedales artificiales

La simulación en Modelmuse se realizó con base en el diseño hidráulico de un humedal artificial de flujo subsuperficial, utilizando las ecuaciones de la EPA y las ecuaciones de reacción de primer orden planteadas por Kadlec & Knight. Lo anterior con el fin de determinar la aplicabilidad del software en la modelación de humedales artificiales.

Análisis de resultados

Una vez obtenido los datos de la simulación, se realizó el análisis de resultados, con el fin de evaluar si se cumplió con los objetivos planteados, y determinar la viabilidad del simulador.

3.1 Diseño del sistema HAFSSH

Para el diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial se usaron las ecuaciones propuestas por los manuales de la EPA, así como también algunas ecuaciones propuestas en el RAS 2000, y los modelos de primer orden de Kadlec & Knight.

El primer paso para la modelación de humedales artificiales es el dimensionamiento, y para ello se requiere definir el caudal de diseño. El caudal de diseño se calculó mediante la ecuación 26, propuesta por el RAS 2000 título D.

La tabla 9 muestra el coeficiente de retorno C_R para niveles de complejidad bajos, la cantidad de población propuesta es para un área rural de 10 casas y la demanda neta es la proporcionada por el RAS (2000) para habitantes de área rural.

Tabla 9. Datos para el cálculo del caudal de diseño

Nivel de complejidad	C _R	P	Demanda neta
Bajo	0.80	50	115

Fuente: Autores con base en datos del RAS.

$$Q_D = \frac{C_R * P * D_{NETA}}{86400} \quad \text{Ecuación (26)}$$

$$Q_D = \frac{0.80 * 50 * 115}{86400} = 0.0532 \frac{L}{s} = 4.57 \frac{m^3}{d}$$

Donde:

Q_D: Caudal de diseño, L/s

C_R: Coeficiente de retorno, Adimensional (0.80 para niveles de complejidad bajos)

P: Población proyectada

D_{NETA}: Demanda neta de agua potable, L/Hab*día

La profundidad de la raíz es un dato que depende del tipo de especie vegetal que se use, el promedio de penetración de la raíz en un medio poroso es de 0.6 metros. La separación entre plantas de acuerdo con la EPA, 2000 debe ser de 1 m, para garantizar el crecimiento de la rizosfera, y evitar el estrés hídrico de las especies vegetales por sobrepoblación, el dato de porosidad (p) se obtiene por las características del medio porosos de acuerdo con la ilustración 22, que para este caso es grava.

La conductividad hidráulica que se muestra en la tabla 10 depende del tipo de lecho de filtrante, que para la grava media con 32 mm de diámetro esta entre 10.000 a 100.000 m³/m² * día. La conductividad hidráulica es un parámetro que, para efectos de modelación matemática se puede asumir empíricamente, siempre y cuando estén dentro del rango para cada tamaño y porosidad, mientras que, si se quiere llevar a la realidad el diseño del humedal artificial, es necesario determinar en laboratorio las características de conductividad hidráulica, debido a que los tamaños de partículas y porosidades pueden variar en un solo tipo de lecho como la grava.

La conductividad hidráulica para esta investigación es de 71.854 m³/m²día, dato para la grava media que se obtiene de acuerdo con Conagua, 2012.

Tabla 10. Características del medio filtrante para HAFSS

Tipo de medio	Tamaño efectivo	Porosidad	Conductividad hidráulica
	Θ mm	%	M ³ /m ² d
Arena de cuarzo	2	32	1000
Arena graduada	8	35	5000
Grava fina	16	38	7500
Grava media	32	36-40	10000-100000
Roca de cuarzo	128	45	100000

Fuente: EPA, 1993^a; Conagua, 2012

La tabla 11 muestra los datos iniciales necesarios con que se debe contar para iniciar con el diseño hidráulico del HAFSSH donde, la temperatura mínima y máxima corresponde a los valores registrados en el municipio de Facatativá de acuerdo con Climate-Data.org. la constante cinética $K_{v,20}$, es una constante propuesta para una temperatura de 20° suministrada por el manual de la EPA, y se usa para todos los humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Tabla 11. Datos iniciales para el diseño del HAFSSH

DESCRIPCION	DATOS PARA EL DISEÑO DEL HUMEDAL	VALOR
	Temperatura media día más caluroso °C	20
	Temperatura media día más frio °C	9
	Constante cinética $K_{v,20}$	1,104
	Profundidad de la Raíz (m)	0,3
	Separación entre planta (m)	1
	Porosidad	0,42
	Caudal (Q) (m ³ /d)	4,57
DBO Afluente	DBO mg/L Co	192
DBO efluente	DBO mg/L Ce	30
Constante cinética	K_{vt} (día caluroso)	1,104
Constante cinética	K_{vt} (día frio)	0,58
Conductividad hidráulica (1%)	$K_{s,1\%}$	719
Perdida de carga máxima en zona inicial	d_{hi} (m)	0,06

DESCRIPCION	DATOS PARA EL DISEÑO DEL HUMEDAL	VALOR
Conductividad hidráulica (10%)	$K_{s,10\%}$	7185
Pendiente del fondo del humedal	S_f	0,005
Distancia propuesta entre la superficie del medio y la del agua	D_{wm}	0,1
Propuesta de profundidad del agua en zona inicial de tratamiento	$(D_{w0})(m)$	0,6
Propuesta de profundidad del agua en zona final de tratamiento	$D_{wf} (m)$	0,6
Lecho filtrante		Grava media (32mm)
Conductividad hidráulica 100%	$K_s (m^3/m^2 * día)$	71854

Fuente: Autores

3.1.1 Calculo del área superficial

El área superficial es fundamental en la eficiencia de remoción de un contaminante, dado que a mayor área superficial mayor es el tiempo que tarda el agua en recorrer dicha área, lo que se conoce como tiempo de retención hidráulica. El cálculo del área superficial se realiza usando la ecuación 5.

$$A_{s, caluroso} = \frac{4.57(\ln(192) - \ln(30))}{1.759 * 0.6 * 0.43} = 18,68 m^2$$

$$A_{s, frio} = \frac{4.57(\ln(192) - \ln(30))}{0.874 * 0.6 * 0.43} = 37.59 m^2$$

Como lo recomienda la teoría, el área superficial que se usa para los cálculos posteriores, es el clima con mayor área, por lo cual se seleccionan 37.59 m².

3.1.2 Calculo del ancho

El ancho del humedal artificial cumple la función de permitir que los contaminantes se dispersen, por lo cual es necesario garantizar un ancho suficiente. Sin embargo, como bien lo dice la ecuación, es el ancho mínimo, por lo cual se pueden proponer mayores anchos, para garantizar la relación largo/ancho (3/1) para este proceso, el ancho se calcula usando la ecuación 10.

$$W = \left(\frac{4.57 * 11.30}{719 * 0.06 * 0.6} \right) = 1.41 \text{ Ecuación (10)}$$

3.1.3 Determinación de la longitud y pérdida de cabeza en la zona de tratamiento inicial y final

Determinación del área inicial y final

El área inicial y final se calculó usando las ecuaciones 8 y 9 respectivamente.

$$A_i = 0.3(AS_{frio}) \quad \text{Ecuación (8)}$$

$$A_i = 0.3(37.59) = 11.30 \text{ m}^2$$

Determinación del área de la zona final de tratamiento

$$A_f = 0.7(AS_{frio}) \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$A_f = 0.7(37.59) = 26.39 \text{ m}^2$$

La longitud de la zona inicial de tratamiento se calculó usando la ecuación 11, mientras que la pérdida de carga en la zona final de tratamiento se calculó usando la ecuación 12.

$$L_i = \frac{11.30}{1.41} = 8 \text{ m} \quad \text{Ecuación (11)}$$

$$d_{hi} = \frac{4.57 \cdot 8}{719 \cdot 1.41 \cdot 0.6} = 0.06 \text{ m} \quad \text{Ecuación (12)}$$

La longitud de la zona final de tratamiento se calculó usando la ecuación 13, mientras que la pérdida de carga en la zona final de tratamiento se calculó usando la ecuación 14.

$$L_f = \frac{26.3}{1.41} = 18.6 \text{ m} \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$d_{hi} = \frac{4.57 \cdot 18.6}{7185 \cdot 1.41 \cdot 0.6} = 0.014 \text{ m} \quad \text{Ecuación (14)}$$

3.1.4 Longitud total del humedal

La longitud total del humedal artificial se calculó usando la ecuación 15.

$$L = 8 + 18.65 = 26.65 \text{ m} \quad \text{Ecuación (15)}$$

3.1.5 Determinación del tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica se calculó usando la ecuación 22.

$$TRH_{nominal} = \frac{0.43 \cdot 0.6}{\left(\frac{4.57}{37.5}\right)} = 2.12 \text{ dias} \quad \text{Ecuación (22)}$$

3.1.6 Determinación de las elevaciones del fondo del humedal

Elevaciones del fondo del humedal

Las elevaciones del fondo del humedal corresponden a la pendiente de este, que para este caso es de 0.5%. Las elevaciones de fondo se calcularon usando las ecuaciones 17 y 18.

$$E_{BF} = 18.65 * 0.005 = 0.093 \text{ m Ecuación (17)}$$

$$E_{BO} = 26.65 * 0.005 = 0.133 \text{ m Ecuación (18)}$$

3.1.7 Calculo del nivel de agua

El nivel del agua es un aspecto importante en un humedal artificial, dado que se debe garantizar que las raíces siempre estén en contacto con el agua, y así evitar su muerte y posterior acumulación de materia orgánica en el humedal. El nivel del agua se calcula con las ecuaciones 19, 20 y 21.

$$E_{WF} = 0.093 + 0.6 = 0.69 \text{ m Ecuación (19)}$$

$$E_{WE} = 0.69 - 0.014 = 0.67 \text{ m Ecuación (20)}$$

$$E_{WO} = 0.69 + 0.06 = 0.75 \text{ m Ecuación (21)}$$

La ilustración 18 muestra la pérdida del nivel de agua de acuerdo con los cálculos realizados con las ecuaciones 19, 20 y 21, y los cálculos de la pérdida de carga, en esta se muestra lo que se espera en cuanto a la pérdida de carga y el nivel del agua, asumiendo que, la pérdida de carga se distribuye equitativamente en la zona inicial y la zona final.

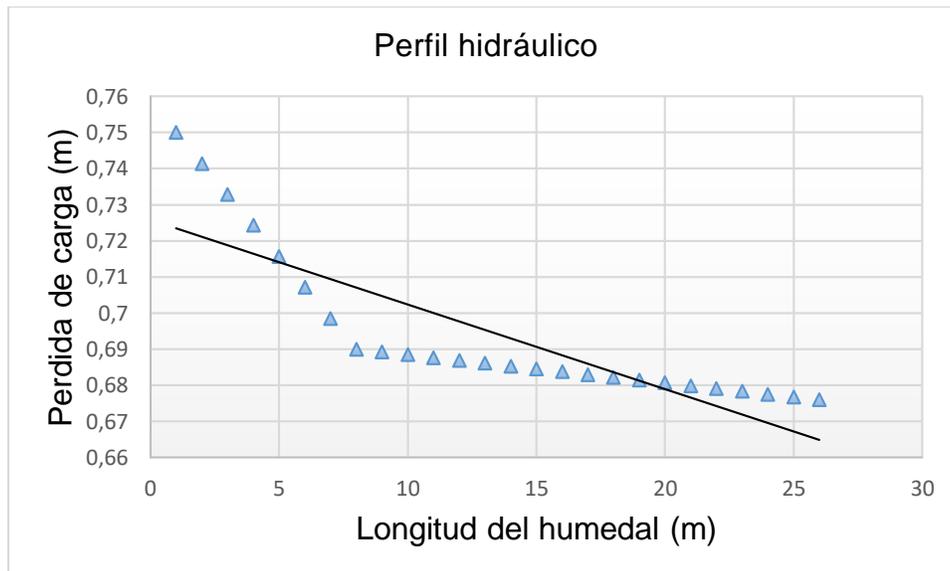


Ilustración 19. Perfil hidráulico del humedal artificial de flujo subsuperficial

Fuente: Autores

3.1.8 Número de macrófitas requeridas

El número de macrófitas o especies vegetales se calcula con la ecuación 25 teniendo en cuenta una separación entre macrófitas de 1 m.

$$Nv = \left(\frac{26.65}{1} - 1\right) \left(\frac{1.41}{1} - 1\right) = 11 \text{ Ecuación (25)}$$

3.1.9 Volumen de material de lecho filtrante necesario

El volumen de material necesario que para este caso es grava media se calcula con la ecuación 26.

$$V = 37.59 \cdot 0.77 = 29.3 \text{ m}^3 \text{ Ecuación (26)}$$

3.2 Aplicación de las ecuaciones de primer orden

Debido a que el objetivo de la investigación es un diseño preliminar de un humedal artificial de flujo subsuperficial, se utilizaron datos de concentraciones de contaminantes, de la literatura, y algunos fueron datos reales obtenidos de MCS Consultoría y Monitoreo Ambiental S.A.S. La tabla 12 muestra las concentraciones de DBO y SST obtenidas de la empresa de consultoría ambiental, y las concentraciones de NT y PT obtenidas a partir de la tabla 7.

Tabla 12. Concentraciones de los contaminantes modelados

Parámetro	Unidad	Concentración
DBO	mg/L	192
SST	mg/L	54
NT	mg/L	49
PT	mg/L	14

Fuente: MCS Consultoría y Monitoreo Ambiental S.A.S (2017); EPA, 1978; Metcalf & Eddy, 1991; EPA, 2000

3.2.1 Constantes de reacción de primer orden

Para la modelación de los parámetros de calidad del agua, es necesario contar con la constante de reacción cinética de primer orden, la cual determina en gran medida la remoción de contaminantes. Con la ecuación 7.1 se calculan las constantes de reacción cinética de primer orden para los contaminantes DBO, SST, NT y PT y se obtiene la tabla 13.

Tabla 13. Cálculo de las Constantes de reacción de primer orden (K_A)

Factor	Contaminante			
	DBO	SST	NT	PT
($K_{A,20}$ m/año)	117,00	43,40	10,00	9,10
Coefficiente de Arrhenius	1,06	1,00	1,05	1,09
T(°C)	14,00	14,00	14,00	14,00
K_A (corregido)	0,230	0,119	0,020	0,015

Fuente: Autores

3.2.2 Cálculo de la DBO efluente del humedal artificial

En los humedales artificiales superficiales y subsuperficiales ocurren procesos similares para la remoción de la DBO, pero en los humedales subsuperficiales el proceso tiene mayor eficiencia, debido a que el agua se encuentra sumergida, lo que incrementa el área específica de formación de biomasa (Lara, 1998). Para modelar el comportamiento de la DBO, se debe tener en cuenta que, al ser un sistema con especies vegetales, estas aportan materia orgánica al sistema representada en DBO, lo que implica que un humedal artificial no podrá entregar efluentes menores a 5-10 mg/L.

