	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A
Dependencia	Aprobado	Pág.		
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO	1(1)		

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	KATTY ALEXANDRA SANJUÁN CARREÑO JHORMAN DUVAN ROJAS SANGUINO		
FACULTAD	INGENIERIAS		
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERÍA CIVIL		
DIRECTOR	DIBREY PAOLA QUINTERO CRIADO		
TÍTULO DE LA TESIS	ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES		
RESUMEN (70 palabras aproximadamente)			
<p>EN EL PRESENTE TRABAJO SE ENCONTRARÁ UNA RECOPIACIÓN DE INFORMACION A CERCA DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL COMO UNA TECNOLOGÍA ALTERNATIVA, EFICAZ Y SOSTENIBLE PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. DANDO A CONOCER SUS VENTAJAS Y LIMITACIONES, COMPARANDO LOS DIFERENTES MODELOS MATEMÁTICOS Y FÍSICOS ENCONTRADOS, PARA BRINDAR UN MÉTODO DE DISEÑO GENERAL, EL PROCESO CONSTRUCTIVO ADECUADO, Y LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS A SEGUIR.</p>			
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 160	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 38	CD-ROM: 1



ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE HUMEDALES
ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL PARA EL TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES

AUTORES:

KATTY ALEXANDRA SANJUAN CARREÑO

JHORMAN DUVAN ROJAS SANGUINO

Trabajo de grado en modalidad monografía, presentado como requisito para optar al
Título de Ingenieros Civiles

Directora

DIBREY PAOLA QUINTERO CRIADO

Ingeniera Civil

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL

Ocaña, Colombia

Febrero de 2020

Índice

Capítulo 1: Generalidades.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Conceptos.....	6
Capítulo 2: Descripción de las propiedades o bondades y limitaciones de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.	22
2.1 Propiedades o Bondades	22
2.2 Limitaciones.....	25
Capítulo 3: Consideraciones y modelos planteados para el Diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSS).	27
3.1 Consideraciones de diseño.....	27
3.1.1 Selección del sitio.	28
3.1.1.1 Topografía del terreno.....	28
3.1.1.2 Clima.....	28
3.1.1.3 Estudios geotécnicos:.....	29
3.1.1.3.1 Suelo.....	29
3.1.1.3.2 Riesgo de inundación.....	29
3.1.2 Factores hidrológicos.....	29
3.1.3 Índices permisibles de contaminación en vertimientos de aguas residuales a cuerpos de agua.	30
3.2 Modelos matemáticos planteados para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial.	31
3.2.1 Modelo propuesto por Sherwood C. Reed, Crites RW y Middlebrooks en su libro Natural Systems for Waste Management and Treatment	32
3.2.2 Modelo matemático propuesto por Kdlec y Knight en su libro Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation.....	37
3.2.3 Modelo matemático propuesto por Crites, R.W. and G. Tchobanoglous en su libro small and decentralized wastewater management systems en 1998.....	41
3.2.4 Modelo matemático propuesto por la Environmental Protection Agency (EPA).....	42
3.2.5 Modelo matemático propuesto por Jairo Alberto Romero Rojas en su libro Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño.....	44
3.3 Modelos físicos implementados de humedales artificiales de flujo subsuperficial	49
3.4 Análisis de modelos encontrados.....	56
Capítulo 4: Proceso constructivo.....	61
4.1 Parámetros y consideraciones.	61
4.1.1 Elección del medio granular o sustrato.....	61

4.1.2 Elección del consorcio microbiano.....	63
4.1.3. Elección de la vegetación.....	64
4.2 Proceso constructivo.	72
Capítulo 5. Especificaciones Técnicas.	79
5.1 Actividades preliminares.	79
5.1.1 Reconocimiento del terreno.	79
5.1.2 Desbroce y limpieza del terreno.	79
5.1.3 Localización y replanteo.	80
5.1.4 Campamento e instalaciones provisionales.	81
5.1.5 Cerramiento en lona verde.....	82
5.2 Movimiento de tierras.	83
5.2.1 Excavación mecánica para dique de contención.....	83
5.2.2 Relleno compactado para suelo de soporte con material de excavación.....	84
5.3 Construcción de cámaras de registro de entrada y salida (Arquetas).....	86
5.4 Impermeabilización del dique de contención.	87
5.4.1 Excavación manual para zanja perimetral.....	87
5.4.2 Extensión de geo membrana.	88
5.4.3 Relleno de zanja perimetral con material de excavación.....	89
5.5 Ensamblado del sistema de drenaje para recolección.	90
5.5.1 Instalación de tubería de recolección.....	90
5.5.2 Ensamblado con cámara de registro.....	91
5.6 Llenado de grava y/o arena.....	92
5.6.1 Vaciado y extensión de colchón de arena para soporte de grava.....	92
5.6.2 Vaciado y extensión de capa de grava (Sustrato).....	93
5.7 Selección y colocación de la capa vegetal.....	94
5.8 Retiro de escombros.....	95
Capítulo 6. Comparativo.....	97
6.1 Comparativo de porcentajes de eficiencias obtenidos para remoción de contaminantes ...	97
6.1.1 Análisis de la información recopilada.....	100
6.2 Comparativo de valores obtenidos de carga para cada contaminante con la normatividad vigente.....	104
6.2.1 Análisis de la información recopilada.....	106
Capítulo 7. Conclusiones.....	115
Referencias.....	119
Apéndices.....	127

Lista de tablas

Tabla 1. Resultados obtenidos en diferentes países mediante la utilización de humedales para el tratamiento de aguas residuales.	5
Tabla 2. Componentes encontrados en el agua residual.	7
Tabla 3. Mecanismos de remoción en los sistemas de tratamiento basados en macrófitas.	18
Tabla 4: Características típicas del medio para humedales de flujo subsuperficial.....	33
Tabla 5. Valores de K ₂₀ , θ , C* para los distintos contaminantes en HHAA FS.....	39
Tabla 6: Características típicas del medio para humedales de flujo subsuperficial.....	44
Tabla 7: Criterios para humedales de flujo subsuperficial.....	46
Tabla 8. Resumen de modelos matemáticos planteados para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.....	48
Tabla 9. Resultados de la simulación vs resultados reales del HAFSSH López y Rodríguez (2016).....	55
Tabla 10. Resultados obtenidos vs normatividad vigente.....	56
Tabla 11. Propiedades físicas del agua.	59
Tabla 12: Características de los medios para el flujo subsuperficial.	62
Tabla 13. Funciones de los microorganismos presentes en Humedales Artificiales	64
Tabla 14. Especies vegetales comúnmente empleadas en Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales	66
Tabla 15: Especies emergentes más utilizadas en la depuración de aguas residuales	67
Tabla 16. Proceso Constructivo.	78
Tabla 17. Recopilación de información de algunos sistemas existentes.	98
Tabla 18. Eficiencia mínima de remoción de constituyentes.	103
Tabla 19. Valores min obtenidos en los proyectos para concentración de contaminantes en el efluente.....	104
Tabla 20. Límites permisibles de concentración de contaminantes para cada norma.	106

Lista de figuras

Figura 1. Etapas de la línea de agua, ordenadas secuencialmente de izquierda a derecha, en el tratamiento de aguas residuales urbanas.	13
Figura 2. Tratamiento en la línea de lodos.	13
Figura 3. Humedal de flujo subsuperficial.	20
Figura 4. Procesos de depuración del agua residual en humedal construido de flujo subsuperficial.	20
Figura 5. Esquema de humedales artificiales.	21
Figura 6. Coeficiente de temperatura, modelo Reed.	32
Figura 7. Estimación área superficial para remoción de fosforo, modelo Reed.	33
Figura 8. Constante de nitrificación, modelo Reed.	34
Figura 9. Coeficiente de temperatura para nitrificación, modelo Reed.	34
Figura 10. Coeficiente de temperatura denitrificación, modelo Reed.	35
Figura 11. Coeficiente de temperatura remoción de fosforo, modelo Reed.	35
Figura 12. Estimación área superficial remoción de fosforo, modelo Reed.	36
Figura 13. Tiempo de retención hidráulico, modelo Reed.	36
Figura 14. Ancho del humedal, modelo Reed.	37
Figura 15. Largo del humedal, modelo Reed.	37
Figura 16. Estimación del área superficial, modelo Kdlec y Knight.	38
Figura 17. Constante de temperatura, modelo Kdlec y Knight.	38
Figura 18. Estimación del área transversal, modelo Kdlec y Knight.	40
Figura 19. Ancho del humedal, modelo Kdlec y Knight.	40
Figura 20. Coeficiente de temperatura, modelo de Crites, R.W. and G. Tchobanoglous.	41
Figura 21. Tiempo de retención hidráulico, modelo de Crites, R.W. and G. Tchobanoglous.	41
Figura 22. Estimación del área superficial, modelo de Crites, R.W. and G. Tchobanoglous.	41
Figura 23. Estimación del ancho del humedal, modelo de Crites, R.W. and G. Tchobanoglous.	42
Figura 24. Estimación coeficiente de temperatura, modelo EPA.	43
Figura 25. Estimación del área superficial, modelo EPA.	43
Figura 26. Estimación coeficiente de temperatura, modelo Romero.	45
Figura 27. Constante de temperatura, modelo Romero.	46
Figura 28. Caudal promedio a través del humedal, modelo Romero.	47
Figura 29. Desarrollo de la película microbiana.	63
Figura 30. Espadaña (Thypha).	68
Figura 31. Junco (Scirpus).	69
Figura 32. Carrizos. (Phragmites).	70
Figura 33. Costus Spicatus.	71
Figura 34. Heliconia Psittacorum.	71
Figura 35. Porcentaje de remoción para DBO.	110
Figura 36. Porcentaje de remoción para SST.	111
Figura 37. Porcentaje de remoción para Fósforo.	112
Figura 38. Porcentaje de remoción para Nitratos.	113

Lista de apéndices

Apéndice A. Artículo 8 de la Resolución 0631	128
Apéndice B. Artículo 9 de la Resolución 0631.....	131
Apéndice C. Artículo 9 de la Resolución 0631.....	134
Apéndice D. Artículo 10 de la Resolución 0631.	137
Apéndice E. Artículo 11 de la Resolución 0631.....	140

Introducción

El presente trabajo consiste en el estudio y análisis del tratamiento de aguas residuales mediante la implementación de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, ya que es un tema poco estudiado a pesar de ser relevante en lo que respecta a lo eficiente y más económico que resulta frente a los tratamientos convencionales.

El vertimiento de aguas residuales en cauces de agua natural (Arroyos, ríos, humedales) es algo proveniente de la antigüedad, surgiendo esto por la necesidad de evacuar estas aguas fuera del casco urbano; remontándonos a las culturas chinas y egipcias que utilizaban los humedales naturales para la disposición de sus aguas residuales (Osnaya, 2012). Debido al impacto ambiental que estos vertimientos provocan fue necesario considerar la depuración previa como imprescindible particularmente para poblaciones grandes.

Existen sistemas de tratamiento convencionales, en los cuales su implementación es costosa y pueden generar impactos ambientales negativos debido al uso de químicos para la depuración del agua; entorno a esto se presentan los humedales artificiales como alternativa eficiente, económica y sostenible para realizar este tratamiento. El primer concepto de estudio que se haya descrito para el empleo de humedales de flujo subsuperficial tiene su origen en los trabajos de K. Seidel, del Max Planck Institute en Alemania a comienzos de los años 50.

En Colombia el crecimiento de la población junto con el incremento de las industrias deja en evidencia el aumento en las vertientes de aguas residuales que son arrojadas a diferentes

caudales sin realizársele el adecuado tratamiento, debido a la escasa disponibilidad de plantas dedicadas a esta labor se hace necesario el idear estrategias que contribuyan al mejoramiento de la situación. Según (Díaz Acero, 2014) en su artículo indica que el primer estudio e implementación de un humedal artificial que se encuentra documentado en Colombia es el hecho por la Organización Lara en 1997 en la ciudad de Tunja, el cual se implementó para el tratamiento de aguas residuales domésticas que eran tratadas previamente con un reactor anaerobio.

El objetivo de este trabajo es recopilar la información correspondiente a los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal que se han implementado y estudiado a lo largo de la historia a nivel mundial, nacional, regional y local, con el fin de comparar y analizar los diferentes modelos matemáticos y físicos descritos, el proceso constructivo realizado y las especificaciones utilizadas en la construcción de estos y así mismo brindar las bondades y ventajas de la implementación de este tipo de sistema.

Para el cumplimiento de los objetivos planteados primero que todo se realiza la recopilación de información revisando las referencias encontradas en las diferentes revistas, folletos informativos, libros, repositorios institucionales a nivel mundial, regional y local, para tomar la información más idónea en cada caso estudiado, referente a los modelos matemáticos y físicos que se han implementado para el diseño de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, el proceso constructivo que se ha realizado y las especificaciones técnicas que se han implementado, con el fin de brindar un documento en el que se contemple la información,

que según los análisis realizados a la bibliografía, es la más adecuada para el diseño y construcción de este tipo de humedales.

En los siguientes 7 capítulos se tiene: 1. Generalidades: Antecedes, tipo y plantas de tratamiento. 2. Descripción de las propiedades y bondades de los HAFSS: Bondades y limitaciones. 3. Consideraciones y modelos planteados para el diseño de un HAFSS: Consideraciones, modelos matemáticos y físicos y su respectivo análisis. 4. Proceso constructivo: Consideraciones y proceso constructivo. 5. Especificaciones técnicas: Especificaciones técnicas que conlleva cada proceso de la construcción del HAFSS. 6. Comparativo: Comparativo de Eficiencia y valores límites permisibles con la normatividad vigente. 7. Conclusiones: Aportes significativos de la investigación.

Resumen

La implementación de plantas de tratamiento de agua residual convencionales, resulta costosa, pueden generar impactos ambientales negativos debido al uso de químicos para la depuración del agua y son altas en consumo de energía. A diferencia de éstas, existen tecnologías alternativas que hacen posible la reutilización del agua retornando a la naturaleza con buena calidad y sin uso de energía, las cuales son sumamente importantes y necesarias puesto que abren paso a la construcción de infraestructura sostenible. Los humedales artificiales se exponen como alternativa eficaz y sostenible. Estos consisten en ecosistemas que albergan distintas especies, donde por medio de procesos químicos, físicos y biológicos se remueven una cantidad de contaminantes del agua residual, mejorando su calidad, manteniendo el equilibrio del ecosistema y a su vez permitiendo la reutilización del agua. Para la realización del presente trabajo se realizó una investigación donde se revisaron las diferentes referencias encontradas recopilando la información y acomodándola de forma tal que se encontrará un método de diseño general, el proceso constructivo adecuado, especificaciones técnicas a seguir y bondades del uso de sistemas de tratamiento de aguas residuales por medio de los humedales artificiales.

Abstract

Most existing treatment plants use polluting technologies; as a result of their operation they produce toxic waste and result in high energy consumption. Unlike frequency, there are alternative technologies that make it possible to reuse water by returning to nature with good quality, without use of energy and without generation of pollutants, which are extremely

important and necessary since it opens the way to the construction of urban infrastructure sustainable. Artificial wetlands are exposed as an effective and sustainable alternative. These consist of ecosystems that house different species, where through chemical, physical and biological processes a quantity of pollutants are removed from the wastewater, improving its quality, the balance of the ecosystem and in turn, the reuse of water. For the realization of this work, an investigation was carried out where the different references found were collected, collecting the information and accommodating it in such a way that a general design method was specified, the appropriate construction process, technical specifications to follow and benefits of the use of systems of Wastewater treatment through artificial wetlands.

Glosario

ABIÓTICO: Proceso no biológico, es decir, no tiene vida, o mecanismo de tratamiento en un humedal artificial.

AERÓBICO: Es un proceso que ocurre mediante la presencia de oxígeno que se encuentra disuelto. Este proceso da lugar a que los microorganismos realicen los procesos metabólicos dentro del humedal, ocurre en ciertas partes de las plantas depuradoras.

AFLUENTE: Alude al volumen de agua que entra a un sistema.

AMONIFICACIÓN: Este proceso ocurre en parte del ciclo del nitrógeno y es por el cual las bacterias convierten compuestos orgánicos que contienen nitrógeno a amoníaco, gracias a los procesos de las bacterias.

ANAERÓBICO: La ausencia de oxígeno disuelto es su principal característica, por lo que debe recurrir al oxígeno molecular que se encuentra disponible en la degradación de los compuestos.

AGUAS RESIDUALES O SERVIDAS: Se denomina al agua que en la cual la calidad ya ha sido afectada negativamente por influencia externa. Las cuales incluyen diferentes tipos según el uso previo que se les haya dado.

ADSORCIÓN: Se le llama al proceso cuando se atraen o retienen gases, vapores, líquidos o cuerpos disueltos, por algún sólido o un líquido.

BACTERIAS: Son todo el grupo de microorganismos Procariontes, que consiste en una célula rodeada por una capa de polisacáridos.

BIODEGRADACIÓN: Descomposición de componentes orgánicos por la acción de microorganismos por acción del sol.

BIOSÓLIDOS: Son residuos orgánicos provenientes del tratamiento de aguas residuales que son procesadas en una PTAR convencional.

BIOFILTRO: Son una serie de dispositivos que mediante un proceso biológico depuran una gran gama de agentes contaminantes.

BIOMASA: Esto corresponde a una unidad de volumen a la cantidad de material vivo, bien sea plantas y/o animales.

COLIFORMES FECALES: Se ubican en el intestino de seres humanos y animales de sangre caliente, y se refieren a bacterias en forma de varillas (coliformes).

CONTAMINACIÓN DEL AGUA: Es una alteración del parámetro normal del agua, como resultado de las actividades realizadas por el ser humano o procesos del ecosistema.

DEPURACIÓN: Remoción de las sustancias nocivas o suciedad de algún producto.

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO): Es la medida del nivel de los residuos orgánicos presentes en el agua que requieren oxígeno para su depuración, mediante la acción realizada por las bacterias presentes. Este parámetro indica la materia orgánica presente en el agua residual.

DESNITRIFICACIÓN: Proceso en el cual las bacterias transforman los nitratos a nitrógeno gaseoso por medio de la reducción de oxígeno.

EFLUENTE: Se refiere al volumen de agua que sale de un sistema.

EUTROFIZACIÓN: Es cuando la gran variedad de nutrientes presentes permite el desarrollo de las algas y otros organismos en un pantano o lago. Cuando mueren van al fondo, y en este proceso se consume el oxígeno, genera malos olores y depura el agua.

EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET): Cuando por medio de la evaporación de la superficie del agua y transpiración de las plantas, se pierde cierta parte del agua en la atmosfera.

FACULTATIVO: Que puede adaptarse eficazmente a diferentes condiciones en el ambiente.

FILTRACIÓN O PERCOLACIÓN: Cuando por medio de la infiltración por debajo del sistema del humedal se pierde el agua que circula por este.

FITORREMEDIACIÓN: Es el proceso en el cual se aprovechan las capacidades de las plantas y los microorganismos presentes en ellas para recuperar el equilibrio ambiental, es decir, para limpiar el aire interior, descontaminar los suelos o depurar el agua.

FLOCULACIÓN: Cuando un grupo de partículas muy pequeñas de la materia son agrupadas para lograr un tamaño más grande conjuntamente.

FOTOOXIDACIÓN: Cuando por medio de la acción del oxígeno, aire y la luz solar, se modifican algunas propiedades físicas o químicas de la sustancia.

GRADIENTE HIDRÁULICO: Es la pérdida de energía que se experimenta por unidad de longitud que recorre el agua en un sistema.

INFILTRACIÓN: Proceso mediante el cual el agua pasa desde el suelo a un cuerpo de agua superficial o que se encuentra en contacto con él.

IRRIGACIÓN: Paso de un líquido por un tubo.

MACRÓFITA: planta que es evidente a simple vista y contiene plantas vasculares o superiores.

MICROBIO O MICROORGANISMO: Organismos responsables directamente de las transformaciones bioquímicas que se presentan en la depuración del agua residual; son visibles solo con un microscopio.

NITRIFICACIÓN: Proceso mediante el cual el nitrógeno amoniacal se convierte a nitrógeno a través de la suma de oxígeno.

OLIGOELEMENTOS: Elemento químico indispensable para el funcionamiento normal del metabolismo, se presenta en pequeñas cantidades en las células de los seres vivos.

PERMEABILIDAD: Capacidad que tiene un medio poroso o granular para transportar un líquido.

PLANTA ACUÁTICA EMERGENTE: Son plantas que crean sus raíces en el suelo, con estructuras que se esparcen sobre la superficie del agua.

PLANTA PILOTO: modelo que permite imitar operaciones, procesos y condiciones hidráulicas de una planta de tratamiento usando el agua de la fuente de abastecimiento.

PROCESOS CATABÓLICOS: Consiste en la degradación de moléculas orgánicas, poco a poco hasta formar moléculas simples y, por último, sustancias inorgánicas.

RIZOSFERA: Es una zona de interacción única y dinámica entre las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo, que se caracteriza por el aumento de la biomasa microbiana y de su actividad.

SEDIMENTO: partículas orgánicas y minerales que se depositan desde la columna de agua supra yacente en el fondo.

SISTEMA RADICULAR: se denomina sistema radicular o sistema radical al grupo de raíces de una misma planta.

SUSPENSIÓN: mezcla heterogénea integrada por un líquido con partículas de tamaño pequeño, que se encuentran dispersas prontas para sedimentarse.

SUSTRATO: Medio natural sobre el cual el sistema radicular de la planta adhiere sus raíces.

Capítulo 1: Generalidades

1.1 Antecedentes

A finales del siglo pasado (Siglo XX) lo que eran las ciénagas, turberas y humedales eran considerados como los mejores captadores para lo que correspondía al vertimiento de aguas residuales. (Espinosa Ortiz, 2014)

En 1950, Kathe Seidel realiza una investigación (1953 y 1955) sobre las plantas que podían ser utilizadas en el tratamiento de aguas residuales, donde se dieron los primeros pasos en investigación científica y sistemática. El doctorj Kathe Seidel del instituto Max Plack, de Alemania, plantea en sus investigaciones que usando el Junco común (*Schoenoplectus lacustris*) la eliminación de componentes orgánicos e inorgánicos era posible, así como la eliminación de las bacterias presentes. (Torres Harker, 2016)

Inicialmente no se tomaron en cuenta estos avances y se siguieron implementando las plantas de tratamiento convencionales, a pesar de ello, la información otorgada por Seidel marcó las bases para continuar investigando el nuevo sistema no convencional; es así, como entre 1950 y 1970 los científicos norteamericanos y europeos siguieron trabajando para incorporar las plantas macrófitas en humedales para el tratamiento de aguas residuales. (Vymazal, Constructed wetland for wastewater treatment: a review., 2008)

La primera vez que se aplicó este método fue en Alemania en el año de 1974 para el tratamiento de aguas residuales municipales y de la industria textilera, cervecera y de productos

lácteos con la utilización de plantas macrófitas emergentes, logrando convertirse en una tecnología muy importante para depurar efluentes de tanques sépticos, lagunas de estabilización y de efluentes de tratamiento biológico secundario en general. (Medina & Bayona Santiago, 2012)

Posteriormente a estos estudios se incorporaron suelos de material granular, para generar una conducción buena del afluente y permitir la filtración de lodos. Además, se comenzó con la creación de sistemas de flujo vertical, horizontal y de las dos formas en distintas etapas, con lo cual se dio paso a los diferentes tipos de humedales artificiales, caracterizándose así según las plantas utilizadas, el flujo del afluente y la pendiente del sistema. (Vymazal, Brix, Cooper, & Haberl, 1998)

Partiendo de la información técnica, en los años 1960 y 1970 en Europa y Norteamérica, algunas ciudades pequeñas, fincas agropecuarias, industrias de petróleo y otros productos químicos, comenzaron con la construcción de humedales para el tratamiento de aguas residuales, aguas lluvias y la adaptación a ecosistemas naturales para el mejoramiento de su estado ecológico. (Kadlec & Wallace, Treatment wetlands. Second edition, 2009)

A finales de 1980, aparece un manual presentado por ((EPA), 1988) el cual fue el primero en su tipo y contemplaba criterios de diseño para este tipo de humedales, también se lleva a cabo el primer simposio internacional acerca de la tecnología en Chattanooga (EEUU), el cual aún se repite cada dos años, y, además, fue creado el grupo International Water Association (IWA) especializado en humedales. Desde entonces han aparecido capítulos de libros y excepcionales

manuales científicos y técnicos los cuales han ido recolectando conocimiento y el estado del arte del sistema de tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales. (Sanz Mena, 2008)

En octubre de 1985, comienza a funcionar en Inglaterra el primer sistema de tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales, para una población de 1.260 habitantes y un caudal primero de 189 m³/día. Igualmente, en Dinamarca entre los años 1983 y 1988 se realizaron más de 130 sistemas para poblaciones de hasta 7.100 habitantes con caudales de 1065 m³/día; además de humedales artificiales que se encontraban funcionando en Bélgica, Holanda, Hungría y Suecia. (Estrada Gallego, 2010)

Terminando los años noventa la utilización de los humedales para la disposición de aguas residuales comenzó a ser más formal, con la percepción de que estas aguas son una fuente de sustancias nutritivas y para los suelos y la formación de humedales. (Benefield & Randall, 1993)

En el viejo continente (Europa), se han construido alrededor de 5.000 humedales artificiales, además de que existen más de doscientos sistemas de humedales naturales utilizados para el tratamiento de aguas residuales industriales y aguas domésticas. A partir de los avances presentados en Europa y de experiencias realizadas con humedales artificiales, se da el desarrollo de los mismos en Estados Unidos. (Espinosa Ortiz, 2014)

Hasta el año 2000, los países en los cuales se implementa con mayor augura estos sistemas naturales para el tratamiento de aguas servidas, eran Australia, Inglaterra y Estados Unidos, debido a que estos países aportan buena financiación a la investigación científica. (Espinosa Ortiz, 2014)

Los sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales se han venido utilizando de manera creciente en las últimas décadas, debido a sus características de construcción y operación, coste de inversión competitivo, poco personal para su tratamiento, no requiere o es muy reducido el consumo de energía, y además no genera lodos en grandes cantidades a menudo. (Noguera & Olivero, 2010)

Los humedales artificiales han sido bastante utilizados para el tratamiento de distintos tipos de aguas residuales como alcantarillados, aguas lluvias, industriales, escorrentía agrícola, drenaje ácido de minas y lixiviados de rellenos sanitarios, además de que han demostrado tener una gran capacidad para el tratamiento de aguas residuales y para la recuperación del medio ambiente. (Yang, Chang, & Lo Huang, 2001)

En nuestro País Colombia, se han realizado algunas experiencias implementado plantas piloto de humedales artificiales que se han enfocado más que todo al tratamiento para poblaciones muy pequeñas.

Data del año 1997 la primera implementación de un humedal que se encuentra documentado en Colombia, la cual fue realizada por Lara en la ciudad de Tunja, donde construyó como sistema de tratamiento complementario un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento del agua residual doméstica que previamente era procesada con un reactor anaerobio UAS; el sistema operó durante aproximadamente 2 años y lo hizo con parámetros correspondientes al Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) de 0,9 a 3 días y para tratar un caudal promedio de 2,2 2,2 m³/d, en él se utilizó vegetación macrófitas (Junco) y se obtuvieron

eficiencias redondeando el 50% para cada contaminantes y alcanzando casi el 100% en lo que correspondía a los Sólidos Suspendedos Totales (SST). (Díaz Acero, 2014)

De allí en adelante se han realizado varias investigaciones con modelos tanto físicos como matemáticos por las Universidades Colombianas y particulares para el estudio y análisis de estos sistemas naturales.

A continuación, se muestra en la tabla 1, algunos resultados de porcentajes de remoción obtenidos en diferentes países mediante la utilización de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 1. Resultados obtenidos en diferentes países mediante la utilización de humedales para el tratamiento de aguas residuales.

CIUDAD	POBLACIÓN (Hab)	CAUDAL (m3/d)	TIPO DE AFLUENTE	REMOCIÓN DBO5 (%)	REMOCIÓN DQO (%)	REMOCIÓN SST (%)
E.E.U.U	California	30000	Secundario	82	-	77,6
E.E.U.U	Arcata	19056	Secundario	-	-	-
España	Los Gallardos	1200	Secundario	75,5	-	96
España	Bustillo de Cea	400	Sin información	65,95	57,34	67,34
Perú	Lacabamba	1300	Secundario	48	-	96
Brasil	Botucatu	-	Secundario	-	88	80
Colombia	Tunja (Prueba piloto)	-	Secundario	45,1	51,7	88,6
Colombia	Cogua, Cundinamarca (prueba piloto)	6	Secundario	80	-	44
Colombia	Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito (prueba piloto)	-	Secundario	52	70	-

Fuente: (Espinosa Ortiz, 2014)

1.2 Conceptos

Las aguas residuales son definidas por la NOM-001-SEMARNAT-1996 como: “*Aquellas aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos, y en general de cualquier otro uso; así como la mezcla de ellas*”; como su nombre lo indica son el residuo que arroja el utilizar el agua potable que es suministrada en los diferentes municipios por el Sistema de acueducto con el que se cuenta a las diferentes viviendas, instituciones, centro comerciales o industrias que se encuentran en el casco urbano de este; estas pueden ser de tipo industrial o municipal según el uso que se le dé. Debido a los agentes contaminantes que presentan las aguas residuales de tipo industrial, se les debe hacer un tratamiento especial previamente a que sean llevadas al sistema de alcantarillado con que se cuenta, debido a que las propiedades de este tipo de aguas varían de una a otra industria, los procesos de tratamiento que se le deben hacer depende de esto.

Existen aguas residuales industriales que tienen características compatibles con las municipales, por lo tanto, a estas se les puede realizar el mismo proceso de descontaminación enviándolas directamente a los sistemas de alcantarillados municipales sin un proceso previo de descontaminación especial. En los sistemas de alcantarillado municipal debido a los diferentes usos del suelo que se presentan en el PBOT podemos encontrar que el agua que se colecta ha pasado por una amplia variedad de usos, por lo que podemos encontrar diferentes contaminantes. (Ver Tabla 2)

Tabla 2. Componentes encontrados en el agua residual.

Contaminantes	Fuente	Importancia Ambiental
Sólidos Suspendidos	Uso doméstico, desechos industriales y agua infiltrada a la red.	Causa depósitos de lodo y condiciones anaerobias en ecosistemas acuáticos.
Compuestos orgánicos biodegradables	Desechos domésticos e industriales.	Causa degradación biológica, que incrementa la demanda de oxígeno en los cuerpos receptores y ocasiona condiciones indeseables.
Microrganismos patógenos.	Desechos domésticos.	Causan enfermedades transmisibles
Nutrientes	Desechos domésticos e industriales.	Puede causar eutrofización.
Compuestos orgánicos refractarios*.	Desechos industriales.	Pueden causar problemas de sabor y olor, pueden ser tóxicos o cancerígenos.
Metales pesados.	Desechos industriales, minería, etc.	Son tóxicos, pueden interferir con el tratamiento y reúso del efluente
Sólidos inorgánicos disueltos	Debido al uso doméstico o industrial se incrementan con respecto a su nivel en el suministro de agua.	Pueden interferir con el reúso del efluente.

Fuente: (Lizarazo Becerra & Orjuela Gutierrez, 2013)

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) en promedio únicamente el 10% de las aguas residuales que se recolectan en Latinoamérica son procesadas mediante cualquier tipo de tratamiento. Además, hay mucha incertidumbre en cuál debería ser el modo correcto en que se deben operar las plantas de tratamiento que existen en la actualidad, es necesario hacerles el tratamiento pues aparte de que se deben mitigar los impactos ambientales que estas puedan causar, también se debe preservar la salud pública.

En cada región se utilizan tratamientos particulares según el contenido que presente el agua, no obstante, esto en la actualidad existen cierto número de opciones modernas y tradicionales que se presentan al diseñar una planta de tratamiento. Se debe realizar una evaluación del tratamiento requerido, ya que este debe ser óptimo para poder determinar los métodos de tratamiento necesarios y procurar que estén dentro del presupuesto.

En aquellas regiones o áreas donde no es viable la construcción de una planta convencional, se podrían emplear muchas otras opciones que son naturales y dan resultados eficientes y óptimos en este tipo de casos, todo esto con el fin de brindar un efluente ya sea que se pueda reusar o que pueda ser llevado de manera segura al medio ambiente.

La finalidad del tratamiento de las aguas servidas no ha sido nunca generar un efluente totalmente potable ni que no tenga especies microbianas, si no, siempre ha sido mitigar los niveles de contaminantes que estos tengan a niveles más seguros de exposición, donde pueda ser llevada a su curso sin causar repercusiones a cauce natural.

Se debe para ello escoger el tratamiento adecuado que se le debe brindar al agua según los parámetros que esta tenga, lo que implica conocer la cantidad y composición de la corriente de residuos, los índices permisibles del efluente, las opciones adecuadas de uso y descarga, pretratamiento industrial si es necesario hacerle y la factibilidad de funcionamiento que esta pueda tener.

Existen diferentes métodos para la depuración de estas aguas, los cuales se pueden clasificar según el tipo de sistema que se utilice, en los que podemos encontrar que se dividen por tipos de procesos utilizados y el grado de tratamiento; según el tipo de proceso se clasifican en:

- **Físicos:** En este tipo de proceso es donde se remueven el material sólido que se encuentra en suspensión en el agua, por medio de rejillas, trituradores, sedimentadores primarios, espesadores y filtros.
- **Químicos:** En este tipo de proceso se aplican productos químicos para la depuración de los agentes contaminantes, Por lo general los procesos que ocurren son de tipo precipitación, adsorción y desinfección.
- **Biológicos:** Este proceso se lleva a cabo gracias a la actividad biológica de los microorganismos, eliminando las sustancias orgánicas biodegradables presentes, también la eliminación del Nitrógeno (N) y el Fosforo (P) y producción de gases.

Según el grado de tratamiento podemos encontrar la siguiente clasificación:

Tratamientos Preliminares: Hace referencia a aquellos tratamientos que buscan adecuar el agua residual por medio de equipos tales como rejillas, tamices, etc. para facilitar los tratamientos y preservar las instalaciones donde se depurará el agua residual de erosiones y taponamientos. A continuación, algunos de los tratamientos preliminares utilizados:

- **Cribado:** Son rejillas o rejillas de barras paralelas que se encargan de retener sólidos gruesos que flotan o que se encuentren suspendidos en el agua.

- **Tamices Estáticos:** Es un filtro que se utiliza para la separación de los sólidos contenidos en el líquido en estaciones de depuración de aguas residuales
- **Trituradores de Canal:** Su función radica en reducir los sólidos con trituradores dobles y tecnología de barrido.
- **Homogenización o tanques de igualación:** Son los que se encargan de regular y/o disminuir la concentración con que pasa el agua residual; la implementación de estos se hace más que todo para el tratamiento de las aguas industriales y municipales.
- **Desarenadores:** son obras hidráulicas que sirven para remover (evacuar) y separar (decantar), el material sólido que se encuentra en el agua residual que es transportada por un canal, son estructuras que remueven arenas y algunas piedras, para evitar la acumulación y el averío de sistemas que se encuentren aguas abajo de este.

Tratamiento Primario: (Rojas, 2002) deduce que este tratamiento es el que está destinado al acondicionamiento y preparación de las aguas residuales para poder proteger las instalaciones, y procurar el debido funcionamiento de los sistemas adyacentes o posteriores a este.

- **Sedimentación:** (R. S, N.E.) Define este proceso como en el cual se separan los sólidos en suspensión en las aguas residuales mediante su tratamiento. Señala que esto se basa en la diferencia de peso específico que presentan las partículas sólidas y el líquido en el que están suspendidas. Es un proceso físico donde por medio de la diferencia de densidades y peso entre el líquido existente y las partículas contenidas en éste, ocurre un asentamiento de los sólidos que más pesan dando lugar a que éstos se separen del líquido.

- **Flotación:** Utilizado para separar las partículas sólidas o líquidas suspendidas en un medio líquido. Utilizado para la depuración de grasas y aceites.
- **Coagulación:** Se utilizan coagulantes químicos para que las partículas de una suspensión tiendan a juntarse unas a otras, conformando partículas más grandes que se precipiten rápidamente.

Tratamiento Secundario: Remoción de la DBO soluble y de sólidos suspendidos que no son eliminados en los anteriores tratamientos, se emplea masivamente para remover la contaminación orgánica disuelta; estos procesos originan reacciones generalmente biológicas.

- **Sistema de biomasa en suspensión – Lodos activados:** En este tipo de tratamiento se agita o airea agua residual y lodos biológicos, las bacterias mediante la obtención de oxígeno reducen la materia orgánica presente y las lleva a sustancias más simples.
- **Sistema de biomasa adherida:** Los microorganismos se adhieren a un sistema de soporte que puede ser de piedra, plástico o cualquiera otra materia inerte.

Tratamiento terciario. Eleva la calidad del influente tratado a través de procesos físicos y químicos como la cloración), la ozonificación, la ósmosis inversa, la electrodiálisis, la adsorción por carbón activado, etcétera. (R. S, N.E.)

Entre los sistemas de tratamiento de agua residual, podemos encontrar los siguientes:

Planta de tratamiento

Es un grupo de sistemas y operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuyo fin es que por medio de un grupo de equipos se remueve o disminuye la cantidad de contaminantes, bien sean residuales, de procesos, de abastecimiento o naturales. Según los procesos que se realicen en las diferentes plantas de tratamiento, estas se pueden clasificar en tecnologías convencionales y no convencionales. Algunos de los procesos que se aplican en tratamientos convencionales como sedimentación, filtración, adsorción, precipitación química, intercambio iónico, degradación biológica, entre otros, son incluidos en las tecnologías no convencionales junto con tratamientos naturales propios de éstas como fotosíntesis, foto oxidación, asimilación por parte de plantas, etc., con la diferencia de que en las tecnologías convencionales el proceso de depuración avanza de manera secuencial en tanques y reactores, a velocidades aceleradas debido a la contribución de energía, mientras que en las tecnologías no convencionales éste proceso ocurre a velocidad natural, es decir, sin aporte de energía, desarrollándose los procesos en un único Reactor-Sistema. (Alianza por el agua, S.F)

En las tecnologías convencionales se diferencian dos líneas de tratamiento:

- Línea de agua: Incorpora los procesos o tratamientos que permiten disminuir los contaminantes existentes en el agua residual. (Ver figura 1)



Figura 1. Etapas de la línea de agua, ordenadas secuencialmente de izquierda a derecha, en el tratamiento de aguas residuales urbanas.

Fuente: (Alianza por el agua, S.F)

- Línea de lodos: donde se tratan la gran mayoría de los subproductos que se producen en la línea del agua. (Ver figura 2)



Figura 2. Tratamiento en la línea de lodos.

Fuente: (Alianza por el agua, S.F)

Las plantas de tratamiento pueden funcionar de las siguientes maneras:

- **Sistema anaeróbico:** El tratamiento anaerobio es un proceso donde se transforma y no se destruye la materia orgánica, es utilizado para residuos industriales y domésticos; utilizado en las plantas con residuos industriales con alta carga contaminante o en las plantas municipales, usa poca energía.

- **Sistema aeróbico:** Se caracteriza por los procesos catabólicos oxidativos que se llevan a cabo en este tipo de tratamiento, proporciona alto contenido de oxígeno para que los microorganismos puedan degradar los contaminantes a dióxido de carbono y agua. Este sistema es utilizado para plantas a gran escala.

- **Floculación iónica:** Es un proceso en el cual los contaminantes se adhieren a las moléculas de agua y mediante una radiación electrolítica se sustraen los electrones de todos los componentes que no son agua para luego quedar suspendidos y retirarlos del agua; no requiere uso de materiales orgánicos o químicos.

Lagunas de oxidación o de estabilización

Es un tipo de tratamiento que es usado para la depuración biológica de aguas residuales industriales y municipales provenientes de distintos usos; se debe hacer un tratamiento primario para retirar los componentes sólidos provenientes del sistema, luego se llevará el agua a una serie de lagunas en la cual ocurren procesos de oxidación y sedimentación, donde la materia orgánica

es transformada a diferentes nutrientes que pasaran a hacer parte de la comunidad de plantas y el ecosistema acuático presente. Según la forma en que actúa, se pueden clasificar en:

- Laguna de oxidación aerobia (Aireadas)
- Laguna de oxidación anaerobia (Sin aireación)
- Laguna de oxidación facultativa (Mezcla de aerobia y anaerobia)
- Laguna de acabado

Trampa de grasas

La trampa de grasas es el sistema de tratamiento primario que se le realiza a las aguas residuales industriales, su manera de operar es básicamente separando densidades, donde el agua residual contaminada al pasar por la trampa se separa de la grasa, logrando así que se descargue al sistema de alcantarillado un agua residual comprendida dentro de los límites admisibles por las normas ambientales. (ISO 14000). (Lizarazo Becerra & Orjuela Gutierrez, 2013)

Fosas sépticas

Son cámaras herméticas elaboradas en diferentes materiales tales como: concreto, fibra de vidrio, PVC o plástico, cuya función es la de almacenar y depurar el agua residual. Se realizan procesos de sedimentación y anaeróbicos encargados de reducir los sólidos y la materia orgánica. Éste tratamiento es sencillo y no muy eficaz, por lo que son generalmente usados para tratar el agua residual de viviendas localizadas en zonas donde no existe una red de alcantarillado o

porque la conexión a algún sistema de alcantarillado existente resulte inviable económicamente por cuestiones de lejanía.

Humedales

Son zonas donde el factor primordial que domina el medio y la vida tanto vegetal como animal es el agua. Los humedales se originan en lugares donde la capa freática se encuentra en la superficie terrestre, cerca de ella o donde el agua cubre la tierra. En nuestro ecosistema se pueden reconocer cinco (5) tipos de humedales naturales principales, los cuales son: Marinos, Estuarios, Lacustres, Rivereños y Palustres. En ellos existe un ecosistema microbiano depurador del agua que al pasar los años los científicos fueron descubriendo, estudiando y analizando, logrando revelar resultados favorables para la remoción de agentes contaminantes en el agua; es así como se empieza a utilizar el concepto de humedal construido o artificial. Según (Granados Gomez, 2018) se definen como unos sistemas biológicos que se encuentran encerrados mediante una capa de impermeabilización y en donde la depuración de las aguas surge a partir de mecanismos que solo ocurren dentro de los humedales naturales, en el cual sucede una combinación de diferentes procesos tanto físicos, químicos y biológicos al interactuar el agua con el suelo.

El uso de plantas y microbios para la limpieza del medio ambiente es conocido como fitorremediación, que consiste en aprovechar la capacidad de las macrófitas y la energía solar para tratar diversos contaminantes del medio ambiente. En este proceso las plantas actúan como trampas o filtros biológicos descomponiendo los contaminantes y fijando en sus raíces y

tallos las sustancias metálicas presentes para estabilizar o metabolizarlas. (Quispe Baldeón, Arias Chavez, Martinez Suarez, & Cruz Huaranga, 2017)

Gran parte de los sistemas de tratamiento convencionales de agua residual no han resultado factible técnica, ambiental o económicamente; bien sea en sus etapas de construcción, ejecución o mantenimiento, lo que hace necesario implementar nuevas tecnologías adecuadas de menor costo, eficaces y confiables. Es por esto que los humedales artificiales se convierten en una buena alternativa de estudio e implementación nueva para el tratamiento de aguas residuales.

En un humedal construido suceden distintos mecanismos de eliminación de agentes patógenos presentes en el agua residual, donde ocurren una gran variedad de procesos físicos, químicos y biológicos. Por lo tanto, es importante que los componentes involucrados interactúen entre ellos. (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

A continuación, se muestran los principales procesos y mecanismos que suceden en los humedales artificiales. (Ver tabla 3)

Tabla 3. Mecanismos de remoción en los sistemas de tratamiento basados en macrófitas.

Parámetro evaluado	Mecanismos de remoción
Sólidos suspendidos	-Sedimentación/Filtración
DBO	-Degradación microbiana (aeróbica y anaeróbica) -Sedimentación (Acumulación de material orgánico/lodo en la superficie del sedimento)
Nitrógeno Amoniacal	-Amonificación seguida por nitrificación y desnitrificación amoniacal -Captado por la planta
Patógenos	-Sedimentación/Filtración -Declinación -Radiación ultravioleta -Excreción de antibióticos por las raíces de las macrófitas

Fuente: (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

Se utilizan como una alternativa sostenible para la depuración de aguas en tanto al tratamiento principal o complementario que debe realizarse, en especial en las zonas donde es difícil implementar adecuadamente un sistema de tratamiento convencional. Estos se pueden clasificar según por donde circule el efluente como:

- **De flujo superficial:** Mirian immaculada en su trabajo final para el optar al título de su maestría (Fernandez Gonzalvo , 2017) define a este tipo de humedales como en los cuales el agua se encuentra expuesta directamente a la atmosfera y esta misma circula debidamente, a través de los tallos de las especies vegetales implantadas. Son considerados como una diversidad de los lagunajes clásicos o lagunas de oxidación, con la pequeña diferencia de que estos operan a bajas profundidades de aguay de que en los humedales se utiliza otro tipo de vegetación, como lo son las plantas acuáticas emergentes.

- **De flujo subsuperficial:** Según (Espinosa Ortiz, 2014) en su trabajo define a los humedales artificiales de flujo libre superficial aquellos sistemas en los cuales el agua que es su principal componente no se encuentra expuesta a la atmósfera. Como los de flujo superficial pueden o no presentar una impermeabilización en el fondo, normalmente estos sistemas presentan un lecho rocoso generalmente que se encuentra compuesta de grava, arena, tierra; estas son las que se encargan de soportar el crecimiento de la especie vegetal que se encuentra emergente y participa a su vez en el tratamiento del agua residual. El nivel de agua se encuentra por debajo de la superficie de soporte y debe fluir solamente a través del medio que sirve para el desarrollo de la película microbiana, el cual se encarga en su mayor parte del tratamiento de agua, en el cual las raíces están enraizadas hasta el fondo del lecho. (Díaz Acero, 2014)

- a) *Humedales de flujo subsuperficial horizontal:* el agua residual fluye horizontalmente de forma continua a través del lecho rocoso que se implemente en el sistema. Debe contar con cámaras de registro de entrada y de salida, para así asegurar la distribución y recolección adecuada del agua residual tratada. Lo que normalmente se utiliza es un método en el cual la tubería es perforada, brindando con ello una mejor distribución y recolección del agua; por lo general en estos sistemas el agua ingresa por un extremo en la parte superior del humedal y es recolectada en la parte inferior opuesta. (Díaz Acero, 2014). El esquema de este tipo humedal se presenta a continuación (ver figura 3 y 4)

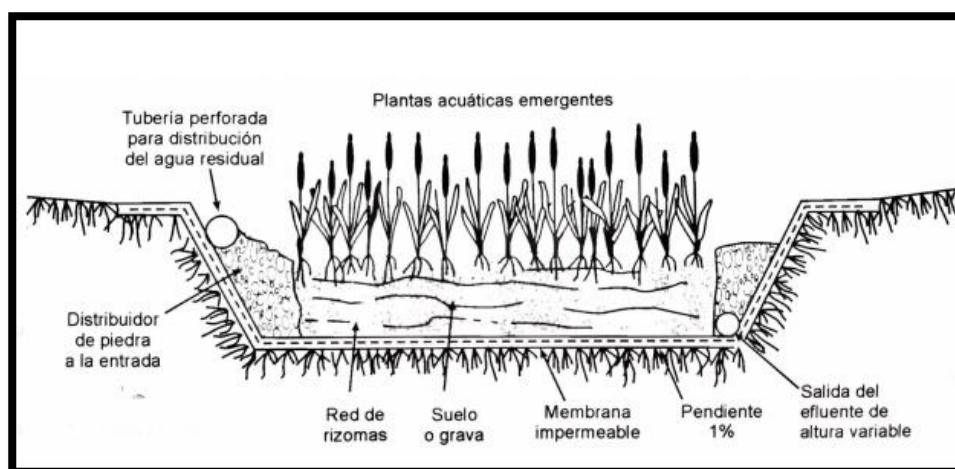


Figura 3. Humedal de flujo subsuperficial.