Modelo volumétrico propuesto por Reed SC, Crites RW y Middlebrooks.

$$\frac{C_e}{C_o} \exp(-K_R t) \text{ Ecuación (32)}$$

Para resolver la ecuación 32 primero se debe calcular la constante K_R , la cual se calculó mediante la ecuación 33.

$$K_R = K_0(37.31 * n^{4.4172}) \text{ Ecuación (33)}$$

$$K_R = 1.839(37.31 * 0.43^{4.4172}) = 1.649 \text{ d}^{-1}$$

Donde:

K_0 : Constante optima de remoción (1.839 d^{-1} para aguas residuales municipales)

K_R : Constante de remoción, d^{-1}

$$C_e = 192 * \exp(-1.649 * 2.12) = 5.82 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ Ecuación (32)}$$

$$\%E = \frac{192 - 5.82}{192} * 100 = 96.9\%$$

Sin embargo, la ecuación 32 es independiente de la temperatura, por lo que el resultado no está exento de error, por lo cual la ecuación 1 y 2 de Kadlec & Knight presentan los modelos K-C y K-C* donde se usa constante de velocidad de reacción de primer orden K_{vt} .

$$C_e = C_o * \text{Exp}(-K_{vt} * tn) \text{ Ecuación (1)}$$

$$C_e = 192 * \text{Exp}(-0.778 * 2.12) = 36.89 \frac{mg}{L}$$

$$\%E = \frac{192 - 36.89}{192} * 100 = 80.7\%$$

$$C_e = (C_o - C^*)\text{Exp}(-K_{vt} * tn) + C^* \text{ Ecuación (2)}$$

$$C_e = (192 - 3)\text{Exp}(-0.778 * 2.12) + 3 = 39.32 \frac{mg}{L}$$

$$\%E = \frac{192 - 39.32}{192} * 100 = 79.52\%$$

3.2.3 Calculo de SST efluente del humedal artificial

La ecuación de regresión lineal de Reed & Brown con datos obtenidos en humedales de Estados Unidos proporciona unas ecuaciones que pueden servir para estimar la concentración de SST a la salida del humedal. Estas ecuaciones sirven solamente para realizar la estimación de la concentración de SST en la descarga, pero no es recomendable usarlo como parámetro de diseño. Sin embargo, la ecuación da un estimado de la remoción de los SST, que sirve para tener una aproximación de la eficiencia del sistema, que es cercana al 90%.

Calculo de la carga hidráulica

$$q = \left(\frac{Q}{As}\right) \text{ Ecuación (28)}$$

$$q = \left(\frac{4.6}{37.59}\right) = 0.122 \frac{m}{d} = 12.23 \frac{cm}{d}$$

Calculo del efluente de SST

La ecuación 24 de acuerdo con Reed (2006) es válida para cargas orgánicas de entre 0.4 y 75 cm/d.

$$C_{e,SST} = 54(0.1058 + 0.0011(12.23)) = 6.43 \frac{mg}{L} \text{ Ecuación (24)}$$

$$\%E = \frac{54 - 6.43}{54} * 100 = 88.09\%$$

3.2.4 Calculo del NT efluente del humedal artificial

La remoción de nitrógeno es un proceso complicado de modelar, esto se debe a que el nitrógeno presenta variedad de formas en el agua. Como lo es el amoniaco, los nitritos y los nitratos, nitrógeno orgánico etc. Es por eso que, para construir un

modelo, es recomendable según la EPA, 2000, asumir que todo el NTK (Nitrógeno total Kehdal) se encuentra en el humedal en forma de amoniaco, el amoniaco no ionizado según Lara (1998), es toxico en pequeñas proporciones para los peces, y la oxidación del amonio en la fuente hídrica receptora, reduce el oxígeno disuelto. Por esa razón, si la norma de vertimientos de cada país exige muy bajas concentraciones de NT, es recomendable modelar con base en la remoción de amoniaco.

Para modelar la remoción del NT, primero se calcula la constante de nitrificación, que depende de la penetración de las raíces, para el caso de este estudio la planta seleccionada es la *Typha Latifolia*, esta especie tiene una penetración media de sus raíces es mayor a 0.3 metros, y, por lo tanto, se asume que la ocupación de las raíces es del 80%. La ecuación 29 muestra el cálculo del coeficiente de nitrificación.

$$K_{NH} = 0.01854 + 0.3922(0.8^{2.6077}) = 0.2377 d^{-1} \quad \text{Ecuación (29)}$$

Luego se calculó la constante dependiente de la temperatura (K_T)

$$K_{T>10} = K_{NH}(1.048)^{(T-20)} \quad \text{Ecuación (30)}$$

$$K_{T>10} = 0.2377(1.048)^{(14-20)} = 0.1794 d^{-1}$$

Remoción de amoniaco vía nitrificación

La ecuación 1 determina la cantidad de amoniaco remanente ($C_{e,N}$), la cantidad de amoniaco oxidado que se asume como nitritos, se calculó con la diferencia entre C_o y C_e .

$$C_{e,N} = 49 * \text{Exp}(-0.1794 * 2.12) = 33.49 \frac{mg}{L} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Calculo del amoniaco oxidado

$$N - NO_3 = C_o - C_e$$

$$N - NO_3 = 49 - 33.49 = 15.50 \frac{mg}{L}$$

Donde:

N-NO₃: Nitratos

C_o: Concentración inicial de amonio, mg/L

C_e: Concentración final de amonio, mg/L

Desnitrificación

$$K_T = 1.00 * 1.15^{(T-20)}$$
$$K_T = 1.00 * 1.15^{(14-20)} = 0.432$$
$$C_e = C_o * \text{Exp}(-K_T * T_n) \quad \text{Ecuación (1)}$$
$$C_e = 15.50 * \text{Exp}(-0.432 * 2.12) = 6.20 \frac{mg}{L}$$

Donde:

C_e : Concentración de nitratos desnitrificados, mg/L

Concentración de NT en el efluente

$$NT = \text{Nitrificacion} + \text{Desnitrificacion} \quad \text{Ecuación (31)}$$

$$NT = 33.49 + 6.20 = 39.69$$

$$\%E = \frac{49 - 39.69}{49} * 100 = 19\%$$

Con la ecuación 23 de regresión lineal se puede calcular de manera directa el efluente de NT.

$$C_{e,N} = (0.52C_{O,N}) + 3,1 \quad \text{Ecuación (23)}$$

$$C_{e,N} = (0.52 * 49) + 3,1 = 28.58 \frac{mg}{L}$$

$$\%E = \frac{49 - 28.58}{49} * 100 = 41.67 \%$$

3.2.5 Calculo de PT efluente del humedal artificial

Los humedales artificiales, ya sean superficiales o subsuperficiales, tienen muy baja remoción del fósforo total. Sin embargo, Kadlec, basándose en los datos de la North American Data Base, construye una constante de primer orden para la remoción del fósforo (K_p), que equivale a 10 m/año.

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp\left(\frac{-K_p}{q}\right) \quad \text{Ecuación (32)}$$

$$C_e = 14 * \exp\left(\frac{-2.74}{12.23}\right) = 11.18 \frac{mg}{L}$$

$$\%E = \frac{14 - 11.18}{14} * 100 = 20.14 \%$$

Donde:

K_p : Constante de remoción de primer orden, cm/día

q : Carga hidráulica, cm/día

3.3 Selección de la especie vegetal

3.3.1 Características de la especie *Typha latifolia*

La especie vegetal *Typha latifolia*, también conocida como espadaña, pertenece a la familia de las Typhaceae, son plantas herbáceas (con tallo subterráneo de varias yemas, que crece de manera horizontal emitiendo raíces y nuevos brotes), con largas hojas verdes y flores de forma de salchicha en su parte apical. En su estado adulto alcanzan alturas entre 3.5–4.0 m.

Las especies de *Typha* siempre se encuentran en la orilla cerca del agua, en pantanos, pozos y lagos. Son plantas indicadoras por excelencia de la salud de los humedales. Pueden tolerar inundaciones estacionales, pobres condiciones de suelo y salinidad moderada. Con grandes afluentes de nutrientes o aguas naturales, las espadañas son invasoras agresivas (USDA-NRCS, 2006). Su distribución en el mundo va desde las zonas boreales hasta las zonas tropicales. La planta puede producir de cientos a miles de semillas que son eficientemente dispersadas y germinan en suelos escasamente húmedos o en aguas muy superficiales.

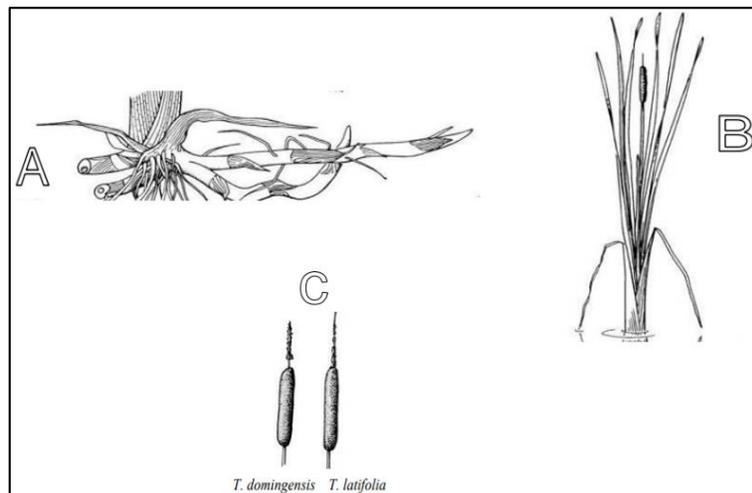


Ilustración 20. Características morfológicas de (A) raíz, (B) hojas y (C) flores de las plantas de *Typha* (*domingensis* y *latifolia*)

Fuente: (IFAS, 1990)

La especie *Typha* se ha utilizado en la preservación de hábitats y en la restauración de humedales. Sin embargo, el uso de esta planta en sistemas acuáticos preservados puede favorecer la invasión de canales, reservorios, campos de cultivos, etc. La planta puede producir efectos nocivos en lagos con fines de recreación, reducir la biodiversidad y desplazar especies deseables en ciertos hábitats (Smith, 2009).

En la tabla 14 se presenta el tratamiento que realiza la especie *typha latifolia* en el agua residual generada en la institución universitaria Colegio Mayor de Antioquia. En esta institución se realizaron los análisis finales de los efluentes obtenidos para las especies T. latifolia y C. papyrus, donde la especie T. latifolia obtuvo mejores resultados en cuanto a eficiencia en la remoción de los contaminantes DBO, SST, PT, NT y nitrógeno amoniacal (NH₄).

Tabla 14. Características del agua residual tratada con la *Typha latifolia*

Parámetro	Unidad	Agua residual no tratada	Agua tratada (T.latifolia)	Agua tratada (C. papyrus)	Limite	Método
DBO ₅	ppm	255	42,8	43,5	200	Prueba DBO ₅
Fosforo Total	ppm	13,2	0,376	0.542	5	Ácido ascórbico
Solidos suspendidos totales	ppm	538	247	682,5		Secados (103 - 105 °C)
Nitrógeno total	ppm	202,2	86,2	90,3	20	Macro-Kjeldahl
Nitrógeno amoniacal	ppm	54,9	23,7	37,5	10	Macro-Kjeldahl

Fuente: Bedoya , 2014

3.4 Calculo del diámetro interno de la tubería

Para el cálculo del diámetro interno de la tubería los modelos más utilizados son el de Manning, Chèzy o Bassin. La ecuación de Manning (ecuación 33) se usa a nivel general debido a su simplicidad y facilidad de empleo.

Tabla 15. Coeficiente de rugosidad de Manning

Material	Coeficiente de Manning (n)
Asbesto cemento	0.011
Hierro fundido (nuevo)	0.012
Concreto simple	0.013
Plomo	0.011
Plástico (PVC)	0.009
Vidrio	0.011

Fuente: Computer Applications in hydraulic engineering

$$Q = \frac{AR^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}}}{n} \text{ Ecuación (33)}$$

Donde:

Q: Caudal, m³/s

A: Área de la sección de flujo, m²

R: radio hidráulico (A/P = D/4)

P: Perímetro mojado, m

D: Diámetro interno real de la tubería, m

S: Pendiente de la línea de energía, m/m

n: Coeficiente de rugosidad de Manning (tabla 15), Adimensional

Expresando la ecuación en términos del diámetro interno

$$Q = 0.312 * \left(\frac{D^{\frac{8}{3}}S^{\frac{1}{2}}}{n} \right) \text{ Ecuación (34)}$$

Despejando el diámetro de la tubería

$$D = 1.548 * \left(\frac{n*Q}{S^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{8}} \text{ Ecuación (35)}$$

Resolviendo la ecuación se obtiene:

$$D = 1.548 * \left(\frac{0.009 * 0.0000528}{0.005^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{8}} = 0.0177 \text{ m} = 17.7 \text{ mm} = 0.70''$$

Al calcular el diámetro de la tubería se tiene que seleccionar el diámetro comercial superior. Por lo tanto, se selecciona una tubería de PVC de 1 ½", se selecciona PVC debido a sus ventajas frente a otros materiales, algunas de ellas son que este material no se oxida, ni se corroe, su menor peso lo convierte en un material fácil de transporta y es más económico que el hierro o el asbesto. Las tuberías PVC contribuyen con la sostenibilidad del medio ambiente debido a que son construida con material reciclable (Aristegui Maquinaria, 2015).

3.5 Resumen de los resultados del diseño

La tabla 16 presenta los resultados obtenidos con las ecuaciones propuestas por la EPA, con los cuales se hará el análisis de costos.

Tabla 16. Diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSSH)

PARAMETRO	UNIDADES	RESULTADO
Área superficial (A_s)	m^2	37.59
Ancho del humedal (W)	m	1.41
Longitud del humedal (L)	m	26.65
Área de tratamiento inicial	m^2	11.30
Área de tratamiento final	m^2	26.39
Profundidad promedio del sistema	m	0.6
Pendiente del lecho	%	0.5
Perdida de carga en la zona final de tratamiento	m	0.014
Tiempo de retención hidráulica	Días	2.12
Número de macrófitas requeridas	No.	11
Volumen estimado del material del lecho	m^3	29.3
Diámetro de tubería	Pulgadas	1 ½
Longitud de la zona inicial de tratamiento	m	8
Longitud de la zona final de tratamiento	m	18.65
Perdida de carga en la zona inicial de tratamiento	m	0.06

Fuente: Autores

La ilustración 21 presenta la vista de perfil del diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, donde se muestran los valores de las elevaciones del agua al inicio de la zona inicial, al inicio de la zona final y a la salida del humedal, D_{wo} , D_{wf} Y D_{we} respectivamente, igualmente se muestra el valor D_{wm} , que indica la distancia recomendada entre la superficie del agua y la superficie del lecho. Finalmente, se presenta la longitud inicial, final y total.

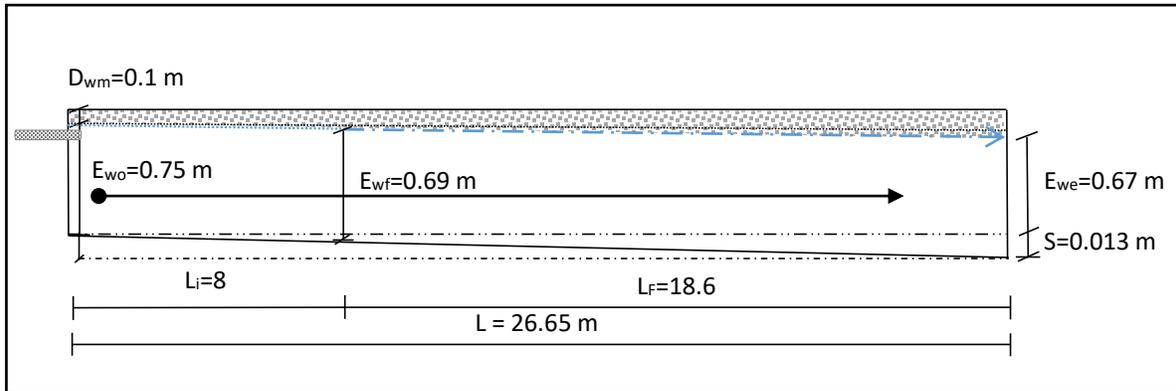


Ilustración 21. Diseño del humedal artificial de flujo horizontal

Fuente: Autores

3.6 Modelo conceptual

Para la modelación del humedal artificial diseñado, se tiene un volumen de control definido, que involucra el flujo de agua y el lecho filtrante.

En esta fase los investigadores identifican los elementos fundamentales que se van a modelar y las interacciones entre estos.



Ilustración 22 Modelo conceptual de un humedal artificial

Fuente: Adaptado de Flechas, 2013

La ilustración 22 muestra el esquema del humedal artificial que se va a modelar en el cual están involucrados los procesos físicos, químicos y biológicos, que dan base a la construcción del modelo matemático.

Dentro del esquema no se presentan las variables externas, que son las variables que se añadirán al sistema en el modelo mecanicista, estas variables son:

- Caudal
- Conductividad hidráulica
- Porosidad
- Evapotranspiración
- Concentración de DBO
- Concentración de NTK
- Concentración de PT

Para la estructura del modelo se cuenta con las siguientes variables de estado:

- Conductividad hidráulica
- Cabezas hidráulicas

3.7 Método de modelación

La modelación del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal se realizó con el software Modelmuse, un visualizador que incluye el modelo de flujo de aguas subterráneas y superficiales MODFLOW 6, PMPATH y el modelo de transporte de contaminantes MT3DMS.

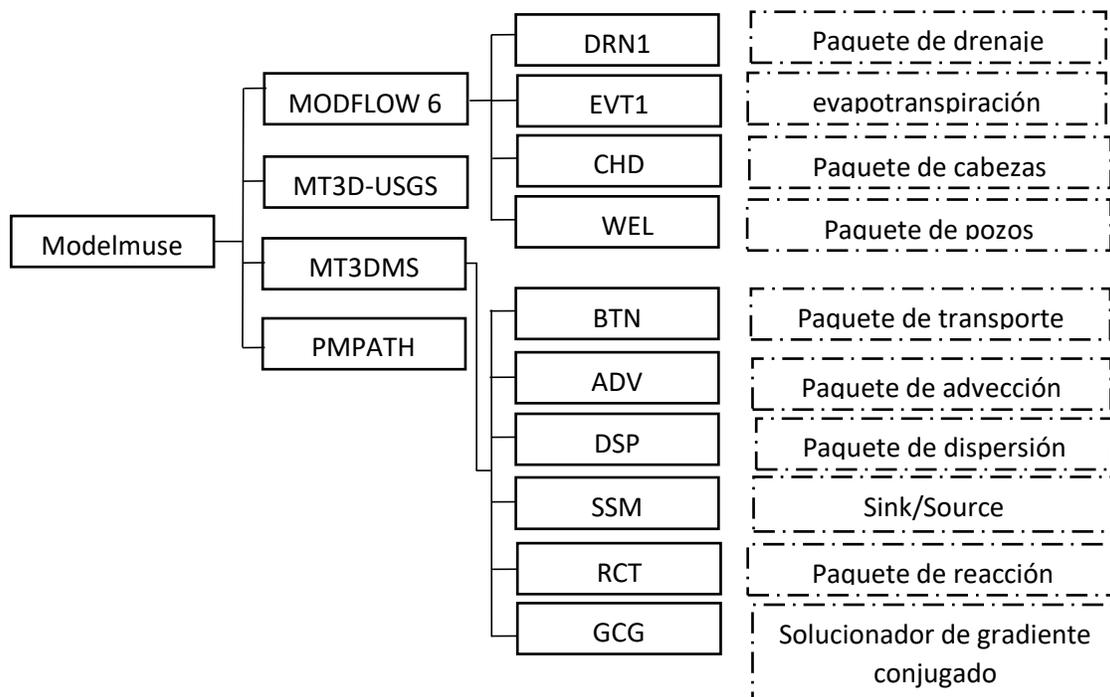


Ilustración 23. Paquetes activados en el software Modelmuse para la modelación del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal

Fuente: Autores

3.8 Descripción del software Modelmuse

Modelmuse es un software relativamente nuevo que fue desarrollado en 2006, y diseñado para ser una interfaz gráfica para los programas ya desarrollados MODFLOW-2005 y PHAST.

El programa permite la creación de modelos 3-D de sistemas de agua subterránea. Modelmuse está basado en un sistema grillas para definir el área y las capas, lo que permite al usuario definir el tamaño del acuífero o sistema de aguas subterráneas, así como también el número de capas, que pueden ser de composición variada como por ejemplo tener 1 capa con limo arcilloso, otra capa de grava, otra capa de limo arenoso etc.

Modelmuse incluye múltiples paquetes de extensiones, lo que permite al usuario seleccionar el paquete que mejor le convenga para su estudio, algunos de los paquetes incluyen:

Modflow

Modflow permite el modelamiento del flujo de agua en un sistema de agua superficial o subterránea, con el paquete CHD se puede modelar las cabezas hidráulicas, y ver su variación a lo largo del tiempo.

MT3DMS

Con MT3DMS se puede modelar el transporte de contaminantes mediante la activación de los paquetes ADV, BTN, DSP, y RCT, los cuales engloban la mayoría de los procesos de remoción físicos y químicos que ocurren dentro de un humedal artificial.

MODPATH

MODPATH es un modelo de seguimiento de partículas que se ejecuta en Windows, a partir de los resultados generados en el modelo de flujo, para calcular las trayectorias de las aguas subterráneas y tiempos de viaje, utilizando un sistema de seguimiento de partículas semianalítico (Pollock, 1.988; Flechas, 2013).

3.8.1 Parámetros del modelo

Conductividad hidráulica.

La conductividad hidráulica es un parámetro importante en la modelación de agua superficial o subterránea, de ella depende en gran parte la velocidad del flujo a través del sistema. En Modflow existen 3 tipos de conductividad hidráulica, K_x , que se refiere a la conductividad hidráulica horizontal, K_y , que se refiere a la conductividad hidráulica transversal, y K_z que se refiere a la conductividad hidráulica vertical. Dado que el humedal artificial modelado solo cuenta con una capa de grava,

modflow solo exige que se inserte el valor de K_x , dicho valor se puede obtener con ecuaciones del manual de la EPA y también de tablas con características hidráulicas de lechos filtrantes.

Porosidad

La porosidad fue seleccionada en 42% de acuerdo con los rangos establecidos para un lecho gravoso con diámetros de partícula entre 10 y 40 mm (EPA, 1999^a; EPA, 2000; Kadlec & Knight, 1999; Kadlec & Wallace, 2009).

Modelo de flujo

De acuerdo con el modelo conceptual planteado se seleccionaron los paquetes que aplican a la modelación del humedal, entre los cuales se encuentra el drenaje (DRN1) que modela el efluente del humedal, donde se usó un valor de conductancia de 0.01. Se usó el paquete WELL, que modela el afluente del humedal, en el cual se asignó un valor de $4.57 \text{ m}^3/\text{d}$.

Construcción de la grilla y condiciones de borde en el modelo

Teniendo los datos iniciales de la Tabla 16. Diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSSH), los resultados de la solución de las ecuaciones de la EPA y los modelos de primer orden, se inició la construcción del modelo, empezando por la grilla.

Para la creación de la grilla se configuro un numero de columnas de 26 y un numero de filas de 1. Se asignó solo una capa debido a que el humedal artificial solo cuenta con una capa de grava. El tope del modelo se asignó a 0.8 m y el fondo del modelo se asignó en 0.

Luego de definir la grilla se realizó una discretización espacial, para aumentar el rango de precisión del modelo. Donde se discretizo la fila inicial en 10 filas más.

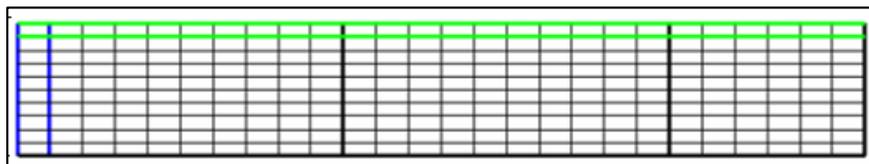


Ilustración 24. Vista superior de la grilla definida para el HAFSS

Fuente: Autores

Luego de obtenida la grilla se efectuó la construcción de la pendiente del HAFSS, donde se usó la función de interpolación de vértices integrada en Modelmuse.

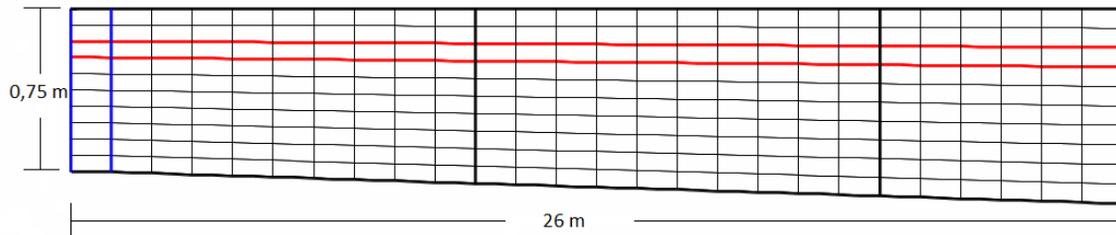


Ilustración 25. *Vista transversal de la grilla del HAFSS*

Fuente: Autores

Teniendo configurada la grilla, se configura el tipo capa que se quiere modelar, para el caso del humedal, subsuperficial, se configuro como un acuífero semiconfinado, para lo cual se seleccionó la opción convertible, lo que quiere decir que en cualquier tiempo de la modelación la celda puede variar de estado seco a estado húmedo.

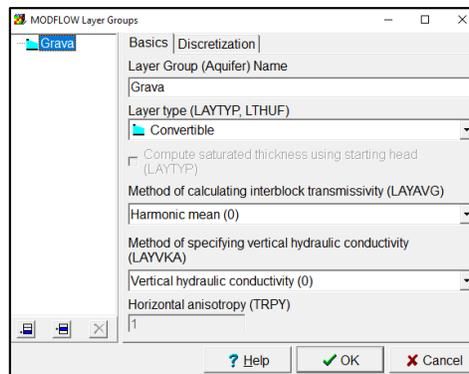


Ilustración 26. *Propiedades de la capa de grava en el software Modelmouse*

Fuente: Autores

Condiciones iniciales y de borde

Modflow solicita que se indiquen las condiciones de borde. Para el humedal artificial se activó la condición CHD (Constant Head Boundary), la cual permite ubicar puntos en el humedal donde la cabeza hidráulica es constante, dichos puntos fueron calculados con las ecuaciones 19, 20 y 21, que representan los valores de elevación del agua a lo largo del humedal, para lo cual la condición de borde CHD al inicio del sistema es de 0.7532 m y la condición de borde del otro extremo es de 0.6792 m.

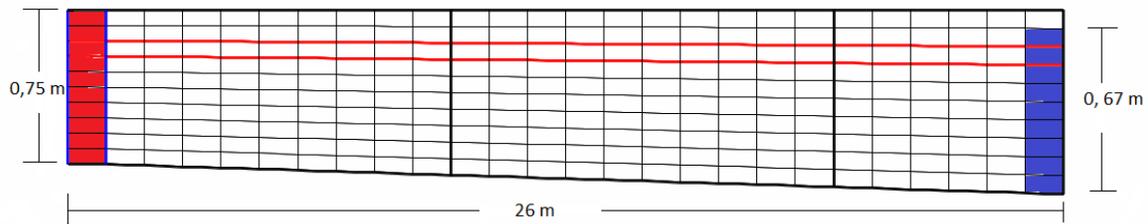


Ilustración 27. Condición de borde CHD oeste (Rojo) y condición de borde CHD este en Azul

Fuente: Autores

El siguiente paso es simular las condiciones de entrada y salida del humedal artificial, para esto se activan los paquetes DRN y WELL del Modflow, el paquete WELL permite simular un pozo de inyección o extracción de agua, y el paquete DRN permite la simulación de un sistema de drenaje. La ilustración 28 muestra el pozo de inyección a la izquierda, con un caudal de entrada de $4.57 \text{ m}^3/\text{d}$ y a la derecha se muestra el drenaje.

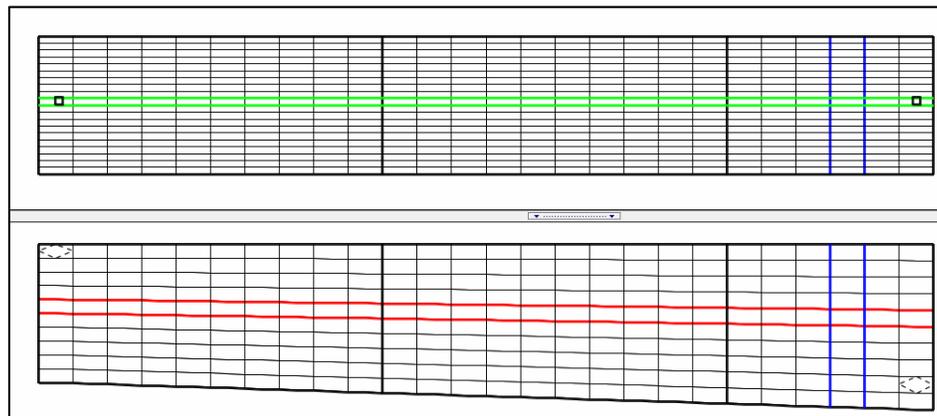


Ilustración 28. Definición de condiciones de borde para paquetes WEL Y DRN

Fuente: Autores

El último paso antes de ejecutar el modelo es activar los paquetes de MT3DMS para modelar el transporte de contaminantes, por lo cual se activa el paquete BTN, ADV, DSP, SSM, RCT Y GCG anteriormente mencionados. Con el paquete básico BTN se puede introducir el número de especies que se quieren modelar que, para el caso, fue la DBO, SST, NT Y PT.