Fuente: (Romero Rojas, 1999)

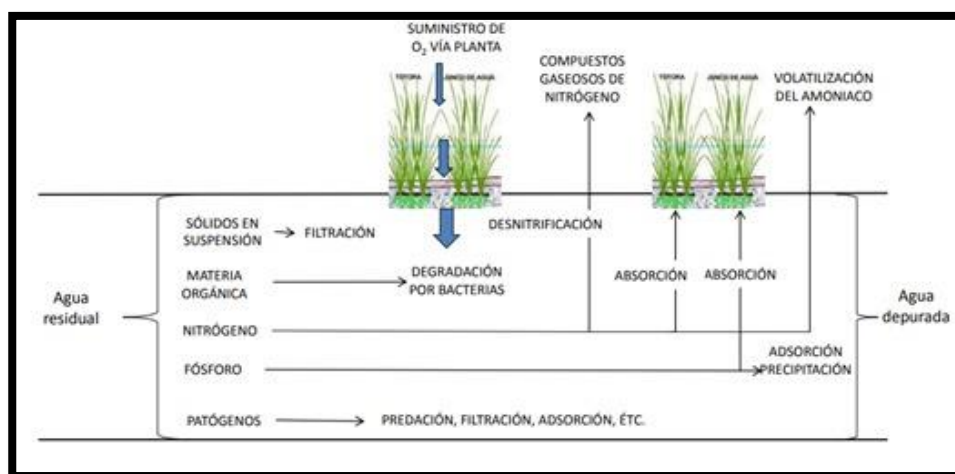


Figura 4. Procesos de depuración del agua residual en humedal construido de flujo subsuperficial.

Fuente: (IMTA, 2012)

- b) *Humedales de flujo subsuperficial vertical*: Las aguas residuales en este sistema se vierten o riegan a la superficie del humedal desde la parte superior usando un sistema mecánico de riego, y son recogidas por una red de drenaje ubicada en el

fondo de este. Las cargas que estos reciben son intermitentes, lo que permite que las reacciones aeróbicas se produzcan con rapidez. (Díaz Acero, 2014)

A continuación, se muestra el diagrama donde se contempla el desglose de los humedales artificiales. (Ver figura 5)

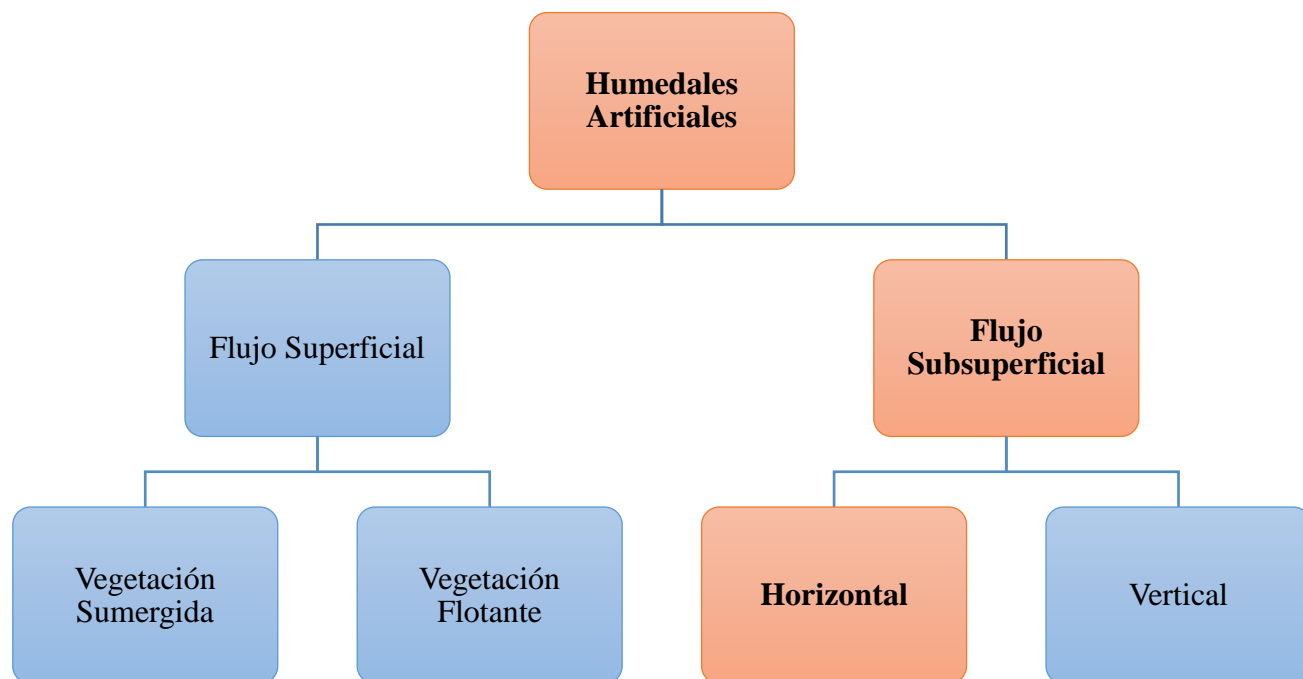


Figura 5. Esquema de humedales artificiales.

Fuente: (Autores, 2019)

Capítulo 2: Descripción de las propiedades o bondades y limitaciones de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.

2.1 Propiedades o Bondades

Los humedales artificiales son una alternativa natural para la depuración de aguas residuales, este sistema resulta viable tanto técnica como económicamente, ya que, para su construcción, mantenimiento u operación, no es necesario la utilización de maquinaria o químicos para que el agua sea tratada; además de esto para su construcción no es necesario la utilización de materiales que normalmente son utilizados en obras civiles.

Debido a los costos tan elevados y el difícil mantenimiento y operación que conlleva implementar una Planta de Tratamiento de Agua Residual Convencional (PTAR), en muchos lugares se han venido implementando los humedales artificiales para el tratamiento de estas, por lo que es un método eficiente y no obstante esto sostenible para el medio ambiente.

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal son generalmente los más utilizados ya que el efluente no se encuentra en contacto directo con el ambiente, por lo que mitiga los impactos ambientales y protege la salud pública, no generando malos olores ni produciendo contaminación directa. (Carlos A, Arias I, & Brix, 2003)

La implementación de estos sistemas trae consigo bondades para el medio ambiente como también para la salud pública, entre las que podemos encontrar las siguientes:

- Según (Marín Montoya & Correa Ramírez, 2010) Proporcionan varios beneficios a la mejorar de la calidad del afluente, ya que genera un hábitat para la vida salvaje y realza las condiciones estéticas de los espacios abiertos en los que se implementan.
- Estos sistemas resultan trabajando de manera integral y respetuosa con el medio ambiente, ya que con sus procesos eliminan la materia orgánica presente en el agua, los sólidos que se encuentran en suspensión y algunos elementos eutrofizan tés y microorganismos patógenos.
- Comparado con una planta convencional los costos de instalación están muy por debajo de estas.
- Según (Lopez Linares & Rodriguez Alvarez, 2016) este es un tratamiento que no genera ningún consumo de energía, la única energía que consume es la solar para poder realizar los procesos de remoción, no se encuentra limitado en su capacidad, pues puede albergar múltiples usos para la depuración de aguas provenientes de diferentes usos.
- El mantenimiento que se le debe hacer es muy básico y conlleva un costo muy bajo y casi nulo uso de energía para ello.
- Estos humedales son muy eficaces en lo que respecta a la remoción de DQO, SST y DBO, algunos compuestos orgánicos presentes en el agua y metales que también podemos encontrar en ella. Se puede remover N y P pero se debe retener mucho más tiempo el agua dentro del humedal. (EPA U. , 2000)
- Para su construcción, es necesaria una infraestructura asequible y simple, además, el mantenimiento es fácil y económico en comparación con los sistemas de tratamiento convencional. (Fazlollahi & Eslamian, 2014).

- Estos sistemas construidos no producen lodos ni biosólidos residuales luego de su funcionamiento (EPA U. , 2000)
- Espinosa Ortiz en su trabajo final para la maestría (Espinosa Ortiz, 2014) menciona que una gran ventaja de estos es que proporcionan tratamiento en forma efectiva y de manera pasiva. También, es poca la utilización de equipos de mecanismo, electricidad y monitoreo por personal especializado.
- Algunos insectos vectores y mosquitos no son un problema en estos humedales mientras el sistema se opere adecuadamente y el nivel subsuperficial de flujo se mantenga. (EPA U. , 2000)
- En los sistemas de flujo subsuperficial se mitiga la producción de mal olor en su mayoría, debido a que el flujo no está expuesto directamente a la atmósfera.
- Los humedales de flujo superficial proporcionan tratamiento efectivo pasivamente y disminuyen la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de mano de obra calificada. (EPA U. , 2000)
- Comparados con los humedales de flujo superficial estos son mucho más pequeños (Sanchez Gil & Vélez, 2016)

En estos sistemas la vegetación juega un papel primordial en el buen funcionamiento, siendo algunas funciones las siguientes:

- Permite la transmisión de oxígeno a los microorganismos presentes en el sistema y así mismo la aireación del sistema radicular.
- Absorbe algunos nutrientes como lo son el fósforo y el nitrógeno.

- Asimila algunos contaminantes en sus tejidos para luego eliminarlos.
- Los sólidos pueden quedar sujetos en el sistema radicular que desarrollan entre ellas.

2.2 Limitaciones

- La eliminación de N, DBO y DQO en los humedales de flujo subsuperficial horizontal es un procedimiento totalmente renovable y continuo, ya que nunca para. Algunos compuestos orgánicos, como también el fósforo y algunos metales quedan ligados al sedimento y por ello son acumulados con el tiempo. Por lo que se le debe hacer limpieza a la grava al transcurrir cierto tiempo de funcionamiento del sistema. (Espinosa Ortiz, 2014)
- Si se contiene un grado elevado de grasas o aceites en el agua residual, el lecho de grava puede ser muy susceptible a su colmatación. (EPA U. , 2000)
- Presenta baja eficiencia de remoción de contaminantes en épocas de invierno. (Lopez Linares & Rodriguez Alvarez, 2016)
- Los sistemas de humedales de flujo superficial normalmente pueden reducir algunas coliformes fecales, al menos en un orden de magnitud, no obstante esto, no se alcanzan a cumplir con los límites permisibles de descarga en todas las localidades, por lo que en estos casos se recomienda hacerle una depuración subsiguiente a esta, tratando de desinfectar con luz ultravioleta, la cual ha sido utilizado con éxito en muchas aplicaciones (Espinosa Ortiz, 2014)
- Las bajas temperaturas que se pueden presentar en zonas con climas fríos, pueden reducir la eliminación de NO_3 , DBO y NH_3 , esto es debido a que se ve delimitado el funcionamiento del humedal si no se mantiene la temperatura adecuada para que la vegetación y los microorganismos presentes se desarrollen de la manera adecuada. Para

evitar que esto suceda se recomienda manejar en zonas con clima frío un tiempo de retención hidráulico en el sistema y una mayor área superficial de este, aunque esto puede resultar no muy factible técnica o económicamente.

- Se requiere una mínima cantidad de agua para que sobrevivan, pero no soportan estar completamente secos. (Marín Montoya & Correa Ramírez, 2010)

Capítulo 3: Consideraciones y modelos planteados para el Diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFSS).

Los sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal se pueden considerar como depuradores biológicos y el rendimiento de se puede manejar simulando el proceso ocurrido en una cinética de primer orden de flujo a pistón para la remoción de N y DBO, ya que en el funcionamiento de estos sistemas el flujo se asimila a esto. En este capítulo se determinaran las consideraciones que se deben tener en cuenta para realizar el diseño y así mismo los diferentes tipos de diseño que se pueden presentar para ello, ya que como tal no existe un consenso universal que nos indique cual es el procedimiento con la mejor aproximación adecuada para el diseño; por lo tanto se deberán realizar los diferentes cálculos establecidos y determinar con el factor limitante presente en el agua residual, cuáles serán las dimensiones adecuadas del humedal para la remoción de agentes contaminantes que se encuentren en ella.

3.1 Consideraciones de diseño.

Para el diseño de un humedal artificial, se deben tener presentes algunas consideraciones tales como pueden ser la selección del sitio donde se vaya a implementar y los índices de contaminación permisibles para cada agente contaminante según la normatividad vigente en el país donde se piense implementar; en Colombia estos parámetros estipulada por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible mediante la Resolución 0631 del 17 de Marzo del 2015, por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

3.1.1 Selección del sitio.

3.1.1.1 Topografía del terreno. Un humedal artificial puede construirse casi en cualquier lugar. Las especies de plantas emergentes utilizadas pueden tolerar la congelación invernal mucho mejor que los sistemas de plantas acuáticas. Debido a que la clasificación y la excavación representan un factor de costo importante, la topografía es una consideración relevante en la selección de un sitio apropiado. ((EPA), 1988). Para la implementación de un humedal construido se recomienda buscar un lugar que cuente con condiciones topográficas adecuadas, que sea lo más horizontal posible o en su efecto que tenga una ligera pendiente, debido a que los sistemas de flujo subsuperficial se suelen diseñar y construir con pendiente del 1% o superior.

3.1.1.2 Clima. Para poder implementar los humedales en zonas con climas fríos, se debe tener en cuenta y preservar la temperatura interior de este y los objetivos del tratamiento, pues este tipo planta de tratamiento funciona correctamente con las condiciones óptimas y necesarias. El rendimiento y el funcionamiento correcto del proceso de tratamiento es muy sensible a las variaciones de temperatura, puesto que los mecanismos de tratamiento principales que ocurren en él, son de origen biológicos. En caso de que las bajas temperaturas no permitan alcanzar los objetivos de tratamiento establecidos para su funcionamiento, será necesario almacenar el agua.

Los humedales que son construidos en zonas con climas fríos, podrían necesitar grandes áreas o un especial funcionamiento para alcanzar los objetivos de depuración esperados. Por el contrario, los climas que cuentan con temperaturas más elevadas podrían requerir fuentes de agua adyacentes para prevenir el secado del humedal. (Silva R. & Zamora Z. , 2005)

3.1.1.3 Estudios geotécnicos: Es importante conocer el suelo sobre el que se piensa trabajar, ya que los datos sobre este pueden incidir directamente en la toma de decisiones. Algunos de los datos más relevantes que arroja el estudio de suelos son, la capacidad de carga, tipo de suelo, nivel freático y también necesario averiguar si la zona donde se implementará es susceptible a inundaciones.

3.1.1.3.1 Suelo. El sistema debe poseer una capa impermeable que garantice la estancia del agua residual dentro del humedal, con el fin de prevenir la filtración del nivel freático que haya en la zona; el material de soporte dependerá de las condiciones con que se cuenten, podrá ser paredes con grava y bases de concreto que hacen parte de los canales horizontales que posea la estructura. (Zamora Z & Silva R, 2005).

3.1.1.3.2 Riesgo de inundación. Deben estar ubicados a una distancia considerable de las comunidades que se encuentren en la región, en especial las que estén aguas debajo de éste. Se debe conocer el caudal a tratar para no sobrepasar la capacidad que pueda soportar el canal. (Silva R. & Zamora Z. , 2005).

3.1.2 Factores hidrológicos. El rendimiento de cualquier sistema de humedal artificial depende de la hidrología del sistema y de otros factores. La precipitación, la infiltración, la evapotranspiración, la velocidad de carga hidráulica y la profundidad del agua, pueden afectar la eliminación de elementos orgánicos, nutrientes y oligoelementos no solo al alterar el tiempo de detención, sino también al concentrar o diluir las aguas residuales. Los cambios en el tiempo de

detención o el volumen de agua, pueden afectar significativamente el rendimiento del tratamiento.

Para el diseño de un humedal se deben tener en cuenta los factores mencionados anteriormente, ya que estos pueden afectar bien sea en su construcción o el debido funcionamiento de este, ocasionando que la eficiencia que se espere que tenga removiendo contaminantes del agua residual disminuya.

3.1.3 Índices permisibles de contaminación en vertimientos de aguas residuales a cuerpos de agua. Según el artículo 8 contemplado en el capítulo V de la resolución 0631 donde se exponen los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas, (ARD) de las actividades industriales, comerciales o de servicios; y de las aguas residuales (ARD y ARND) de los prestadores de servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales. Los parámetros a cumplir son los siguientes. ([Ver Apéndice 1](#))

Según el artículo 9 contemplado en el capítulo VI de la resolución 0631 donde se exponen los parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas, (ARND) a cuerpos de aguas superficiales de actividades de agroindustria y ganadería. Los parámetros a cumplir son los siguientes.

-Agroindustria: ([Ver Apéndice 2](#))

-Ganadería: ([Ver Apéndice 3](#))

Según el artículo 10 contemplado en el capítulo VI de la resolución 0631 donde se exponen los parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas, (ARND) a cuerpos de aguas superficiales de actividades de minería. Los parámetros a cumplir son los siguientes. (Ver Apéndice 4)

Según el artículo 11 contemplado en el capítulo VI de la resolución 0631 donde se exponen los parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas, (ARND) a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con hidrocarburos (Petróleo crudo, gas natural y derivados). Los parámetros a cumplir son los siguientes. (Ver Apéndice 5).

Para conocer los índices permisibles de otros tipos de industrias en las que se producen otros tipos de bienes y/o servicios de los mencionados anteriormente (Alimentos y bebidas, Fabricación y manufactura de bienes, servicios y otras actividades) que se encuentran descritos en los capítulos VI, VII y VIII, nos podemos dirigir a la resolución 0631 del 17 de marzo de 2015. (Resolución) descrita por Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.

3.2 Modelos matemáticos planteados para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Existen diferentes modelos matemáticos que se han propuesto para el diseño de los humedales artificiales a lo largo del estudio que se ha hecho frente a esta alternativa natural para la depuración de aguas residuales, entre los cuales podemos encontrar los siguientes:

3.2.1 Modelo propuesto por Sherwood C. Reed, Crites RW y Middlebrooks en su libro *Natural Systems for Waste Management and Treatment*

Es un modelo de tipo volumétrico en el cual se considera a los humedales como unos reactores biológicos en los cuales su funcionamiento se puede describir por la cinética de primer orden de un reactor que trabaja su flujo a pistón. Se presentan diferentes ecuaciones para la obtención de los resultados según el tipo de contaminante que se desee eliminar.

- Remoción de DBO

Las ecuaciones que se utilizan son las siguientes:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-Kt} \quad Ec(1)$$

$$Kt = K_{20} * 1,06^{(T-20)} \quad Ec(2)$$

Figura 6. Coeficiente de temperatura, modelo Reed.

Fuente: (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006)

Co: Índice de DBO del afluente (mg/l)

Ce: Índice de DBI efluente (mg/l)

Kt: Proporción de la constante de temperatura de las aguas residuales (T°C)

Donde, K_{20} es la proporción de la constante de temperatura de las aguas residuales $T=20^{\circ}\text{C}$. (Ver tabla 2).

Nota: En algunos proyectos el valor constante 1,06 que aparece en la ecuación es aproximado a 1,1, pero el modelo inicialmente propuesto por los autores indica que debe utilizarse 1,06 para obtener unos resultados mejores.

$$A_s = Q * \frac{\ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{Kt * d * n} \quad Ec (3)$$

Figura 7. Estimación área superficial para remoción de fosforo, modelo Reed.

Fuente: (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006)

Donde;

As: Área de superficie del humedal construido (m²)

Q: Flujo (m³/día)

d: Profundidad promedio del agua en el filtro (m).

n: Porosidad de la estructura del filtro (% como decimal)

En donde el valor de “n” varía según el tipo de sustrato utilizado para material de soporte de la vegetación que ya se encuentran estipulados. (Ver tabla 4)

Tabla 4: Características típicas del medio para humedales de flujo subsuperficial

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

Fuente: (Romero Rojas, 1999)

- Remoción de Nitrógeno
- Nitrificación

Se utilizarán las ecuaciones 1, 2 y 3 planteadas en la remoción de DBO, a diferencia de que ahora nuestro coeficiente de temperatura K_T estará sujeto a una nueva Variable la cual es llamada constante de nitrificación (K_{NH}) y que se determina según la siguiente ecuación:

$$K_{NH} = 0,01853 + 0,3922(r_z)^{2,6077} \quad Ec(4)$$

Figura 8. Constante de nitrificación, modelo Reed.

Fuente: (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006)

Donde;

r_z : Porcentaje de la profundidad del lecho ocupado por la zona de raíces, fracción decimal (0 a 1)

Por lo tanto:

$$Kt = K_{NH} * 1,06^{(T-20)} \quad Ec (5)$$

Figura 9. Coeficiente de temperatura para nitrificación, modelo Reed.

Fuente: (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006)

- Denitrificación:

Se utilizan las ecuaciones 1 y 3 planteadas en la remoción de DBO, y para el cálculo del coeficiente de temperatura K_T se determinó la siguiente ecuación:

$$Kt = 1,00 * 1,15^{(T-20)} E_c (6)$$

Figura 10. Coeficiente de temperatura denitrificación, modelo Reed.

Fuente: (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006)

- Remoción de Fosforo.

Las ecuaciones que se plantearon son las siguientes:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{\left(\frac{-K_p}{CH}\right)} E_c(7)$$

Figura 11. Coeficiente de temperatura remoción de fosforo, modelo Reed.

Fuente: (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006)

Co: Concentración de fosforo en el afluente (mg/l)

Ce: Concentración de fosforo en el efluente (mg/l)

Kp: 2,74 cm/d (Cte)

CH: Carga hidráulica promedio anual (cm/d)

$$As = b * Q * \frac{\ln\left(\frac{Co}{Ce}\right)}{Kp} \quad Ec \quad (8)$$

Figura 12. Estimación área superficial remoción de fosforo, modelo Reed

Fuente: (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006)

Donde;

As: Área de superficie del humedal construido (m²)

Q: Flujo (m³/día)

b: Factor conversión, 100 cm/m.

Habiendo determinado cual es el agente contaminante limitante para el diseño del humedal, es decir el que requiera mayor área superficial para su remoción, se debe calcular el tiempo de retención hidráulica (TRH) y siguiente a esto calcular las dimensiones correspondientes que tendrá el humedal, ajustando esto a las condiciones topográficas del terreno. Las ecuaciones correspondientes para realizar esto son las siguientes:

$$TRH = \frac{As * d * n}{Q} \quad Ec \quad (9)$$

Figura 13. Tiempo de retención hidráulico, modelo Reed.

Fuente: (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006)

Ancho del humedal:

$$W = \left(\frac{1}{d}\right) * \left(\frac{Q * As}{m * Ks}\right)^{0,5} Ec(10)$$

Figura 14. Ancho del humedal, modelo Reed.

Fuente: (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006)

Donde;

W: Ancho del humedal (m)

Ks: Conductividad hidráulica (m³/m²*d) (Ver tabla 3)

m: Pendiente del lecho del humedal

Largo del humedal:

$$L = \frac{As}{W} Ec(11)$$

Figura 15. Largo del humedal, modelo Reed.

Fuente: (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006)

3.2.2 Modelo matemático propuesto por Kdlec y Knight en su libro *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*.