Advección

En el paquete de advección se usó el esquema de solución Third-order TVD (ultimate).

Difusión y dispersión

Los datos de difusión y dispersión son muy difíciles de obtener empíricamente, dado que dependen de muchos factores, por lo cual se deben hacer ensayos con trazadores, para obtener un valor cercano. Los valores de difusión y dispersión son valores que, para estudios experimentales, pueden asumirse de acuerdo con la literatura, dado que los datos exactos de los valores de estos dos parámetros deben ser analizados en laboratorio para cada tipo de medio filtrante y características del agua que se desea tratar. Gianna M. Cothren en su estudio Longitudinal Dispersion and Interstitial Velocity Relationship in Subsurface Flow Constructed Wetlands presenta la dependencia del porcentaje de remoción de la DBO con respecto al coeficiente de dispersión, cuyos valores se muestran en la tabla 17. Dado que la eficiencia en remoción de DBO calculada con las ecuaciones de primer orden está en el rango de 80-90%, se podría seleccionar un coeficiente de dispersión de 0.833 m²/h, sin embargo, para obtener un dato de dispersión más preciso, es necesario hallar la dispersión mecánica longitudinal.

Tabla 17. Remoción de DBO en función del coeficiente de dispersión

D _s m ² /h	C _e /C _o	% Remoción
0.833	0.167	83.3
1.667	0.179	82.1
2.5	0.190	81.0
3.333	0.200	80.0
4.0	0.208	79.2
10.0	0.264	73.6
15	0.30	70.0

Fuente: Cothren, G (1996)

La capacidad de un medio poroso para dispersar mecánicamente un fluido se conoce como coeficiente de dispersividad dinámica (α) (Sánchez s.f), este coeficiente se refleja con la ecuación 36 propuesta por Xu & Ekstein, citados en Fetter (1999), que se obtuvo a través de datos empíricos, donde se elaboraron diversas relaciones entre la dispersividad dinámica longitudinal y la longitud recorrida por el flujo.

$$\alpha = 0.83 (\text{Log}(L))^{2.414} \quad \text{Ecuación (36)}$$

$$\alpha = 0.83 (\text{Log}(26))^{2.414} = 1.91 \text{ m}$$

Para calcular el coeficiente de dispersión mecánica, se requiere hallar primero la velocidad lineal media (V_L), la cual se consigue con la velocidad de Darcy (v) en la ecuación 37 y 38.

$$v = \frac{q}{w*y} \quad \text{Ecuación (37)}$$

$$v = \frac{4.57}{1.41 * 0.6} = 5.22 \frac{m}{d} = 0.0000625 \frac{m}{s}$$

$$V_l = \frac{v}{n} \quad \text{Ecuación (38)}$$

$$V_l = \frac{0.0000603}{0.42} = 0.00014 \frac{m}{s}$$

Donde:

V: Velocidad de Darcy, L/t

V_L: Velocidad lineal media, L/t

Con la ecuación 39 se calcula el coeficiente de dispersión mecánica longitudinal que se utilizó en la modelación del humedal artificial.

$$D_l = \alpha * V_l \quad \text{Ecuación (39)}$$

$$D_l = 1.918 * 0.00014 = 0.00027 \frac{m^2}{s}$$

Donde:

D_L: Dispersión mecánica longitudinal, L²/t

Reacciones químicas

Para evaluar la remoción de contaminantes en el humedal artificial, se realizó la modelación de la variación de concentraciones de DBO, SST, NT Y PT, determinando inicialmente las constantes cinéticas de degradación a partir de las ecuaciones de primer orden, las cuales se presentan en la tabla 13.

La demanda bioquímica de oxígeno - DBO₅, este parámetro corresponde a una medida del consumo de oxígeno de los microorganismos en la oxidación de la materia orgánica (Kadlec & Wallace, 2.009), por lo que solo se modela el proceso de biodegradación, sin presentarse procesos de absorción o adsorción.

El nitrógeno total, se subdivide en varias especies, como lo son el amonio, el amoniaco, los nitritos, los nitritos, entre muchas otras más. Para efectos de la modelación se simulo que el nitrógeno total entra al humedal en forma de amonio, el cual está sometido a procesos físicos y biológicos que influyen en su degradación. Para modelar uno de los procesos químicos como lo es la Sorción, se requiere de una isoterma de Sorción lineal, que según Kadlec & Wallace (2009) se representa en el coeficiente de distribución (Kd) y que corresponde a 0.000083 m³/kg.

El fosforo total, al igual que el NT se subdivide en diversas especies, como lo son los fosfatos, orto-fosfatos, fosforo orgánico, fosforo inorgánico, etc. Para efectos de

la modelación no se modeló cada especie por separado, debido a la falta de información para cada subdivisión. Por lo cual solo se modeló los procesos de Sorción del PT, donde este es sorbido por el medio poroso y las raíces.

Al igual que el NT para la modelación del fosforo total se necesitan de isothermas de Sorción, que se representan según Kadlec & Wallace (2009) en la concentración máxima de fosforo sorbido (S_{max}) en mg P/Kg de sólido y $1/k$ que es la constante media de saturación, estos valores corresponden a 5.21 mg/kg y 0.22 l/kg respectivamente.

3.9 Validación del software

Para dar veracidad a los resultados obtenidos con la modelación mediante software, se validó el modelo, simulando las condiciones hidráulicas de un humedal artificial construido, a partir de un trabajo de grado publicado por López y Rodríguez, 2016 en la Universidad de La Salle. En la investigación, las ingenieras ambientales y sanitarias diseñaron, construyeron y evaluaron un humedal artificial de flujo sub superficial horizontal, en el cual obtuvieron las siguientes condiciones hidráulicas y de calidad de agua (tabla 18).

Tabla 18. *Diseño hidráulico y características del agua residual* López y Rodríguez (2016)

Parámetro	Unidad	Valor
Tipo de lecho		Grava fina
Profundidad efectiva	m	0.65
Profundidad total	m	1
Largo del humedal	m	4
Ancho del humedal	m	2
Área superficial	m ²	8
Tiempo de retención	Días	3
Pendiente	Adimensional	0.008
Caudal	m ³ /d	0.0621
Conductividad	m ³ /m ² *d	3000
Porosidad	Adimensional	0.38
DBO afluente	mg/L	475
SST afluente	mg/L	256
PT afluente	mg/L	21
Macrófitas	Cantidad	12

Fuente: López y Rodríguez (2016)

Los resultados que obtuvieron con el diseño del HAFSSH muestran eficiencias superiores al 60%, y a las cuales se debe llegar con la modelación mediante

software. Los efluentes del HAFSSH y la eficiencia en la remoción que obtuvieron con el humedal artificial se presentan en la tabla 19, donde se listan los métodos analíticos que utilizaron para su determinación.

Tabla 19. Resultados obtenidos con el HAFSSH (López y Rodríguez (2016))

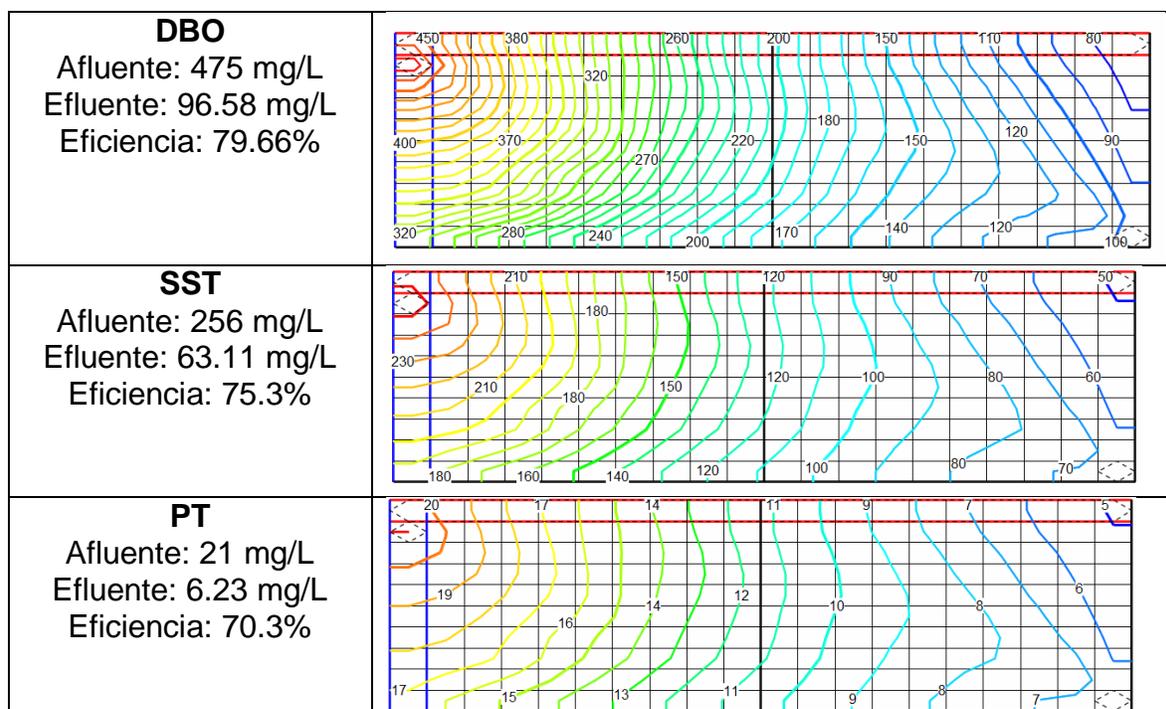
Parámetros	Muestra 2	Unidad	Método	Técnica analítica	Remoción (%)
DBO ₅	90,88	mg/L O ₂	SM5210B , 4500 O-C	Incubación 5 días	80,8
Fósforo Total (P)	8,468	mg/L	SM 4500-P B, D	Ácido vanadomolibdofo sfórico	60,2
SST	64	mg/L	SM 2540 D	Gravimetría	75,0

Fuente: López y Rodríguez (2016)

3.9.1 Validación con Modelmuse

Mediante el software Modelmuse y los paquetes Modflow y MT3DMS se simularon todas las condiciones hidráulicas que diseñaron López y Rodríguez (2016), dicha simulación arrojó los siguientes resultados:

Tabla 20. Simulación con Modelmuse del HAFSSH de López y Rodríguez (2016)



Nota: Las imágenes presentan las isocóncntraciones dentro del modelo de flujo. Fuente: Autores

3.9.2 Comparación de resultados

La tabla 21 muestra los resultados finales obtenidos en la simulación del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal diseñado por López y Rodríguez (2016), en el cual se observa que los porcentajes de remoción.

Ya que se desea saber la eficiencia del modelo para simular el humedal artificial, se calcula el error experimental, que se define como la desviación del valor medido de una magnitud física respecto al valor real de dicha magnitud. Dicho error se calcula con la ecuación 40 y se presenta en la tabla 21.

$$\varepsilon_{ab} = \bar{x} - x_i \quad \text{Ecuación (40)}$$

Donde:

\bar{x} : Valor medido

x_i : Valor real

Tabla 21. Resultados de la simulación vs resultados reales del HAFSSH López y Rodríguez (2016)

Parámetro	Simulación		Datos reales	
	Concentración (mg/l)	Eficiencia (%)	Real (mg/L)	Eficiencia (%)
DBO	96.58 ± 5.7	79.66	90.88	80.8
PT	6.23 ± 2.23	70.3	8.468	60.2
SST	63.11 ± 0.89	75.3	64	75.0

Nota: El error experimental se presenta con el símbolo (±) que indica el rango de error en la variable simulada.

Fuente: Autores

Como lo evidencia la tabla 21, la simulación fue precisa para los parámetros DBO y SST, que obtuvieron eficiencias similares a los datos reales con diferencias poco significativas. La excepción fue la modelación del fósforo total, el cual presenta una significativa discrepancia. Las discrepancias se deben a la baja concentración afluente que presenta el fósforo total, para la cual el software tiene poca precisión, añadiendo el hecho de que el fósforo es un parámetro cuya remoción depende de las especies vegetales usadas, y la temperatura del agua en los humedales artificiales, por ende, las constantes de reacción cinética pueden variar de acuerdo a las condiciones hidráulicas de cada tipo de humedal.

Considerando lo anterior, y teniendo en cuenta que las constantes cinéticas de reacción de primer orden de la presente investigación fueron calculadas específicamente para las condiciones ambientales del municipio de Facatativá, se da como validado el modelo, lo que indica que es un sistema confiable con bajo porcentaje de error.

3.10 Algoritmos de solución del modelo en Modelmuse

3.10.1 Algoritmo de solución del modelo de flujo

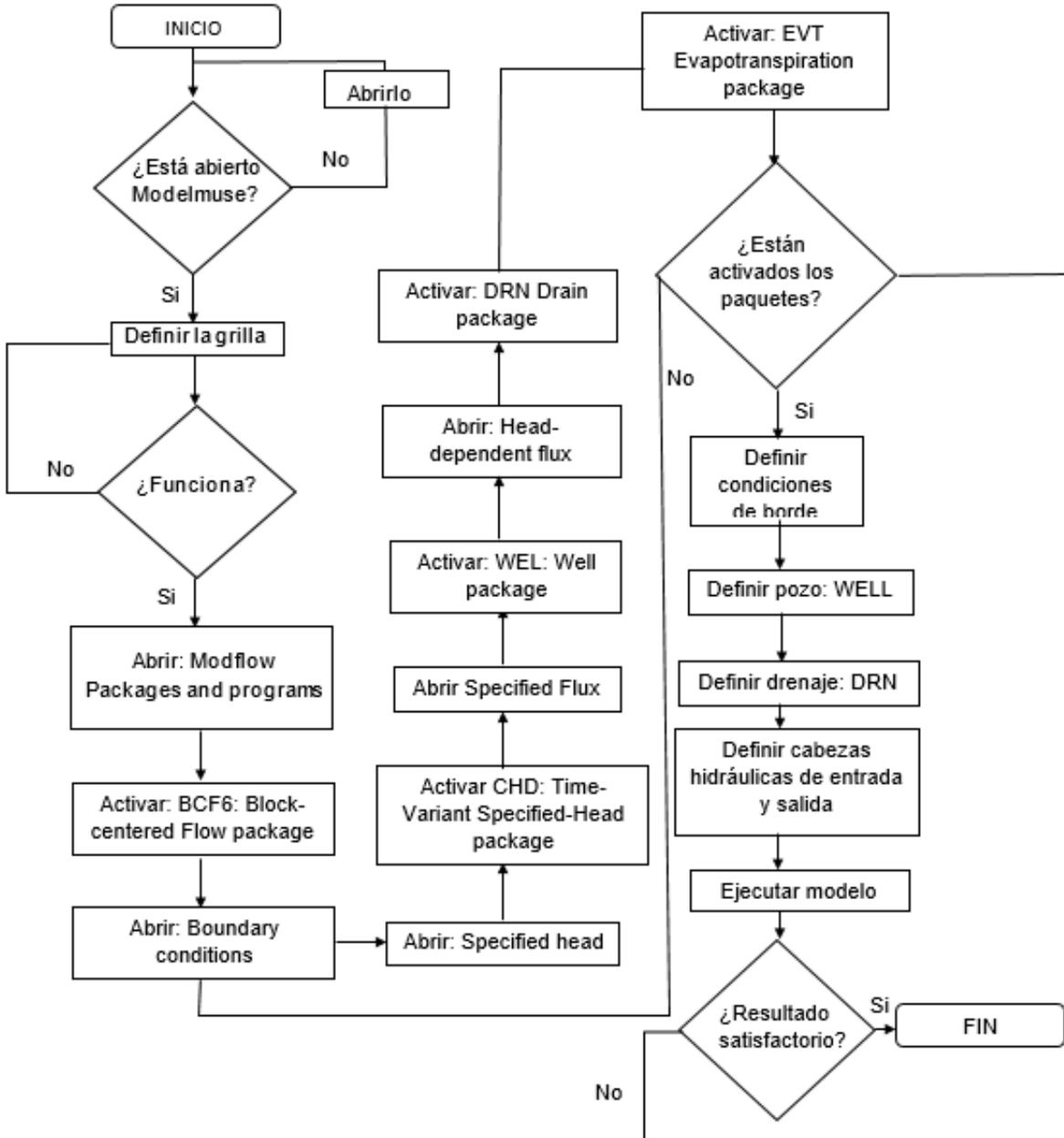


Ilustración 29. Algoritmo de solución del modelo de flujo

Fuente: Autores

3.10.2 Algoritmo de solución del modelo de transporte de contaminantes

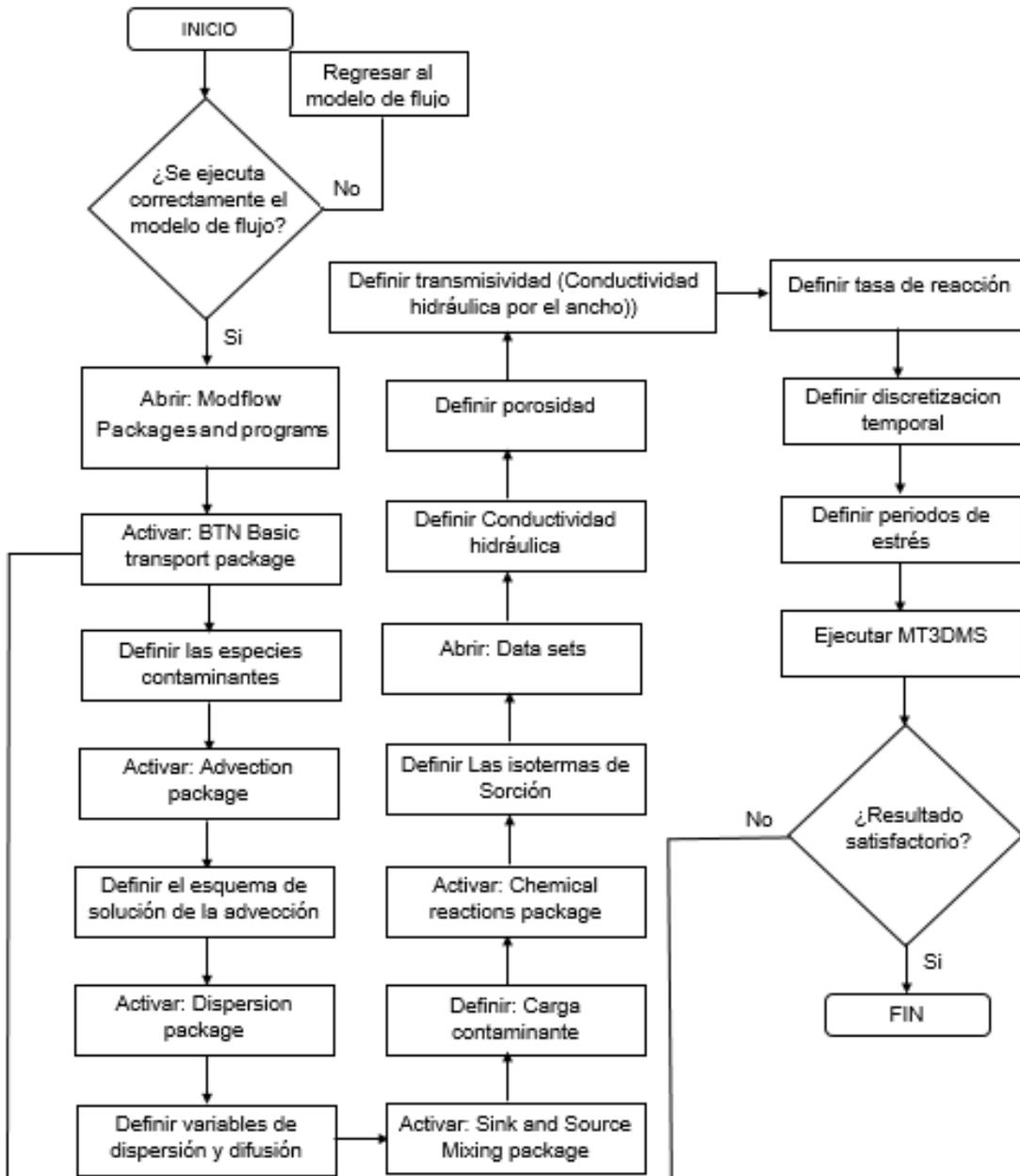


Ilustración 30. Algoritmo de solución del modelo de transporte de contaminantes.

Fuente: Autores

4. RESULTADOS Y ANALISIS

4.1 Resultados de los modelos mecanicistas

El objetivo de la modelación mediante ecuaciones de primer orden, y mediante el software Modelmuse, fue comprobar que el humedal artificial de flujo subsuperficial que se diseñó con las ecuaciones propuestas por la EPA, es óptimo para el tratamiento de aguas residuales veredales, los primeros resultados que se obtuvieron fueron los calculados mediante las ecuaciones de primer orden propuestas por Kadlec & Wallace (2009) La tabla 22 presenta los afluentes y efluentes que se obtuvieron, donde se observan altos porcentajes de eficiencia en la remoción de la DBO y los sólidos suspendidos totales, y muy bajos porcentajes de eficiencia en la remoción del nitrógeno total y fosforo total. De los 4 parámetros modelados, el 100% de estos obtuvieron porcentajes de eficiencia cercanos o iguales a los esperados para los humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Tabla 22. Resultados obtenidos con los modelos mecanicistas

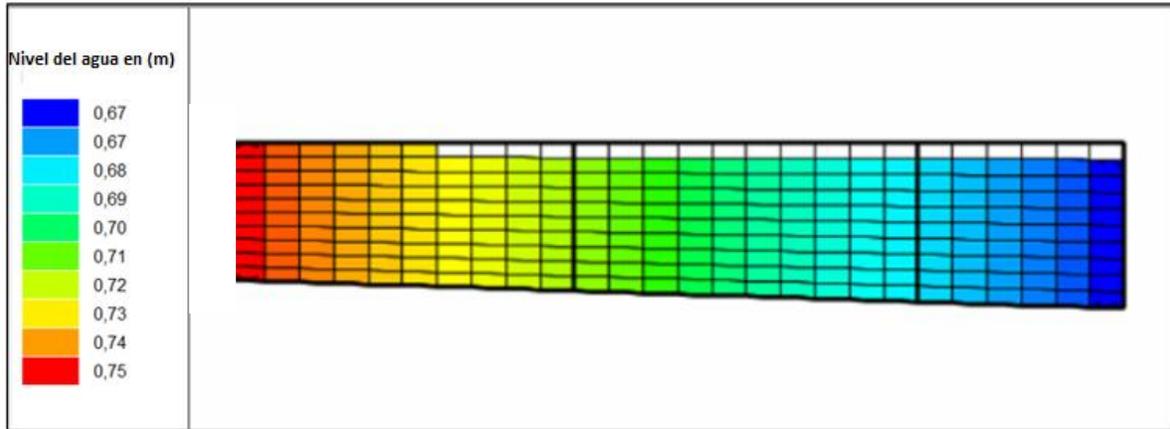
Parámetro	Metodología	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiencia (%)
DBO	Modelo volumétrico (Reed SC, Crites RW & Middlebrooks)	192	5.82	96.9
	Modelo K-C de Kadlec		36.89	80.7
	Modelo K-C* de Kadlec		39.32	79.52
SST	Regresión lineal (Reed, 2006)	54	6.43	88.09
NT	Modelo de Kadlec	49	39.69	19
	Regresión lineal (Reed, 2006)		28.58	41.67
PT	Modelo de Kadlec	14	11.18	20.14

Fuente: Autores

4.2 Resultados de los modelos no mecanicistas

4.2.1 Cabeza hidráulica

Inicialmente se obtuvo los resultados de la variación de las cabezas hidráulicas a lo largo del humedal (ilustración 31), esto con el fin de obtener un valor o un perfil cercano a lo calculado con las ecuaciones del manual de la EPA, 2000.



31. Cabezas hidráulicas en el HAFSSH

Fuente: Autores

En la ilustración 32 se observa la pérdida del cabezal hidráulico en función de la longitud del humedal, en la cual se observa una pérdida de energía constante a lo largo del humedal.

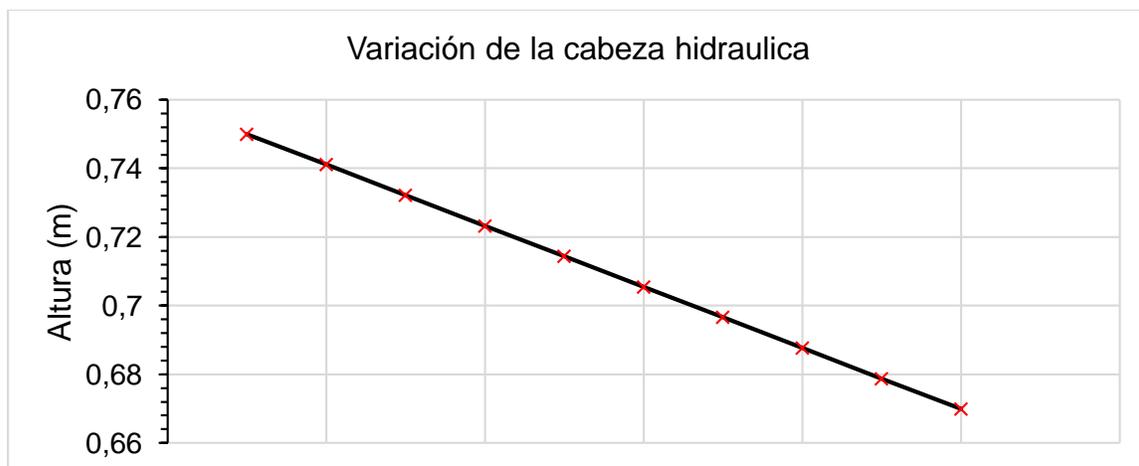


Ilustración 32. Perfil de la cabeza hidráulica modelada

Fuente: Autores

Teniendo la variación de las cabezas constantes, se puede observar la dirección del flujo, ya que el sentido del agua en la mayoría de los casos depende de cual extremo tiene más altura, y en este caso el extremo de más altura es el lado derecho con 0.75 m y el de menor altura es el lado izquierdo con 0.67 m.

Adicional a las cabezas hidráulicas, otro parámetro que determina la dirección del flujo, son los pozos, los drenajes y la pendiente. En esta investigación se simuló una entrada de agua a través de un pozo con altura de 0.75 m, al otro extremo se simuló un drenaje en la parte inferior de la pendiente del humedal. la ilustración 32 muestra la dirección del flujo que depende de la altura del pozo y la del drenaje.

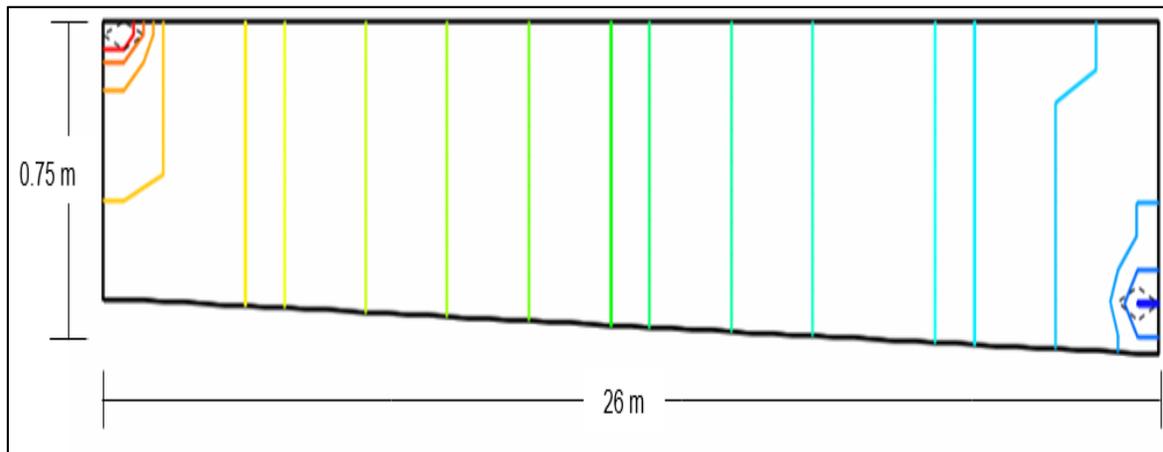


Ilustración 33. Dirección del flujo en el HAFSSH

Fuente: Autores

En cuanto al balance de masa, teniendo en cuenta que se simuló un pozo de inyección con caudal de $4.57 \text{ m}^3/\text{d}$, y un drenaje, se obtuvo el balance de masa, para corroborar que las condiciones de borde fueron correctamente planteadas, y que existe un flujo continuo.

La ilustración 34 presenta el formato de exportación de los datos del modelo de flujo que entrega el software Modelmuse, en el cual se evidencia que el porcentaje de discrepancia o error es del 0%, lo que indica que las ecuaciones fueron correctamente solucionadas por Modflow, y que el agua que está entrando a través del pozo de inyección, está saliendo por procesos de evapotranspiración, y por el drenaje.