En este modelo propuesto por Kdlec y Knight en el año 1996, se basa en la carga superficial ya que considera que en este tipo de humedales hay producción de nueva materia

orgánica debido a la proliferación de los microorganismos, la cual será retenida y quedará depositada en el propio humedal. Las expresiones matemáticas que describen este modelo son las siguientes:

$$\frac{C_e - C^*}{C_o - C^*} = e^{\left(\frac{-KT}{HLRA}\right)} \quad Ec(12)$$

$$As = 365 * Q * \frac{\ln\left(\frac{C_o - C^*}{C_e - C^*}\right)}{KT} \quad Ec(13)$$

Figura 16. Estimación del área superficial, modelo Kdlec y Knight

Fuente: (Kadlec, y otros, 2000)

Donde;

Co: Concentración de fosforo en el afluente (mg/l)

Ce: Concentración de fosforo en el efluente (mg/l)

C*: Concentración de fondo (mg/l)

KT: Constante de primer orden dependiente de la temperatura (m/año)

$$KT = K20 * (\theta)^{(T-20)} \quad Ec(14)$$

Figura 17. Constante de temperatura, modelo Kdlec y Knight

Fuente: (Kadlec, y otros, 2000)

As: Área de superficie del humedal construido (m²)

Q: Flujo (m³/día)

HLRA: Carga hidráulica nominal (m/año)

Los valores de las constantes que se encuentran en esta ecuación se encuentran ya estipulados en un estudio realizado por Pidre en el año 2010 y se muestran a continuación para cada tipo de contaminante que se puede presentar en el agua residual. (Ver tabla 5)

Tabla 5. Valores de K20, θ , C* para los distintos contaminantes en HHAA FS

HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL							
	SS	DBO ₅	N _{ORG}	N-NH ₄	N-NO ₃	Nt	Pt
K20 (m/año)	1000	34	17	18	35	22	12
θ	1,065	1	1,05	1,04	1,09	1,05	1
C* (mg/l)	5,1+0,16 Co	3,5+0,053 Co	1,5	0	0	1,5	0,02

Fuente: (Pidre Bocardo, 2010)

Cabe aclarar que el empleo de este método da lugar a la utilización de mayores superficies de área para la implementación de los humedales artificiales comparado con el método volumétrico propuesto por Reed anteriormente mencionado.

La información anterior fue tomada de (Kadlec, y otros, 2000)

Luego de haber realizado el procedimiento del cálculo del área superficial requerida para la remoción de cada contaminante y de haber determinado cual es el factor contaminante para el diseño del humedal, es decir el que mayor área superficial requiera para su remoción se procede a calcular el tiempo de retención hidráulico (TRH) por medio de la Ec(9) y las dimensiones

correspondientes de largo y ancho que tendrá el diseño final del humedal, mediante las siguientes ecuaciones:

$$At = \frac{Q}{\left(\frac{Ks}{Q}\right) * m} \quad Ec (15)$$

Figura 18. Estimación del área transversal, modelo Kadlec y Knight

Fuente: (Kadlec, y otros, 2000)

Donde;

At: Área de la sección transversal del humedal

Ks: conductividad hidráulica (Ver tabla 3)

m: Pendiente del lecho

Se determina el ancho (W) del humedal:

$$W = \frac{At}{d} \quad Ec(16)$$

Figura 19. Ancho del humedal, modelo Kadlec y Knight

Fuente: (Kadlec, y otros, 2000)

El largo se determina por medio de la Ec(11)

3.2.3 Modelo matemático propuesto por Crites, R.W. and G. Tchobanoglous en su libro *small and decentralized wastewater management systems* en 1998.

Las ecuaciones que se describen en este modelo matemático son las siguientes:

$$Kt = K_{20} * 1,06^{(T-20)} \quad Ec (16)$$

Figura 20. Coeficiente de temperatura, modelo de Crites, R.W. and G. Tchobanoglous

Fuente: (Crites & Tchobanoglous, 1998)

$$TRH = \ln\left(\frac{C_e}{C_o}\right) / Kt \quad Ec (17)$$

Figura 21. Tiempo de retención hidráulico, modelo de Crites, R.W. and G. Tchobanoglous

Fuente: (Crites & Tchobanoglous, 1998)

$$As = Q * \frac{TRH}{d * n} \quad Ec (17)$$

Figura 22. Estimación del área superficial, modelo de Crites, R.W. and G. Tchobanoglous

Fuente: (Crites & Tchobanoglous, 1998)

Luego de haber realizado el procedimiento del cálculo del área superficial requerida para la remoción de cada contaminante y de haber determinado cual es el factor contaminante para el diseño del humedal, es decir el que mayor área superficial requiera para su remoción se procede a calcular el tiempo de retención hidráulico (TRH) mediante la Ec 13 y las dimensiones correspondientes de largo y ancho que tendrá el diseño final del humedal, mediante las siguientes ecuaciones:

$$W = \sqrt{As/R} \quad Ec \quad (18)$$

Figura 23. Estimación del ancho del humedal, modelo de Crites, R.W. and G. Tchobanoglous

Fuente: (Crites & Tchobanoglous, 1998)

Donde, R: relación que se debe fijar de largo y ancho, se recomienda utilizar una relación de 1:3 para este modelo matemático; 1 m de largo por cada 3m de longitud.

El largo del humedal se calcula mediante la Ec(11) planteada en el modelo matemático de Reed.

3.2.4 Modelo matemático propuesto por la Environmental Protection Agency (EPA)

La Agencia de Protección ambiental de los Estados Unidos, en una guía presentada para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial presenta las siguientes ecuaciones:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-Kt} \quad Ec (19)$$

$$Kt = K_{20} * 1,1^{(T-20)} \quad Ec (20)$$

Figura 24. Estimación coeficiente de temperatura, modelo EPA

Fuente: ((EPA), 1988)

Co: Índice de DBO del afluente (mg/l)

Ce: Índice de DBI efluente (mg/l)

Kt: Proporción de la constante de temperatura de las aguas residuales (T°C)

Donde, K_{20} es la proporción de la constante de temperatura de las aguas residuales $T=20^{\circ}\text{C}$. (Ver tabla 2).

$$As = Q * \frac{\ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{Kt * d * n} \quad Ec (21)$$

Figura 25. Estimación del área superficial, modelo EPA

Fuente: ((EPA), 1988)

Donde;

As: Área de superficie del humedal construido (m^2)

Q: Flujo ($\text{m}^3/\text{día}$)

d: Profundidad promedio del agua en el filtro (m).

n: Porosidad de la estructura del filtro (% como decimal)

En donde el valor de “n” varía según el tipo de sustrato utilizado para material de soporte de la vegetación que ya se encuentran estipulados. (Ver tabla 6)

(Espinosa Ortiz, 2014)

Tabla 6: Características típicas del medio para humedales de flujo subsuperficial

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

Fuente: (Romero Rojas, 1999)

3.2.5 Modelo matemático propuesto por Jairo Alberto Romero Rojas en su libro

Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño.

Romero en su libro (Romero Rojas, 1999) describe una serie de ecuaciones que formuló para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial, basándose en que dentro de ellos ocurre un modelo básico de flujo a pistón, con la incorporación de algunos coeficientes empíricos que él plantea a lo largo de este estudio.

Las ecuaciones que describe en su trabajo son muy similares a las de otros modelos previamente mencionados, pero varía, en algunos coeficientes que él cree son los adecuados para realizar los cálculos para el diseño. A continuación, se presentan las ecuaciones planteadas.

$$C_e = C_o * e^{-K*t} \quad Ec(22)$$

$$Kt = K_{20} * 1,06^{(T-20)} \quad Ec(23)$$

Figura 26. Estimación coeficiente de temperatura, modelo Romero.

Fuente: (Romero Rojas, 1999)

Co: Índice de DBO del afluente (mg/l)

Ce: Índice de DBI efluente (mg/l)

K: Constante de remoción (d-1)

t: Tiempo de retención, d; calculado con base en la profundidad del agua, el área superficial del lecho y el caudal afluente.

Para el valor de “t” y algunos otros parámetros, Romero plantea unos criterios que según él son determinantes en la realización del diseño según el tipo de contaminante que se desee remover. (Ver tabla 7)

Tabla 7: Criterios para humedales de flujo subsuperficial

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

Fuente: (Romero Rojas, 1999)

Ya que el DBO es un factor por lo general limitante en el diseño de estos humedales, pues es un agente contaminante que por lo general presenta mayor concentración en el agua residual, y es el que siempre termina abarcando mayor área superficial para su remoción; por consiguiente, se plantea la siguiente ecuación para su remoción:

$$K_{20} = K_0 * (37,31 * e^{4,172}) \quad Ec (24)$$

Figura 27. Constante de temperatura, modelo Romero.

Fuente: (Romero Rojas, 1999)

K₀: constante optima de remoción, para medio con zona de raíces completamente desarrollada

K₀: 1,839 d⁻¹ para aguas residuales municipales

K_0 : 0,198 d^{-1} para aguas residuales industriales con DQO alta.

K_{20} : constante a 20°C. d^{-1}

e : Porosidad total del medio, fracción decimal.

El área de la sección transversal del lecho del humedal se calcula mediante la Ley de Darcy, en la que se plantea lo siguiente:

$$Q = K * At * \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad Ec(25)$$

Figura 28. Caudal promedio a través del humedal, modelo Romero.

Fuente: (Romero Rojas, 1999)

Donde;

Q : Caudal promedio a través del humedal, (m^3/d).

K : Conductividad eléctrica del lecho completamente desarrollado, m/s . Para diseño, se toma un 10% del valor de la tabla 3. (Ver tabla 3)

At : Área de la sección transversal perpendicular al flujo, m^2 .

h/L : Pendiente del lecho

A continuación, se presenta un resumen de los modelos matemáticos anteriormente planteados. (Ver tabla 8)

Tabla 8. Resumen de modelos matemáticos planteados para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.

Autor / Referencia	Remoción de DBO
(Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006)	$A_S = \frac{Q \text{Ln}\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_T(h)(n)}$
(Kadlec, y otros, 2000)	$A_S = \frac{Q}{K_A} \text{Ln}\left(\frac{C_o - C^*}{C_e - C^*}\right)$
(EPA), 1988)	$A_S = \frac{Q \text{Ln}\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_T(h)(n)}$ $A_t = \frac{Q}{K_S * S}; \text{ (Ley de Darcy)}$ $a = A_t/h; l = A_t/a$ $t = \frac{V_v}{Q} = \frac{l * a * h}{Q}$
(Romero Rojas, 1999)	$C_e = C_o * e^{(-K_R * t)}$ $A_S = \frac{V}{y} \quad ; \quad V = Q * t$ $A_t = \frac{Q}{K_S * S} \quad ; \text{ (Ley de Darcy)}$ $a = A_t/h; l = A_t/a$
RAS 2000	$A_S = \frac{Q \cdot (\text{Ln}C_o - \text{Ln}C_e)}{(K_T \cdot h \cdot n)}$ $A_S \leq 0,032 \text{ m}^2 / \left(\frac{L}{d}\right)$ $A_t = \frac{Q}{K_S * S} \quad ; \text{ (Ley de Darcy)}$

Tabla 8 (Continuación)

Crites, R. W. and G. Tchobanoglous	$A_s = Q * \frac{TRH}{d * n}$
	$TRH = \ln\left(\frac{C_e}{C_o}\right) / Kt$
	$Kt = K20 * 1,06^{(T-20)}$

Fuente: (Autores, 2020)

3.3 Modelos físicos implementados de humedales artificiales de flujo subsuperficial

Para poder soportar los modelos matemáticos y no obstante esto, validar que el diseño cumpla con la eficiencia para la cual se construye, se implementan una serie de plantas piloto la cuales tienen medidas a escala de las reales y con las que se puede verificar que los porcentajes de remoción sean los indicados y que el efluente tenga la calidad necesaria.

- En el trabajo realizado por Jaime Lara e Ismael Vera en la ciudad de Cagua Cundinamarca (Vera Puerto & Lara Borrero, 2004) se hizo el diseño del humedal y se implementó para realizársele un monitoreo y poder evaluar el funcionamiento de este, en donde se realizaron muestreos durante los meses de Septiembre a Noviembre y para los cuales se determinaron los porcentajes de remoción que arrojó el humedal para cada contaminante. Para la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se obtuvo un porcentaje de remoción de 66%, para el Nitrógeno un promedio de 43%, para el fósforo el 28% y coliformes fecales un 69%; estos valores son aceptables pero no eran los esperados al momento de diseñarlo y según la literatura especializada utilizada para ello, el modelo de diseño que se implementó fue el

planteado por Sherwoor Reed (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006) aunque también se presenta y se toman algunos valores planteados en el modelo de Kadlec y Knight (Kadlec, y otros, 2000).

-Otro modelo físico implementado y evaluado es el realizado en la ciudad de Bogotá (Bernal Lopez, 2014) donde se hizo el estudio para las aguas residuales domesticas provenientes del campus de la universidad en donde se evaluó la calidad del agua en 3 puntos distintos; el diseño de la planta piloto se realizó según lo planteado en el libro de Sherwood Reed (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006) se utilizaron diferentes tipos de especies vegetales que comúnmente se conocen con los nombres de barbasco, Jacinto de agua, buchón cucharita y totora. Las dimensiones finales que se obtuvieron para la planta fueron las siguientes:

Se trabajó con un caudal promedio de 0,1 m³/d, un medio poroso constituido por grava media de 25mm y una profundidad de 0,6m, para las cuales se obtuvo un valor de ancho de 0,2m por 1,7 de largo y un tiempo de retención hidráulico de 3,2 días.

Se analizaron diferentes parámetros de la calidad del agua en el afluente y el efluente, obteniendo consigo porcentajes de remoción de los contaminantes para cada caso mayores al 50% y no obstante esto la concentración del efluente cumplía con la normatividad vigente para vertientes. Se hace también un análisis de esto con el decreto 4728 del 2010 para vertimientos superficiales.

-Por otro lado tenemos el humedal diseñado, construido y evaluado por Tatiana García en su tesis para optar el título de Ingeniero Civil en la Universidad de los Andes (García Botero, 2005) en donde se diseñó un humedal teniendo en cuenta el paso a paso que recomienda la Environmental Protection Agency ((EPA), 1988) el cual fue retomado y replanteado por Reed en su libro (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006); se toma como relación de largo y ancho de la planta piloto la relación 3:1. Los resultados obtenidos en tanto a la remoción de contaminantes no fueron los esperados pero si son considerados comparados con la carga del afluente; se obtuvieron porcentajes de remoción mayores al 50% ; de acuerdo a la información que presentó la autora del trabajo mencionado, al hacerle la evaluación preliminar al humedal se logró una eficiencia de 57,1% en DBO, 52,4% en DQO, del 78% al 85% en SST, del 56,6% en N, del 44% en P, 89,5% en Ni y casi del 100% en coliformes fecales. (García Botero, 2005) Aparte de esto cabe resaltar que esto fueron los parámetros medidos, pero hay remoción de otro tipo de contaminantes en un mayor o menor porcentaje, según presenta la autora en las conclusiones del trabajo.

-Se tiene un ejemplo claro en la región de una planta piloto diseñada y evaluada por Luisa Sanchez y Yermis Velez (Sanchez Gil & Vélez, 2016) en donde se implementó una planta piloto de un humedal artificial para evaluar la eficiencia presentada en la descontaminación de aguas residuales que se generan en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. Se construyeron 3 plantas piloto donde en cada una se implementó una especie macrófitas distinta y que se encuentran en la región, implantando 15 individuo en cada sistema, esto con el fin de determinar qué tipo de especie vegetal resultando arrojando mayor eficiencia en la remoción de contaminantes del agua residual. Las mediciones se realizaron con dos volúmenes de agua

distintos y dos tiempos de retención diferentes para cada caso. Los porcentajes de remoción obtenidos para cada contaminante estuvieron por encima del 50 % y hubo casos en que se aproximó a casi el 100% de su remoción, evidentemente los resultados arrojados dejan ver que entre mayor sea el tiempo de retención hidráulico en el sistema, habrá más eficiencia en su funcionamiento. En todos los casos se cumple con la normatividad vigente en el país para vertimientos estipulada en la resolución 0631.

-En Ciudad de México se diseñó e instaló un sistema piloto de humedal subsuperficial de flujo horizontal, allí se realizó un análisis de diferentes parámetros fisicoquímicos, se calculó el tiempo de retención hidráulico y determinó la eficiencia en la remoción de contaminantes. En ese caso se utilizó las especies *Phragmites australis* y *Typha dominguensis*, el sustrato empleado fue una mezcla de grava tezontle y arena. Los resultados de este sistema en cuanto al tiempo de retención hidráulica fue de 5 días, con una remoción de carga orgánica del 50%, la remoción de DQO fue del 95.73% en la temporada de estiaje; aunque respecto al fósforo no encontraron eficiencia en su remoción, se pudo determinar que los microorganismos ayudan a la remoción de la carga orgánica y de los nutrimentos del agua residual (Romero Aguilar, Colín Cruz, Sanchez Salinas, & Ortiz Hernandez, 2009)

-Por otro lado en Iztapalapa, México también nos encontramos con el informe de un proyecto de investigación realizado por Ángel Mendoza (Mendoza Ortega & Ramoz Escorza, Oct, 2012) donde se diseñó una unidad piloto pero no se evaluó como tal el sistema, el proyecto fue realizado para el tratamiento inicial de aguas residuales porcícolas ya que se consideró que estas tenían una mayor concentración de algunos agentes contaminantes. Se tuvieron en cuenta

parámetros como la DQO, DBO5 y NTK; el diseño final del humedal arrojó un área superficial de 6,3195 m² para un caudal de 1,8 m³/d. para el diseño de este se tuvo en cuenta lo planteado por los diferentes autores de los modelos matemáticos descritos.

-En Valparaíso Chile nos encontramos con un proyecto realizado por Álvaro Barría (Barria A., Jul 2007) en donde se hizo el diseño y la construcción de una planta piloto de un humedal artificial para la recuperación de las aguas residuales que arroja la minería de cobre; los contaminantes que se encontraron presentes en el agua y para los cuales se hizo el diseño son Cobre, Arsénico y plomo; la planta piloto se diseñó teniendo en cuenta el modelo sugerido por Sherwood Reed (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006), y se implementaron dos tipos de especies de macrófitas la *Scirpus Californicus* y la *Thypha Angustifolia*, obteniéndose resultados satisfactorios al encontrarse con una concentración del contaminante en el efluente menor a 0,1 mg/l que es límite permitido según la normatividad vigente estipulada en el decreto D.S. 90 emitido por el congreso nacional de Chile.

-En la ciudad de Pereira Jhoan Marín y Juan Correa (Marín Montoya & Correa Ramírez, 2010) se evaluó la eficiencia que se tenía en un humedal artificial que utilizó como especie vegetal implantada la *guadua Angustifolia Kunth*, se analizaron dos humedales, uno que tenía como medio filtrante arena y otro con grava, para ambos casos se obtenían buenos resultados ya que removían en más del 50% la concentración de los contaminantes, pero en el humedal que se construyó con medio poroso de arena se obtenía una eficiencia mayor arrojando resultados con el humedal 1 (con lecho de arena), debido a que su porcentaje de remoción de DBO₅ el cual fue de

92.21% y DQO de 84.31%, con respecto al humedal 2 (con lecho de grava) el cual presentó un porcentaje de remoción de DBO5 de 72.88% y DQO 64.35%.

-El proyecto de investigación desarrollado por las ingenieras ambientales y sanitarias Eylen López y María José Rodríguez (Lopez Linares & Rodriguez Alvarez, 2016) en el cual diseñaron, construyeron y evaluaron un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal como sistema depurativo de agua residual para una vivienda ubicada en la vereda de Yerbabuena en el municipio de Chía, Cundinamarca, resultó óptimo ya que su remoción en promedio al mes de funcionamiento fue de 57,25% en los contaminantes analizados, siendo mayores los parámetros más relevantes (DBO5, DQO y SST) con porcentaje mayor a 70%, además que con la construcción de dicho sistema depurativo se obtuvieron beneficios como la eliminación de vectores y malos olores. Para su diseño utilizaron el modelo matemático planteado en el libro de Sherwood Reed, con un caudal de 0,0621 m³/día, área superficial del humedal de 8 m² (Largo = 4m y Ancho= 2 m), profundidad efectiva de 0,65 m, pendiente de 0,8% y sustrato de filtración de grava fina enraizada con macrófitas.

Teniendo este estudio realizado por la ingenieras ambientales y sanitarias, dos años después retoman este trabajo en la Universidad de Cundinamarca los Ingenieros Ambientales Cristian Cuervo y Miguel Hernández en una monografía presentada como proyecto de grado, donde modelan el sistema diseñado por López y Rodríguez (Lopez Linares & Rodriguez Alvarez, 2016) mediante el software MODEL MUSE; este programa permite la creación de modelos 3-D de sistemas de agua subterráneo brindando una interfaz gráfica para los programas ya desarrollados MODFLOW-2005 y PHAST (Cuervo Aponte & Hernandez Espinoza, 2018);

esto con el fin de comprobar que el humedal artificial de flujo subsuperficial diseñado por las ecuaciones planteadas en el documento publicado por la EPA, resulta siendo eficiente para el tratamiento de aguas residuales veredales y no obstante esto para darle veracidad a los resultados obtenidos por López y Rodríguez, 2016 en la Universidad de la Salle. A continuación, se muestran los valores obtenidos en el modelo físico y matemático, mediante los resultados experimentales y mediante la modelación en el software, respectivamente. (Ver tabla 9)

Tabla 9. 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 (\pm) que indica el rango de error en la variable simulada.

Fuente: (Cuervo Aponte & Hernandez Espinoza, 2018)

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. (Cuervo Aponte & Hernandez Espinoza, 2018).

A continuación, se presenta una comparación que realizaron los autores referentes a la normatividad vigente en Colombia para vertimiento de aguas residuales, la resolución 0631 del 2015 y una norma internacional que es la NOM-001-SEMARNAT-1996, protección de la vida acuática. (Ver tabla 10)

Tabla 10. 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	96,90	192,00	27,62	85,60	180 mg/L	30 mg/L
N _T	49	28,58	29,34	49,00	30,03	38,70	Análisis y reporte	--
P _T	14	11,18	20,14	14,00	7,05	49,60	Análisis y reporte	--
SS _T	54	6,43	88,09	54,00	7,09	85,40	90 mg/L	40 mg/L

Fuente: (Cuervo Aponte & Hernandez Espinoza, 2018)

Respecto a las eficiencias que el humedal presentó en la remoción de contaminantes, se puede notar que el humedal resulta siendo más eficiente en la eliminación de DBO₅ y SST ya que presentó porcentajes mayores al 80% contrario al NT y PT que no supera el 50% por lo que no resulta siendo tan eficiente para estos componentes.

3.4 Análisis de modelos encontrados

Analizando las diferentes referencias encontradas acerca de los modelos matemáticos que se han formulado y los modelos físicos que se han implementado, se evidenció el gran auge del modelo matemático planteado por Sherwood Reed, ya que ha sido el modelo más utilizado para los distintos diseños que se han realizado a nivel regional, nacional y mundial; cabe aclarar que algunos trabajos toman también algunos coeficientes y parámetros planteados por Kadlec y Knight en su libro, pero las ecuaciones que normalmente se utilizan y las cuales se tienen una

mayor aproximación en tanto a la remoción que se obtiene realmente en laboratorio para las aguas que son tratadas en estos sistemas naturales, son las descritas por Reed.

En todos los modelos físicos encontrados que se han implementado los porcentajes de remoción no resultan siendo los esperados en el diseño, esto es debido a diferentes factores que afectan el funcionamiento del humedal, como puede ser la temperatura, condiciones hidrológicas del sitio, entre otros; no obstante, las remociones que se presentan permiten que el agua residual cumpla en gran parte con la norma de vertimientos, presentando mayores eficiencias en la remoción de DBO, DQO y SST.

El procedimiento adecuado para el diseño recopilando los diferentes modelos matemáticos planteados y los modelos empíricos estudiados, es el siguiente:

-Primero se determinan las condiciones con que se cuenta en el afluente (DBO, Temperatura promedio de las aguas residuales en invierno, Promedio del flujo diario del afluente).

-Determinar la calidad deseada del efluente, parámetros indicados en la norma (DBO)

-Seleccionar la profundidad del lecho. Para los humedales artificiales de flujo subsuperficial la profundidad del lecho varía entre 0,45m a 1m y debe tener una pendiente entre 0,5% a 1%. Es necesario que el agua que entra al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie de éste (5-10 cm) (Sanchez Gil & Vélez, 2016). (m)

-Seleccionar un valor para los espacios vacíos dentro de la estructura de la roca. (n)

-Habiendo determinado los parámetros anteriormente mencionados, se procede a determinar el Área superficial requerida para la remoción de cada contaminante implementando el modelo planteado por Sherwood Reed y descrito en este documento. ([Ver modelo de Reed](#))

-Dado que las ecuaciones anteriores son válidas únicamente cuando el flujo es laminar a lo largo de los espacios vacíos del medio, es decir cuando el número de Reynolds es menor a 10, se debe verificar este parámetro mediante la siguiente ecuación.

$$N_R = \frac{(v) * (D)}{\tau} \quad Ec(15)$$

En donde,

N_R : Numero de Reynolds, adimensional.