IN:		IN:	
---		---	
STORAGE =	0.0000	STORAGE =	0.0000
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	31.9900	WELLS =	4.5700
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
ET =	0.0000	ET =	0.0000
TOTAL IN =	31.9900	TOTAL IN =	4.5700
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	0.0000	STORAGE =	0.0000
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
DRAINS =	31.4731	DRAINS =	4.4962
ET =	0.5169	ET =	7.3840E-02
TOTAL OUT =	31.9900	TOTAL OUT =	4.5700
IN - OUT =	1.9073E-06	IN - OUT =	0.0000
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00
TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP			
	1 IN	STRESS PERIOD	1
	SECONDS	HOURS	DAYS
	MINUTES		YEARS

TIME STEP LENGTH	6.04800E+05	10080.	168.00
			7.0000
			1.91650E-02

Ilustración 34. Balance de masa en el HAFSSH

Fuente: Autores

4.2.2 Modelo de transporte

Trayectoria de partículas simulada con MODPATH

Antes de iniciar con el modelo de transporte de contaminantes MT3DMS se activó el paquete MODPATH con el fin de tener una visualización preliminar, del comportamiento que tendrán las partículas contaminantes, este comportamiento depende de la dirección del flujo, del caudal, de la evapotranspiración, de la presencia de pozos, y de los drenajes.

En la ilustración 35 presenta la trayectoria de las partículas dentro del humedal artificial, en ella se observa el flujo laminar desde la inyección a la entrada del humedal, hasta la salida en el drenaje.

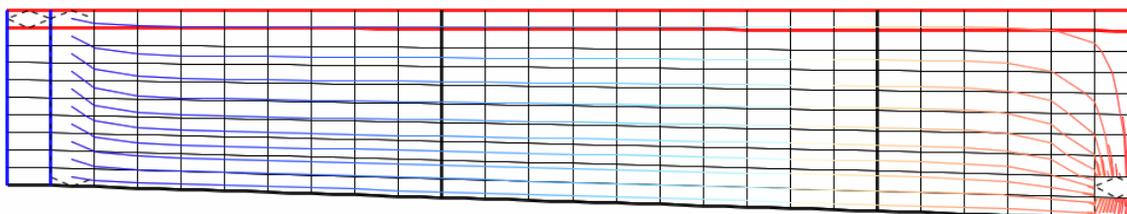


Ilustración 35. Trayectoria de partículas modelada con MODPATH

Fuente: Autores

4.2.3 Transporte y remoción de contaminantes

Demanda bioquímica de oxígeno.

Con las constantes de reacción de primer orden, se simuló el comportamiento de la DBO durante los 2.12 días de retención hidráulica que se calcularon. Con esta simulación se obtuvo los contornos de la degradación de DBO a lo largo del humedal.

La tabla 23 muestra la degradación de la DBO a lo largo del humedal artificial, en donde se muestran las isolíneas con un intervalo de degradación de 6 mg/L, y la cual muestra un efluente final de 30 mg/L y teniendo en cuenta que el afluente fue de 192 mg/L, se obtiene una eficiencia del 84 %. El humedal artificial se modeló bajo el supuesto de que la grava se encuentra limpia, por lo cual el flujo a lo largo del humedal es uniforme, teniendo en cuenta lo anterior la degradación de la DBO podría cambiar si se modelara el humedal asumiendo concentraciones de fondo, y diferentes conductividades hidráulicas.

Según la EPA, 2000 los humedales artificiales no pueden tratar la DBO hasta valores superiores al 90% de remoción dado que el material vegetal aporta materia orgánica al sistema, que incrementa la DBO, adicionalmente, la remoción de la DBO es muy dependiente de la temperatura, por lo que se pueden observar variaciones en las temporadas húmedas y secas, sin embargo, como se observa en la ilustración, la DBO disminuye de manera constante, es posible predecir que si el humedal es más ancho y/o largo, lograría una eficiencia mayor.

La degradación de la materia orgánica es aerobia en pequeños sitios de la superficie de las raíces, pero en el resto del lecho que está sumergido es anaerobia, mediante los procesos de fermentación mecánica y sulfato reducción (Lahora, 2001).

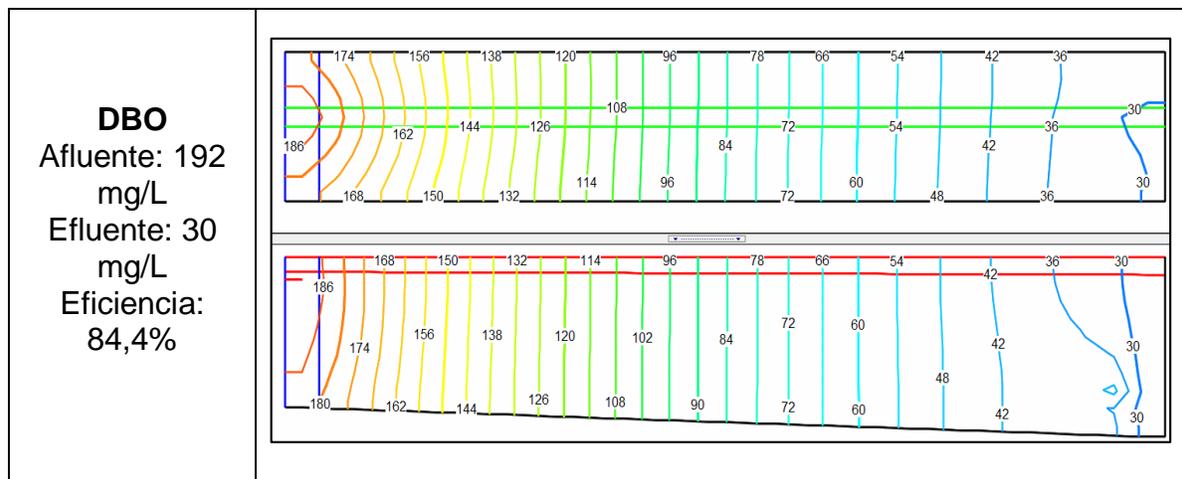


Tabla 23. Degradación bioquímica de la DBO expresado en mg/L en el HAFSSH vista superior y de perfil.

Fuente: Autores

La ilustración 36 muestra la tendencia lineal en la remoción de la DBO hasta los 12 metros de longitud, donde la remoción empieza a ser menor, además se evidencia la posibilidad de aumentar la eficiencia incrementando la longitud del humedal artificial. Calculando el promedio de remoción por metro de longitud, se obtiene que el humedal artificial remueve 6.54 mg/L por metro.

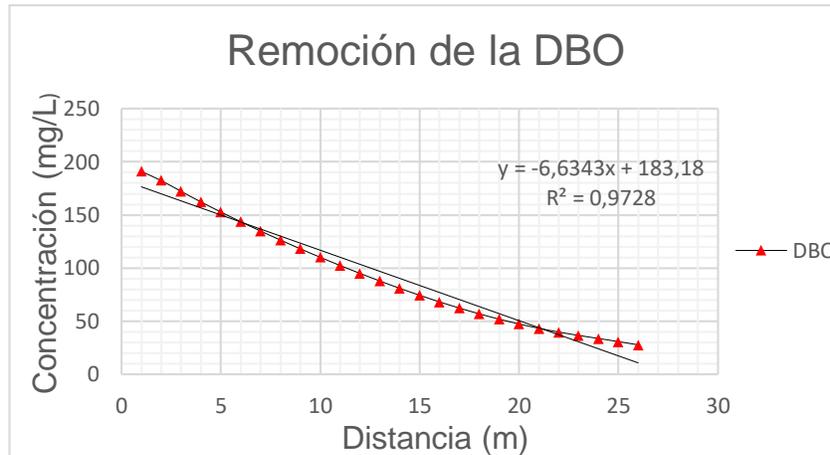


Ilustración 36. Remoción de la DBO en función de la longitud total.

Fuente: Autores

Nitrógeno total

Con respecto al nitrógeno total se observó un comportamiento muy cercano a los datos teóricos y reales obtenidos en diferentes estudios, ya que, como lo muestra la tabla 6 muestra la remoción esperada en un humedal artificial de flujo subsuperficial, horizontal está en el rango de 8 a 34%, y como se ve en la tabla 24, la remoción es del 36%. En los humedales subsuperficiales es menor la remoción del NT, debido a que, al no estar expuesto a la atmosfera, el oxígeno disuelto depende de la capacidad de las raíces para realizar su transferencia, y debido a que las reacciones de nitrificación necesitan abundante oxígeno, la producción de nitritos (NO_2) y Nitratos (NO_3) es reducida.

La remoción de nitrógeno se realiza de dos formas: nitrificación y desnitrificación, pero la reacción que predomina es la nitrificación; en esta, el ion amonio (NH_4) es oxidado a nitrito (NO_2) y posteriormente estos son oxidados a nitratos (NO_3) por las bacterias nitrificantes, como los géneros nitrosomonas y nitrobacter. La nitrificación ocurre bajo condiciones aerobias, por lo que esta reacción está determinada por la cantidad de oxígeno en el humedal que depende de la eficiencia con la cual las especies vegetales pueden transferir el oxígeno desde la atmósfera al interior del humedal.

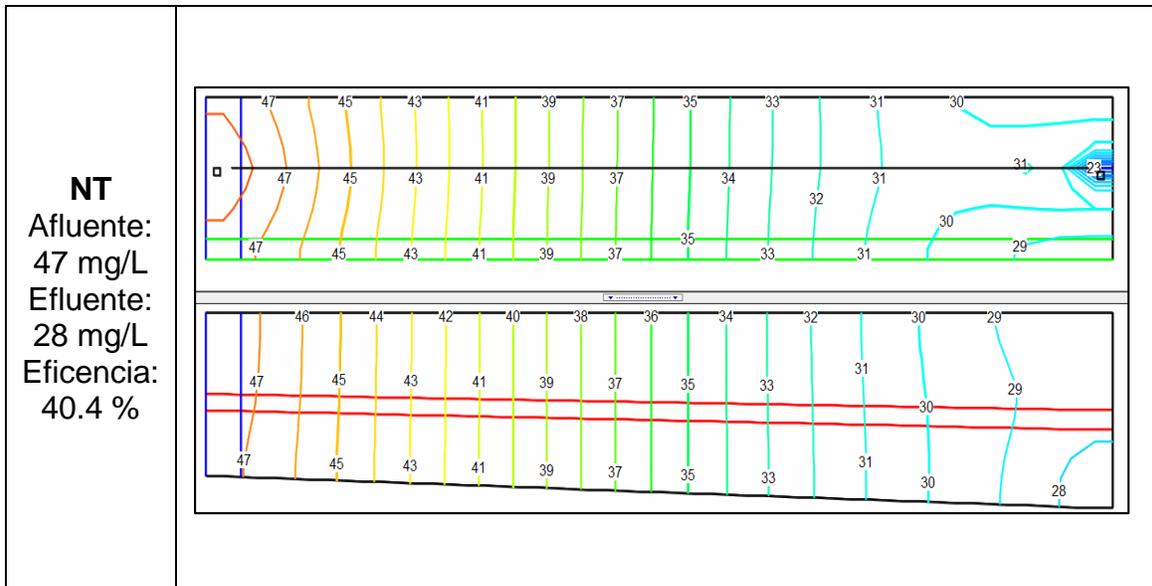


Tabla 24. Vista superior y de perfil. Remoción del Nitrógeno Total expresado en mg/L en el HAFSSH

Fuente: Autores

Analizando la ecuación 29, se concluye que la constante de nitrificación, y por lo tanto la eficiencia en la oxidación del amonio a nitrito depende en gran medida de la profundidad de la raíz, la especie *Typha latifolia* tiene una penetración de entre 0.3 m a 0.5 m, lo que indica que la nitrificación será mucho menor.

La ilustración 37 muestra el comportamiento del Nitrógeno total durante su recorrido por el humedal artificial, en esta se puede observar que el efluente final obtiene un valor de 28 mg/L, siendo el afluente de 47 mg/L obteniendo con esto una eficiencia de 42%. La eficiencia obtenida supera el rango de valores que se presentan en la tabla 6, aun teniendo en cuenta que la penetración de la raíz de la *Typha latifolia* no es del 100%. El valor obtenido se debe a factores tales como: La penetración de la raíz, la temperatura, la conductividad hidráulica y la dispersión dinámica longitudinal, los dos últimos son determinados por el tipo de lecho filtrante.

El promedio de remoción de NT por metro de longitud, obtenido en el humedal artificial modelado es de 0.73 mg/L.

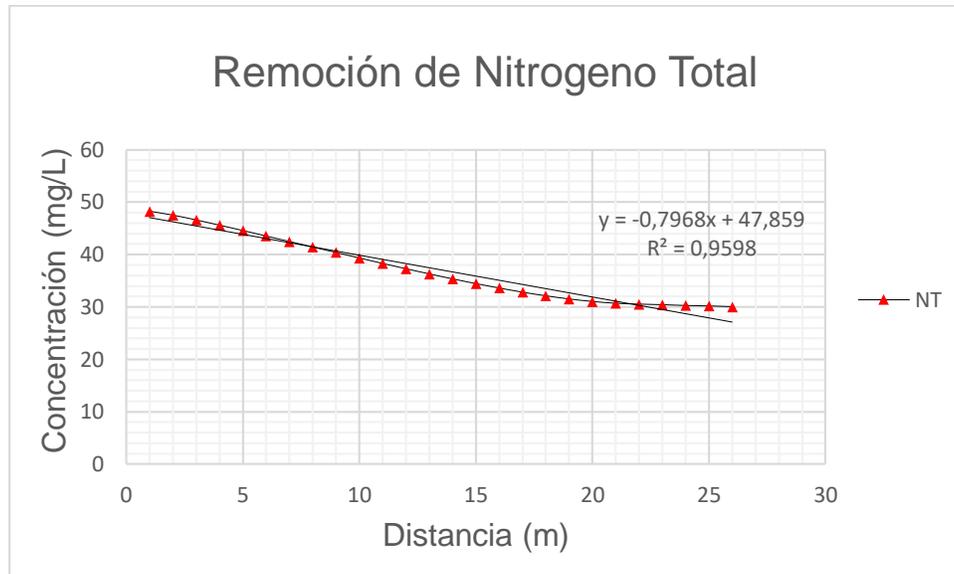


Ilustración 37. Remoción del NT en función de la longitud total

Fuente: Autores

Fosforo Total

El fosforo es uno de los parámetros con más baja eficiencia en su remoción, debido principalmente a la dificultad que presentan los procesos de degradación del mismo dentro de un HAFSSH. Con los tratamientos naturales como lo son los humedales artificiales, se consiguen porcentajes de remoción no mayores al 40%, y resulta inviable usarlos dado que el área necesaria para la remoción del fosforo es 5 veces mayor que la necesaria para la DBO, por lo cual resulta mucho más costoso. Una forma efectiva de remover el fosforo es la precipitación química, pero igualmente resulta costoso por los reactivos usados.