V: Velocidad de Darcy (De la ecuación de Darcy) m/s

D: Diámetro de lo vacíos del medio, tomarlo igual al tamaño medio del medio, m.

T: Viscosidad cinemática del agua, m^2/s (Ver tabla 11)

Tabla 11. Propiedades físicas del agua.

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad cinemática x10 ³ (N*s/m ²)	Viscosidad cinemática x10 ⁶ (m ² /s)
0	999,800	1,781	1,785
5	1000,000	1,518	1,519
10	999,700	1,307	1,306
15	999,100	1,139	1,139
20	998,200	1,102	1,003
25	997,000	0,890	0,893
30	995,700	0,708	0,800
40	992,200	0,653	0,658
50	988,000	0,547	0,553
60	983,200	0,466	0,474
70	977,800	0,404	0,413
80	971,800	0,354	0,364
90	965,300	0,315	0,326
100	958,400	0,282	0,294

Fuente: (Autores, 2019)

-Como verificación se debe calcular el módulo de dispersión, esto permite determinar si se presenta un flujo a pistón o mezcla completa en los humedales artificiales, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{D}{vL} = \alpha * \left(\frac{u}{u'}\right) * \frac{W^2}{Lh}$$

D/vL: Modulo de dispersión.

α : Constante que depende de la forma de la sección transversal. Para efectos de cálculo se toma el valor de 1.

u: Velocidad media del flujo en el humedal (m/d)

u': Velocidad cortante o dinámica.

W: Ancho del humedal artificial

L: Longitud del humedal artificial.

h: Profundidad del humedal artificial.

Sí el módulo de dispersión es muy pequeño y tiende a cero, se considera que es una dispersión despreciable, por lo tanto, el flujo es a pistón, lo que es una condición ideal para humedal ya que se hace de forma continua sin que se mezcle con cualquier otro elemento durante su recorrido.

Capítulo 4: Proceso constructivo

4.1 Parámetros y consideraciones.

4.1.1 Elección del medio granular o sustrato. En los Humedales Artificiales de Flujo Sub Superficial (HAFSS) la grava funciona como biofiltros para el material que se encuentra suspendido en el agua residual, por lo que esta es uno de sus principales constituyentes. Éste también permite el anclaje de la vegetación emergente y facilita el desarrollo de los microorganismos que se encargan de llevar a cabo la mayoría de los procesos de depuración del agua residual.

Para el diseño óptimo del humedal artificial se recomienda utilizar grava de un diámetro aproximado superior de 1/8" (3,18mm), debido a que un tamaño menor favorece el encharcamiento ya que no se le estaría agregando grava si no arena al sistema. En relación a ello, durante la construcción es usual colocar en el fondo y en la superficie del lecho una capa de material pétreo de mayor diámetro que el resto, con el propósito de favorecer un buen drenaje y de proporcionar una zona más aireada para el desarrollo de raíces.

EL sustrato no debe contener, limo, arcilla, ni otro material fino; ya que un elevado contenido en finos puede colmatarse fácilmente el sistema, acortando la vida útil de este.

Debe ser en su preferencia un material homogéneo (Sin bordes afilados) para evitar el maltrato o daño de la geo membrana.

En la tabla 12 se observan las características del sustrato según el tipo de sustrato para el flujo subsuperficial.

Tabla 12: Características de los medios para el flujo subsuperficial.

Características de los medios para el flujo subsuperficial sistemas				
Tipo de medio	Max. 10% Grano Tamaño, mm	Porosidad (n)	Conductividad hidráulica (Ks), m³/m² - d	K₂₀
Arena mediana	1	0,42	420	1.84
Arena gruesa	2	0,39	480	1.35
Arena Grava	8	0,35	500	0.86

Fuente: ((EPA), 1988)

El sustrato se conforma por algunos componentes del sistema como lo son las rocas, grava, sedimentos, arena y los restos que desprende la vegetación emergente, y que se van reposando en el fondo del humedal debido al crecimiento de la especie vegetal; el medio debe ser permeable para que pueda brindar el paso adecuado del agua por el sistema. La importancia radica en:

- Los organismos que conviven en el humedal son soportados sobre este.
- El movimiento del agua a través del humedal se ve afectada por la permeabilidad que este contenga.
- Dentro de este ocurren procesos que implican transformaciones químicas y biológicas, sobre todo de origen microbiano.
- En él se pueden almacenar o depositar muchos contaminantes, por lo que es necesario su mantenimiento periódico.

(Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

4.1.2 Elección del consorcio microbiano. Los microorganismos adheridos a la superficie del sustrato se encuentran en íntimo contacto con el agua residual, por lo que son los principales encargados de llevar a cabo todas las reacciones bioquímicas del proceso de depuración. Esta microbiota se encuentra organizada dentro de una matriz mucilaginosa de origen endógeno denominada biopelícula. En ella, se lleva una dinámica de crecimiento (Figura 6) que propicia la heterogeneidad estructural, génica y metabólica de los microorganismos presentes; lo que concluye en un acoplamiento ecológico donde cada integrante del consorcio está adaptado a una parte del proceso de depuración. (Mendoza Ortega & Ramoz Escorza, Oct, 2012)

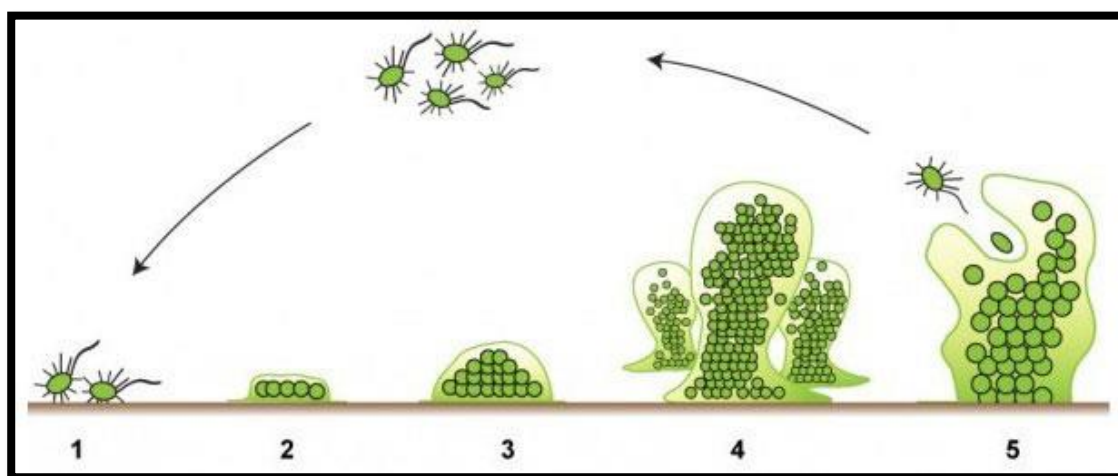


Figura 29. Desarrollo de la película microbiana.

Fuente: (Bellostas Ara, 2019)

En los humedales los microorganismos que principalmente deben estar presentes para encargarse en su mayor eficiencia de la depuración del agua residual son las bacterias, las algas, los protistas y los hongos, ya que cada uno cumple una función distinta en el sistema, entre las que podemos encontrar las siguientes. (Ver tabla 13)

Tabla 13. *Funciones de los microorganismos presentes en Humedales Artificiales*

Microorganismo	Función
Bacterias	- Consumo de materia orgánica y sales minerales - Producción de enzimas - Transformación de nutrientes y nutrimentos
Algas	- Liberación de oxígeno al medio - Contribución a la formación de la biopelícula
Protozoarios	- Consumo de materia orgánica y sales minerales - Regulación de la población microbiana y la proliferación de algas
Hongos	- Consumo de materia orgánica - Producción de enzimas

Fuente: (Mendoza Ortega & Ramoz Escorza, Oct, 2012)

4.1.3. Elección de la vegetación. La vegetación es el componente principal de los humedales artificiales en lo que respecta al tratamiento de las aguas residuales, ya que la película microbiana que se produce en las raíces y en los sustratos por medio de la fitorremediación, es la encargada de la depuración de los patógenos que contiene el agua residual, y aparte de esto ayudan a retener los sólidos suspendidos disminuyendo el flujo del caudal que va a circular por el humedal. También permite la transferencia de oxígeno y mantiene la temperatura del lecho en la zona de la rizosfera, evitan la evapotranspiración y absorben los nutrimentos liberados para evitar la eutrofización. De ahí que resulte necesario crear un microambiente adecuado para su desarrollo, ya que, de lo contrario, se pueden crear zonas anaerobias que promuevan una disminución en los procesos relacionados con el ciclo del nitrógeno.

Para poder determinar las especies de plantas apropiadas a utilizar para el sistema, se debe tener en cuenta factores tales como la profundidad del agua y la frecuencia del flujo, esto permite considerarlas como uno de los factores más importantes en la construcción.

Los principales criterios para poder seleccionar una planta adecuada son:

- 1) Crecimiento en zonas inundadas
- 2) Tolerancia a tóxicos
- 3) Alto contenido proteico
- 4) Alta capacidad de absorción de nutrimentos
- 5) Extenso crecimiento y periodo de cosecha
- 6) Eficiente sistema de transporte de oxígeno hacia las zonas anaerobias
- 7) Amplia zona de rizosfera

(Mendoza Ortega & Ramoz Escorza, Oct, 2012)

En la tabla 14 se muestran algunos ejemplos de especies vegetales según el tipo de planta usada en Humedales artificiales.

Tabla 14. Especies vegetales comúnmente empleadas en Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales

Tipo de planta	Ejemplo
Emergente	Alisma spp., Baumea articulata, Canna fláccida, Crassipes spp., Cyperus spp., Eleocharis dulcis, Eleocharis spp., Fimbristylis spp., Glyceria american, Hydrocotyle unbellata, Iris pseudocorus, Iris pseudocorus, Iris versicolor, Juncus spp., Panicum hemitomon, Phragmites australis, Pontederia cordata, Sagittaria spp., Scirpus spp., Tiphia spp., Zizania latifolia, Zizaniopsis milasea
Subemergente	Potamogetum spp., Najas spp., Elodea canadiensis, Vallisneria americana, Ceratophyllum demersum
Flotante	Eichornia spp., Lemma spp., Pistia stratiotes, Salvinia spp., Spirodela spp
Raíces flotantes	Neleumbo lutea, Nymphaea spp., Nymphoides spp

Fuente: (Mendoza Ortega & Ramoz Escorza, Oct, 2012)

La vegetación cumple un papel primordial en estos sistemas para el tratamiento del agua, ya que permite la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz, además de esto cumplen con otras funciones como lo son:

- Limitan la canalización del flujo y permiten la estabilización del sustrato.
- Permiten que los materiales que se encuentran suspendidos se depositen lo que da lugar a velocidades de aguas bajas
- Toman el carbono, nutrientes y elementos de traza y los incorporan a los tejidos de la planta
- Ocurren transferencias de gases entre la atmosfera y los sedimentos
- Los microorganismos se fijan en el tallo y los sistemas de raíz.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato.

(Lara Borrero, Depuración de Aguas Residuales Artificiales con Humedales Artificiales, 1999)

A continuación, en la tabla 15 se muestran características de algunas especies vegetales de tipo emergente.

Tabla 15: Especies emergentes más utilizadas en la depuración de aguas residuales

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

(*) Especie más utilizada entre todas

Fuente: (Lara Borrero, Depuración de Aguas Residuales Artificiales con Humedales Artificiales, 1999)

Las plantas que mayormente se han implementado y que han resultado efectivas, cumpliendo las funciones como tal para las que se disponen al ponerse en estos sistemas, y que han sido utilizadas en humedales que se han construido a nivel mundial, hacen parte de un grupo de plantas que se denominan helófitos las cuales son plantas cuyos órganos persistentes están

enraizados en el fondo del humedal, y cuyos tallos emergen y desarrollan hojas y flores en la superficie; entre las que podemos encontrar que se han utilizado:

- La espadaña (*Thypha*): Planta robusta, capaz de desarrollarse bajo condiciones medioambientales y se expande sin esfuerzo, estas representan una planta especial y adecuada para la implementación en un humedal artificial. Además, puede producir una gran proporción de biomasa anual, aunque no es muy eficiente para la remoción de Nitrógeno y Fósforo por la vía de la poda y la cosecha. Los rizomas de espadaña plantados a intervalos de aproximadamente 0.60 m, pueden alcanzar una gran expansión en menos de un año, dando una gran capa que cubre la mayoría de área superficial, tiene aparentemente una baja penetración en grava de 0.3 m, por lo que no se recomienda en sistemas flujo superficial. (Tresserras Herrera, Dic 2015). (Ver figura 7)



Figura 30. Espadaña (*Thypha*).

Fuente: (Quintero, 2015)

- Juncos (*Scirpus*): Plantas ubicuas que se desarrollan en diversas aguas interiores y costeras, pantanos salobres y humedales. Este tipo de planta se desarrolla bien en agua desde los 5cm a los 3m de profundidad, además de esto soporta temperaturas desde los 16

a los 27°C. crecen en un PH aproximado entre 4-9. Puede lograr abarcar una gran área superficial en menos de un año y con una distancia promedio entre plantas de 0,3m. (Lara Borrero, Depuración de Aguas Residuales Artificiales con Humedales Artificiales, 1999) (Ver figura 8).



Figura 31. Junco (Scirpus).

Fuente: (Mermo Laguna , 2008)

- Carrizos (*Phragmites*): Son plantas altas perennes con rizoma largo y leñoso, logran una buena cobertura en un año con separación de 0.6 m. Los rizomas de estas plantas se implantan de manera vertical y más profundamente comparado con la Espadaña, lo que hace posible que los sistemas que utilizan este tipo de planta sean más eficientes en la transferencia de oxígeno. Además, poseen la ventaja de tener poco valor alimenticio, por lo cual no suelen ser atacados por animales. (Ver figura 9)



Figura 32. Carrizos. (Phragmites).

Fuente: (Alsaza, 2012)

Revisando las referencias encontradas acerca de proyectos de este tipo hechos en la región, específicamente en la ciudad de Ocaña, un proyecto realizado por dos estudiante de la Universidad Francisco de Paula Santander, en la seccional que se encuentra en el municipio mencionado, el cual fue titulado “Diseño y evaluación de un sistema piloto para la descontaminación de aguas residuales generadas en la UFPSO, empleando las especies *Costus Spicatus* y *Heliconia Psitacorum* (Sanchez Gil & Vélez, 2016)” como su nombre bien lo indica el proyecto fue desarrollado y llevado a cabo, poniéndolo en funcionamiento con estos dos tipos de plantas las cuales se conocen en la región como Caña y Agria y AVECILLA, siendo estos los nombres con los que normalmente se consiguen estas plantas en la región donde se desarrolló el proyecto. (Ver figura 10 y 11)



Figura 33. Costus Spicatus.

Fuente: (Sanchez Gil & Vélez, 2016)



Figura 34. Heliconia Psittacorum.

Fuente: (Autores, 2020).

Para seleccionar adecuadamente la vegetación que se va a implementar en el sistema se deben tener en cuenta ciertos criterios, tales como:

- Capacidad de remoción.
- Resistencia a niveles de sedimentos y agentes contaminantes presentes.

- Profundidad de la raíz adecuada (Entre 0.4 y 0.6m)
- Resistencia a un amplio intervalo de temperatura, en particular en lo registrados en el lugar.
- Compatibilidad con la biopelícula de microorganismos
- Fácil manipulación.
- Facilidad de propagación.
- Disponibilidad a lo largo del año.
- Facilidad de mantenimiento, transporte y compra.

(Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2014)

4.2 Proceso constructivo.

EL proceso constructivo es el procedimiento que se debe seguir para la construcción de una obra de índole civil, en el cual se describen las actividades a realizar con el objetivo de llevarlas a cabo de forma eficiente y organizada para ahorrar tiempo y dinero.

En lo que respecta a los humedales artificiales de flujo subsuperficial este procedimiento no es tan complejo, ya que las actividades a desarrollar no son actividades que necesiten de muchos materiales o de equipos no tan especializados, y también debido a que estos materiales se pueden conseguir fácilmente en la región donde se implemente el sistema.

Se debe tener en cuenta que para la implementación adecuada de un HAFSS y para que se garantice en gran porcentaje que el agua residual quede lo más tratada posible, antes de esta ser llevada al sistema debe haber pasado o se le debe hacer un tratamiento preliminar, el cual se determina según los agentes contaminantes o componentes que el agua residual contenga y que

al humedal construido no se le sea fácil tratar y que pueda perjudicar el funcionamiento de tal; estos tratamiento preliminares pueden incluir entre otros:

- Sistema de pre tratamiento constituido por unas unidades de cribados y trampa de grasa.
- Reactor primario de sedimentación de múltiples compartimientos y flujo a pistón.

Revisando las diferentes referencias encontradas en donde se construyó como tal un humedal artificial de flujo subsuperficial, y recopilando los diferentes procesos que se abarca en cada uno de estos, se llegó a decidir que las actividades que implican el construir un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, en el orden adecuado que se deben ejecutar, son las siguientes:

Reconocimiento del terreno: Para la realización de cualquier obra de tipo civil es necesario primero que toco hacer la evaluación y el debido reconocimiento del terreno. Es una visita en campo de suma importancia ya que es vital conocer las características del terreno en que se piensa trabajar, para así poder adecuar el diseño del humedal a las condiciones que este tenga. Se deben tener en cuenta características como lo son la pendiente, disponibilidad que tenga el terreno para desarrollar las diferentes actividades previstas, el acceso que tenga el sitio a la maquinaria a utilizar, el uso del suelo entre otros, estos factores son pertinentes para el diseño del humedal y asegurar el éxito de su implementación.

Desbroce y limpieza del terreno: Según García y Corzo (García Serrano & Corzo Hernández, 2008) con esta actividad se da inicio a la construcción de este sistema de tratamiento, con el fin de retirar toda la capa vegetal superficial, construcciones y objetos

existentes que se encuentren en el lugar donde se realizará la instalación del sistema. Esto se hace con el resultado final de obtener una plataforma de trabajo adecuada.

Localización y replanteo: El levantamiento topográfico es necesario para poder hacer la proyección de la obra. Teniendo el plano se debe proceder a realizar un trazado, estableciendo los límites de la obra, en esto se tiene en cuenta la propuesta realizada y si es necesario el replanteo sobre el terreno de las estructuras que se diseñaron y que se encuentran establecidas en los planos. Según (Gómez Ramirez & García Echavarría, 2018) en su trabajo de investigación se debe primero que todo delimitar las cotas rasantes del pozo séptico si existe y a su vez las cotas claves de las tuberías que se encuentran en el sitio, esto con el fin de poder ubicar la tubería que se va a instalar y el Humedal como tal, delimitando y marcando las áreas donde se ubicaran las estructura que compondrán el humedal artificial.

Se debe delimitar y marcar el terreno, en especial las áreas que se piensan intervenir, en donde se construirán las diferentes estructuras necesarias para la construcción de los humedales, como lo son las cámaras de registro, el dique de contención y la ubicación de las tuberías de conducción, entre otros.

(Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

Campamento e instalaciones provisionales: Si la zona donde se piensa construir el humedal queda retirada y no cuenta como tal con acceso a redes de agua potable y eléctrica, se deberá buscar la forma suministrarlas, tomando una fuente de energía eléctrica cercana y abasteciendo el agua necesaria de la manera adecuada. Además de esto, se construirá un

campamento en el que se guardarán los equipos, materiales y herramientas que se utilicen durante la ejecución del proyecto.

Cerramiento en lona verde: Se delimitará el área de trabajo en lona verde evitando el acceso de personas o animales a la zona de trabajo.

Movimiento de tierras: Se realizarán excavaciones necesarias para la nivelación del terreno y posteriormente la construcción de las paredes del humedal que constituirán el dique de contención; en llegado caso de que por consideraciones de construcción se decida realizar la obra a un nivel más elevado respecto al del terreno, no será necesario la excavación, pero si la construcción y nivelación de un terraplén además de las paredes del humedal. Al realizar las excavaciones para conformar los taludes del dique de contención del humedal se recomienda que las paredes de este mantengan una relación 1:1, buscando que se encuentren a 45°.

Construcción de cámaras de registro de entrada y salida (Arquetas): Estas cámaras de registro hacen referencia a los puntos por donde el agua residual entrará al sistema y por donde posteriormente luego de ser tratada, saldrá. Es una caja para la recogida de agua de las tuberías de drenaje y posterior entrega a un desagüe; se puede construir en ladrillo, hormigón, materiales cerámicos o piezas prefabricadas según lo aprobado por el director de la obra.

Impermeabilización del dique de contención: según (Torres Harker, 2016) para este medio de impermeabilización puede implementarse varias capas de arcilla y los costos se verían disminuidos, pero no obstante esto, esto implica un riesgo para las paredes del dique y el fondo

del humedal ya que se pueden originar filtraciones, lo que ocasionaría un mal funcionamiento del sistema. Se debe primero que todo nivelar la base del humedal, previamente antes de proceder a impermeabilizar el dique, dando una pendiente que dirija el efluente hacia la tubería de drenaje. (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

La base del humedal debe estar compactada en su preferencia igual o superior al 90% mediante el procedimiento de proctor modificado, para así evitar asentamientos en esta capa que puedan ocasionar deformaciones considerables en la geo membrana; esta superficie debe estar lisa y libre de cualquier elemento que pueda perforar a esta, además de esto se debe verificar que no tenga cambios abruptos en la pendiente.

Es necesario realizar una excavación tipo zanja perimetral en la base del humedal, la cual servirá como anclaje de la geo membrana a la estructura de tierra; esta franja será luego de puesta la geo membrana a rellenar con material proveniente de las excavaciones realizadas. . (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

NOTA: La impermeabilización del sistema también puede hacerse mediante otros métodos implementado cemento, compactación con arcilla, entre otros... En los que se debe procurar bien que el sistema quede totalmente impermeable a factores externos provenientes del suelo, ya que estos pueden generar diferentes problemas que pueden radicar en el mal funcionamiento hasta la contaminación de acuíferos.

Ensamblado del sistema de drenaje o recolección: Las perforaciones de la tubería de desagüe del sistema se construirán de acuerdo a la gradación de la grava que se vaya a utilizar como sustrato. Para este tipo de sistema (HAFSS) se requiere una tubería de 4" perforada ubicada únicamente en el extremo de salida del humedal.

Llenado de grava y o arena: Según (García Serrano & Corzo Hernández, 2008) en su libro este proceso se inicia con la colocación de las franjas de material de mayor diámetro en el inicio y el final de las celdas, es decir a la entrada y salida del humedal; luego de esto si se procede a poner el propio medio granular que hará parte del sustrato que compone el humedal. Antes de comenzar con el llenado de grava al humedal, Es recomendable colocar una capa de arena de 5cm a 10cm, esto para proteger a la geo membrana de roturas que puedan ser ocasionadas por herramientas o durante el vaciado de la grava. (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

Selección y colocación de la capa vegetal: Luego de haber seleccionado la planta que se va a utilizar teniendo en cuenta los criterios antes mencionado en las consideraciones, se procede a hacer el llenado del sistema con agua natural (Sin potabilizar) para la implantación de la capa vegetal, dando lugar con esto a que las plantas se desarrollen en la superficie y sus raíces se adhieran al sustrato, de manera que estos crezcan y maduren, para posteriormente proceder a la irrigación con agua residual únicamente.

Retiro de escombros: Se hará el retiro del material sobrante de las excavaciones realizadas y de los desechos que haya producido la construcción como tal.

En la tabla 16 se encuentran desglosadas las actividades que se deben realizar en el proceso constructivo, con su respectiva unidad de medida.

Tabla 16. Proceso Constructivo.