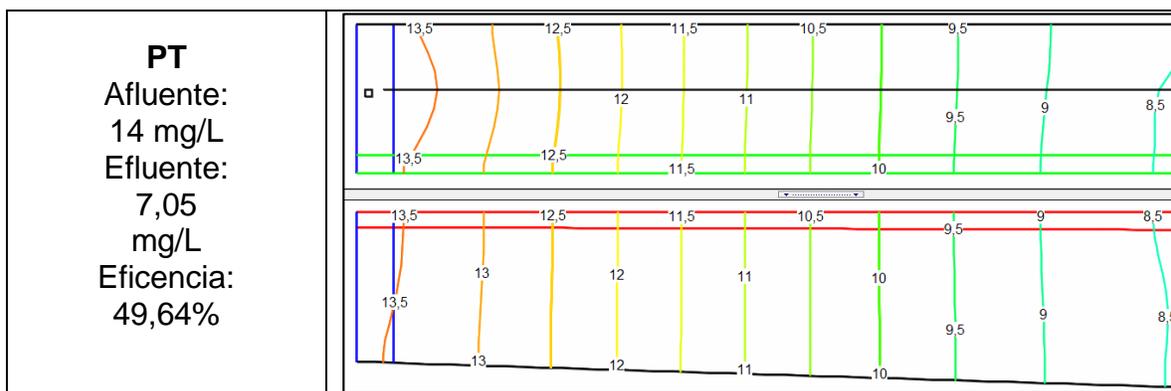


Tabla 25. Vista superior y de perfil. Remoción del Fosforo total expresado en mg/L en el HAFSSH

Fuente: Autores

La tabla 25 muestra el rendimiento en la remoción del fósforo total, donde se aprecia un efluente de 7.05 mg/L representado un porcentaje de remoción del 49.6%, el cual es elevado teniendo en cuenta la teoría y las experiencias en otros humedales, aun así, si se observan las referencias de la tabla 6, el porcentaje obtenido con el humedal modelado, es cercano a la media obtenida en los 5 humedales de los países citados.

Factores como las condiciones hidráulicas y la temperatura influyen en el porcentaje de remoción del fósforo, es por eso que dos humedales de similares características en cuanto al diseño hidráulico, caudal y carga hidráulica, pueden obtener efluentes muy distintos, otro factor altamente influyente es el lecho filtrante, ya que si se selecciona un lecho con alta capacidad para el intercambio iónico, como puede ser el carbón activado, se pueden obtener efluentes de mejor calidad, a costa de aumentar los costos de implementación y mantenimiento.

Analizando la ilustración 38, se deduce que el humedal artificial diseñado remueve 0.27 mg/L de PT por metro recorrido, lo que implica que a priori, para remover la totalidad de PT se necesita que el agua recorra 52 m con las características del humedal diseñado.

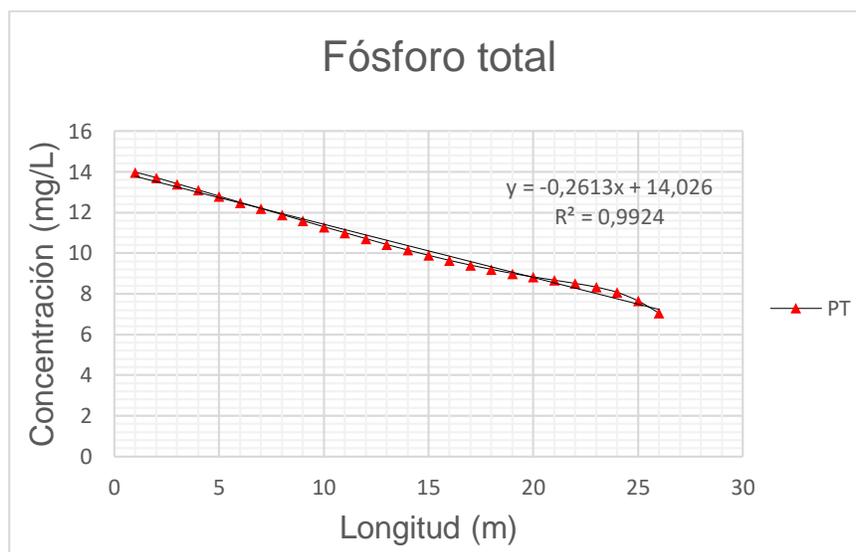


Ilustración 38. Remoción del PT en función de la longitud total

Fuente: Autores

Sólidos suspendidos totales

Los sólidos suspendidos totales (SST) incluyen al plancton, minerales de arcilla, arena, limo, coloides agregados, materia orgánica e inorgánica finamente dividida y otros microorganismos en el agua (Rangel y Beltrán, 2012). Las aguas residuales contienen tres tipos de sólidos no sedimentables: suspendidos, coloidales y

disueltos. Los sólidos suspendidos son transportados gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua; los más pequeños (menos de 0.01 mm) no sedimentan rápidamente y se consideran sólidos no sedimentables, y los más grandes (mayores de 0.01 mm) son generalmente sedimentables (IDEAM, 2007).

La tabla 26 presenta el afluente y el efluente final de SST obtenido en la modelación, que corresponden a 54 mg/L y 8 mg/L respectivamente, resultando una eficiencia de 85%. La alta eficiencia en la remoción se debe a que Los SST son uno de los parámetros más fáciles de controlar en un sistema de tratamiento, debido a que gran parte de ellos es removido por adsorción, filtración y sedimentación, procesos que son llevados a cabo fácilmente por los HAFSSH. El lecho filtrante y las raíces de las plantas permiten que la remoción de los SST este entre el 80 y el 95%.

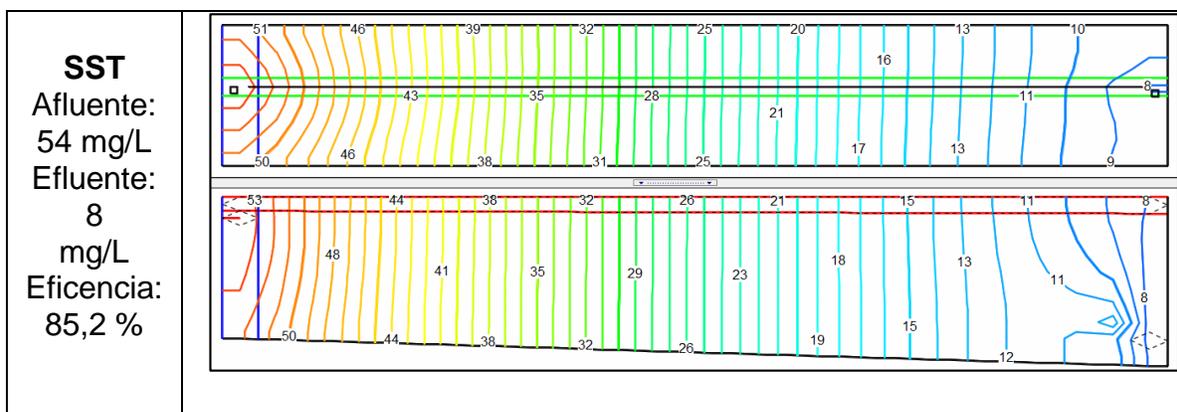


Tabla 26 Vista superior y de perfil. Sólidos suspendidos totales expresado en mg/L en el HAFSSH

La eficiencia en la remoción de los SST depende en gran medida de la carga hidráulica y la velocidad de flujo, debido a que a medida que aumentan estos parámetros, se presenta menor tiempo de retención hidráulica y mayor arrastre de material suspendido y sedimentable, por lo que para aumentar la eficiencia en la remoción de los SST es recomendable reducir la velocidad de flujo, mediante el diseño de dispersores de agua que distribuyan uniformemente el caudal a lo ancho del humedal, así como también reguladores de caudal.

La ilustración 39 presenta el porcentaje de remoción de los SST a lo largo del humedal, en donde se obtiene una remoción final de 85,4%, valor que está dentro de lo esperado para un humedal artificial subsuperficial, y concuerda con el valor obtenido en la ecuación de regresión lineal de Reed (2006).

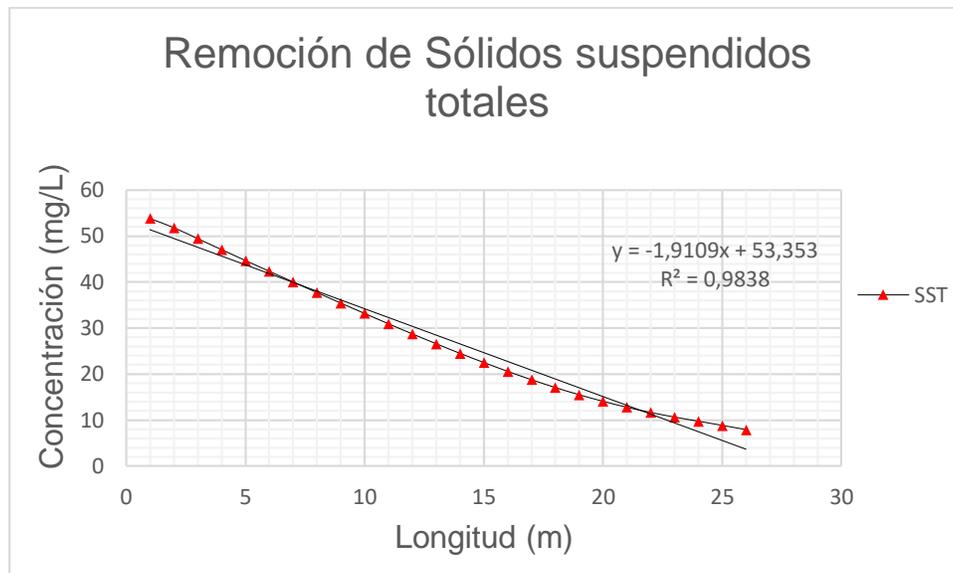


Ilustración 39. Remoción de SST en función de la longitud total

Fuente: Autores

Analizando el porcentaje la remoción de los SST, se puede inferir que el humedal artificial entrega efluentes con valores bajos de turbiedad, debido a que esta se compone de material en suspensión, disuelto y coloidal.

Eficiencias del sistema

La ilustración 40 presenta la comparación entre las eficiencias de los 4 contaminantes modelados, donde se observa que la mayor eficiencia la obtuvo la DBO y los SST, con eficiencias superiores al 80%, y se observa el NT Y PT cuyas eficiencias fueron inferiores al 50%, la ilustración muestra que el PT presenta mayor eficiencia que la NT, sin embargo, la concentración de entrada del PT fue mucho menor que la del NT, por lo tanto, si ingresara mayor concentración la eficiencia del PT sería menor.

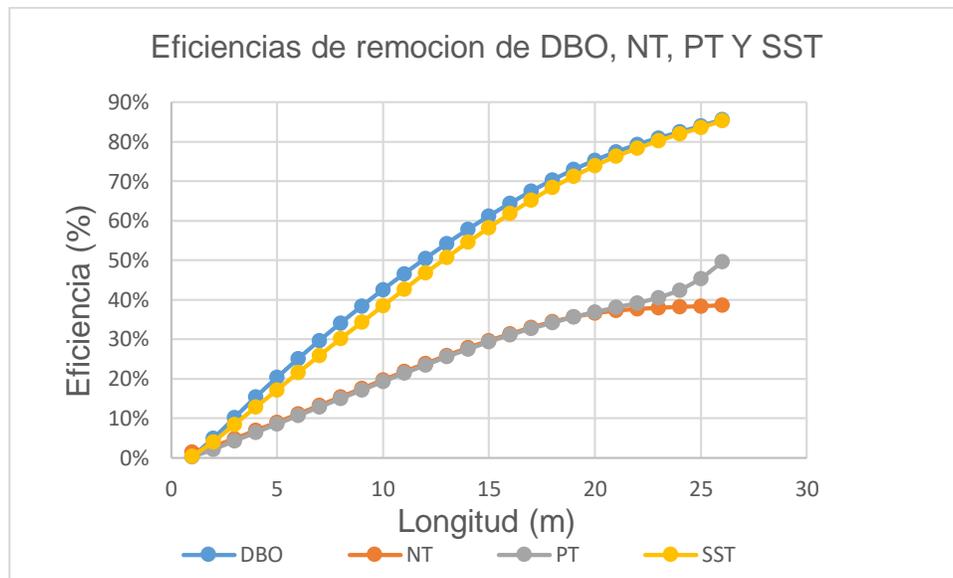


Ilustración 40. Eficiencias en la remoción de los contaminantes modelados

Fuente: Autores

4.3 Análisis comparativo con la Normatividad Colombiana e internacional

En la tabla 27 se realizó la comparación de los resultados obtenidos con la aplicación de las ecuaciones de primer orden propuestas por la EPA y por Kadlec & Knight, las ecuaciones de regresión lineal propuestas por Reed y los resultados de la modelación con Modelmuse aplicando Modflow 2006 y MT3DMS de la USGS. La comparación con la resolución 0631 de 2015 indica que los valores de DBO y SST, obtenidos en el efluente del humedal artificial subsuperficial diseñado, están muy por debajo de los máximos permitidos por la normativa Colombiana.

Dado que el humedal artificial cumple con la normativa vigente en Colombia y a falta de normatividad más estricta, se consultó una normativa extranjera para la protección de la vida acuática que, aunque no aplica para Colombia, se evaluó su cumplimiento, la normativa exigida por la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, es mucho más exigente en cuanto a vertimientos a cuerpos de agua, sin embargo, el humedal artificial diseñado continua muy por debajo de esta norma.

Tabla 27. Resultados obtenidos Vs Normatividad vigente

Resultados comparativos entre las ecuaciones de primer grado, modelación, resolución 0631 2015 artículo 8, protección de la vida Acuática								
Parámetro mg/l	Ecuaciones de primer grado			Modelación con modflow			Resolución 0631 2015 Límite máximo permisible Artículo 8 columna 4	Límite máximo permisible para contaminantes. NOM-001-SEMARNAT -1996, protección de la vida Acuática
	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Remoción(%)	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Remoción (%)		
DBO ₅	192	5,52	96,9	192	27,62	85,6	180 mg/L	30 mg/L
NT	49	28,58	29,34	49	30,03	38,7	Análisis y reporte	--
PT	14	11,18	20,14	14	7,05	49,6	Análisis y reporte	--
SST	54	6,43	88,09	54	7,09	85,4	90 mg/L	40mg/L

Fuente: Autores

5. ANÁLISIS DE COSTOS

Los principales componentes que se incluyen en los costos de inversión de los humedales de flujo subsuperficial incluyen el costo del terreno, la evaluación del sitio, la limpieza del sitio, la movilización de suelos, el recubrimiento con geomembrana, el medio de grava, sembrado de las plantas, las estructuras de entrada y descarga, las cercas, tuberías, la ingeniería, los costos legales, las contingencias, los gastos fijos y ganancia del contratista; el medio de grava y el recubrimiento pueden ser los elementos más costosos (ORTIZ, 2014, pág. 73). La vereda Mancilla está localizada en el municipio de Facatativá, en el cual se encuentra variedad de comercio, esto facilita hallar los componentes o elementos de construcción para el humedal, lo que implica que no se incluye el costo de desplazamiento a otras ciudades para el transporte de materiales, los precios o valores tomados de años anteriores fueron reajustados con el IPC año a año hasta el 2018 para tener un análisis de costos actualizado al presente año.