Ítem	Descripción	Unidad
1	Actividades preliminares	
1,1	Reconocimiento del terreno	GLOBAL
1,2	Desbroce y limpieza del terreno	M2
1,3	Localización y Replanteo	M2
1,4	Campamento e instalaciones provisionales	GLOBAL
1,5	Cerramiento en lona verde	ML
2	Movimiento de tierras	
2,1	Excavación mecánica para dique de contención	M3
2,2	Relleno compactado para suelo de soporte con material de excavación	M3
3	Construcción de cámaras de registro de entrada y salida (Arquetas)	UND
4	Impermeabilización del dique de contención	
4,1	Excavación manual para zanja perimetral	M3
4,2	Extensión de geo membrana	M2
4,3	Relleno de zanja perimetral con material de excavación	M3
5	Ensamblado del sistema de drenaje o recolección	
5,1	Instalación de tubería de recolección	ML
5,2	Ensamblado con cámaras de registro	GLOBAL
6	Llenado de grava y/o arena	
6,1	Vaciado y extensión de colchón de arena para soporte	M3
6,2	Vaciado y extensión de capa de grava (Sustrato)	M3
7	Selección y colocación de la capa vegetal	UND
8	Retiro de escombros	M3

Fuente: (Autores, 2019)

Capítulo 5. Especificaciones Técnicas.

El siguiente conjunto de especificaciones técnicas se armó, luego de haber revisado las referencias bibliográficas en las cuales se encontró que se construyó este tipo de humedales, se tomó la descripción de cada actividad a realizar conjunto con los materiales y equipos que se necesitan para llevarla a cabo, y además de esto, las normas que se deben tener en cuenta al desarrollar cada actividad.

5.1 Actividades preliminares.

5.1.1 Reconocimiento del terreno.

Descripción: Este ítem hace referencia al reconocimiento que se le debe hacer previo al terreno antes de diseñar cualquier estructura; el contratista deberá acercarse al terreno a realizar una inspección visual y verificar las características que este tenga, para determinar el área sobre la que se trabajará y si esta cumple con las condiciones necesarias.

5.1.2 Desbroce y limpieza del terreno.

Descripción: Este ítem hace referencia al desbroce y limpieza que se debe hacer en el terreno, incluyendo tala de árboles, remoción de troncos, de raíces y limpieza de las áreas donde la vegetación se presenta en forma de bosque continuo. Aquí también se incluye la remoción de la capa vegetal y de otros materiales que se encuentren en el sitio.

Los materiales producto de la limpieza que no sean utilizables deberán transportarse hasta las zonas o áreas de desperdicio, de acuerdo a las indicaciones del interventor.

Ejecución

Se hará de acuerdo a las indicaciones del interventor, según las condiciones del terreno.

Materiales y equipo:

-Herramienta menor

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
1.3	Desbroce y limpieza del terreno	M3

5.1.3 Localización y replanteo.

Descripción: Este ítem hace referencia al levantamiento topográfico y replanteo del área a intervenir. El contratista siempre tendrá que desarrollar el replanteo con la mayor precisión posible con el personal idóneo para esta labor y el equipo con la precisión adecuada. Se debe verificar previamente que el plano topográfico suministrado este acorde con el terreno en campo, considerando todas las características plasmadas en él.

Ejecución

Se deben iniciar las actividades luego de que la interventoría de la orden.

primero se determina la cantidad de área a replantear

Se realiza la localización y el replanteo con el equipo y el personal adecuado, procurando preservar lo establecido en los términos y pliegos que indique el interventor.

Materiales y equipo:

-Herramienta menor

-Equipo topográfico

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
1.4	Localización y replanteo	M2

5.1.4 Campamento e instalaciones provisionales.

Descripción: Este ítem hace referencia a la construcción del campamento provisional si es necesario y así mismo el suministro de las fuentes de energía y agua potable, y alguna otra fuente que sea necesaria para el desarrollo del proyecto y no se tenga fácil acceso a esta. El campamento deberá estar dotado con oficinas para el constructor e interventor, almacén, vestidores, baños, entre otros, para el manejo administrativo y operativo de la obra. Al finalizar la obra el campamento será desmontando.

Ejecución

- Localizar y replantear en terreno.
- Realizar relleno de nivelación con sub-base.
- Ejecutar instalaciones hidrosanitarias enterradas.
- Construir placa de piso en concreto de $f'c = 2.000$ PSI, con espesor 8 cm.

- Conformar cerramientos en teleras y mampostería de acuerdo a diseño previo de distribución de espacios de trabajo, almacén, baterías sanitarias, etc.
- Conformar entramado para cubierta con largueros 2 x 4" madera común. Instalar cubierta en teja de asbesto cemento No. 6.
- Instalar puertas y ventanas. Instalar baterías sanitarias.
- Realizar instalaciones eléctricas y culminar instalaciones hidrosanitarias.
- Instalar mobiliario. Asear y habilitar

Materiales y equipo:

-Herramienta menor

-Equipo topográfico

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
1.4	Levantamiento topográfico y replanteo	M2

5.1.5 Cerramiento en lona verde

Descripción: Este ítem hace referencia al cerramiento en lona verde que se hará delimitando el área que se piensa intervenir, evitando el acceso a esta de personal no autorizado. Toda la zona a intervenir deberá aislarse completamente, por lo que el Contratista construirá un cerramiento provisional de acuerdo con el diseño suministrado por el consultor del proyecto.

Ejecución

Se hará de acuerdo a las indicaciones del contratista y el interventor.

Materiales y equipo:

- Herramienta menor
- Lona verde (Poli sombra)
- Estacas de madera de 3m
- Varas de clavo
- Puntilla de 2 ½”

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
1.5	Cerramiento en lona verde	ML

5.2 Movimiento de tierras.

5.2.1 Excavación mecánica para dique de contención

Descripción: Este ítem hace referencia a las excavaciones necesarias para la conformación del dique de contención que hará parte del humedal, el contratista dará las indicaciones a la interventoría según los planos suministrados.

Ejecución

- Previamente antes de la excavación se confirmará el sitio por donde pasan las redes de acueducto o alcantarillado existentes, si es necesario el retiro de alguna de estas, se

procede a hacerse habiendo previamente conectado los servicios antes de dar inicio a la actividad respectiva y se debe proteger adecuadamente las instalaciones que se pondrán en su lugar.

- Se deberán proteger los bordes de las excavaciones solo si estas presentan algún riesgo, y durante la noche esta área de riesgos potenciales quedará señalizada por objetos luminosos y a la distancia pertinente para ver el peligro.
- Las excavaciones se ejecutarán como se especifica de acuerdo lo indique el Interventor.

Materiales y equipo:

-Herramienta menor.

-Retro excavadora.

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
2.1	Excavación para dique de contención	M3

5.2.2 Relleno compactado para suelo de soporte con material de excavación

Descripción: Este ítem hace referencia al relleno compactado con material de las excavaciones realizadas; el contratista decidirá según el diseño el espesor de la capa a compactar. Se debe disponer por encima y por debajo de la lámina plástica, una lámina de geotextil para

evitar punzonamiento por piedras del terreno, como por la misma grava utilizada para constituir el humedal. (Alianza por el agua, S.F)

Ejecución

- Determinar las especificaciones del material a utilizar proveniente de las excavaciones.
- Verificar los niveles para rellenos y terraplenes.
- Verificar todas las características del terreno que están comprendidas en los planos topográficos suministrados, como lo son cotas, niveles, pendientes, entre otras.
- Seleccionar el material que se puede utilizar para relleno, luego de ser excavado
- Revisar métodos y aprobar los adecuados para la colocación y compactación del material.
- Se debe regar el material con agua para alcanzar la humedad óptima precisa deseada.
- Realizar la compactación por medio de equipo i es necesario o manual.
- Verificar los niveles definitivos y que se cumplan las condiciones deseadas.

Materiales y equipo:

-Herramienta menor.

-Retroexcavadora.

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
2.2	Relleno compactado para suelo de soporte con material de excavación	M3

5.3 Construcción de cámaras de registro de entrada y salida (Arquetas)

Descripción: Este ítem hace referencia a la construcción de las arquetas de entrada y de salida al sistema. El consultor deberá determinar las dimensiones adecuadas para que estas se encarguen de recibir y drenar el caudal del agua residual antes y después de entrar al sistema. Estas son pequeños depósitos utilizados para recibir, enlazar y distribuir canalizaciones o conductos subterráneos. Debe estar enterrada y tener una tapa superior para evitar accidentes y poder limpiar su interior de impurezas.

Ejecución

- Determinar el sitio donde se construirán
- Construir una base en solado de hormigón de $e=0,1\text{cm}$
- Levantar las paredes de la arqueta según las indicaciones del interventor, para delimitarla.
- Se deben colocar los conductos tanto entrantes como salientes que atraviesan la arqueta, esto a la par que se levanten los muros que la delimitan.
- Empañetar las caras interiores de la arqueta con mortero de cemento, dejando las aristas redondeadas.

Materiales y equipo:

-Herramienta menor.

-Hormigón de solado.

-Bloque de ladrillo macizo.

- Mortero.

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
3.	Construcción de las cámaras de registro de entrada y de salida (Arquetas)	UND

5.4 Impermeabilización del dique de contención.**5.4.1 Excavación manual para zanja perimetral**

Descripción: Este ítem hace referencia a la excavación manual que corresponde a la zanja perimetral de anclaje para la geomembrana del humedal. El contratista deberá determinar el ancho de la zanja el cual se recomienda ser de 1 m y la profundidad que será estimada según el área sobre la que se esparcirá la geomembrana (No es una excavación muy profunda).

Ejecución

Esta excavación se realizará de acuerdo a las indicaciones dadas por el contratista y que el interventor se encargará de ejecutar.

Materiales y equipo:

-Herramienta menor

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
4.1	Excavación manual para zanja perimetral	M3

5.4.2 Extensión de geo membrana.

Descripción: Este ítem hace referencia a la extensión de la geomembrana que cumplirá la función de impermeabilizante del humedal, evitando con esto la filtración del nivel freático y la contaminación del subsuelo por infiltración. El contratista dará las indicaciones al interventor, el cual ejecutará este proceso tal cual esté indicado en el diseño.

Ejecución

- Extendido de la geomembrana.
- Introducir los extremos de la geomembrana en la zanja perimetral excavada previamente.
- Ajustar la geomembrana a las paredes del dique y a las paredes de la zanja perimetral excavada para su anclaje.

Materiales y equipo:

- Herramienta menor.
- Geomembrana

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
4.2	Extensión de geo membrana	M2

5.4.3 Relleno de zanja perimetral con material de excavación.

Descripción: Este ítem hace referencia al relleno que se debe hacer luego de extender la geo membrana sobre las paredes y base del dique de contención del humedal. La interventoría deberá asegurar que la geomembrana quede bien anclada al sistema para evitar percances en el funcionamiento de este. Consiste en volver a llenar la zanja perimetral excavada con material de la excavación realizada, para que la lámina quede anclada.

Ejecución

- Relleno de la zanja sobre la geomembrana con el material de la excavación, verificando que esta quede bien anclada.

Materiales y equipo:

- Herramienta menor.
- Material de excavación.

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
4.3	Relleno de zanja perimetral con material de excavación	M3

5.5 Ensamblado del sistema de drenaje para recolección.

5.5.1 Instalación de tubería de recolección.

Descripción: Este ítem hace referencia a la instalación de la tubería con la cual se recolectará el agua luego de haber sido tratada en el sistema. Se deberá implementar una tubería de diámetro 4” perforada, la cual se encontrará ubicada en el extremo de salida del humedal. El contratista dará las indicaciones de donde debe ir ubicada según los planos suministrados por la consultoría del proyecto.

Ejecución

- Instalación de la tubería de 4” en el extremo de salida del humedal.

Materiales y equipo:

- Herramienta menor.
- Tubería 4”

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
5.1	Instalación de tubería de recolección.	ML

5.5.2 Ensamblado con cámara de registro

Descripción: Este ítem hace referencia a la conexión de la tubería previamente instalada para la recolección del agua tratada, con el sistema de arqueta o cámara de registro de salida del humedal. Esta se hará mediante uniones del mismo material y diámetro de la tubería de recolección. El contratista dará las indicaciones según lo descrito en los planos suministrados sobre el proyecto.

Ejecución

- Conexión de tubería a arqueta de salida o cámara de registro.

Materiales y equipo:

- Herramienta menor
- Uniones

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
5.2	Ensamblado con cámara de registro	GLOBAL

5.6 Llenado de grava y/o arena

5.6.1 Vaciado y extensión de colchón de arena para soporte de grava

Descripción: Este ítem hace referencia al vaciado y extensión de un colchón de arena que se utilizará como soporte para el sustrato que hará parte del humedal; esta capa se pondrá con el fin de evitar el contacto del sustrato con la geo membrana e impedir que este la rompa, ya que puede haber rocas filosas, punteadas que pueden ocasionarle daño a la geo membrana. El contratista dará las indicaciones según lo descrito en los planos suministrados sobre el proyecto y su propio criterio, teniendo en cuenta la cantidad de grava que estará soportando la capa.

Ejecución

- Vaciado del material granular sobre la geo membrana.
- Expansión sobre toda el área superficial; para este procedimiento se recomienda la utilización de equipo no muy pesado, en su preferencia esparcirlo manualmente utilizando pala.
- Nivelación del colchón de arena.

Materiales y equipo:

- Herramienta menor.
- Material granular.

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
6.1	Vaciado y extensión de colchón de arena para soporte	GLOBAL

5.6.2 Vaciado y extensión de capa de grava (Sustrato)

Descripción: Este ítem hace referencia al vaciado y extensión de la capa de grava que servirá como soporte del humedal, ya que en esta estarán sujetas las raíces de la vegetación emergente utilizada; el espesor será determinado en el diseño según criterios de construcción. El vaciado de la grava debe hacerse con precaución evitando no dañar la geo membrana que se encuentra recubriendo las paredes laterales del dique de contención; a su vez su extensión se recomienda realizarse de forma manual, para evitar el daño de las tuberías de recolección y el sistema de ensamblado con la arqueta de salida. El contratista dará las indicaciones según lo descrito en los planos suministrados sobre el proyecto y su propio criterio.

Ejecución

- Vaciado de la grava sobre el colchón de arena.
- Expansión sobre toda el área superficial; para este procedimiento se recomienda la utilización de equipo no muy pesado, en su preferencia esparcirlo manualmente utilizando pala.
- Nivelación de la capa de grava.

Materiales y equipo:

- Herramienta menor.

- Material granular.

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
6.2	Vaciado y extensión de capa de grava (Sustrato)	M3

5.7 Selección y colocación de la capa vegetal

Descripción: Este ítem hace referencia a la selección y colocación de las plantas, la selección deberá realizarse previamente teniendo en cuenta los criterios antes descritos en las consideraciones de diseño para la selección de la vegetación; deberá utilizarse vegetación preferiblemente que se consiga en la región, de no ser así y necesite ser transportada de algún otro sitio, se deberán seguir las recomendaciones del proveedor para el viaje, y ser transportadas cuidadosamente para evitar el daño de estas. Al momento de la colocación se deberá seguir estrictamente lo descrito por el interventor. El contratista dará las indicaciones según lo descrito en los planos suministrados sobre el proyecto y su propio criterio.

Ejecución

- Selección de las plantas a utilizar.
- Llenado del humedal con agua natural (NO POTABILIZADA).
- Colocación de la planta según indicación del interventor.
- Maduración y desarrollo de la vegetación.
- Retirar el agua natural y poner en funcionamiento el sistema con agua residual.

Materiales y equipo:

- Herramienta menor.
- Vegetación.

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
7	Selección y colocación de la capa vegetal	UND

5.8 Retiro de escombros

Descripción: Este ítem hace referencia al cargue, transporte y disposición del material sobrante en obra en el botadero certificado más cercano.

Ejecución

- Solicitar pertinente aprobación de la interventoría.
- Previo al Inicio de actividades debe tenerse autorización y claridad por parte de la dirección y el de la interventoría de obra acerca de la disposición final del material producto de la excavación.
- No podrá darse inicio de actividades sin contar con los respectivos trabajos de topografía en donde deben ser localizados los respectivos ejes, niveles, anchos y longitudes según revisión y aprobación del de la interventoría.

- Determinación de riesgos, realizar revisión y verificación del estudio de suelos correspondiente previo al inicio de actividades con el director, residente de obra y de la interventoría y de esta forma determinar grado de seguridad a tener en cuenta precedente al inicio de labores.

Materiales y equipo:

- Herramienta menor.

- Volqueta.

Unidad y forma de pago:

Ítem	Descripción	Unidad y forma de pago
8	Retiro de escombros	M3

Capítulo 6. Comparativo

6.1 Comparativo de porcentajes de eficiencias obtenidos para remoción de contaminantes

Revisando la bibliografía recopilada referente a los sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial que se han construido y evaluado y algunos que ya se encontraban contruidos pero se evaluaron para medir la eficiencia en porcentajes de remoción que estos tenían y si estaban trabajando adecuadamente, se hizo una compilación de este información tomando el lugar donde se realizó, los tipos de especies vegetales que se implementaron, el modelo matemático utilizado para su diseño y los porcentajes de remoción que se obtuvieron en cada uno de ellos, entre otros. A continuación, se presenta una tabla donde se recoge esta información para luego analizarse. (Ver tabla 17)

Tabla 17. Recopilación de información de algunos sistemas existentes.

Autores	Universidad	Año	Ubicación Modelo	Planta utilizada	T _{prom} (°C)	Lecho	Modelo matemático de diseño utilizado	% Eficiencia de remoción					
								DBO5	DQO	SST	N _T	P _T	Coliformes Fecales
Jhoan Marín	U.Tecnológica de Pereira	2010	Pereira	Guagua angustifolia Kunt	23	Arena	--	92,21	84,31	-	62,60	-	-
Juan Carlos Correa						Grava		72,88	64,35	-	36,45	-	-
Óscar Bernal López	U. Jorge Tadeo Lozano	2014	Campus de la Universidad (Bogotá)	*Polygonum punctatum *Eichhornia Crassipes *Limnobium laevigatum *Typha spp	17	Grava media 25mm	Reed	42,72	50,8	57,1	20	90	-
Miriam I. Fernandez Monsalvo	U. Politécnica de Valencia	2017	Valencia, España	Phragmites australis	Min 5°C Max 34°C	Arena	Kadlec & Knight	82	61	86	16	6	-
Jaime Lara Borrero Ismael Vera Puerto	-	2005	Cogua, Cundinamarca	Junco al tresbolillo	16,15	Grava 0,5"	*Reed *Kadlec	80	-	44	43	28	69
Tatiana García Botero	U. de los Andes	2005	Bogotá	*Bidens Laevis *Juncus effusus *Polygonum hydropiperoides	13	Grava 1" y 2"	EPA	57,1	52,4	78-85	56,6	72,1	99,9

Tabla 17 (Continuación).

Autores	Universidad	Año	Ubicación Modelo	Planta utilizada	T _{pro} m (°C)	Lecho	Modelo matemático de diseño utilizado	% Eficiencia de remoción					
								DBO ₅	DQ _O	SST	N _T	P _T	Coliformes Fecales
Reyna Magdalena Núñez	U. Peruana Unión	2016	Lima	Cyperus Papyrus	19,3	Grava 3/4"	Jairo Romero Rojas	96	96,00	55	78,00	88	-
Alejandra Patricia Otálora	U. Nacional de Colombia	2011	Locación Petrolera de Caño Gandul	Bidens Laevis	20	Materia 1 Plástico	-	53	63	88	50	14	95,2
Luisa Fernanda Sánchez	U. Francisco de Paula Santander-Ocaña	2016	Ocaña, Norte de Santander	Costus Spicatus	20	Grava gruesa 25% - Granito #3 25% - Arena 50%	Empírico	91,1	91,27	96,12	84,22	89,52	-
Yermis Fabián Vélez				Heliconia Psittacorum		95,89		95,96	98,91	84,94	86,66	-	
				Costus & Heliconia		90,86		90,86	97,71	86,19	82,05	-	
Eylen López María Rodríguez	U. de la Salle	2016	Chía, Cundinamarca	Junco	14	Grava fina 16mm	*Reed *Romero Rojas	80,8	71,2	75	58,3	60,2	-

Fuente: (Autores, 2020)

6.1.1 Análisis de la información recopilada

En la revisión de la bibliografía encontrada para la compilación del trabajo se hallaron diferentes proyectos en los cuales se diseñó, construyó o evaluó un sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial. Este es un tema que muy poco se ha estudiado, pero bastante relevante, ya que en la actualidad debido a los altos costos que conlleva implementar una planta de tratamiento convencional para el tratamiento de las aguas residuales, se ve la necesidad de buscar alternativas más económicas y no obstante esto sostenibles con el medio ambiente. En los resultados arrojados en los proyectos podemos notar que la eficiencia de estos sistemas están por encima del 50% en lo que respecta a la remoción de agentes contaminantes como lo son la DBO, DQO, SST y coliformes fecales, esto se evidencia claramente en el caso del proyecto realizado en la Universidad Francisco de Paula Santander, en la ciudad de Ocaña (Sanchez Gil & Vélez, 2016) donde se utilizaron plantas propias de la región y el medio de sustrato que se implemento fue una combinación de grava, granito y arena en mayor porcentaje; en los resultados obtenidos para las muestras seleccionadas, la remoción que hubo para cada contaminante está por encima del 80%, estos resultados se obtuvieron en gran mayoría para un tiempo de retención hidráulico de 5 días y un volumen de agua a tratar de 12,5 Litros, lo que nos deja ver que para obtener una mayor eficiencia del sistema es necesario si el volumen de agua a tratar es muy grande, que el tiempo de retención hidráulico dentro de este sea mayor, por lo tanto se requerirá de una extensión del humedal más larga, para permitir que los microorganismos cumplan con su función.

Según el análisis realizado, Para estos humedales es recomendable la utilización de un medio de sustrato de diámetro pequeño (Arena) ya que la conductividad hidráulica al ser menor

en este tipo de material, permite una mayor retención de los agentes contaminantes contenidos en el agua residual, por lo cual habrá unos mayores porcentajes de eficiencia en la remoción. En el proyecto realizado en la Universidad Tecnológica de Pereira (Marín Montoya & Correa Ramírez, 2010), se diseñaron dos tipos de plantas piloto en las cuales se implantaron la misma especie vegetal y con los mismos criterios de diseño, pero con la diferencia de que en un humedal se trabajó con medio poroso de arena y en el otro con grava; en los dos humedales los porcentajes de remoción aunque cumplen con el estipulado en el artículo 164 del RAS 2000 donde muestra la eficiencia mínima de remoción de constituyentes, es notorio que con el sistema que se trabajó con lecho de arena resulta arrojando mayores porcentajes de eficiencia que con el que se trabajó con Grava, habiendo un margen de error del 20% al 30% en cada caso.

Por otro lado se encontró un proyecto en el que el medio de sustrato utilizado no se implementó ningún tipo de material granular, en este caso se implementó como medio de soporte material plástico, este proyecto se realizó en la Universidad Nacional de Colombia (Otalora Rodríguez, 2011) el cual se implementó para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la locación petrolera de Caño Gandul; en los resultados obtenidos en este humedal que se muestran en la tabla 14 (Ver tabla 14) podemos notar que para los agentes contaminantes como la DBO, DQO, SST y NT se obtuvieron valores promedio de remoción mayores al 50% en cada caso, pero en el caso del PT el valor de remoción fue del 14%, esto es debido a que al no utilizar un medio de sustrato de material granular y haber implementado material plástico, el fosforo no iba a ser retenido en el sustrato, ya que según Otálora Rodríguez este se remueve por el fenómeno de adsorción y depende directamente de las características del sustrato, aunque el

porcentaje de remoción en el muestreo 3 realizado fue un poco considerable, se presume que esto se debe a la acción de los microorganismos presentes en el agua residual.

En el proyecto realizado en la Universidad de los Andes por Tatiana García (García Botero, 2005) comparando las especies vegetales implantadas en el humedal artificial se encontró que el Junco (*Juncus Effusus*) tiene mayor capacidad de adaptación al medio y de absorción de nutrientes ya que presentan gran cantidad de pelos radicales, contrario a las raíces de Barbasco (*Polygonum Hydropiperoides*) y Botoncillo (*Bidens Laevis*) en las cuales estos pelos radicales se observan en menor cantidad; llegando a la conclusión de que entre más cantidad de pelos radicales tengan, tendrán mayor capacidad de adaptación y crecimiento.