Tabla 28. *Costos para la construcción del Humedal artificial Subsuperficial*

Costos de construcción del humedal de flujo subsuperficial para una vivienda rural con un máximo de población equivalente a 50 habitantes				
Componente	Cantidad	Costo unitario (cop)	Valor ajustado IPC año 2018	Referencias
Costo operación y mantenimiento	(\$/año habitante)	\$ 2.850	\$142.500	(ORTIZ,2014, pag.76)
Excavación y movimiento de la tierra	38 m ²	\$ 2600	\$98.800	(net,2018)
Grava media	336 kg	\$177,5	\$59.640	(Homcenter,2 018)
Tubería de entrada, y salida	26 m	\$20000	\$520.000	(Homcenter,2 018)
Geo membrana	38 m ²	\$7553	\$ 287.014	(ALVAREZ,2 016)
Costos de ingeniería y construcción			\$700.000	(Villara ,2014)
Estudio de suelos			\$1.200.000	(ORTIZ,2014)
Siembra	10	4.000	\$40.000	(net,2018)
Costo Total			\$3.047.954	
Costo unitario por habitante			\$60.959,08	

Los costos presentados en la tabla 29 corresponden a la cotización realizada en Homecenter de un pozo séptico integrado con capacidad para 5 m³ y los costos unitarios de excavación por m³ de suelo.

Tabla 29. Costos de un sistema integrado de pozo séptico

Pozo séptico (Sistema séptico integrado)			Costo de la excavación		
Beneficios	Capacidad	Costo del sistema de fosa séptica COP	Cantidad	Costo unitario COP	Costo final COP
Fácil instalación: solo requiere de una excavación para ser instalado. Resistentes estructuralmente Flexibles (movimientos de la tierra). Fácil mantenimiento. Reutilizable. (instalaciones provisionales) Por su diseño y color negro son más eficientes Material resistente a rayos UV ¹	5000 Litros	\$4.922.900	5m ³	\$14,022	\$70,111
Costo total de la fosa séptica para puesta en marcha = \$ 4.993.011					

Fuente: (Homcenter,2018), (CYPE Ingenieros, S.A,2018)

Los sistemas sépticos integrados son tanques cilíndricos horizontales con refuerzos internos, fabricados con polietileno lineal de alta resistencia al impacto, divididos en su interior en cámaras que conforman un tanque séptico y un filtro aerobio de flujo ascendente (FAFA).

5.1 Análisis económico comparativo entre los humedales artificiales y los sistemas de pozos sépticos

La tabla 30 presenta la comparación económica entre el sistema de fosa séptica y el humedal artificial, se evidencia que el humedal artificial de flujo subsuperficial es más económico que el sistema de fosa séptica, siendo este último más usado. Otro costo adicional del sistema de fosa séptica es la limpieza y succión de sus aguas residuales cuando sea requerido.

Tabla 30 *Costos totales del humedal artificial diseñado vs costos totales del sistema de pozo séptico*

Costo del humedal artificial de flujo subsuperficial con área superficial de 38 m ²	Costo de la fosa séptica con volumen de 5 m ³
\$ 3.047.954	\$ 4.993.011

Aunque el costo del pozo séptico cotizado es más alto que el costo del humedal artificial diseñado, los habitantes rurales no suelen comprar este tipo de sistemas integrados, por lo que recurren a la excavación de pozos sin ningún tipo de impermeabilización, por lo que reducen enormemente los costos de implementación, pero incrementan el daño ambiental.

Con el análisis técnico económico se obtuvo el costo total que requiere la implementación de un humedal artificial para 10 casas y 50 personas, este costo que equivale a \$3.047.954 corresponde al valor de la puesta en marcha, sin embargo, no tiene en cuenta los costos de mantenimiento, dado que su frecuencia depende de muchos factores, como pueden ser las temporadas húmedas y secas, los fenómenos naturales como el Niño y la Niña y periodos prolongados de inutilización del sistema.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Como primera y más importante conclusión, se demostró que los humedales artificiales de flujo subsuperficial son una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales domésticas veredales, dado que para las condiciones climáticas de la vereda Mancilla en el municipio de Facatativá y las características del agua residual veredal, los porcentajes de remoción de los cuatro contaminantes modelados: DBO, SST, NT y PT fueron los esperados, y cumplieron con la normativa colombiana vigente (Res. 0631 de 2015).

La simulación con el software Modelmuse y con los paquetes MODFLOW y MT3DMS fue satisfactoria, dado que se logró con precisión simular las condiciones hidráulicas del humedal artificial, lo que se corroboró con la validación del software simulando un caso real.

Los resultados obtenidos al utilizar las ecuaciones de primer orden, (EPA, 1993), Kadlec and Knight (1996), y el software de modflow aplicado en la modelación del humedal artificial que se diseñó, fueron semejantes a los esperados, de acuerdo con las experiencias que se han obtenido a lo largo del tiempo que se llevan investigando estos sistemas. Para los contaminantes DBO₅, SST, PT y NT el porcentaje de remoción fue del 85.6%, 85.4%, 49.6% y 38.7% respectivamente, valores que según todos los autores consultados en esta investigación y como ejemplo la tabla 6, fueron muy precisos.

Modflow no es un programa específicamente diseñado para trabajar con humedales artificiales, aun así, de acuerdo con la experiencia de los autores de esta investigación, cuenta con las herramientas necesarias para simular las condiciones químicas y físicas que ocurren dentro de estos sistemas, esto se evidenció al obtener los resultados del uso de los paquetes de modflow y MT3DMS que demostraron obtener modelos de flujo similares a los esperados, y concentraciones de contaminantes dentro del rango de los datos reales y teóricos.

Comparando el análisis costo/beneficio entre los humedales artificiales y los pozos sépticos, se concluye que los humedales artificiales son una alternativa más económica y con muchos más beneficios que los pozos sépticos, dado que, estos últimos con el tiempo requerirán el servicio de evacuación mediante equipo Vactor, lo cual incrementa los costos de mantenimiento.

6.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con la investigación en el campo de la simulación de los procesos ambientales, como lo es el tratamiento de aguas residuales, ya que complementa el diseño de los sistemas de tratamiento, al igual que ayuda en su optimización.

Con el fin de mejorar la precisión y exactitud de los resultados obtenidos con la simulación mediante software, se recomienda para futuras investigaciones, realizar análisis de laboratorio en cuanto a la conductividad hidráulica del lecho filtrante, debido a que este es un parámetro altamente influyente en el comportamiento del agua dentro del sistema.

Para lograr construir un modelo más robusto se recomienda la construcción de puntos de monitoreo dentro de un humedal artificial, con el fin de realizar la curva de calibración en Modelmuse, además se recomienda realizar ensayos con trazadores químicos para determinar los coeficientes de dispersión reales.

Se recomienda usar esta investigación como una herramienta base para continuar con el desarrollo de los modelos de simulación de humedales artificiales, con el fin de encontrar diseños más eficientes y poder ampliar el campo de aplicación de estos sistemas.

Se recomienda a las instituciones de educación superior incentivar el uso de software de modelación de la calidad del agua, dado que es una herramienta importante en el diseño de sistemas depuradores.

BIBLIOGRAFIA

- Agua, C. N. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales artificiales*. Obtenido de <http://mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>
- APHA-AWWA-WPCF. *Standard methods for the examination of water and wastewater 22nd Edition*. Washington D.C., 2012.
- Arias, S., Betancur, F., Gómez, G., Salazar, J y Hernández, M. (2010). *Fito remediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas*. Colombia
- Morales, G. (2013). *Humedales contruidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas*.
- Bedoya, J. (2014). *Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la institución universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia*.
- Borrero, L. Jaime A. *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Trabajo final (Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental)*. Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona 1999.
- Beltrán, G. (2013). *Evaluación de las lagunas de oxidación y de los humedales como sistemas de tratamiento de aguas residuales en poblaciones de hasta 12500 habitantes*. Bogotá D.C
- Brito, M., Alemán, I. y Fraga, E. (2011). *Papel de la modelación matemática en la formación de los ingenieros*. ISSN: 1815-5944
- Centro regional de investigaciones científicas y tecnológicas. (2007). *macrofitas*, Gobierno de Mendoza.
- colombia, U. n. (2013). *Biovirtual UNAL*. Obtenido de: <http://www.biovirtual.unal.edu.co/es/colecciones/result/species/Typha%20latifolia/>
- CONAGUA, 2012. *Manual de agua potable, Alcantarillado y saneamiento, Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales*. México.
- Cooper PF, Job GF, Green MB, Shutes RBE. (1996). *Reed beds and Constructed wetlands for wastewater treatment*. Swindon,
- Consejo municipal de Facatativá. (2012). *Plan de desarrollo económico, social, ambiental y de obras públicas 2012-2015: Todos somos Facatativá*. Facatativá, Colombia.
- Consorcio GV-AQV, (2015). *Actualización del plan de gestión integral de residuos sólidos de Facatativa, Cundinamarca*. Contrato de consultoría No. 418 DE 2015.

- Contraloría de Cundinamarca. (2015). *Saneamiento básico*. Bogotá, Colombia.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Bolivia.
- Díaz, C. (2014). *Tratamiento del agua residual a través de humedales*. Universidad de Santo Tomas. Tunja, Colombia.
- Díaz, C. y Romero, J. (2013). *Evaluación de la remoción de DBO, DQO, SST, NTK, PT Y CF en un humedal de flujo subsuperficial construido con carbón mineral y cultivado con Zantedeschia aethiopica*. Colombia. *Revista Escuela Colombiana de Ingeniería* ISSN: 0121-5132. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, v. 1 No. 89 p.29
- EPA, (2000). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo libre superficial*. Washington, D.C
- EPA, (2000). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial*. Washington, D.C
- Espigares, M. Pérez, J. (1985). *Aguas residuales. Composición*. Universidad de Granada. Granada
- Espinosa, C. (2014). *Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes*. Bogotá, Colombia.
- Estrada, I. (2010). *Monografía de sobre Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) para remoción de Metales Pesados en Aguas Residuales*. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Colombia.
- Estrada, I. *Monografía de sobre Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) para remoción de Metales Pesados en Aguas Residuales*. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Colombia 2010.
- Gobernación de Cundinamarca. (2014). *Estadísticas de Cundinamarca 2011-2013*. Bogotá, Colombia
- Gómez, J. M. (30 de enero de 2012). *Costos de inversión inicial, operación y mantenimiento de tratamientos naturales de aguas residuales para comunidades*. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7547/tesis606.pdf;sequence=1>
- Grupo Banco Mundial, (2018). *Crecimiento de la población (% anual)*. Obtenido de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.GROW>
- Guzmán, L. (2008). *Guía de laboratorio de materiales*, Universidad de Santiago de Chile, Santiago de Chile, Chile.

- Homecenter. (2018). Obtenido de <http://www.homecenter.com.co/homecenter-co/search/?Ntt=tuberia+agua+residual>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2007. Toma de muestras de aguas residuales: instructivo para la toma de muestras de aguas residuales. Bogotá, Colombia.
- Kadlec, R & Wallace, S. (2009). *Treatment Wetlands second edition*. CRC Press LLC. 1996, Boca Raton, Nueva York, USA.
- Konstantinos, L. Konstantinos, M. Vassilios, T. *Modeling of Flow and BOD fate in horizontal subsurface Flow Constructed wetlands*
- Lahora, A. (2001). *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería)*. Almería, España.
- Lara, Jaime y Vera, L. (2005). *Implantación y Evolución de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia*.
- Lesikar, B y Enciso, J. (s.f). *Sistemas individuales para el tratamiento de aguas negras. Humedales artificiales*. Universidad de Texas. Texas, Estados Unidos.
- Lizaraso, J. y Orjuela, M. (2013). *Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia*. Bogotá, Colombia.
- Llagas, W. Gómez, E. (2006). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM*. Lima, Perú.
- Mena, J. (2008). *Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos*.
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Resolución Número 631 de 2015.
- Ministerio de Desarrollo Económico, (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000 Sección II Título E: Tratamiento de aguas residuales*. Bogotá D.C
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000 Título J: Alternativas Tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural*. Bogotá D.C
- Nuevo, D. (2016). *Humedales artificiales en depuración de agua residual*. TECPA.
- Organización de la Naciones Unidas. (2012). *Agenda de desarrollo post 2015*. United Nations
- ORTIZ, C. E. (enero de 2014). *FACTIBILIDAD DEL DISEÑO DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES DE 30.000*. Obtenido de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/114/1/FACTIBILIDAD%20DEL>

%20DISEÑO%20DE%20UN%20HUMEDAL%20DE%20FLUJO%20SUBSUPERFICIAL%20PARA%2030000%20HABITANTES.pdf

- Osnaya, M. (2012). *Propuesta de Diseño de un Humedal Artificial para el tratamiento de Aguas Residuales en la Universidad de la Sierra Juárez. Ciudad de Juárez, Mexico.*
- Maira María Pérez Villara, E. R. (14 de abril de 2014). *Diseño de un humedal subsuperficial vertical para la depuración de las aguas residuales de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Obtenido de www.raco.cat/index.php/afinidad/article/viewFile/291707/380205*
- Gabriela Morales, D. L. (2013). *HUMEDALES CONSTRUIDOS CON PLANTAS ORNAMENTALES PARA EL TRATAMIENTO DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES CONTENIDOS EN AGUAS SERVIDAS. Obtenido de [http://www.ubiobio.cl/miweb/webfile/media/194/v/v22-1/vidal_theo22\(1\)-2013.pdf](http://www.ubiobio.cl/miweb/webfile/media/194/v/v22-1/vidal_theo22(1)-2013.pdf)*
- Sampieri, H., Collado, C. y Lucio, P. (2003). *Metodología de la investigación. McGraw-Hill Interamericana. México, D.F.*
- Saavedra, J. (2013). *Modelación hidráulica y de calidad del agua acoplada para humedales, mediante processing modflow (Tesis de maestría). Bogota, Colombia*
- Silva, A. Zamora, H. (2005). *Humedales artificiales (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.*
- Suárez, A., Agudelo, N., Rincón, J. y Millán, N. (2014). *Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Revista Mutis 4(1); pag 8-14*
- Superintendencia de servicios públicos domiciliarios. (2013). *Informe tecnico sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales en Colombia.*
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). *World Population Prospects: The 2017 Revision, DVD Edition.*
- Urban Pollution Research Centre, (2001). *Artificial wetlands and wáter quality improvement, Middlesex University, Bounds Green Road, London N11 2NQ, UK*
- U.S. EPA, (2000). *Design Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment, U.S. EPA, CERL, Cincinnati, OH.*
- U.S. EPA, (2000). *Free Water Surface Wetlands for Wastewater Treatment: A Technology Assessment, U.S. EPA, OWM, Washington, D.C.*
- U.S EPA, (1993). *Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment: A technology assessment. United States.*
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). 2017. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los*

Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. París, UNESCO.

WWDR, 2015. Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos del mundo: Agua para un mundo sostenible

WWDR, 2017. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2017: Aguas residuales El recurso desaprovechado. ONU

Zapata, A. (2014). Humedales artificiales; una respuesta para la mitigación de la contaminación hídrica de la quebrada La Nutria, de los cerros orientales de Bogotá D.C. Bogotá, Colombia.