Según la normatividad colombiana vigente, para los diferentes tratamientos por los que debe atravesar el agua residual existen ciertos parámetros o índices mínimos de remoción de constituyentes que deben cumplir; estos índices se encuentran expresados en porcentajes de remoción y fueron tomados del título A del Reglamento técnico del sector de Agua potable y Saneamiento básico; a continuación se presenta un resumen de los rendimientos típicos que se deben lograr con las diferentes etapas y procesos de tratamiento. (Ver tabla 18)

Tabla 18. Eficiencia mínima de remoción de constituyentes.

	Unidades de tratamiento	Eficiencia mínima de remoción de constituyentes, Porcentaje						
		DBO	DQO	Sólidos Suspendidos	P	N Org	NH ₃ -N	Patógenos
Pre-tratamiento	Rejillas	Desp	Desp	Desp	Desp	Desp	Desp	Desp
	Desarenadores	0-5	0-5	0-10	Desp	Desp	Desp	Desp
Trat. Primario	Sedimentación primaria	30-40	30-40	50-65	10-20	10-20	0	Desp
Trat. Secundario	Lodos activados (Convencional)	80-95	80-95	80-90	10-25	15-20	8-15	Desp
	Filtros percoladores							Desp
	de alta tasa, roca.	65-80	60-80	60-85	8-12	15-50	8-15	
	de súper tasa, plástico.	65-85	65-85	65-85	8-12	15-50	8-15	
Trat. Anaerobio	Reactores UASB (RAFA)	65-80	60-80	60-70	30-40	-	-	Desp
	Reactores RAP	65-80	60-80	60-70	30-40	-	-	Desp
	Filtros anaerobios	65-80	60-80	60-70	30-40	-	-	Desp
Post-Tratamiento	Lagunas de Oxidación							
	Lagunas anaerobias	50-70	-	20-60	-	-	-	90-99.99
	Lagunas aireadas	80-95	-	85-95	-	-	-	90-99.99
	Lagunas facultativas	80-90	-	63-75	30	-	-	90-99.99
	Lagunas de maduración	60-80	-	85-95	-	-	-	90-99.99
Desinfección	Rayos ultravioleta	Desp	Desp	Desp	Desp	Desp	Desp	100
	Cloración	Desp	Desp	Desp	Desp	Desp	Desp	100

Fuente: (RAS, 2000)

6.2 Comparativo de valores obtenidos de carga para cada contaminante con la normatividad vigente.

En cada proyecto que se analizó en el cual se evaluó el sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial diseñado, construido o que ya se encontraba implementado, se encontraron valores obtenidos en el efluente para la concentración de cada contaminante luego de haber atravesado el humedal artificial. A continuación, se muestra en la tabla 19 la compilación de estos valores organizados según el proyecto, para luego hacerse el correspondiente análisis con una norma nacional (Resolución 0631 del 2015) y una internacional (NOM-001-SEMARNAT-1996).

Tabla 19. Valores min obtenidos en los proyectos para concentración de contaminantes en el efluente.

Autores	Universidad	Tipo	Valores max-min obtenidos en los proyectos para concentración de contaminantes en el efluente				
			DBO5 (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	N _T (mg/l)	P _T (mg/l)
Óscar Bernal López	U. Jorge Tadeo Lozano	HUM	110	117	30	0,319	1,49
Miriam I. Fernández Monsalvo	U. Politécnica de Valencia	HUM	121	234	49	47	5,6
Jaime Lara Borrero Ismael Vera Puerto	-	HUM	20	-	4	50	4
Tatiana García Botero	U. de los Andes	HUM	57,5	234,7	25	16,4	27,3

Tabla 19, continuación.

Autores	Universidad	Tipo	Valores max-min obtenidos en los proyectos para concentración de contaminantes en el efluente				
			DBO5 (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	N _T (mg/l)	P _T (mg/l)
Reyna Magdalena Núñez	U. Peruana Unión	HUM	12,38	30,45	180	6,27	0,49
Luisa Fernanda Sánchez	U. Francisco de Paula Santander-Ocaña	HUM	401,3-42,3	141,6-30,3	75,6-12,2	84,22	0,97-0,62
Yermis Fabián Vélez		HUM	309,3-19,6	127,3-14	46,4-3,4	84,94	0,9-0,26
		HUM	342,4-43,5	139,5-36,6	56-7,2	86,19	0,91-0,35
Eylen López	U. de la Salle	HUM	90,88	307	64	36,24	8,468
María Rodríguez		HUM					
Ernesto torres	Revista Ingenio	PTAR	240,00	630,00	240,00	-	-
Alexander Marin Sanabria		HUM	5,00	205,00	3,00	-	-

Fuente: (Autores, 2020).

Según la resolución 0631 del 2015 que rige en Colombia, y en la cual se contemplan los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones y según la norma mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 para la protección de la vida Acuática, se toma este cuadro comparativo como referencia donde se incluyen los límites máximos permisibles en cada caso. (Ver tabla 20)

Tabla 20. Límites permisibles de concentración de contaminantes para cada norma.

Parámetro mg/l	Resolución 0631 2015 Límite máximo permisible Artículo 8 Columna 4	Límite máximo permisible para contaminantes. NOM-001-SEMARNAT-1996, protección de la vida Acuática
DBO5 (mg/l)	90	200
DQO (mg/l)	180	--
NT (mg/l)	Análisis y reporte	60
PT (mg/l)	Análisis y reporte	30
SST (mg/l)	90	200

Fuente: (Autores 2020).

Cabe aclarar que estos valores implican para aguas residuales domesticas de origen urbano.

6.2.1 Análisis de la información recopilada

Los valores mínimos obtuvimos durante el muestreo realizado en cada proyecto son muy variables, esto es debido a que en algunos proyectos se trabajó bien sea con un caudal muy pequeño y un tiempo de retención hidráulico mayor, lo que produciría que el contaminante bajara más su concentración, pues los microorganismos tendrían más tiempo para hacer su trabajo; otro factor influyente en esto es el tipo de especie vegetal implantado, ya que diferentes plantas tienen diferentes características y pues como tal cumplen una función diferente en la fitorremediación que ocurre dentro del humedal artificial; otro factor que afectó los resultados obtenidos en la depuración es el sustrato, pues como anteriormente se mencionó este es

indispensable en la eliminación del fosforo y no obstante esto también permite que el sistema tenga un mayor o menor tiempo de retención hidráulico del agua residual.

En el caso del proyecto realizado en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña por Luisa y Yermis (Sanchez Gil & Vélez, 2016) podemos ver que se obtienen valores máximos y mínimos para cada planta piloto diseñada, esto es debido a los criterios antes mencionados, pues los valores más altos obtenidos al final del muestreo fueron con un tiempo de retención hidráulica de 2 días y un volumen a tratar de agua de 25L, mientras que por otro lado los valores mínimos se obtuvieron con un TRH de 5 días y un volumen de agua a tratar de 12,5L. en el primer caso la mayoría de los valores no cumplen con los establecidos como mínimos en la resolución 0631 ni en la norma internacional tomada como referencia (NOM-001-SEMARNAT-1996), pues se encuentran muy por encima de los permisibles, mientras que en el segundo caso todos los valores cumplen con las dos normas, ya que se encuentran por debajo de los establecidos en ella.

Los resultados analizados en el proyecto dejan ver que la especie vegetal con la cual se obtuvieron los índices de concentración del contaminante en el efluente más bajos fue con la *Heliconia Psittacorum* comúnmente conocida en la región como avecilla.

Como referente internacional tenemos el proyecto realizado por Reyna Magdalena Núñez en la Universidad Peruana Unión (Núñez Burga, 2016) donde los valores obtenidos de concentración para cada contaminante están por debajo de los permisibles tanto en Colombia (Resolución 0631) y El referente internacional, la norma Mexicana (NOM-001-SEMARNAT-

1996), dando valores para la DBO de 30,45 mg/l, la DQO 12,48 mg/l, de 180 mg/l para los SST, de 6,27 mg/l para el NT y 0,49 mg/l para el PT, que según cómo podemos ver en lo establecido en la tabla 18 (Ver tabla 18), todos estos valores cumplen con la normatividad de vertimientos.

En el estudio realizado por Ernesto Torres y Alexander Marín (Torres & Marín Sanabria, 2012) y publicado en la revista INGENIO de la universidad libre de Colombia, se evaluaron dos diferentes sistemas de tratamiento para las aguas residuales, en el cual expusieron los resultados de un trabajo de investigación realizado en la especialización de Gerencia Ambiental y de un proceso investigativo llevado a cabo en un centro de entrenamiento que se ubica en Tolemada, Melgar. En él compararon los resultados obtenidos en los efluentes de una PTAR y de un Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal donde fue notoria la gran diferencia de estos valores, pues en el Humedal se obtenían valores muy por debajo para cada agente contaminante, por lo cual estos muestran una gran eficiencia en el tratamiento secundario de las aguas residuales, por otro lado también deja en evidencia que una planta de tratamiento convencional no necesariamente genera un vertimiento que cumpla con los parámetros exigidos en la norma, esto depende del mantenimiento y del manejo que se le dé a esta.

En la mayoría de las fuentes empleadas como referencia los valores obtenidos para concentraciones de cada contaminante en efluente del humedal cumplen con la normatividad vigente con la cual se estableció la comparación; en proyectos como los realizados por Tatiana Garcia y el de Eyleen Lopez y Rodríguez en los que por ejemplo la concentración en el efluente de DQO era mayor que la máxima permisible en la norma, esto se debió a que el agua residual contenía una alta concentración del contaminante en el afluente, por lo que aunque se obtuvieron

porcentajes de remoción altos y una eficiencia optima en el funcionamiento del humedal, no se lograron alcanzar los valores máximos permisibles dentro de la norma.

Como referencia local para comparar los sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con los parámetros de eficiencia mínima de remoción de constituyentes del agua residual mostrados en la tabla 8, se optó por tomar los resultados obtenidos en un proyecto realizado en las instalaciones de la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña por estudiantes de Ingeniería ambiental que tiene por nombre “DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PILOTO PARA LA DESCONTAMINACION DE AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN LA UFPSO, EMPLEANDO LAS ESPECIES *COSTUS SPICATUS* Y *HELICONIA PSITTACORUM*” (Sanchez Gil & Vélez, 2016) en donde como su nombre lo indica se utilizaron dos especies de plantas que se encuentran en la región y se conocen con los nombres de Caña Agria y AVECILLA respectivamente; en el proyecto se realizaron 3 plantas pilotos utilizando en dos de ellas una de las especies de macrófitas por separado y en la tercera se utilizaron las dos en conjunto, para cada tratamiento se hicieron las diferentes pruebas de laboratorio determinando la carga de cada constituyente al finalizar el proceso de tratamiento y con esto el porcentaje de remoción que se obtenía.

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO							
Standard Methods 5210 B / Dilución							
Unidad: mg/L O ₂							
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluente (mg/L O ₂)	Valor efluente (mg/L O ₂)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L O ₂)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	536,6	401,3	25,21	135,3
		25	120	443,3	89,2	79,87	354,1
		12,5	48	475,7	236,9	50,19	238,8
		12,5	120	475,7	42,3	91,10	433,4
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	536,6	309,3	42,36	227,3
		25	120	443,3	50,4	88,64	392,9
		12,5	48	475,7	136,8	71,24	338,9
		12,5	120	475,7	19,6	95,89	456,1
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	536,6	342,4	36,20	194,2
		25	120	443,3	65,9	85,13	377,4
		12,5	48	475,7	198,6	58,25	277,1
		12,5	120	475,7	43,5	90,86	432,2

Figura 35. Porcentaje de remoción para DBO.

Fuente: (Sanchez Gil & Vélez, 2016)

En los resultados obtenidos para remoción de DBO₅ (Ver figura 12) se obtuvieron porcentajes de remoción del constituyente que están entre 25,21% y 95,89%, el cual el segundo fue obtenido utilizando la especie *Heliconia Psittacorum* con un volumen de afluente de 12,5L y un tiempo de retención en el sistema de 120 Horas (5 días), obteniendo consigo una carga removida de 456,1 mg/L; cabe resaltar que para las tres unidades experimentales se obtuvieron índices por encima del 80% lo cual según lo establecido en la tabla 8 de este documento, indica que está por encima de la eficiencia mínima que debe tener una unidad de tratamiento secundario; además de esto, según lo establecido en el artículo 15 de la resolución 0631 en donde indica que la carga permitida de DBO₅ en el efluente tiene que ser de 50 mg/L, podemos observar que con esta especie de planta y trabajando con un volumen de 12,5L y 120 horas de retención se obtienen valores por debajo de lo establecido en la resolución, por lo que este

sistema es totalmente viable y cumple con la normatividad vigente para la remoción de DBO₅ teniendo en cuenta los parámetros antes mencionados.

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES							
Standard Methods 2540 D / Gravimétrico							
Unidad: mg/L SST							
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	347,6	75,6	78,25	272
		25	120	336,4	44,8	86,68	291,6
		12,5	48	314,8	29,2	90,72	285,6
		12,5	120	314,8	12,2	96,12	302,6
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	347,6	46,4	86,65	301,2
		25	120	336,4	36,8	89,06	299,6
		12,5	48	314,8	20,4	93,51	294,4
		12,5	120	314,8	3,4	98,91	311,4
3	<i>Costus spicatus</i> y <i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	347,6	56	83,88	291,6
		25	120	336,4	41,2	87,75	295,2
		12,5	48	314,8	24	92,37	290,8
		12,5	120	314,8	7,2	97,71	307,6

Figura 36. Porcentaje de remoción para SST.

Fuente: (Sanchez Gil & Vélez, 2016)

En los resultados obtenidos para remoción de SST (Ver figura 13) se obtuvieron porcentajes de remoción del constituyente que están entre 78,25% y 98,91%, el cual el mayor porcentaje fue obtenido con los mismos parámetros que se obtuvo la máxima remoción de DBO₅, obteniendo una carga removida de 311,4 mg/L. Según los datos arrojados en laboratorio para este constituyente se llega a la conclusión de que cumple con la normatividad vigente, tanto lo estipulado en el título A del RAS para eficiencia mínima permisible como la carga mínima permitida contemplada en el artículo 15 de la resolución 0631 del 2015.

FÓSFORO TOTAL							
Standard Methods 8048				Espectrofotómetro UV-Visible DR 6000			
Unidad: mg/L P				Procedimiento: 490			
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	1,91	0,56	70,68	1,35
		25	120	1,90	0,94	50,52	0,96
		12,5	48	1,95	0,97	50,25	0,98
		12,5	120	1,95	0,62	68,20	1,33
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	1,91	0,20	89,52	1,71
		25	120	1,90	0,90	52,63	1,00
		12,5	48	1,95	0,51	73,84	1,44
		12,5	120	1,95	0,26	86,66	1,69
3	<i>Costus spicatus y Heliconia psittacorum</i>	25	48	1,91	0,47	75,39	1,44
		25	120	1,90	0,91	52,10	0,99
		12,5	48	1,95	0,70	64,10	1,25
		12,5	120	1,95	0,35	82,05	1,60

Figura 37. Porcentaje de remoción para Fósforo.

Fuente: (Sanchez Gil & Vélez, 2016)

En los resultados obtenidos para remoción de Fosforo (P) (Ver figura 14) se obtuvieron porcentajes de remoción del constituyente que están entre 50,25% y 86,66%, el cual el mayor porcentaje fue obtenido con los mismos parámetros de los contaminantes anteriores, pero con la planta piloto de tratamiento en la cual se utilizó la especie vegetal *Heliconia Psittacorum*, obteniendo consigo una carga removida de 1,69 mg/L. Según los datos arrojados en laboratorio para este constituyente se llega a la conclusión de que cumple con la normatividad vigente, tanto lo estipulado en el título A del RAS para eficiencia mínima permisible como la carga mínima permitida contemplada en el artículo 15 de la resolución 0631 del 2015.

NITRATOS							
Standard Methods 8039				Espectrofotómetro UV-Visible DR 6000			
Unidad: mg/L NO ₃ ⁻				Procedimiento: 355			
Unidad experimental	Especie vegetal	Variables		Evaluación		Resultados	
		Volumen (Litros)	Tiempo (Horas)	Valor afluente (mg/L)	Valor efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)	Carga removida (mg/L)
1	<i>Costus spicatus</i>	25	48	41,65	39,48	5,21	0,15
		25	120	36,81	23,90	35,07	12,91
		12,5	48	47,08	22,44	52,33	24,61
		12,5	120	47,08	14,08	70,09	33,00
2	<i>Heliconia psittacorum</i>	25	48	41,65	33,00	20,76	8,65
		25	120	36,81	23,32	36,64	13,49
		12,5	48	47,08	9,24	80,37	37,84
		12,5	120	47,08	4,48	90,48	42,6
3	<i>Costus spicatus y Heliconia psittacorum</i>	25	48	41,65	38,13	8,45	3,52
		25	120	36,81	25,66	30,56	11,15
		12,5	48	47,08	18,48	60,74	28,6
		12,5	120	47,08	13,2	71,96	33,88

Figura 38. Porcentaje de remoción para Nitratos.

En los resultados obtenidos para remoción de Nitratos (Ver figura 15) se obtuvieron porcentajes de remoción del constituyente que están entre 5,21% y 90,48%, el cual el mayor porcentaje fue obtenido utilizando la especie vegetal *Heliconia Psittacorum* y los mismos parámetros de los contaminantes anteriores, obteniendo consigo una carga removida de 42,6 mg/L. Según los datos arrojados en laboratorio para este constituyente se llega a la conclusión de que cumple con la normatividad vigente, tanto lo estipulado en el título A del RAS para eficiencia mínima permisible como la carga mínima permitida contemplada en el artículo 15 de la resolución 0631 del 2015.

En el documento de donde se tomaron los datos anteriormente mencionados para la comparación con la normatividad vigente, se evaluaron otros tipos de contaminantes que puede presentar el agua residual y que también son removidos en el proceso de depuración de ésta

mediante estos sistemas naturales; no obstante, en el presente trabajo se evaluó y se describió el diseño como tal para los constituyentes que se presentan con mayor carga en el agua residual.

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal son sistemas de tratamiento natural de agua residual, por lo que la implementación de estos trae consigo bondades al medio ambiente y a la economía del sector donde se implemente, puesto que revisando datos obtenidos con la utilización de estos sistemas, se pudo observar que para los diferentes contaminantes se obtuvieron porcentajes de remoción altos y esto sin necesidad de la utilización de químicos ni sistemas complejos para depurar el agua.

Capítulo 7. Conclusiones

Los humedales artificiales se postulan como una alternativa efectiva para el tratamiento de aguas residuales debido a la tecnología que estos utilizan; además de esto resultan siendo una opción técnicamente ejecutable, económicamente viable, socialmente acogida y no obstante esto, amigable con el medio ambiente.

Los humedales de flujo subsuperficial aunque pueden resultar ser más costosos en lo que respecta al medio granular que se utilice como sustrato frente a los de flujo superficial, estos cuentan con un gran punto positivo ya que brindan la protección a la vegetación del sistema de factores externos como lo pueden ser las bajas temperaturas que se presenten en la zona, puesto que éstas reducen las tasas de depuración de contaminantes por los microorganismos presentes en él, es por ello que el medio granular resulta siendo una ventaja en el tiempo utilizado ya que las tasas de reacción microbiana serán mayores en estos humedales.

Estos humedales a pesar de ser una alternativa efectiva para la depuración de algunos constituyentes del agua residual, no implican la exclusión de los sistemas convencionales, pueden ser un complemento y no una competencia para estos sistemas; ya que estos no resultan siendo tan efectivos al eliminar ciertos constituyentes, por lo que son una alternativa eficaz principalmente para la depuración de aguas servidas de origen urbano. Si el diseño y funcionamiento de los humedales se acomodan a las características del agua residual se pueden obtener buenos rendimientos en la degradación de contaminantes en aguas domésticas, además

de esto también se deben tener en cuenta las condiciones climáticas del lugar de emplazamiento y a que se use el material vegetal que se adecue a las condiciones de la zona.

La temperatura de la zona en la que se implemente el humedal es un factor fundamental en el funcionamiento de este y además afecta lo que corresponde al diseño, ya que los procesos biológicos suceden a mayor velocidad si se cuenta con una mayor temperatura, lo que implicaría un menor tiempo de retención hidráulico y por lo tanto un menor tamaño del humedal en lo que respecta al área superficial.

Debido a los procesos que se efectúan para la depuración del agua residual, estos sistemas de tratamiento se consideran no convencionales puesto que en ellos ocurren procesos netamente biológicos tales como la degradación bacteriana y decantación secundaria. Comparados con los sistemas convencionales de tratamiento, los humedales normalmente requieren una mayor extensión en su área superficial.

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial tienen un ciclo de vida renovable una vez sean implantados y puestos en funcionamiento adecuadamente, lo que genera que estos sean más económicos comparados con los sistemas convencionales, ya que estos requieren en su operación y mantenimiento mayor tecnología, puesto que utilizan equipos mecánicos que consumen energía.

Revisando los diferentes modelos matemáticos planteados para el diseño, se encontró que cada uno de ellos calcula lo que es el área superficial requerida de manera diferente por lo tanto también presentan discrepancias en el cálculo del tiempo de retención hidráulico y la carga superficial orgánica aplicada, además, no tienen en cuenta directamente las complejas interacciones y reacciones que se producen dentro de estos sistemas, por lo cual en cada uno de ellos se propone en lugar de esto una constante de velocidad que es aparente y en la cual se tiene en cuenta la variación de los niveles de carga de los agentes contaminantes tanto en el afluente como en el efluente. Esto implica el enfoque más aproximado que se puede determinar en concepto a los estudios realizados, las de bases de datos que se encuentran disponibles y el conocimiento que se tiene actualmente sobre el tema; por lo que es necesario la realización y el adelanto de más estudios que nos indique con mejor precisión estos parámetros.

Aunque se obtienen porcentajes de remoción considerables en la eliminación de algunos constituyentes del agua residual en los humedales artificiales, estos no son precisamente los esperados al momento de hacer el diseño del sistema, ya que estos resultados pueden alterarse en campo debido a diferentes factores que pueden afectar el funcionamiento del humedal, como lo pueden ser la temperatura, ya que el humedal se diseña para un temperatura promedio del agua residual y esta puede variar a lo largo del año según las condiciones climáticas, otro factor influyente es que la especie vegetal implantada no se adapte a la geografía de la región, además de esto la elección del medio granular filtrante, puesto que entre mayor diámetro tenga, habrá menor tiempo de retención hidráulico, por lo que los microorganismos presentes no cumplirán a cabalidad las reacciones bioquímicas del proceso de depuración.

El modelo matemático que más se toma como referencia para el diseño de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, es el planteado por Sherwood Reed en su libro, puesto que Reed retoma los criterios de diseño descritos por la EPA en el año 1988 y formula unas ecuaciones que permiten determinar con mayor exactitud el área superficial requerida para la remoción de los contaminantes. Sin embargo, hay autores de algunos proyectos que, basándose en este modelo, toman parámetros y criterios que Kadlec & Knight descubrieron a lo largo de su estudio.

Referencias

- (EPA), A. d. (1988). *Constructed Wetlands and Aquatic plants systems for municipal wastewater treatment*. Cincinnati, Ohio, U.S.: N.E.
- akwa. (2011). Plantas de Tratamiento de Agua por Floculación Iónica (patente). *akwa*, 7.
- Alianza por el agua. (S.F). *Manual de duplicación de aguas residuales urbanas*. Valle del Cauca: Ideasanares.
- Alsaza. (2012, Mayo 20). *CIUDADCIENCIA*. Retrieved from <http://www.ciudadciencia.es/carrizo/>
- Barria A., A. (Jul 2007). *Diseño y construcción de un humedal artificial piloto para la recuperación de las aguas superficiales de Escorial de Minería del Cobre*. Valparaíso, Chile.: N.E.
- Bellostas Ara, A. (2019, Abril 29). *3tres3.com*. Retrieved from https://www.3tres3.com/articulos/%C2%BFcomo-limpiar-para-eliminar-el-biofilm-de-las-tuberias-de-la-granja_40920/
- Benfield, L., & Randall, C. (1993). *Biological process design for wastewater treatment*. N.E.: Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall, Inc.
- Bernal Lopez, O. (2014). *Diseño de unidad piloto de humedales artificiales de flujo subsuperficial para tratamiento de aguas residuales domésticas en el campus UMNG-Cajicá con fines de reuso*. Bogotá: N.E.
- Carlos A, Arias I, & Brix, H. (2003). Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranandina*.
- CCP, C. (2010, 08 25). *The Johns Hopkins School of Public Health*. Retrieved from Population Information Program: <http://info.k4health.org/pr/prs/sm14/sm14chap2.shtml>

- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (1998). *Small and decentralized wastewater management systems*. New York: McGraw-Hill.
- Crites, R., Middlebrooks, J., & Reed, S. (2006). *Natural systems for waste management and treatment*. Boca Ratón, Estados Unidos.: Taylor & Francis Group.
- Cuervo Aponte, C., & Hernandez Espinoza, M. (2018). *Diseño y modelación de un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal para tratamiento de aguas residuales en la vereda Mancilla del municipio de Facatativa, Cundinamarca*. Facatativa: Universidad de Cundinamarca.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de Aguas residuales por medio de Humedales Artificiales*. Cochabamba: No Especifica.
- Díaz Acero, C. A. (2014). *Tratamiento de agua residual a través de humedales*. Tunja.
- DISEPROSA. (S.F.). *Plantas de Tratamiento de Aguas. Diseños y proyectos reunidos*.
- E. de Miguel, J. d., E., d., J., d., & M. D. Curt. (S.F.). *Humedales Artificiales para Depuración*. In *Manual de Fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación*. (pp. Cap. 6. 79-89). N.E.: EDITAN.
- EPA, E. (1993). *Guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujos subsuperficiales*. Region 6, E.E.U.U.: N.E.
- EPA, U. (2000). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial*. Washington, D. C.
- Espinosa Ortiz, C. (2014). *Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30000 habitantes*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

- Estrada Gallego, I. (2010). *Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales*. Pereira: N.E.
- Fernandez Gonzalvo, M. (2017). *Desarrollo de un modelo matemático para el diseño y la gestión de humedales artificiales subsuperficiales*. Valencia, España: Universidad politécnica de valencia.
- García Botero, T. (2005). *Diseño, construcción y evaluación preliminar de un humedal de flujo subsuperficial*. Bogotá: N.E.
- García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). *Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*. Catalunya, España.: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Gómez Ramirez, L., & García Echavarría, J. (2018). *Construcción de un humedal artificial a nivel de laboratorio vivo, en el predio "Mi Ranchito", en la vereda Olarte, localidad Usme-Bogotá*. Bogotá, D.C.: Universidad Católica de Colombia.
- Granados Gomez, M. (2018). *Estudio de factibilidad de la implementación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en ecosistemas de alta montaña en Toquilla*. Aquitania, Boyacá: Universidad Libre.
- IMTA, I. (2012, Nov). *Agua.org.mx*. Retrieved from https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/07/Ecotecnia-humedales_MAC_IMTA.pdf
- Kadlec, R., & Wallace, S. (2009). *Treatment wetlands. Second edition*. Boca Ratón.: CRC Press.
- Kadlec, R., Knight, R., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., & Habert, R. (2000). *Constructed Wetlands For Pollution Control: Processes, Performance, Design and operation*. Reino Unido: IWA Publishing in its scientific and technical report series.

- Lahora, A. (S.F.). *Depuracion de Aguas residuales mediante Humedales Artificiales*. Almería: No especifica.
- Lara Borrero, J. (1999). *Depuracion de Aguas Residuales Artificiales con Humedales Artificiales*. Barcelona, España.: N.E.:
- Lara Borrero, J., & Vera Puerto, I. (2004). *Implantacion y evolucion de un humedal artificial de lfujo subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia*. Cogua: N.E.
- Lizarazo Becerra, J., & Orjuela Gutierrez, M. (2013). *Sistemas de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en Colombia*. Bogotá: N.E.
- Lopez Linares, E., & Rodriguez Alvarez, M. (2016). *Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial como tratamiento de agua residual doméstica en la vereda bajos de Yerbabuena en el municipio de Chía, Cundinamarca*. Bogotá: N.E.
- Luna Pabello, V., & Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutrofication del lagop del bosque de San Juan de Aragón. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biologicas*, 40.
- Marín Montoya, J., & Correa Ramírez, J. (2010). *Evaluación de la remoción de contaminantes de aguas residuales en humedales artificiales utilizando la guadua angustifolia Kunth*. Pereira: N.E.
- Marketing Perú. (2018, Noviembre 29). *Quimtia Medio Ambiente*. Retrieved from <http://www.quimtiamedioambiente.com/blog/importancia-tratamiento-aguas-residuales/>
- Medina, V., & Bayona Santiago, D. (2012). *Implementacion de una planta de tratamiento para el manejo de aguas residuales en el municipio de San Martín, César*. Ocaña: Universidad Francisco de Paula Santander-Ocaña.

- Mendoza Ortega, A., & Ramoz Escorza, C. (Oct, 2012). *Diseño y construcción a escala piloto de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales porcícolas. Apaxtla de Castrejón, Guerrero . Iztapalapa, México.: N.E.*
- Mermo Laguna , F. (2008, Julio). *Francis*. Retrieved from <http://www.redjaen.es/francis/?m=c&o=2699&letra=&ord=&id=2702>
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2015). *Resolución 0631* . Bogotá: N.E.
- Morales Rodriguez, K. (2018). *DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN VILLAVICENCIO*. Bogotá: N.E.
- Noguera, K., & Olivero, J. (2010). Los rellenos sanitarios en latinoamerica: caso Colombiano. *La revista de la academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales. Vol XXXIV*, 132.
- Núñez Burga, R. (2016). *Tratamiento de aguas residuales domésticas a nivel familiar, con Humedales Artificiales de*. Lima: N.E.
- Osnaya, M. (2012). *Propuesta de diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de la Sierra Juarez*. México: Universidad de Sierra Juarez.
- Otalora Rodriguez, A. (2011). *Evaluacion del sistema de tratamiento de aguas residuales domesticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la localizacion petrolera de Caño Gandúl*. Bogotá: N.E.
- Pidre Bocado, J. (2010). *Influencia del tipo de granulometria del sustrato en la depuracion de las aguas residuales por el sistema de humedales artificiales de flujo vertical y horizontal*. Cadiz, España: N.E.

- Quintero, A. (2015, Enero 26). *BoCES*. Retrieved from Boletín de Ciencia, Educación y Sociedad: <https://boletinboces.wordpress.com/2015/01/26/investigan-el-uso-de-typha-domingensis-que-disminuye-contaminacion-en-canales-agricolas/>
- Quispe Baldeón, L., Arias Chavez, J., Martínez Suarez, C., & Cruz Huaranga, M. (2017). Eficiencia de la especie macrófita *Eichhornia Crassipes* (Jacinto de agua) para la remoción de parámetros físico-químicos, metal pesado (Pb) y la evaluación de su crecimiento en función del tiempo y adopción al medio en una laguna experimental. *Ciencia, Tecnología y desarrollo*.
- R. S, R. (N.E.). *Tratamiento de aguas residuales*. Quebec, Canadá: Reverté, S.A.
- Rabat Blázquez, J. (2016). *Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración*. España: N.E.
- RAS. (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico*. Bogotá: N.E.
- Reynolds, K., MSPH, & Ph. D. (2002). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica (identificación del problema). *De La Llave*, 1.
- Rivas Hernandez, H., & Paredes Cuervo, D. (2014). *Sistema de Humedales para el Manejo, Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua*. Morelia-Michoacan, México.: N.E.
- Rodríguez, J. (S.F). *TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES*. Cali.
- Rojas, R. (2002). *Conferencia Sistemas de tratamiento de aguas residuales*. N.E.: N.E.
- Romero Aguilar, M., Colín Cruz, A., Sanchez Salinas, E., & Ortiz Hernandez, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 158-167.

- Romero Rojas, J. (1999). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Rühmland , S. (2015). *Technische Feuchtgebiete zur Nachreinigung von Abwasser*. Berlín, Alemania.: N.E.
- Sanchez Gil, L., & Vélez, Y. (2016). *DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PILOTO PARA LA DESCONTAMINACION DE AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN LA UFPSO, EMPLEANDO LAS ESPECIES COSTUS SPICATUS Y HELICONIA PSITTACORUM*. Ocaña, Ufpsy: N.E.
- Sanz Mena, J. (2008). *Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos*. España: Alquimia Soluciones Ambientales.
- Silva R., A., & Zamora Z. , H. (2005). *Humedales Artificiales*. Manizales: N.E.
- Soledad Rodriguez, B. (S.F.). *Aplicación en Venezuela del tratamiento de las Aguas residuales y su Reutilización*. Venezuela.: N.E.
- Stantec Consulting Ltd R&TT, & Alfred College (University of Guelph). (Nov 1999). *GUIDANCE MANUAL FOR THE DESIGN, CONSTRUCTION AND OPERATIONS OF CONSTRUCTED WETLANDS FOR RURAL APPLICATIONS IN ONTARIO*. Ontario, California. U.S.: N.E.
- Torres Harker, M. (2016). *Humedales construidos: una alternativa para recuperar funciones ecológicas de los humedales naturales de Bogotá D.C*. Bogotá: Universidad de ciencias aplicadas y ambientales U.D.C.A.
- Torres, E., & Marín Sanabria, A. (2012). *OPTIMIZACIÓN DEL HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. INGENIO Libre*.

- Tresserras Herrera, A. (Dic 2015). *Proyecto de ampliación del tratamiento secundario mediante humedales artificiales de macrófitas en flotación en la EDAR Novelda-Monforte del Cid*. Alicante, España: N.E.
- Vera Puerto, I., & Lara Borrero, J. (2004). *Implantación y evolución de un humedal artificial de flujo subsuperficial en Cogua, Cundinamarca; colombia*. Cogua: N.E.
- Vymazal, J. (2008). *Constructed wetland for wastewater treatment: a review*. India: The 12th World lake conference.
- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., & Haberl, R. (1998). *COntstructed wetland for wastewater treatment in Europe*. The Netherlands: Backhuys.
- Yang, L., Chang, H.-T., & Lo Huang, M.-N. (2001). nutrient removal in gravel-and soil based wetland microcosms with and without vegetation. *Ecological Engineering* (pp. 19,91-105). Elsevier.
- Zamora Z, H., & Silva R, Á. (2005). *Humedales Artificiales*. Manizales: N.E.

Apéndices

Apéndice A. Artículo 8 de la Resolución 0631

PARÁMETRO	UNIDADES	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD) DE LAS SOLUCIONES INDIVIDUALES DE SANEAMIENTO DE VIVIENDAS UNIFAMILIARES O BIFAMILIARES	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD), Y DE LAS AGUAS RESIDUALES (ARD – ARnD) DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PÚBLICO DE ALCANTARILLADO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES, CON UNA CARGA MENOR O IGUAL A 625,00 kg/DÍA DBO5
Generales			
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O2	200,00	180,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L O2		90,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	100,00	90,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,00	5,00
Grasas y Aceites	mg/L	20,00	20,00
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L		Análisis y Reporte
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L		Análisis y Reporte
Compuestos de Fósforo			
Ortofosfatos (P-PO43-)	mg/L		Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L		Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno			
Nitratos (N-NO3-)	mg/L		Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO2-)	mg/L		Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH3)	mg/L		Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L		Análisis y Reporte

Parámetro	Unidades	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD), Y AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS - ARnD DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PÚBLICO DE ALCANTARILLADO, CON UNA CARGA MAYOR A 625,00 kg/día Y MENOR O IGUAL A 3.000,00 kg/día DBO5	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD), Y AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS - ARnD DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PÚBLICO DE ALCANTARILLADO, CON UNA CARGA MAYOR A 3.000,00 kg/día DBO5
Generales			
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O2	180,00	150,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L O2	90,00	70,00
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/L	90,00	70,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,00	5,00
Grasas y Aceites	mg/L	20,00	10,00
Compuestos Semivolátiles Fenólicos	mg/L		Análisis y Reporte
Fenoles Totales	mg/L		Análisis y Reporte
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L		Análisis y Reporte
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L		Análisis y Reporte
Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX)	mg/L		Análisis y Reporte

Compuestos de Fósforo

Ortofosfatos (P-PO43-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Compuestos de Nitrógeno

Nitratos (N-NO3-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO2-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH3)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Iones

Cianuro Total (CN-)	mg/L	0,50	0,50
Cloruros (Cl-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Sulfatos (SO42-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Sulfuros (S2-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Metales y Metaloides

Aluminio (Al)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Cadmio (Cd)	mg/L	0,10	0,10
Cinc (Zn)	mg/L	3,00	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50	0,50
Hierro (Fe)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Mercurio (Hg)	mg/L	0,02	0,02
Níquel (Ni)	mg/L	0,50	0,50
Plata (Ag)	mg/L		Análisis y Reporte
Plomo (Pb)	mg/L	0,50	0,50

Otros parámetros para análisis y reporte

Acidez Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálctica	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m-1	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Apéndice B. Artículo 9 de la Resolución 0631.

PARÁMETRO	UNIDADES	PROCESAMIENTO DE HORTALIZAS, FRUTAS, LEGUMBRES, RAÍCES Y TUBÉRCULOS	BENEFICIO DE CAFÉ (CLASIFICACIÓN DE LA FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS – FNC/ CENICAFÉ).	
			PROCESO O ECOLÓGICO	PROCESO TRADICIONAL
Generales				
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	5,00 a 9,00	5,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	150,00	3.000,00	650,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	50,00	400,00	
Sólidos Suspending Totales (SST)	mg/L	100,00	800,00	400,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,00	10,00	10,00
Grasas y Aceites	mg/L	10,00	30,00	10,00
Compuestos de Fósforo				
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno				
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Otros parámetros para análisis y reporte				
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm).	m-1	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

PARÁMETRO	UNIDADES	PROCESOS POSCOSECHA DE PLÁTANO Y BANANO	PRODUCCIÓN DE AZÚCAR Y DERIVADOS A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR	EXTRACCIÓN DE ACEITES DE ORIGEN VEGETAL
Generales				
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	200,00	900,00	1.500,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	50,00	500,00	600,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	100,00	200,00	400,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,00	2,00	2,00
Grasas y Aceites	mg/L	10,00	20,00	20,00
Compuestos Semivolátiles Fenólicos	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Hidrocarburos				
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10,00	10,00	
Compuestos de Fósforo				
Ortofosfatos (P-PO ₄₃₋)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	

PARÁMETRO	UNIDADES	PROCESOS POSCOSECHA DE PLÁTANO Y BANANO	PRODUCCIÓN DE AZÚCAR Y DERIVADOS A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR	EXTRACCIÓN DE ACEITES DE ORIGEN VEGETAL
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno				
Nitratos (N-NO ₃ -)	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ -)	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Iones				
Cloruros (Cl-)	mg/L	600,00	500,00	
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	500,00	500,00	
Metales y Metaloides				
Arsénico (As)	mg/L	0,50	0,50	
Cadmio (Cd)	mg/L	0,05	0,05	
Cinc (Zn)	mg/L			
Cobre (Cu)	mg/L			
Cromo (Cr)	mg/L			
Mercurio (Hg)	mg/L			
Níquel (Ni)	mg/L	0,50	0,50	
Plomo (Pb)	mg/L	0,20	0,20	
Otros parámetros para análisis y reporte				
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálctica	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm).	m-1	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Apéndice C. Artículo 9 de la Resolución 0631

PARÁMETRO	UNIDADES	GANADERÍA DE BOVINO, BUFALINO, EQUINO, OVINO Y/O CAPRINO	GANADERÍA DE BOVINO, BUFALINO, EQUINO, OVINO Y/O CAPRINO	GANADERÍA DE PORCINOS	GANADERÍA DE PORCINOS
		BENEFICIO	BENEFICIO	CRÍA	BENEFICIO
Generales					
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O2	500,00	900,00	900,00	800,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L O2	250,00	450,00	450,00	450,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	150,00	200,00	400,00	200,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,00	5,00	5,00	5,00
Grasas y Aceites	mg/L	20,00	50,00	20,00	30,00
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos de Fósforo					
Ortofosfatos (P-PO43-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

PARÁMETRO	UNIDADES	GANADERÍA DE BOVINO, BUFALINO, EQUINO, OVINO Y/O CAPRINO	GANADERÍA DE BOVINO, BUFALINO, EQUINO, OVINO Y/O CAPRINO	GANADERÍA DE PORCINOS	GANADERÍA DE PORCINOS
Compuestos de Nitrógeno					
Nitratos (N-NO ₃ -)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ -)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal(N-NH ₃)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Iones					
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	500,00	500,00		
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	500,00	500,00		
Otros parámetros para análisis y reporte					
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálctica	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

PARÁMETRO	UNIDADES	GANADERÍA DE BOVINOS Y PORCINOS BENEFICIO DUAL (BOVINOS Y PORCINOS)	GANADERÍA DE AVES DE CORRAL INCUBACIÓN Y CRÍA	GANADERÍA DE AVES DE CORRAL BENEFICIO
Generales				
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	800,00	400,00	650,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	450,00	200,00	300,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	225,00	200,00	100,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,00	5,00	2,00
Grasas y Aceites	mg/L	30,00	20,00	40,00
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos de Fósforo				
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno				
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Iones				
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	600,00	250,00	250,00
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	500,00	250,00	250,00
PARÁMETRO	UNIDADES	GANADERÍA DE BOVINOS Y PORCINOS BENEFICIO DUAL (BOVINOS Y PORCINOS)	GANADERÍA DE AVES DE CORRAL INCUBACIÓN Y CRÍA	GANADERÍA DE AVES DE CORRAL BENEFICIO
Otros Parámetros para Análisis y Reporte				
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálcica	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m-1	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Apéndice D. Artículo 10 de la Resolución 0631.

PARÁMETRO	UNIDADES	EXTRACCIÓN DE CARBÓN DE PIEDRA Y LIGNITO	EXTRACCIÓN DE MINERALES DE HIERRO	EXTRACCIÓN DE ORO Y OTROS METALES PRECIOSOS
Iones				
Cianuro Total (CN-)	mg/L	1,00	1,00	1,00
Cloruros (Cl-)	mg/L	500,00	250,00	250,00
Sulfatos (SO42-)	mg/L	1.200,00	250,00	1.200,00
Sulfuros (S2-)	mg/L	1,00	1,00	1,00
Metales y Metaloides				
Arsénico (As)	mg/L	0,10	0,10	0,10
Cadmio (Cd)	mg/L	0,05	0,05	0,05
Cinc (Zn)	mg/L	3,00	3,00	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00	1,00	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50	0,50	0,50
Hierro (Fe)	mg/L	2,00	2,00	2,00
Mercurio (Hg)	mg/L	0,002	0,002	0,002
Níquel (Ni)	mg/L	0,50	0,50	0,50
Plata (Ag)	mg/L	0,50		
Plomo (Pb)	mg/L	0,20	0,20	0,20
Otros Parámetros para Análisis y Reporte				
Acidez Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálcica	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m-1	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

PARÁMETRO	UNIDADES	EXTRACCIÓN DE MINERALES DE NÍQUEL Y OTROS MINERALES METALÍFEROS NO FERROSOS	EXTRACCIÓN DE MINERALES DE OTRAS MINAS Y CANTERAS
Generales			
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	150,00	150,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	50,00	50,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50,00	50,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	10,00	2,00
Grasas y Aceites	mg/L	10,00	10,00
Fenoles	mg/L	0,20	0,20
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10,00	10,00
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L		Análisis y Reporte
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L		Análisis y Reporte
Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX)			
Compuestos de Fósforo			
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno			
	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Iones			
Cianuro Total (CN ⁻)	mg/L	1,00	1,00
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	250,00	
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	250,00 o 1.000,00 cuando realice el beneficio a través de procesos de hidrometalurgia	400,00
Sulfuros (S ₂ ⁻)	mg/L	1,00	

PARÁMETRO	UNIDADES	EXTRACCIÓN DE MINERALES DE NÍQUEL Y OTROS MINERALES METALÍFEROS NO FERROSOS	EXTRACCIÓN DE MINERALES DE OTRAS MINAS Y CANTERAS
Generales			
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	150,00	150,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	50,00	50,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50,00	50,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	10,00	2,00
Grasas y Aceites	mg/L	10,00	10,00
Fenoles	mg/L	0,20	0,20
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10,00	10,00
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L		Análisis y Reporte
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L		Análisis y Reporte
Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX)			
Compuestos de Fósforo			
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno			
	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Iones			
Cianuro Total (CN ⁻)	mg/L	1,00	1,00
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	250,00	
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	250,00 o 1.000,00 cuando realice el beneficio a través de procesos de hidrometalurgia	400,00
Sulfuros (S ₂ ⁻)	mg/L	1,00	

Metales y Metaloides

Aluminio (Al)	mg/L	Análisis y Reporte	
Arsénico (As)	mg/L	0,10	0,10
Cadmio (Cd)	mg/L	0,05	0,05
Cinc (Zn)	mg/L	3,00	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50	0,50
Hierro (Fe)	mg/L	5,00	2,00
Manganeso (Mn)	mg/L	Análisis y Reporte	
Mercurio (Hg)	mg/L	0,002	0,002
Molibdeno (Mo)	mg/L	Análisis y Reporte	
Níquel (Ni)	mg/L	0,50	0,50
Plata (Ag)	mg/L	0,50	
Plomo (Pb)	mg/L	0,20	0,20

Otros Parámetros para Análisis y Reporte

Acidez Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálrica	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m-1	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Apéndice E. Artículo 11 de la Resolución 0631.

PARÁMETRO	UNIDADES	EXPLORACIÓN (UPSTREAM)	PRODUCCIÓN (UPSTREAM)	REFINO	VENTA Y DISTRIBUCIÓN (DOWNSTREAM)	TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO (MIDSTREAM)
Generales						
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O2	400,00	180,00	400,00	180,00	180,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L O2	200,00	60,00	200,00	60,00	60,00
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/L	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Grasas y Aceites	mg/L	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Fenoles	mg/L	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

PARÁMETRO	UNIDADES	EXPLORACIÓN (UPSTREAM)	PRODUCCIÓN (UPSTREAM)	REFINO	VENTA Y DISTRIBUCIÓN (DOWNSTREAM)	TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO (MIDSTREAM)
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Hidrocarburos						
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	
Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Compuestos de Fósforo						
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Ortofosfatos (P-PO43-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Compuestos de Nitrógeno						
Nitratos (N-NO3-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Nitrógeno Amoniacal (N-NH3)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Nitrógeno Total (N)	mg/L	10,00	10,00	10,00 o 40,00 si en el proceso de refino se incluyen actividades de hidrogenación	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Iones

Cianuro Total (CN-)	mg/L	1,00	1,00	1,00		
Cloruros (Cl-)	mg/L	1.200,00	1.200,00	500,00	250,00	250,00
Fluoruros (F-)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Sulfatos (SO42-)	mg/L	300,00	300,00	500,00	250,00	250,00
Sulfuros (S2-)	mg/L	1,00	1,00	1,00		

Metales y Metaloides

Arsénico (As)	mg/L	0,10	0,10	0,10		
Bario (Ba)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Cadmio (Cd)	mg/L	0,10	0,10	0,10		
Cinc (Zn)	mg/L	3,00	3,00	3,00		
Cobre (Cu)	mg/L	1,00	1,00	1,00		
Cromo (Cr)	mg/L	0,50	0,50	0,50		
Hierro (Fe)	mg/L	3,00	3,00	3,00		
Mercurio (Hg)	mg/L	0,01	0,01	0,01		
Níquel (Ni)	mg/L	0,50	0,50	0,50		
Plata (Ag)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Plomo (Pb)	mg/L	0,20	0,20	0,10		
Selenio (Se)	mg/L	0,20	0,20	0,20		
Vanadio (V)	mg/L	1,00	1,00	1,00		

PARÁMETRO	UNIDADES	EXPLORACIÓN (UPSTREAM)	PRODUCCIÓN (UPSTREAM)	REFINO	VENTA Y DISTRIBUCIÓN (DOWNSTREAM)	TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO (MIDSTREAM)
Otros Parámetros para Análisis y Reporte						
Acidez Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálctica	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO3	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m-1	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte