

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA
INDUSTRIA TEXTIL POR MEDIO DE HUMEDALES ARTIFICIALES**

DANIEL FERNANDO ROMERO RONDEROS

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE ESPECIALISTA
EN GESTIÓN AMBIENTAL**

DOCENTE

**ORIENTADOR ANGIE TATIANA ORTEGA RAMÍREZ
MSC GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA COMPETITIVIDAD**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C**

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Director de la Especialización

Firma del calificador

Bogotá D.C., Noviembre de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad

Dr. Julio César Fuentes Arismendi

Director de Programa Especialización en Gestión Ambiental

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág
RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
2.ANTECEDENTES	10
3.JUSTIFICACIÓN	12
4.OBJETIVOS	13
4.1.OBJETIVO GENERAL	13
4.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
5.MARCO REFERENCIAL	14
5.1.MARCO TEÓRICO	15
5.2.MARCO CONCEPTUAL	20
5.3.MARCO NORMATIVO	21
6.METODOLOGÍA	22
7.RESULTADOS	24
7.1.Objetivo 1. Describir los principales parámetros de los vertimientos con base en estudios de caso	24
7.1.1 <i>Materias primas y fibras</i>	26
7.1.2 <i>Hilados y tejidos</i>	26
7.1.3 <i>Acabados</i>	28
7.2.Objetivo 2: Identificar las características de los diferentes humedales artificiales según los vertimientos identificados	36
7.2.1 <i>Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes</i>	36
7.2.2 <i>Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas</i>	36
7.2.3 <i>Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas flotantes</i>	37
7.2.4 <i>Flujo libre (FL)</i>	38
7.2.5 <i>Humedales artificiales de flujo subsuperficial</i>	39
7.3.Objetivo 3: Establecer las especificaciones de un humedal artificial para su potencial uso como sistema de tratamiento de aguas residuales de la industria textil.	45
8.CONCLUSIONES	54

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Marco referencial	15
Figura 2. Componentes de un humedal artificial	16
Figura 3. Partes de un humedal artificial	17
Figura 4. Mecanismos de remoción de contaminantes	18
Figura 5. Transferencia de oxígeno desde las raíces	20
Figura 6. Cadena de valor de la industria textil	26
Figura 7. Proceso general de la fabricación de un producto textil	27
Figura 8. Clasificación de humedales según tipo de macrófitas	38
Figura 9. Humedales según especie de macrófitas dominantes	39
Figura 10. Tipos de humedales artificiales según la circulación del agua	40
Figura 11. Humedal de flujo libre	41
Figura 12. Humedal con flujo subsuperficial horizontal	43
Figura 13. Componentes de un humedal con flujo subsuperficial horizontal	44
Figura 14. Humedal con flujo subsuperficial vertical	45
Figura 15. Componentes de un humedal con flujo subsuperficial vertical	46
Figura 16. Etapas del tratamiento físico químico	47
Figura 17. Adición de agua industrial a humedales experimentales	48
Figura 18. Esquema de tratamiento propuesto en el caso de estudio	49
Figura 19. Conformación de humedales artificiales combinados o híbridos	50
Figura 20. Humedal artificial híbrido horizontal- vertical	51
Figura 21. Humedal artificial una solución sostenible	54

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales artificiales	18
Tabla 2. Normatividad	23
Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos de vertimientos textiles	24
Tabla 4. Modelo de matriz técnica de análisis de remoción de contaminantes	25
Tabla 5. Procesos aportantes de carga húmeda en textiles	28
Tabla 6. Relación consumo de agua vs actividad textil	29
Tabla 7. Parámetros de los vertimientos textiles	31
Tabla 8. Identificación de parámetros que no cumplen la Resolución 0631 de 2015	34
Tabla 9. Porcentaje de degradación del fenol por medio de humedales artificiales	50
Tabla 10. Combinaciones de sistemas híbridos con relación a los diferentes tipos de afluentes usados	52
Tabla 11. Matriz de remoción de contaminantes aplicada	53

RESUMEN

En el presente proyecto, se conocieron las características de las aguas residuales provenientes de la industria textil a la que se les aplicó un porcentaje de remoción del 90% correspondiente al tratamiento fisicoquímico con el fin de determinar que parámetros seguían por encima de lo que indica la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos en cuerpos de agua.

Por otra parte, se especificaron los tipos de humedales artificiales según la siguiente clasificación: Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergente, Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas, Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas flotantes, humedales de Flujo libre (FL) y humedales artificiales de flujo subsuperficial que a su vez se subdividen en flujo horizontal y vertical.

Los humedales anteriormente mencionados presentaron una serie de porcentajes de remoción para los diferentes parámetros del agua residual, aportando a la proximidad del límite permitido en relación con vertimientos en cuerpos de agua. Los humedales que presentaron mejor eficiencia y posible combinación como un sistema híbrido fueron los humedales de flujo libre y humedales de flujo horizontal subsuperficial.

Una vez aplicados los porcentajes de remoción de los sistemas de humedales propuestos, se concluyó que este método de tratamiento resulta eficiente y un adecuado complemento a los tratamientos primarios y/o convencionales, ya que contribuye en la disminución de contaminantes y permiten que los parámetros fisicoquímicos que no alcanzan a tener valores menores a los estipulados en la normatividad sean reducidos hasta cumplir con dicho requisito legal, por lo cual se puede considerar esta alternativa como una solución sostenible en el tratamiento de aguas residuales industriales, específicamente del sector textil, con el fin de reducir el impacto socioambiental de los cuerpos de agua.

Palabras clave: Humedal artificial, industria textil, tratamiento, remoción.

INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación, se identificó una de las problemáticas con mayor auge a través del tiempo la cual es la contaminación del agua o en este caso, el escaso tratamiento de las aguas residuales industriales que llegan a verterse de manera directa en los cuerpos de agua afectando el ecosistema y las comunidades riverseñas a estos.

En Colombia, el recurso hídrico es abundante, teniendo presente que este cuenta con dos océanos, tres cordilleras donde se alojan el 50% de los páramos del mundo y más de 700 mil cuerpos de agua entre ríos, quebradas, canales, humedales y lagunas, obteniendo un sexto lugar con mayor capacidad hídrica en el mundo. (lanotapositiva, 2020), sin embargo, no cuenta con la mejor tecnología para el tratamiento de aguas residuales industriales, lo cual atenta directamente en contra de la calidad del agua presente, afectando la fauna y flora, además de limitar todos los servicios ecosistémicos, sociales y económicos a lo largo del cauce donde son vertidas.

La industria textil genera aguas residuales con alto contenido contaminante, presentando sólidos, aceites minerales y compuestos orgánicos, surgiendo de allí la necesidad de considerar una etapa posterior que complemente los procesos de tratamiento de agua residual desarrollados convencionalmente como las fases fisicoquímicas y biológicas, además de técnicas como evaporadores al vacío, filtración y ósmosis inversa. (Condorchem Envitech, 2019)

Es aquí donde surge la idea principal del presente estudio, la cual se dirige a buscar nuevas alternativas de tratamiento de aguas residuales industriales específicamente del sector textil o sistemas complementarios de los tratamientos convencionales mencionados anteriormente como los humedales artificiales por sus características depuradoras. (Agua Simple, 2015). Según Moksa, este tipo de sistemas sirven para tratar en general aguas grises o como fase complementaria en el tratamiento de agua residual de tipo industrial. Para lo anterior se recomienda que estos vertidos tengan un tratamiento previo para facilitar el funcionamiento y hacer más eficiente el biofiltro (Moksa, 2020)

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria textil es uno de los sectores que más gasto de agua presenta, ya que consumen alrededor del 15% del total del agua empleada para labores industriales a nivel global, debido a que una gran parte de los procesos es realizada en fase húmeda, es decir, en: limpieza de materias primas y productos, llenado, carbonizado, desmenuzado, blanqueado, mercerizado y teñido. En general, los efluentes de origen textil provienen principalmente en un 15% del desengomado, un 20% del descruce y mercerizado, en un 65% del blanqueo, teñido y lavado (Unigarro, Zambrano, & Gallo, 2015).

Es importante tener presente que, todas las operaciones que son desarrolladas en la industria textil traen consecuencias, ya que produce una gran cantidad de agua residual con elevadas concentraciones de: almidón, dextrina, goma, glucosa, cera, pectinas, ácidos grasos, ácido acético, jabones, detergentes, hidróxido de sodio, carbonatos, sulfuros, cloruros, colorantes y pigmentos, peróxidos, entre otros (Unigarro, Zambrano, & Gallo, 2015).

Además, esta industria es considerada como uno de los principales aportantes de contaminantes a cuerpos de agua y desechos debido a que el proceso de fabricación incluye diversas etapas que provocan una seria contaminación al medio ambiente. Los principales puntos de contaminación están centrados en el manejo de materiales peligrosos, emisiones al aire, consumo de energía y generación de grandes cantidades de aguas residuales altamente coloreadas y constituidas por compuestos difíciles de biodegradar. (Agua Simple, 2015)

Por lo tanto, las características que tienen las aguas residuales dependerán de las operaciones específicas que se realicen, es decir por medio de la fibra tratada y de la máquina utilizada. De hecho, se estima que hay más de 100.000 colorantes comercialmente disponibles, muchos de ellos son tóxicos para la vida acuática, mutagénicos a los seres humanos y recalcitrantes a la biodegradación, por lo que se hace indispensable tratarlos (Unigarro, Zambrano, & Gallo, 2015).

Sin embargo, los efluentes generados en la industria textil son muy variables, típicamente caliente, alcalino y coloreado. Los principales contaminantes presentes son sólidos, aceites minerales y

compuestos orgánicos, surgiendo de allí la necesidad de considerar una etapa posterior que complemente los procesos fisicoquímicos y biológicos desarrollados convencionalmente como los humedales artificiales teniendo en cuenta sus características depuradoras. (Agua Simple, 2015)

2. ANTECEDENTES

Actualmente, en Colombia la industria textil requiere gran cantidad de agua para sus procesos productivos, es decir que, de 100 a 200 L de agua son necesarios para producir un kilogramo de productos textiles (Gilpavas, Arbelaez, & Medina, 2017). Además, el agua residual resultante es altamente contaminada debido a la presencia de colorantes, surfactantes, sales inorgánicas y distintos compuestos químicos en el proceso productivo.

A pesar de que existen plantas de tratamiento de aguas residuales, estas no cumplen con sus objetivos por obsolescencia y/o mayor carga debido a la actividad industrial, es decir que al construir nuevas plantas de depuración o al conectarse a plantas lejanas ya existentes implica un elevado costo. Por ende, conectar antiguas plantas o aquellas que ejecuten los tratamientos primarios y secundarios con humedales artificiales puede ser una alternativa económica y ecológicamente aceptable, ya que este tipo de sistemas son de fácil construcción, bajo costo, mantenimiento reducido y con una depuración confiable, incluso cuando hay altas variaciones en el caudal. (Remtavares, 2013)

La primera vez que se utilizó la palabra humedal artificial fue en la Convención sobre los Humedales Ramsar, Irán en 1971, a partir de esta fecha se han desarrollado estudios sobre este tema en diferentes países como Estados Unidos, Europa y Sudamérica, también se han construido humedales artificiales donde los resultados han sido satisfactorios (Suárez, Agudelo, Rincón, & Millán, 2014).

Desde 1976 se reportaron en Sudáfrica, Estados Unidos y Gran Bretaña experiencias en sistemas con áreas inundadas, como pantanos y manglares naturales y a partir de 1986, se empiezan a introducir los sistemas de humedales construidos o artificiales. (Suárez, Agudelo, Rincón, & Millán, 2014).

En los años 90 se notó un incremento en la utilización de humedales artificiales no solamente para tratar agua residual municipal, sino también para tratamiento de agua lluvia y aguas residuales provenientes de actividades industriales y agrícolas (Suárez, Agudelo, Rincón, & Millán, 2014).

Durante los años 70 y 80 la principal utilización de los humedales artificiales fue como estaciones de depuración de aguas residuales urbanas. Aunque, a partir de la década de los 90 los humedales artificiales se han utilizado con éxito en el tratamiento de distintas aguas residuales industriales. (Remtavares, 2013)

Es importante tener presente que los humedales artificiales desempeñan un papel importante en la descentralización de sistemas de tratamiento de aguas residuales, debido a sus características como sistemas “naturales” de fácil aplicación. Así mismo, el uso de esta tecnología es cada vez más aceptado en diferentes partes del mundo por ser rentable y factible para este tipo de procesos (Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, 2011).

Además, esta tecnología comenzó a utilizarse en 1950 por la Doctora Seide y el Doctor Kickuth en el Instituto Max Plank de Alemania, donde se desarrolló un tratamiento conocido como “*Root Zone Method*”, que corresponde a un humedal de flujo subsuperficial relleno de arcilla. El primer estudio de un humedal artificial construido de flujo subsuperficial a escala real se realizó en 1974, en Wolverton, Mississippi. (Ramírez & Echavarría, 2018)

Por otro lado, en el año 2017, ANANTRAO (Pawar College of Engineering & Research) menciona en su investigación que aplicó un humedal artificial multicapa de flujo subsuperficial, con sustratos como roca, grava, polvo de carbón, ceniza de horno y suelo, y cubierto uniformemente con caña. Éste obtuvo como resultado con una tasa promedio de eliminación de DBO_5 , NH_3-N , NT y PT del humedal artificial multicapa es, 87.9%, 66.7%, 63.4 y 92.6% respectivamente. (Ramírez & Echavarría, 2018)

En Colombia también se han construido humedales artificiales de flujo subsuperficial, con el objetivo de realizar pruebas piloto para el tratamiento de aguas residuales con caudales y poblaciones de diseño pequeñas. (Ramírez & Echavarría, 2018) De acuerdo con lo anterior, a continuación, se muestran algunos de los casos de humedales artificiales construidos en Colombia:

En el año 2004, en Cagua Cundinamarca, la Universidad Javeriana construyó un humedal artificial piloto de flujo superficial. Este humedal mantuvo un caudal promedio de $1,34 m^3/s$, un afluente en

DBO₅ de 132 mg/L y un efluente de 44 mg/L. El reactor anaerobio UASB fue una celda de 2 m de ancho por 5,8 m de largo, con una profundidad efectiva de 0,6 m, es decir un área del humedal de 11,6 m², con un tiempo de retención hidráulica de 1,6 días y una carga hidráulica de 0,23 m/d. Con este sistema se obtuvieron remociones promedio de DBO₅ entre el 66 y 80%. (Ramírez & Echavarría, 2018)

De igual importancia, en el año 2009, en la Vereda la Bananera en Pereira se utilizaron humedales horizontales de flujo subsuperficial, como tratamiento complementario para el tratamiento de las aguas residuales domésticas. Para lo cual, se usaron cuatro humedales con un área de 90 m² cada uno, construidos a escala real para el tratamiento secundario del efluente de un tanque séptico. Los humedales estuvieron sometidos a un caudal medio de 0,27 L/s, para una carga hidráulica de 2542 m³/ha*d y un tiempo de retención hidráulica de 1,23 días. Finalmente se calculan promedios de remoción de 49,58 % para DBO. (Ramírez & Echavarría, 2018) También, en la ciudad de Bogotá, la Universidad Nacional realizó un prototipo de humedal artificial de configuración simple y eficiente denominado “HUMEDAR – I”. El sistema consiste en un reactor anaerobio de compartimientos paralelos a flujo pistón, seguido de un humedal artificial de alta tasa, conformado por macrófitas nativas y comunes, soportadas sobre un sustrato de material plástico reciclado. Gracias al humedal, se lograron niveles de remoción promedio de DBO₅ en un 45 %, para un tiempo de retención hidráulica de 2,77 días. (Ramírez & Echavarría, 2018)

3. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación tiene como fin reconocer alternativas para el postratamiento de aguas residuales la industria textil, mediante humedales artificiales como sistemas naturales de depuración, ya que se han evidenciado diferentes problemáticas ambientales actualmente en Colombia por la generación de este tipo de vertimientos y su carga contaminante, generando afectaciones a los diferentes cuerpos de agua como: páramos, lagunas, ríos, entre otros.

Además, se hace con el propósito de aportar al control y manejo, es decir, mejorar la calidad del agua y generar diversos hábitats similares a los humedales naturales, en los cuales pueda albergar una gran variedad de avifauna, insectos, anfibios, entre otros.

Por otro lado, este sistema permite un beneficio ecológico, debido que de forma controlada se producen mecanismos de eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales, esto por medio de esta tecnología verde, ya que busca replicar los beneficios ecosistémicos de los humedales naturales, para tratar diversos afluentes de aguas residuales. (Cortez, 2018) Este tipo de alternativas para el mejoramiento de la calidad del agua que desemboca en los cuerpos de agua es relevante por su rentabilidad además de ser una apuesta a este tipo de tratamientos actual, con no más de 30 años en el mercado.

El presente trabajo genera algunos beneficios no solo ecológicos ni económicos sino también sociales, contribuyendo a la calidad del agua para algunas poblaciones vulnerables y generación de empleo una vez este tipo de proyectos se pretendan desarrollar en campo.

Finalmente, el proyecto aporta a esta temática en cuanto a conceptos y metodología aplicada a uno de los sectores más contaminantes actualmente como es la industria textil. También genera aportes relevantes para el tema base de la investigación, el cual sea Nota: de consulta para futuros trabajos relacionados con tratamiento de aguas residuales industriales, especialmente con humedales artificiales. Es importante resaltar las diferentes dimensiones que abarcan el proyecto de investigación, como lo son:

Social: Brindar por medio de una alternativa de tratamiento no convencional mejor calidad de vida a las poblaciones aledañas a los cuerpos de agua que reciben este tipo de vertimientos.

Económico: Producir un ahorro mediante el desarrollo de un tratamiento no convencionales en el sector, obteniendo un valor agregado en cuanto a los niveles de competitividad y productividad del sector industrial por la disminución de su huella contaminante a los cuerpos de agua.

Ecológico: Implementar una alternativa amigable con el medio ambiente, como mecanismo de conservación de los abundantes recursos naturales que se ven afectados a diario por las aguas residuales que no reciben ningún tipo de tratamiento previo al vertimiento o una poco eficiente.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Análisis de la aplicabilidad del tratamiento de aguas residuales de la industria textil por medio de humedales artificiales.

4.2 Objetivos específicos

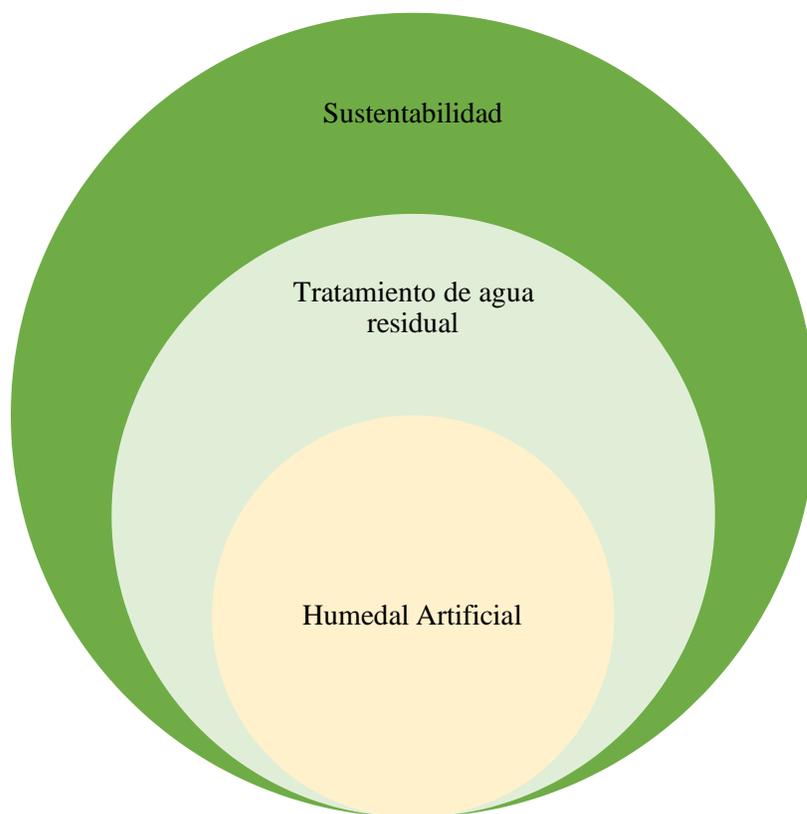
- Describir los principales parámetros de los vertimientos con base en estudios de caso.
- Identificar las características de los diferentes humedales artificiales según los vertimientos identificados.
- Establecer las especificaciones de un humedal artificial para su potencial uso como sistema de tratamiento de aguas residuales de la industria textil.

5. MARCO REFERENCIAL

Los marcos de referencia son de gran importancia para el desarrollo del ejercicio investigativo ya que son la base fundamental en cuanto a los conocimientos previos que se deben tener en cuenta, partiendo de investigaciones recientes relacionadas con la temática a trabajar, referentes teóricos y diferentes conceptos.

Figura 1.

Marco referencial



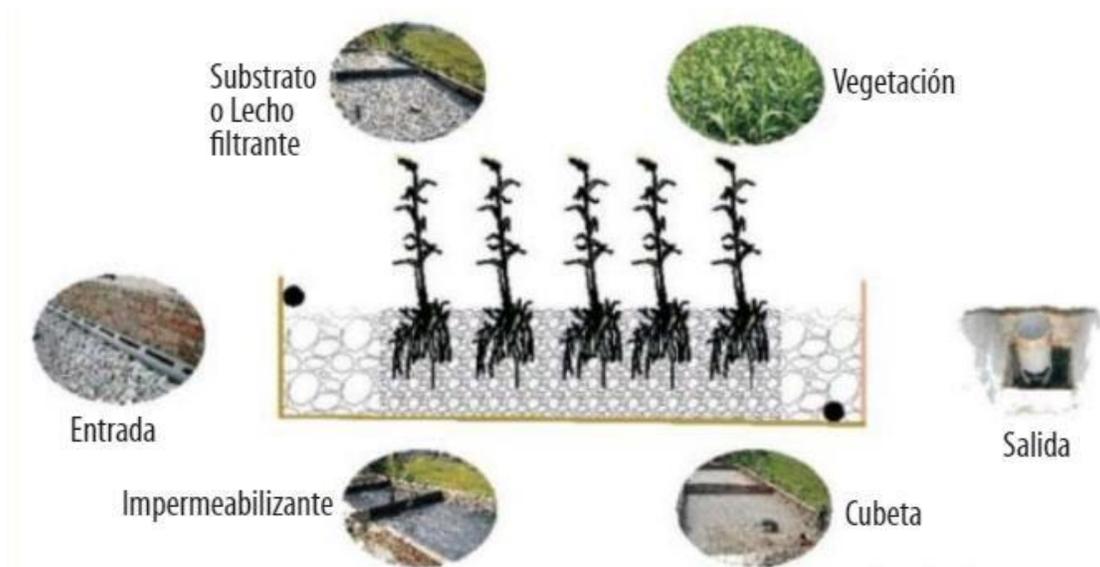
Nota. En la Figura 1 se presentan los tres grandes conceptos que abarca el proyecto de investigación, partiendo de la sostenibilidad o desarrollo sostenible tanto social, ecológico y económicamente, contribuyendo a este fin con una propuesta alterna de tratamiento de aguas residuales, como los humedales artificiales.

5.1 Marco teórico

Un humedal artificial consiste en una laguna impermeabilizada, con una profundidad inferior a un metro, que puede estar empacada con grava, a la que se conducen las aguas residuales tratadas y en la cual se siembran diferentes tipos de plantas con capacidad para crecer en condiciones de alta humedad y de eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos, aún presentes en las aguas residuales tratadas, ya sea provenientes de la vivienda o de un proceso agroindustrial, permitiendo realizarles un tratamiento posterior, con el fin de mejorar su calidad, antes de ser descargadas al suelo o a cuerpos de agua superficiales. (Valencia, 2020)

Figura 2.

Componentes de un humedal artificial



Nota. Componentes de humedal artificial como cubeta, sustrato o lecho filtrante, vegetación, membrana impermeabilizante y estructuras de entrada y salida. Tomado de: Valencia, N. R. (2020). Federación Nacional de cafeteros de Colombia. Humedales artificiales: Una alternativa para el postratamiento de aguas residuales agroindustriales. Componentes de un humedal artificial. Disponible: https://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/2_Humedales_artificiales_Conceptos_y_resultados_en_el%20sector_cafetero.pdf

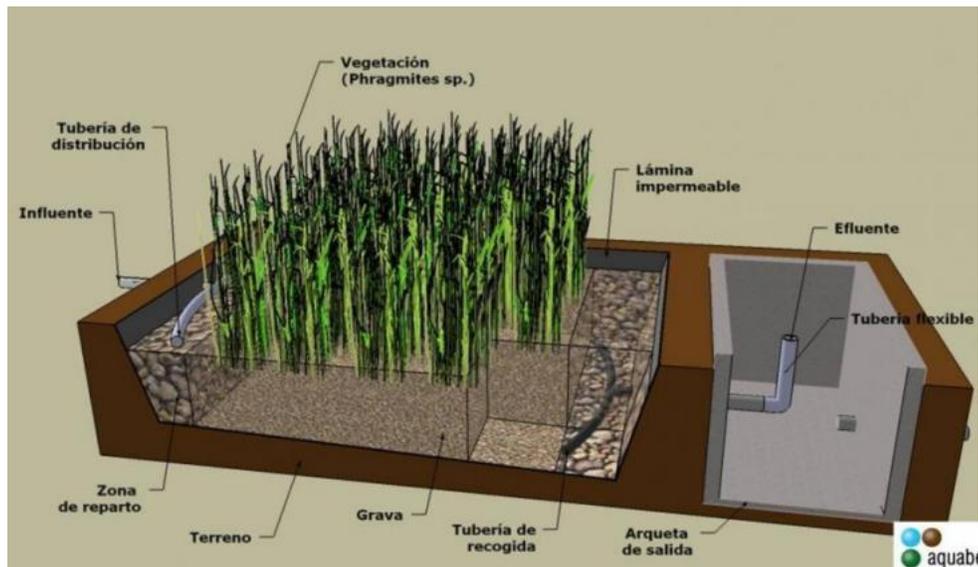
La cubeta excavada que conforma el humedal se rellena con un sustrato permeable (se ha usado roca, grava, arena y suelo) y el nivel de agua se mantiene por debajo de la parte superior del sustrato, de tal manera que se produzca un flujo subsuperficial. Este sustrato da soporte a las raíces de los mismos tipos de vegetación emergente, plantada en la parte superior del sustrato. (Programa de las Naciones Unidas ONU, 2018)

Según la ONU, los humedales artificiales son zonas construidas por el hombre en las que de forma controlada se reproducen mecanismos de eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales, que se dan en los humedales naturales mediante procesos físicos, biológicos y químicos. Los humedales artificiales son un tipo de alternativa para tratar el agua, mediante diferentes tipos de plantas, vegetales y microorganismos adaptados a las condiciones del agua a tratar. Por medio de esto, se puede depurar el agua, es decir eliminar grandes cantidades de materia orgánica, sólidos en suspensión, nitrógeno, fósforo e incluso productos tóxicos. (Programa de las Naciones Unidas ONU, 2018)

El carácter artificial de este tipo de humedales viene definido por el confinamiento del humedal, el cual se construye mecánicamente y se impermeabiliza para evitar pérdidas de agua al subsuelo, el empleo de sustratos diferentes del terreno original para el enraizamiento de las plantas y la selección de las plantas que se van a colonizar en el humedal. (Linares & Álvarez, 2016)

Figura 3.

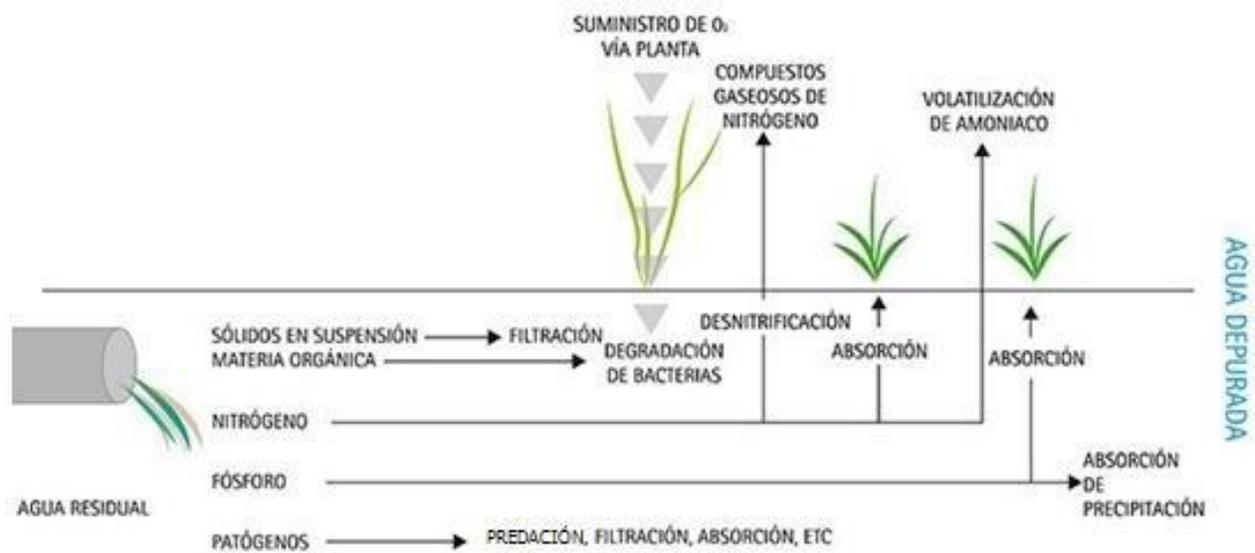
Partes de un humedal artificial



Nota. Estos humedales están constituidos principalmente por una tubería de entrada por donde circula el agua a tratar (influyente), la cual pasa a través del sustrato, que tiene las finalidades de servir de soporte a la vegetación y de permitir la fijación de la población microbiana en forma de biopelícula, que va a participar en la mayoría de los procesos de depuración. Tomado de: *Salas, J. J. (2021). Introducción a los Humedales Artificiales como tratamiento de las aguas residuales. Disponible: <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/introduccion-humedales-artificiales-como-tratamiento-aguas-residuales>*

También, debe tener una lámina impermeable para que no permita el paso del agua hacia zonas no deseadas, es decir, un material alrededor del sustrato para evitar infiltraciones; posteriormente, el agua entra a la tubería de recogida, la cual ya sale sin los contaminantes, lo cual indica que ya está tratado el efluente. (Programa de las Naciones Unidas ONU, 2018)

Figura 4.
Mecanismos de remoción de contaminantes



Nota. La remoción de los contaminantes dentro de los humedales se logra por medio de varios procesos físicos, químicos y biológicos. Tomado de: *Paimed. (2021). Fitodepuración. Mecanismos de remoción de contaminantes. Disponible: <https://paimed.com/fitodepuracion-de-aguas-residuales/>*

Tabla 1.*Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales artificiales*

Componentes de las Aguas Residuales	Mecanismos de Remoción
Sólidos en suspensión	<ul style="list-style-type: none"> ● Sedimentación/Floculación ● Filtración/intercepción
Orgánicos solubles	<ul style="list-style-type: none"> ● Degradación microbiana aeróbica ● Degradación microbiana anaeróbica
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> ● Procesos físicos como la filtración, intercepción, floculación, sedimentación. ● Procesos de sorción (biopelículas) ● Asimilación vegetal
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> ● Procesos físicos filtración, intercepción, floculación, sedimentación. ● Procesos de sorción (biopelículas) ● Nitrificación – Desnitrificación ● Asimilación vegetal ● Volatilización
Metales	<ul style="list-style-type: none"> ● Absorción e intercambio catiónico ● Precipitación
	<ul style="list-style-type: none"> ● Absorción por la planta ● Oxidación/reducción microbiana
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> ● Decaimiento natural ● Predación ● Sedimentación ● Excreción de antibióticos por parte de las raíces de las plantas ● Irradiación UV

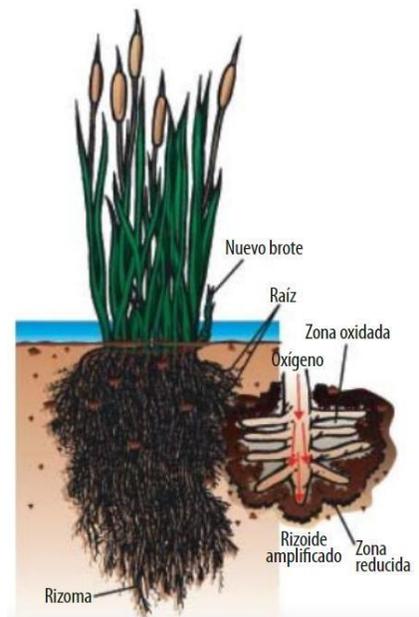
Nota. Mecanismos de remoción de contaminantes. Tomado de: Valencia, N. R. (2020). *Federación Nacional de cafeteros de Colombia. Humedales artificiales: Una alternativa para el postratamiento de aguas residuales agroindustriales. Componentes de un humedal artificial. Disponible: https://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/2_Humedales_artificiales_Conceptos_y_resultados_en_el%20sector_cafetero.pdf*

Tanto los sólidos en suspensión como los sedimentados que no son eliminados en el tratamiento primario, son eliminados de forma efectiva en el humedal mediante filtración y sedimentación. Las partículas se sedimentan en micro celdas estáticas o son forzadas por restricciones de caudal. (Programa de las Naciones Unidas ONU, 2018)

Además, el crecimiento microbial tanto en suspensión como adherido es responsable de la remoción de compuestos orgánicos solubles, que son degradados biológicamente, es decir de forma aeróbica (en presencia de oxígeno disuelto).

Figura 5.

Transferencia de oxígeno desde las raíces



Nota. La vegetación desempeña un papel fundamental ya que tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces, este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación. Tomado de: *Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Vegetación. Universidad Mayor de San Simón Bolivia. Disponible: <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>*

Lo siguiente son tres funciones básicas que tienen los humedales y que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales.

- Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica.
- Utilizar y transformar los elementos por intermedio de los microorganismos.
- Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento. (Espinoza & Barbosa, 2015)

5.2 Marco conceptual

En primer lugar, según el Convenio Ramsar protección de humedales, se define una zona húmeda o **humedal** como cualquier extensión de marisma, pantano o turbera, o superficie cubierta de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de aguas marinas cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

En este caso, se hace énfasis en los **humedales artificiales** los cuales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales, que consisten en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. Además, la acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente. (Guerra, Vargas, Aguirre, & Huaranga, 2015)

De acuerdo con lo anterior, es necesario conocer qué es un sistema de **fitodepuración**, el cual hace referencia a la depuración de aguas residuales, basado en la utilización de humedales artificiales en los que se desarrollan plantas acuáticas (hidrófitas) que contribuyen activamente a la eliminación de los contaminantes, principalmente la materia orgánica. Además, son sistemas muy económicos en la inversión inicial y en el mantenimiento. (Mora, 2014)

Por tanto, las **plantas acuáticas, hidrófitas**, como su nombre lo indica, son aquellos vegetales que colonizan o se localizan en entornos acuáticos, ya que poseen adaptaciones morfológicas, anatómicas y fisiológicas que les permiten la supervivencia de dichos hábitats. (Mora, 2014) Sin embargo, existen plantas o vegetación propias de los humedales, como las **macrófitas** que contribuyen a la oxigenación del sustrato, a la eliminación de nutrientes y sobre la que su parte subterránea también se desarrolla la comunidad microbiana. Teniendo en cuenta que el agua a tratar circula a través del sustrato y de la vegetación. (Remtavares, 2013)

Dicho **sustrato** sirve de soporte a la vegetación, permitiendo la fijación de la población microbiana que va a participar en la mayoría de los procesos de eliminación de los contaminantes. (Remtavares, 2013) Además de lo anterior, es de vital importancia conocer el objeto a tratar en el presente trabajo, siendo los **vertimientos**, una descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

El trabajo impulsa una alternativa que aporta a la **sostenibilidad** la cual es un paradigma para pensar en un futuro en el cual las consideraciones ambientales, sociales y económicas se equilibran en la búsqueda del desarrollo y de una mejor calidad de vida. (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2012) Estos tres ámbitos: la sociedad, el medio ambiente y la economía están entrelazados, es decir, una sociedad próspera depende de un ambiente sano que provea de alimentos y recursos, agua potable y aire limpio a sus ciudadanos.

5.3 Marco normativo

A continuación, se presenta la normatividad relacionada con el tema objeto de estudio, teniendo como base principal la Resolución referente al vertimiento de aguas residuales a cuerpos hídricos 0631 de 2015 del Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible.

Tabla 2.

Normatividad

Normatividad	Definición
<p>Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, Resolución 330 del 8 de junio de 2017, sección 3. Tratamientos descentralizados.</p>	<p>Artículo 172. Trampas de grasa. Dentro de los sistemas de tratamiento de aguas residuales descentralizados, cuando se prevean aportes de grasas y aceites, debe considerarse el empleo de sistemas de remoción de los mismos, con el fin de proteger los procesos de tratamiento subsiguientes, tales como: pozos sépticos, filtros anaeróbicos, campos de infiltración, humedales artificiales, entre otros. (Ministerio de vivienda, 2017)</p> <p>Artículo 180: Humedales artificiales. Para el diseño de estos sistemas se deberán tener en cuenta los siguientes aspectos: caudal y características del afluente, tipo de vegetación que se va a emplear y evapotranspiración. (Ministerio de vivienda, 2017)</p> <p>El tiempo de retención hidráulica normalmente está alrededor de 5 días, la relación largo-ancho de 3.1 a 4:1. Las profundidades para sistemas de flujo superficial de 0,30 a 0,60 m y 0,1 a 0,45 para flujo sumergido. Se deberá contar con la impermeabilización del suelo mediante una capa de arcilla o empleando geomembranas. (Ministerio de vivienda, 2017)</p>

Tabla 2.

(Continuación)

<p>Resolución 0631 de 2015</p>	<p>Por la cual se establecen 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.</p> <p>Artículo 13: Parámetros máximos permisibles en fabricación de productos textiles. (Ministerio de Ambiente, 2015)</p>
<p>Código de los Recursos Naturales Renovables y Protección del Medio Ambiente. Decreto - Ley 2811 de 1974 Congreso de Colombia.</p>	<p>Artículo 137: Señala que serán objeto de protección y control especial las, cascadas, lagos y otras corrientes de agua naturales o artificiales, que se encuentren en áreas declaradas dignas de protección. (secretaría Distrital de Ambiente, 1974)</p>

Nota. Normatividad relacionada con el tema objeto de estudio. Tomado de: *Ministerio de vivienda. (2017). Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS. Disponible: <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/0330-2017.pdf> & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 0631. Disponible: https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf*

6. METODOLOGÍA

Objetivo 1: *Describir los principales parámetros de los vertimientos con base en estudios de caso.*

Este objetivo se va a realizar por medio de referencias bibliográficas para describir de manera general el proceso productivo de la industria textil así como los principales parámetros fisicoquímicos del agua residual vertida según la Resolución 0631 de 2015 en su Artículo 13 el cual indica los “parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con fabricación y manufactura de bienes” en el cual se incluye la fabricación de productos textiles.

Tabla 3

Parámetros fisicoquímicos de vertimientos textiles.

Dimensión	Variable	Aspectos	Indicadores/descriptores	Unidades
Vertimientos	Agua	Parámetros fisicoquímicos	pH	pH
			DQO	mL
			DBO5	mL O2
			DBO5/DQO	mL O2
			Grasas y aceites	mL
			Fenoles	mL
			SST	mL
			SDED	mL
			Cl	mL
			S	mL
			Cd	mL
			Zn	mL
			Co	mL

Tabla 3.*(Continuación)*

Vertimientos	Agua	Parámetros físicoquímicos	Cu	mL
			Cr	mL
			Ni	mL

Nota. Variables con sus respectivos aspectos, indicadores y/o descriptores de evaluación y las unidades que se deben representar en el resultado. Tomado de: *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 0631. Disponible: https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631-marz_2015.pdf*

Objetivo 2: Identificar las características de los diferentes humedales artificiales según los vertimientos identificados.

Para el desarrollo de este objetivo fue necesario acudir a la revisión bibliográfica, para conocer los diferentes tipos de humedales artificiales, teniendo en cuenta que, sea factible en el sector textil y que cumpla con los requerimientos para establecer su aplicabilidad. Además, se tendrá como línea base algunos documentos que permitirán reconocer los componentes de los sistemas no convencionales de depuración, fitodepuración de humedales, humedales artificiales y sus tipos, entre otros, con el fin de tener un óptimo desarrollo del presente objetivo.

Objetivo 3: Establecer las especificaciones de un humedal artificial para su potencial uso como sistema de tratamiento de aguas residuales de la industria textil.

Para proponer las características de los diferentes humedales artificiales, se debe tener en cuenta la revisión bibliográfica recopilada en los resultados anteriores.

Tabla 4.*Modelo de matriz técnica de análisis de remoción de contaminantes*

Parámetro	Proceso	Fibra	Valores (mg/L)		%		mg/L
			Vertimiento que no cumple con la norma	Res. 631 de 2015	Remoción humedal FL	Remoción humedal HF	Remoción del sistema de humedal aplicado

Nota. Matriz técnica de análisis de las características de este sistema de tratamiento con el fin de calcular la eficiencia de remoción de los procesos textiles que presentan datos que no cumplen la norma y que ya han pasado por tratamientos físicoquímicos y/o biológicos.

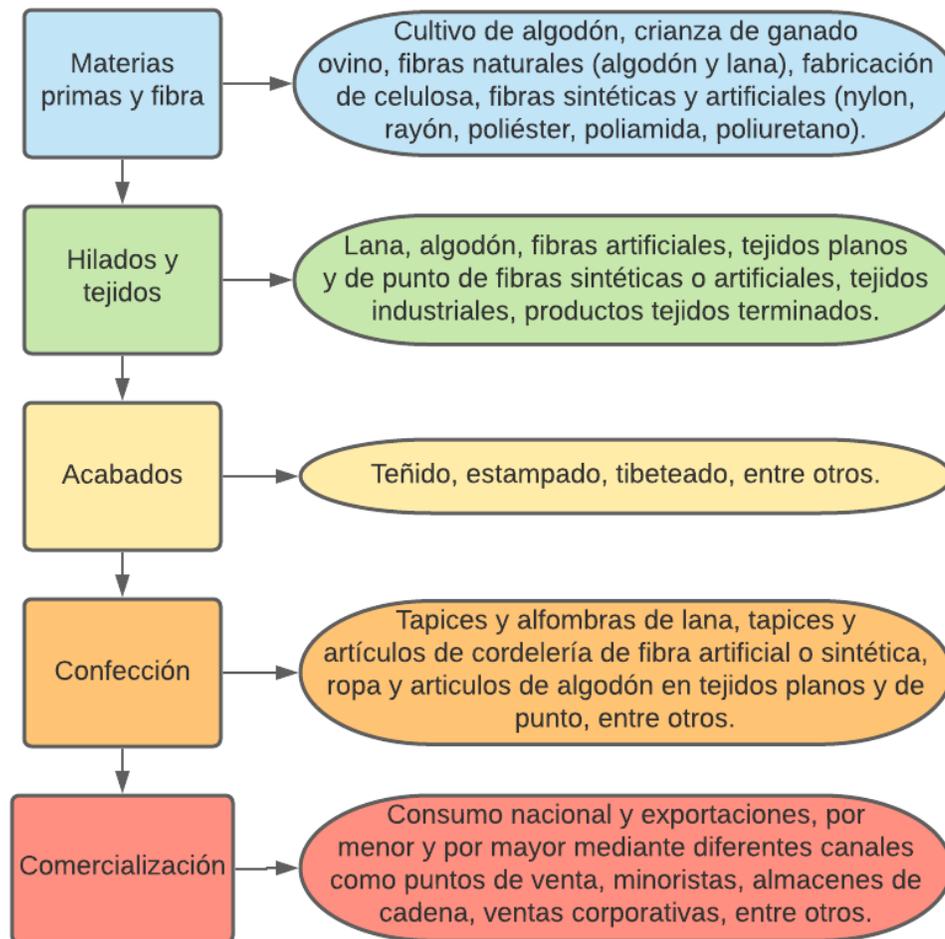
7. RESULTADOS

7.1 Objetivo 1. Describir los principales parámetros de los vertimientos con base en estudios de caso

Inicialmente es importante conocer la cadena de valor de la industria textil la cual está conformada por 5 etapas o eslabones como se muestra en la figura 6:

Figura 6.

Cadena de valor de la industria textil

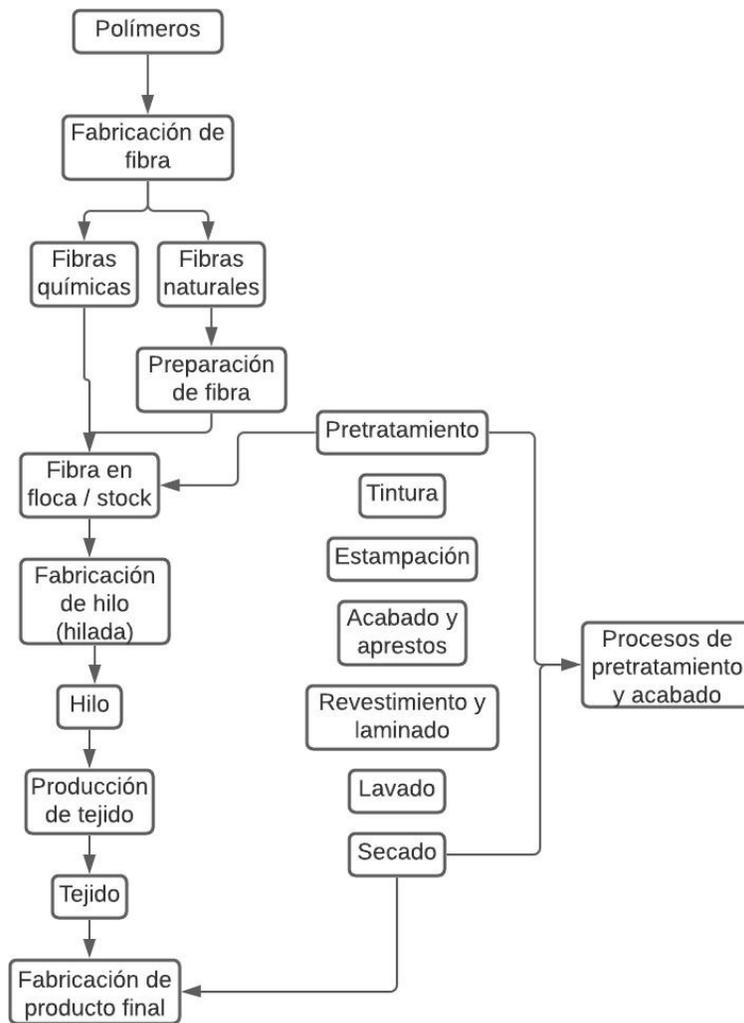


Nota. Cadena de valor de la industria textil la cual está conformada por 5 etapas o eslabones. Tomado de: *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Universidad Nacional de Colombia. (2015). Programas integrales de gestión ambiental sectorial. disponible: convenio interadministrativo un-mads no. 338/2015 - Subsector textil. Disponible: https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Sello_ambiental_colombiano/PGAS_Textil_final_.pdf*

El agua residual de la industria textil es uno de los principales contaminantes y degradantes de la vida presente en los cuerpos de agua, incluidas especies de flora y fauna, ya que, debido a sus compuestos, tales como los colorantes, se puede impedir el paso del sol afectando el proceso de la fotosíntesis además de los componentes tóxicos que afectan de manera directa a la fauna presente en los mismos. (Espinoza & Barbosa, 2015)

Figura 7.

Proceso general de la fabricación de un producto textil



Nota. Proceso general de la fabricación de un producto textil. Tomado de: *Consejo intertextil español*. (2014). *Proyecto Textil*. Disponible: <https://textil.ibv.org/el-proyecto/el-sector-textil/siniestralidad/#>

Una vez están fabricados los diferentes tipos de tejidos, estos posteriormente se someten a unos procesos húmedos distribuidos en 3 grupos como son la preparación, teñido y acabados, dichos procesos son los que aportan la mayor parte de los efluentes acuosos de la industria textil. (López & Crespi, 2015) En la tabla 5 se detallarán las operaciones anteriormente mencionadas:

Tabla 5.

Procesos aportantes de carga húmeda en textiles

Fase	Operación	Tipo de Fibra		
		Algodón	Lana	Poliéster
Preparación	Desencolado	X		X
	Desengrasado		X	
	Carbonización		X	
	Batanado		X	
	Descrude	X		X
	Mercerizado	X		
	Blanqueo químico	X	X	
Teñido	Tintura/Estampación	X	X	X
Acabado	Acabados	X	X	X

Nota. Se hizo énfasis en algunos procesos expuestos en la cadena de valor y la fabricación de los productos textiles, con los tipos de fibra. Tomado de: López, V., & Crespi, M. (2015). *Gestión de los efluentes de la industria textil.* Disponible: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/87574/Gesti%C3%B3n%20efluentes%20textiles%20Num18.pdf>

7.1.1 Materias primas y fibras

La primera etapa que se presenta en la cadena de valor de la industria textil se compone por el cultivo de algodón y la crianza del ganado ovino, de las cuales provienen las fibras naturales como el algodón y la lana, por otra parte, se llevan a cabo procesos petroquímicos y fabricación de

celulosa para la creación de fibras sintética o artificiales como el nylon, poliéster, poliuretano, entre otros. (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015)

7.1.2 Hilados y tejidos

La segunda etapa en esta cadena se desarrolla mediante la conformación de hilados y tejidos, además se contempla la limpieza de la materia prima resultante de la primera etapa, la cual, posteriormente se somete a un proceso de cardado que tiene por objetivo transformar las fibras textiles en mechas de aproximadamente 4 cm de diámetro, las cuales se enrollan hasta unos 5000 m de longitud. (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015)

Luego, el estirado es el proceso que consiste en separar las mechas largas de las más cortas o que han quedado rotas. Seguido a esto, se llevan a unas prensas de rodillos que se encargan de presionar y estirar el material para darle volumen al mismo. Posteriormente se realiza el peinado, proceso en el cual, se presionan y limpian las mechas nuevas que tienen un diámetro más pequeño, le sigue el proceso de torsión y tensión para generar pabilos. Con el fin de dar mayor resistencia a estos pabilos, en el proceso de hilado se someten a un último estiraje y torsión a partir del cual se obtiene el hilo que es enrollado en canillas. (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015)

Sigue el proceso de tejido, que consiste en enlazar los hilos de la urdimbre con el fin de transformar las fibras o hilos en telas, aquí es importante tener en cuenta el producto que se desea confeccionar para que se desarrolle de esta manera el diseño, proporción y estructura de la tela. (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015)

En todos los procesos descritos anteriormente, pertenecientes a la etapa de hilados y tejidos, el principal consumo de agua está relacionado con la fase de limpieza, llegando a niveles entre 176.000 y 345.000 m^3 /año según la cantidad de materia prima procesada. Estos elevados consumos de recurso hídrico implican altos costos en la producción de textiles, aumento del costo final del producto y disminución del recurso. (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015).

Tabla 6.

Relación consumo de agua vs actividad textil

Actividad	Consumo de agua
Mercerizado	7000 - 10000 L/ ton tela
Descrude algodón	2500 - 43000 L/ ton
Descrude poliéster	25000 - 42000 L/ ton
Batanado de lana	5 -20 L/ ton
Carbonizado de lana	30 - 80 L/ ton

Nota. Se relacionaron el consumo de agua (litros) aproximado en diferentes actividades correspondientes a la elaboración de productos textiles (tonelada de tela) Tomado de: *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Universidad Nacional de Colombia. (2015). Programas integrales de gestión ambiental sectorial. disponible: convenio interadministrativo un-mads no. 338/2015 - Subsector textil. Disponible: https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosAmbientalesySectorialyUrbana/pdf/Sello_ambiental_colombiano/PGAS_Textil_final_.pdf*

Los hilados de fibra vegetal pasan por unos tratamientos previos de carácter físicoquímico en medio acuoso para su ennoblecimiento. El primero de estos es el pretratamiento de hilados, el cual se realiza mediante la limpieza de las fibras para lograr la absorción y el blanco necesario para los tratamientos posteriores. (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015)

La mayor cantidad de agua que se consume en esta etapa se debe al lavado de la lana ya que antes de pasar por el hilado, esta fibra debe pasar por un proceso de descrude, donde dependiendo de las condiciones de reproducción y hábitat de la oveja, la lana cruda puede contener de 30% a 70% de impurezas naturales y adquiridas como grasa, sales solubles y suciedad, dichas impurezas en general terminan en el recurso hídrico. En este proceso de descrude, se utilizan aproximadamente de 10 a 50 litros de agua por kilo de lana lavada y en general la transformación de la fibra cruda en tejido no acabado o en hilos, es una operación en seco. (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015)

Por otra parte, el proceso de hilatura del algodón conlleva unos tratamientos mecánicos los cuales se realizan en ausencia de suministro hídrico para su posterior hilado, sin embargo, apesar de que estos tratamientos logran una limpieza alta, las fibras de algodón pueden contener productos naturales como ceras y aceites vegetales provenientes de las plantas donde se produce, además de sustancias externas como plaguicidas y fertilizantes, dichas sustancias deben ser removidas para desarrollar los procesos de blanqueo químico, tintura y acabado para evitar afectaciones en la calidad de las fibras.(Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015)

El proceso de descrude se lleva a cabo en las diferentes fibras que no se han procesado (crudas), este proceso consiste en la extracción de impurezas. Como algunos de los contaminantes presentan color y son de diferente origen, se genera la necesidad de realizar un blanqueo químico para uniformar las fibras, proceso del cual se genera gran cantidad de vertimientos con alta concentración de contaminantes, sin embargo, esta cantidad depende del tipo de fibra que se está limpiando, los principales parámetros que varían en esta operación son la demanda bioquímica de oxígeno, los sólidos totales y el pH. Por otra parte, uno de los procesos comunes en el procesamiento de fibras textiles es el mercerizado, el cual consiste en impregnar la tela o el hilado con una solución de hidróxido de sodio (15% a 30% en volumen), este proceso se realiza con el objetivo de aumentar la resistencia, lustre y afinidad de los colorantes sobre la fibra de algodón y las sintéticas celulósicas, (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015) una vez terminada esta etapa se pueden dar 2 escenarios:

- Eliminación del álcali con ayuda de algún ácido débil y enjuague con agua y vapor, provocándose la consecuente descarga.
- El exceso de soda en la tela o el hilado es aprovechado para el siguiente paso de descrude. (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015)

7.1.3 Acabados

En la etapa de acabado se abarcan todas las operaciones químicas y mecánicas a las que se someten los hilos y tejidos obtenidos de los procesos anteriores. El acabado se compone de procesos de pretratamiento como el blanqueo, teñido, fijado, estampado y otros de postratamiento como aprestado, secado, planchado y otras operaciones menos convencionales como el afelpado y aterciopelado. (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015)

Uno de los procesos que genera grandes vertimientos es el teñido del algodón, debido a que involucra una gran variedad de colorantes y otros agentes aportantes a este proceso, aquí se emplean soluciones alcalinas y detergentes para acondicionar las fibras a las siguientes etapas de blanqueo o tintura. Los principales parámetros que se ven afectados por el teñido del algodón son el color, pH, sólidos suspendidos totales, DBO y DQO. Además, la tintura de lana también representa vertimientos significativos, ya que, junto al algodón, son las fibras más utilizadas en el país; la tintura de la lana afecta principalmente la demanda de oxígeno del agua y el pH. (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015)

En los procesos de teñido del hilado, tinturado, estampado y suavizado también se pueden generar vertimientos tóxicos con alta carga contaminante por las diferentes sustancias utilizadas en estos procesos, y que pueden afectar al ambiente. (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015)

Tabla 7.

Parámetros de los vertimientos textiles

Parámetro	Proceso	Fibra	Valores (mg/L)	
			Rango	Promedio
DBO ₅ mg/L	Descrude	Lana	5.000 - 25.000	15.000
	Descrude	Algodón	100 - 2.900	1.500
	Descrude	Poliéster	500 - 800	650

Tabla 7.*(Continuación)*

DBO₅ mg/L	Batanado	Lana	4.000 - 24.000	14.000
	Carbonizado	Lana	200 - 500	350
	Mercerizado	Lana, algodón, poliéster, entre otros.	500 - 800	650
	Tintura	Lana	10-20	15
	Teñido	Algodón	52 – 240	146
DQO mg/L	Descrude	Lana	10.000 - 45.000	27.500
	Batanado	Lana	4.000 - 24.000	14.000
	Carbonizado	Lana	200 - 500	350
	Tintura	Lana	200-4.000	2.100
	Teñido	Algodón	84 - 663	374
Grasas mg/L	Descrude	Lana	4.000	2.000
	Batanado	Lana	3.300	1.650
pH	Descrude	Algodón	10 - 12	/
	Descrude	Poliéster	8 - 10	/
	Descrude	Lana	8 - 9	/
	Batanado	Lana	9 - 12	/
	Carbonizado	Lana	3 - 10	/
	Mercerizado	Lana, algodón, poliéster, entre otros	11 - 14	/
	Tintura	Lana	6 - 8	/
	Teñido	Algodón	6,9 – 10,7	/
Sólidos totales mg/L	Descrude	Algodón	2.200 - 17.400	9.800
	Descrude	Poliéster	600 - 1.400	1.000
	Mercerizado	Lana, algodón, poliéster, entre otros.	8.000 - 18.000	13.000
	Teñido	Algodón	1.565 – 10.570	6.068

Tabla 7.*(Continuación)*

Sólidos suspendidos mg/L	Descrude	Lana	12.500	6.250
	Batanado	Lana	11.000	5.500
	Carbonizado	Lana	750	375
	Descrude	Lana	6.600	3.300
Sólidos disueltos mg/L	Batanado	Lana	2.800	1.400
	Carbonizado	Lana	300 - 1.500	900

Nota. Parámetros expuestos en las diferentes operaciones o procesos sin tratar. Tomado de: *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Universidad Nacional de Colombia.(2015). Programas integrales de gestión ambiental sectorial. disponible: convenio interadministrativo un-mads no. 338/2015 - Subsector textil. Disponible: https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Sello_ambiental_colombiano/PGAS_Textil_final_.pdf*

Como bien se conoce, las actividades propias de la industria textil son unas de las que mayores cantidades de agua consume, además de otros insumos como la energía eléctrica y productos químicos, los cuales generan un gran volumen de agua residual con características altamente contaminantes, teniendo presente las concentraciones de colorantes, contaminantes orgánicos, compuestos tóxicos, tensoactivos provenientes de los detergentes, entre otros. (Baldeón & Carrión, 2015)

En promedio una compañía textil genera 51.993 m³ al año de agua residual. (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015) Según Baldeón y Carrión, se expresan los efectos carcinogénicos, mutagénicos y el deterioro al medio ambiente que generan los colorantes al ser dispuestos de manera directa en cuerpos de agua o Nota:s superficiales. (Baldeón & Carrión, 2015)

Debido a los contaminantes anteriormente mencionados, se pueden generar impactos por la disposición de metales al recurso hídrico, disminución del oxígeno disuelto y cambio en la temperatura del agua, afectando la calidad del agua y por ende el equilibrio del ecosistema, además de la afectación a las redes de alcantarillado debido a las características corrosivas del vertimiento. (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015)

Adicional, la producción de productos textiles contribuye con un gran porcentaje de los contaminantes vertidos por la industria manufacturera, a partir del estudio *“Concentraciones de referencia para los vertimientos industriales realizados a la red de alcantarillado y de los vertimientos industriales y domésticos efectuados a cuerpos de agua de la ciudad de Bogotá”* realizado por la Universidad de los Andes, esta cadena productiva genera el 36% de los sulfuros, el 81% del plomo, 75% de fenoles, 65% de la demanda química de oxígeno, 56% de los sólidos suspendidos, 35% de cobre, 30% de grasas y aceites; y 3% de cobre. (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015)

Por otra parte, indican que el proceso más empleado para tratar los vertimientos de tipo industrial son los biológicos; según la Environmental Protection Agency (EPA), el proceso más usado es el de Lodos Activados.

En estos procesos, “la biodegradación de la materia orgánica se lleva a cabo mediante la acción de microorganismos en condiciones aerobias, y la separación sólido-líquido se lleva a cabo mediante un clarificador secundario”. Si bien es cierto que, este proceso es adecuado para eliminar la materia orgánica, su principal problema es el “bulking” o abultamiento de los lodos, el cual genera la eliminación de la biomasa en el clarificador secundario. (Baldeón & Carrión, 2015)

Los parámetros de las aguas residuales son importantes para determinar el grado de contaminación y así mismo su tratamiento, por esto es importante conocer los que se emplean para caracterizar la presencia de cada uno de los contaminantes en el agua residual textil teniendo como referencia valores de aguas residuales sin tratar y los que han pasado por tratamientos primarios (físicoquímicos y/o biológicos) según un 90% de eficiencia de remoción correspondiente a estos tratamientos, contrastados con los valores permisibles según la normatividad legal vigente la cual es la Resolución 631 de 2015 que estipula los parámetros máximos para verter aguas residuales en cuerpos de agua y de esta manera poder complementar procesos descontaminantes que no alcanzan a cumplir lo que exige la norma por medio de los sistemas de humedales artificiales, estos valores se pueden ver en la tabla 8, teniendo en cuenta que las casillas de color rojo son aquellos parámetros que no cumplen con los valores estipulados en la normatividad aplicable para vertimientos en cuerpos de agua que serían los casos puntuales para tratar mediante los sistemas de humedales.

Tabla 8.*Identificación de parámetros que no cumplen la Resolución 0631 de 2015*

Parámetro	Proceso	Fibra	Valores (mg/L)		
			Promedio Vertimiento sin tratar	Tratamiento Físicoquímico (90% de remoción)	Valores permisibles Res. 0631 de 2015
DBO ₅ mg/L	Descrude	Lana	15.000	1.500	200
	Descrude	Algodón	1.500	150	200
	Descrude	Poliéster	650	65	200
	Batanado	Lana	14.000	1.400	200
	Carbonizado	Lana	350	35	200
	Mercerizado	Lana, algodón, poliéster, entre otros.	650	65	200
	Tintura	Lana	15	1.5	200
	Teñido	Algodón	146	15	200
DQO mg/L	Descrude	Lana	27.500	2.750	400
	Batanado	Lana	14.000	1.400	400
	Carbonizado	Lana	350	35	400
	Tintura	Lana	2.100	210	400
	Teñido	Algodón	374	37	400
Grasas mg/L	Descrude	Lana	2.000	200	20
	Batanado	Lana	1.650	165	20

Tabla 8.*(Continuación)*

pH	Descrude	Algodón	10 - 12	NA	6-9
	Descrude	Poliéster	8 - 10	NA	6-9
	Descrude	Lana	8 - 9	NA	6-9
	Batanado	Lana	9 - 12	NA	6-9
	Carbonizado	Lana	3 - 10	NA	6-9
	Mercerizado	Lana, algodón, poliéster, entre otros	11 - 14	NA	6-9
	Tintura	Lana	6 - 8	NA	6-9
	Teñido	Algodón	6,9 – 10,7	NA	6-9
Sólidos totales mg/L	Descrude	Algodón	9.800	980	NR
	Descrude	Poliéster	1.000	100	NR
	Mercerizado	Lana, algodón, poliéster, entre otros.	13.000	1300	NR
	Teñido	Algodón	6.068	607	NR
Sólidos suspendidos mg/L	Descrude	Lana	6.250	625	NR
	Batanado	Lana	5.500	550	NR
	Carbonizado	Lana	375	37	NR
Sólidos disueltos mg/L	Descrude	Lana	3.300	330	NR
	Batanado	Lana	1.400	140	NR
	Carbonizado	Lana	900	90	NR
SST (mg/l)	/	Lana	12.125	1.212	50
SDED (mg/l)	NR	/	/	/	2
Color	/	/	>10000	653	Análisis y reporte
Fenoles(mg/l)	/	/	1 - 2,7	0,60	0,20
Cl (mg/l)	NR	NR	NR	NR	1200

Tabla 8.

(Continuación)

S (mg/l)	NR	NR	NR	NR	1
Cd (mg/l)	NR	NR	NR	NR	0,02
Zn (mg/l)	NR	NR	NR	NR	3
Co (mg/l)	NR	NR	NR	NR	0,5
Cu (mg/l)	NR	NR	NR	NR	1
Cr (mg/l)	NR	NR	NR	NR	0,5
Ni (mg/l)	NR	NR	NR	NR	0.5

FQ: Físicoquímico; pH: potencial de hidrógeno; DQO: demanda química de oxígeno; DBO5: demanda bioquímica de oxígeno; SST: Sólidos suspendidos totales; SSED: Sólidos sedimentables; Cl: Cloruros; S: Sulfuros; Cd: Cadmio; Zn: Zinc; Co: Cobalto; Cu: Cobre; Cr: Cromo; Ni: Níquel. NR: No Reporta; NA: No Aplica; Res.: Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Medio Ambiente, Colombia. (Ministerio de Ambiente, 2015)

Nota. La tabla anterior representa los valores de los vertimientos textiles, teniendo en cuenta que las casillas de color rojo son aquellos parámetros que no cumplen con los valores estipulados en la normatividad aplicable para vertimientos en cuerpos de agua y que serían los casos puntuales para tratar mediante los sistemas de humedales.

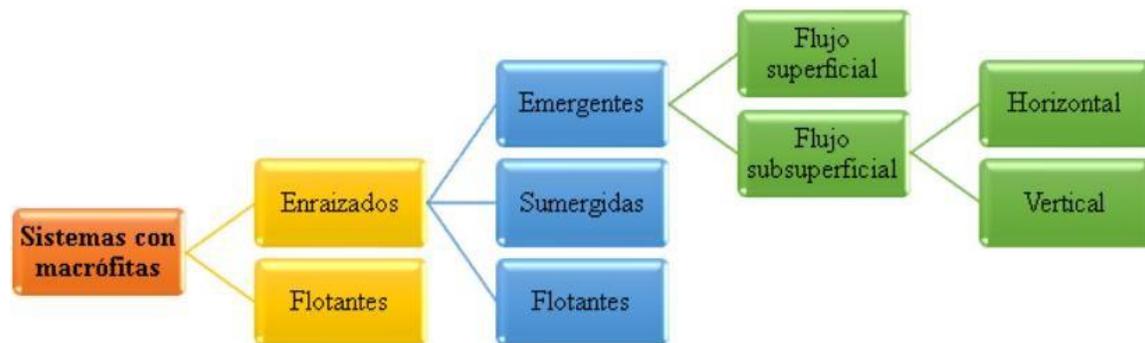
Los principales vertimientos relacionados con las materias primas se tienen en la fabricación de fibras sintéticas y artificiales, según el DANE para el 2007 se tenía que el volumen de desechos vertidos para esta actividad eran 643 millones m^3 , siendo la DBO y sólidos suspendidos totales los principales contaminantes de esta actividad (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015) Una de las funciones de los humedales, es que a través de ellos se pueda disminuir el colorante presente en el agua y de la misma manera reducir parámetros como la DQO, DBO, sólidos totales, entre otros. (Espinoza & Barbosa, 2015)

7.2 Objetivo 2: Identificar las características de los diferentes humedales artificiales según los vertimientos identificados

Los humedales artificiales pueden ser clasificados según el tipo de macrófitas que se utilicen para su construcción y funcionamiento como las macrófitas fijas al sustrato o enraizadas y macrófitas flotantes libres (Rabat, 2016).

Figura 8.

Clasificación de humedales según tipo de macrófitas



Nota. Clasificación de humedales según el tipo de macrófitas utilizada. Tomado de: Rabat, J. (2016). *Escuela Politécnica Superior. Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración.* Disponible: <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm10/tfm10-jorge-rabat-blazquez.pdf>

7.2.1 Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes

Las especies de plantas macrófitas emergentes que son más utilizadas son el carrizo, la eneay los juncos, estas se desarrollan en suelos anegados permanente o temporalmente y en general son plantas perennes con órganos reproductores aéreos. Las macrófitas que se desarrollen en un humedal deben poseer una extensa superficie para la fijación de microorganismos y también deben ser capaces de transportar el oxígeno de forma eficiente de las hojas hasta las raíces, creando de esta manera una zona aerobia en el sustrato que favorece la nitrificación. (Rabat, 2016)

Una de las principales ventajas de este sistema dominado por macrófitas emergentes son subajos costos de construcción y mantenimiento reducido, por otra parte, su principal desventaja es que requiere más espacio que otros sistemas para lograr una misma eficacia en la reducción de carga contaminante. (Rabat, 2016)

7.2.2 Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas

Las plantas sumergidas se encuentran suspendidas en el espejo de agua o enraizadas en los sedimentos, sus órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos. En estos sistemas se usan algunos helechos, musgos, carófitas y muchas angiospermas, las cuales se encuentran en toda la zona fótica que es donde llega la luz solar, aunque las angiospermas vasculares sólo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente. (Rabat, 2016)

Las partes fotosintéticas de la planta suelen estar en el espejo de agua y su aporte de oxígeno al agua debido a esta actividad fotosintética durante el día es muy abundante, esto favorece la mineralización y la nitrificación. Además, la utilización del dióxido de carbono (CO_2) presente en el agua para la realización de la fotosíntesis durante el día incrementa el potencial hidrógeno (pH) en la columna de agua, lo que favorece la volatilización del amonio. (Rabat, 2016)

En el uso de las plantas sumergidas para la depuración de aguas, su utilidad se ve limitada por su baja resistencia en aguas en las que se produce un crecimiento simultáneo de algas, perjudicando de esta manera las condiciones anaeróbicas que se dan en estos casos hasta el punto de verse afectada o morir. (Rabat, 2016)

7.2.3 Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas flotantes

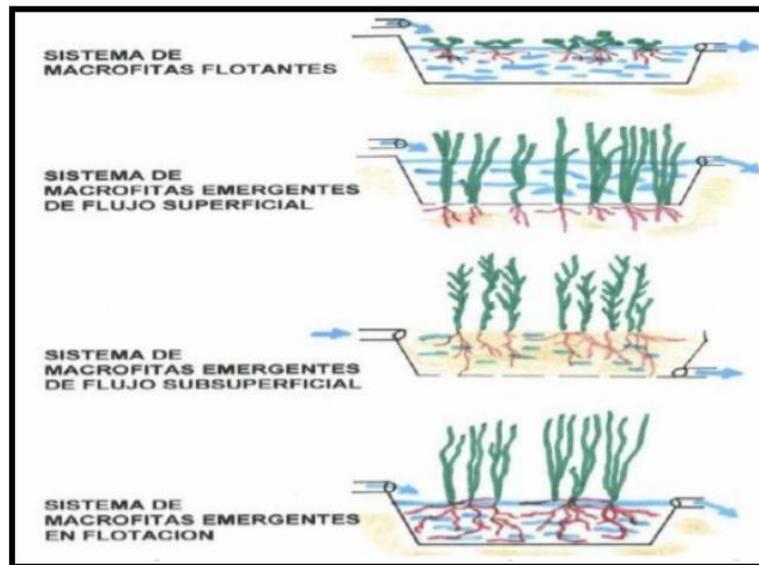
Se utilizan principalmente angiospermas sobre suelos anegados, los órganos reproductores son flotantes o aéreos. Las especies más utilizadas para este sistema son El Jacinto de agua *Eichhornia crassipes* y la lenteja de agua *Lemna sp.* (Rabat, 2016)

La principal ventaja del jacinto o buchón de agua es su sensibilidad a las bajas temperaturas, sin embargo, esta temperatura no se debe acercar a niveles extremos como las heladas ya que pueden llegar a morir. Una densa cubierta de macrófitas flotantes impide que la luz penetre en el espejo de agua, limitando de esta manera la actividad de las algas y reduce la transferencia de gases entre el agua y la atmósfera. (Rabat, 2016)

La secuencia nitrificación – desnitrificación puede ser sustancial en sistemas dominados por los jacintos de agua, ya que su extensivo sistema de raíces proporciona oxígeno para la nitrificación, este caso no sucede de la misma manera con otros macrófitas flotantes como la Lemna sp. o lenteja de agua, cuya superficie enraizada es escasa. (Rabat, 2016)

Figura 9.

Humedales según especie de macrófitas dominantes

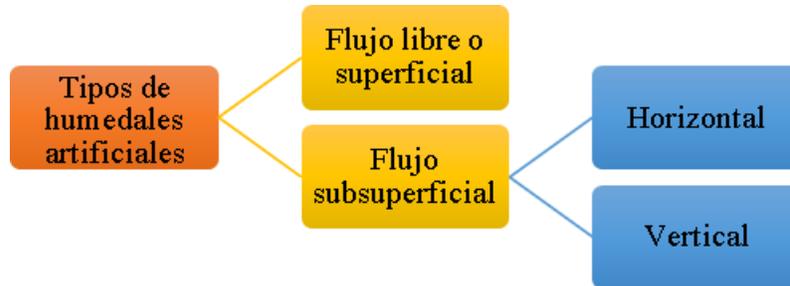


Nota. En la figura se evidencian los diferentes tipos de humedales según especie de macrófitas dominantes. Tomado de: Rabat, J. (2016). *Escuela Politécnica Superior. Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración.* Disponible: <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm10/tfm10-jorge-rabat-blazquez.pdf>

Las macrófitas no sólo juegan un papel importante en la eliminación de nutrientes por sí mismas, sino que además constituyen el principal soporte para las comunidades microbianas y crean un ambiente favorable para la eliminación de contaminantes. (Rabat, 2016) Los humedales basados en macrófitas enraizadas emergentes pueden ser de dos tipos, de acuerdo a la circulación del agua que se emplee, es así como se llega a la clasificación evidenciada en la figura 10.

Figura 10.

Tipos de humedales artificiales según la circulación del agua



Nota. En la figura se evidencian los diferentes tipos de humedales según la circulación del agua como los son humedales de flujo libre o superficial y de flujo subsuperficial (horizontal o vertical).

7.2.4 Flujo libre (FL)

Los humedales de flujo libre o superficial se utilizan como tratamiento secundario en la depuración de aguas residuales, con una efectividad de remoción del 96% para SST, 96% para DBO, 87% para DQO y 30% para PT (fósforo total). (Arteaga, y otros, 2019) Estos sistemas se diseñan para cargas superficiales bajas, con una profundidad entre los 5 a 90 cm por lo general entre los 30 a 40 cm, además están conformados por zanjas de 3 m de ancho y 100 m de largo, con una profundidad que oscila entre 0,30 y 0,40 m. Es común que en este tipo de humedales se utilice la planta *Scirpus lacustris* (Junco de agua).

Estas profundidades superficiales permiten el desarrollo de una densa cantidad de vegetación acuática (macrófitas) en la mayor parte de la superficie del humedal como se evidencia en la Figura 11, favoreciendo el proceso depurativo por la presencia y variedad de la biomasa, siendo esta, una de las principales diferencias con relación al tratamiento por lagunaje. El ingreso del agua a tratar es de forma continua y la depuración se da en el tránsito del agua a través de los tallos y raíces de las plantas emergentes utilizadas. Los tallos, raíces y hojas caídas sirven de soporte para la fijación de la película bacteriana responsable de los procesos de biodegradación, mientras que las hojas que están por encima de la superficie del agua dan sombra a la masa de agua, limitando el crecimiento de microalgas. (Rabat, 2016)

Figura 11.

Humedal de flujo libre



Nota. Se evidencia un humedal de flujo libre el cual es el que más se acerca a un ecosistema natural. Tomado de: *Latarjere, J. (2018). Saneamiento sostenible y caja de herramientas de gestión del agua. Humedal artificial de flujo superficial libre.* Disponible: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/humedal-artificial-de-flujo-superficial-libre>

En los humedales de flujo libre, el agua circula por encima del sustrato a través de los tallos de las plantas continuamente, donde se ven favorecidas las condiciones aerobias al estar el agua en contacto con la atmósfera. Como se expresó anteriormente, se emplean para tratar efluentes procedentes de tratamientos secundarios y para crear o restaurar ecosistemas acuáticos, además, brindan aspectos positivos a nivel ecosistémico ya que permiten albergar una gran variedad de especies como peces, anfibios, aves, entre otros. (José Luis Soto Fuster, 2016)

7.2.5 Humedales artificiales de flujo subsuperficial

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial se utilizan como sistemas secundarios, aquí la circulación del agua es de tipo subterráneo a través de un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. La profundidad de la lámina de agua suele ser de entre 0,3 y 0,9 m. La biopelícula que crece adherida al medio granular y a las raíces y rizomas de las plantas tiene un papel fundamental en los procesos de descontaminación del agua. (José Luis Soto Fuster, 2016)

Las principales diferencias de los sistemas de flujo subsuperficial respecto a los superficiales son: admiten mayor carga orgánica, bajo riesgo de contacto del agua con las personas y de aparición de insectos, y menor utilidad para proyectos de restauración ambiental debido a la falta de lámina de agua accesible. (José Luis Soto Fuster, 2016)

En este sistema, el agua circula a través del sustrato, con una profundidad de agua cercana a los 0,6 m. La vegetación emergente se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y las raíces de las plantas. En la mayoría de los casos se usan para el tratamiento de aguas residuales generadas en núcleos de población de menos de 2000 habitantes. (José Luis Soto Fuster, 2016)

Los humedales son sistemas que requieren una buena repartición y recogida de las aguas para alcanzar los rendimientos estimados, es por ello que las estructuras de entrada y salida deben estar muy bien diseñadas y construidas para que el agua residual procedente de los tratamientos previos llegue hasta una arqueta donde el caudal se divide equitativamente y mediante diversas tuberías se vierte al lecho o se puede hacer llegar el agua hasta un canal con vertedero que la distribuye de forma homogénea en todo el ancho del sistema. (José Luis Soto Fuster, 2016)

La recogida del agua efluente se realiza con una tubería perforada asentada sobre el fondo del humedal, esta tubería conecta con otra en forma de “L” invertida y cuya altura es regulable, esta estructura permitirá modificar el nivel del agua y a su vez drenar el humedal durante operaciones de mantenimiento. Es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie (5-10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento. (José Luis Soto Fuster, 2016)

En cuanto al medio granular, en las zonas de entrada y salida es importante colocar piedras que permitan diferenciar estas zonas de lo que es el conjunto medio granular/biopelícula/plantas el cual es considerado como el principal constituyente de los humedales. (José Luis Soto Fuster, 2016)

El medio granular debe ser limpio, homogéneo, duro, durable y capaz de mantener su forma a largo plazo, además, debe permitir un buen desarrollo de las plantas y de la biopelícula. Una

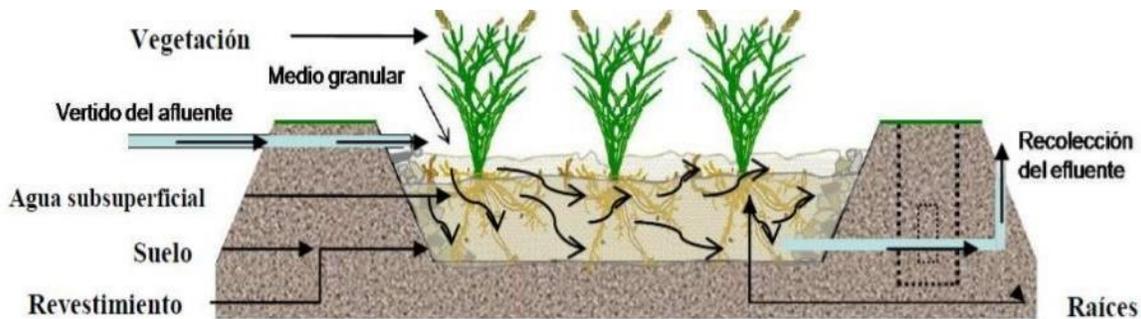
característica muy importante del medio granular es su conductividad hidráulica, ya que esta propiedad depende de la cantidad de flujo de agua que puede circular a través de él, también es importante tener en cuenta que un medio granular con diámetros medios de alrededor de 5-8 mm ofrecen muy buenos resultados. Se debe tener presente durante el diseño de este sistema de tratamiento, que la conductividad hidráulica va a disminuir con el paso del tiempo. (José Luis Soto Fuster, 2016)

Los humedales de tipo subsuperficial se clasifican en:

7.2.5.a Flujo subsuperficial horizontal

Figura 12.

Humedal con flujo subsuperficial horizontal



Nota. Sistema de humedal subsuperficial de flujo horizontal. Tomado de: Rabat, J. (2016). *Escuela Politécnica Superior. Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración.* Disponible: <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm10/tfm10-jorge-rabat-blazquez.pdf>

Los humedales de flujo subsuperficial horizontal (FSSH), son sistemas con medios porosos saturados, donde se siembra una vegetación emergente. Dentro de sus usos más importantes se encuentran las aguas provenientes de la industria, principalmente las aguas residuales de la industria alimentaria, (Arteaga, y otros, 2019) además, estos son los sistemas más utilizados en Europa.

Un humedal FSSH presenta una alta remoción de materia orgánica, DBO_5 (demanda bioquímica de oxígeno medida a cinco días), DQO y sólidos suspendidos totales. Sin embargo, presentan una

menor eliminación de nutrientes. Por tanto, las plantas *T. latifolia* y *P. australis* son especies vegetales que se adaptan mejor a las aguas residuales de curtidurías en términos de supervivencia y propagación. (Arteaga, y otros, 2019)

Los suelos compuestos de material arcilloso, por tener capacidad de intercambio iónico, permiten la remoción temporal del nitrógeno presente en las aguas residuales, que depende del tiempo de estabilización del sistema. En el caso de los humedales de flujo horizontal, que emplean suelo, presentan un potencial de remoción adicional de fósforo y amonio, mientras que en los sistemas de flujo vertical debido a la intermitencia del flujo favorece la restauración de las condiciones aerobias y el amonio es adsorbido. Al usar grava en humedales, la capacidad de remoción de fósforo es limitada. (Arteaga, y otros, 2019)

En este tipo de humedales el agua circula horizontalmente a través del sustrato de manera continua, por lo general su diseño consiste en una cama, bien sea con sustratos como tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas; toda la cama está recubierta por una membrana impermeable para evitar posibles filtraciones en el suelo. (José Luis Soto Fuster, 2016)

Posteriormente, el agua es aplicada permanentemente en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior; finalmente el agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0,5 % a 1 %. (José Luis Soto Fuster, 2016)

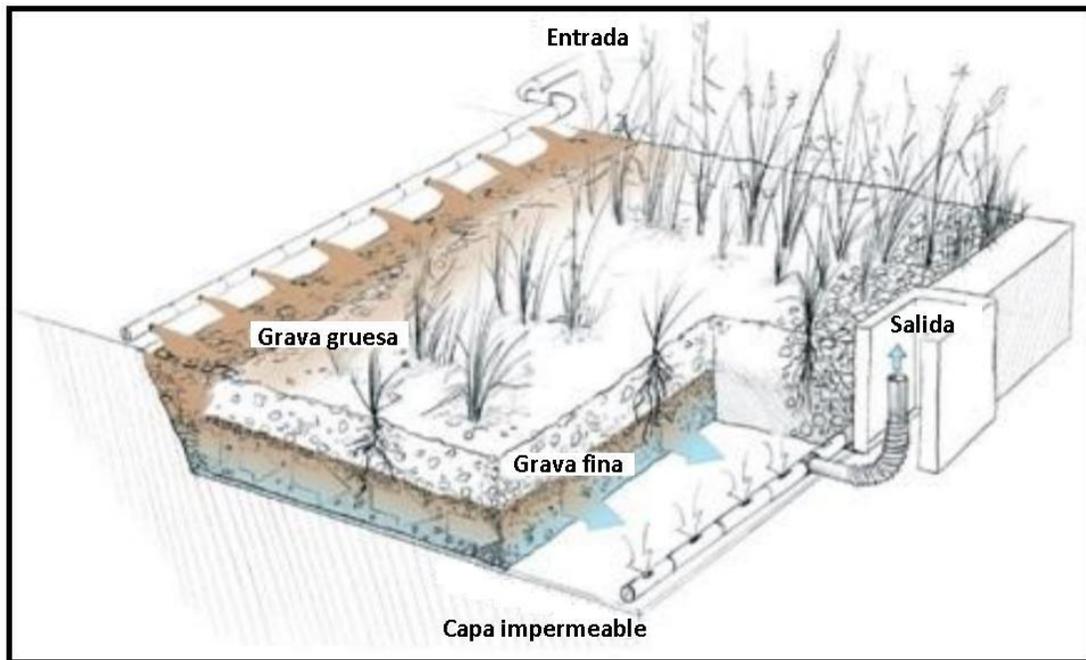
El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal o cuerpo, sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño, este sistema de recogida consiste en un tubo de drenaje cribado, rodeado con grava de igual tamaño que la utilizada al inicio, el diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm. (José Luis Soto Fuster, 2016)

Otro de los componentes de este sistema es la zona de plantación, la cual está constituida por grava fina de un solo diámetro, entre 3 mm a 32 mm, donde el agua circula horizontalmente a través del medio granular y los rizomas y raíces de las plantas. Se caracterizan por funcionar permanentemente

inundados (el agua se encuentra entre 0,05 y 0,1m por debajo de la superficie) y con cargas de alrededor de 6 g DBO/ m²*día. (José Luis Soto Fuster, 2016)

Figura 13.

Componentes de un humedal con flujo subsuperficial horizontal

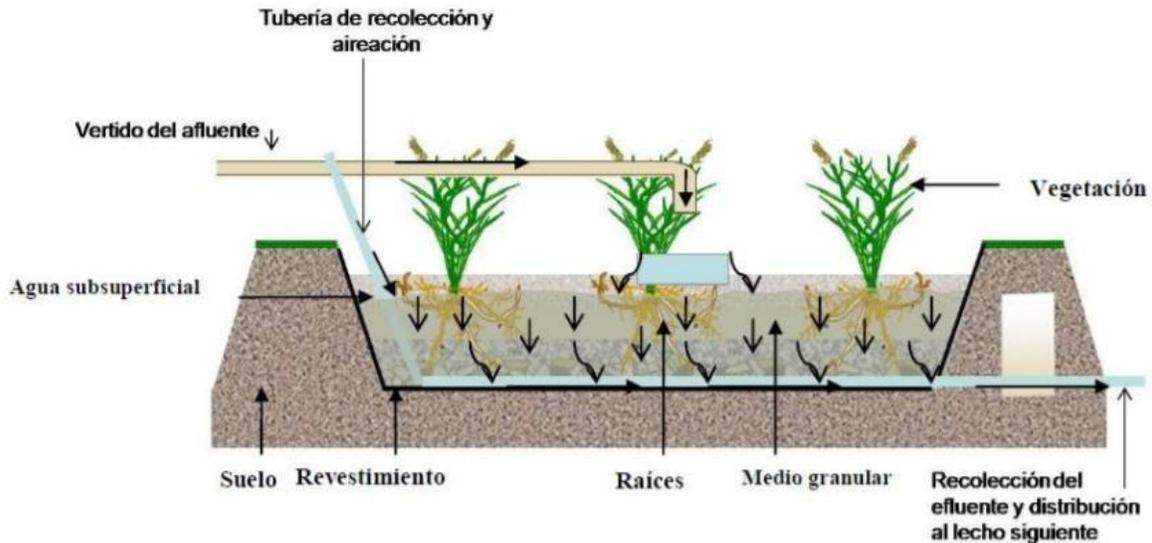


Nota. Sistema de humedal subsuperficial de flujo horizontal. Tomado de: José Luis Soto Fuster. (2016). Estudio de aplicabilidad de humedales artificiales para la mejora de la calidad de las aguas en los meandros abandonados del río Segura. Universidad Politécnica de Valencia. Disponible: https://riUNET.upv.es/bitstream/handle/10251/70818/01_Estudio%20de%20aplicabilidad%20de%20humedales%20artificiales%20para%20la%20mejora%20de%20la%20calidad%20de%20las%20aguas%20en%20los%20meandros%20abandonados%20del%20r%C3%ADo%20Segura.pdf?sequence=1&isA

7.2.5.b Flujo subsuperficial vertical

Figura 14.

Humedal con flujo subsuperficial vertical



Nota. Sistema de humedal subsuperficial de flujo horizontal. Tomado de: Rabat, J. (2016). *Escuela Politécnica Superior. Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración*. Disponible: <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm10/tfm10-jorge-rabat-blazquez.pdf>

Los humedales subsuperficiales de flujo vertical también se utilizan como sistemas secundarios y se componen de dos fases: una con dos celdas de flujo vertical seguido por una celda de flujo horizontal, esta última fase tiene la finalidad de lograr la depuración de los efluentes. (Arteaga, y otros, 2019)

La eficiencia del proceso de depuración depende en gran medida de la aireación del sustrato, una de las desventajas de este tipo de sistemas es que son susceptibles a la obstrucción, por lo cual es recomendable limitar la alimentación de carga orgánica a 25 g DQO/m^2 por día, además de utilizar el sistema en forma rotatoria, de este modo se logrará la oxigenación del lecho, y se permitirá que el sistema tenga un tiempo de descanso, en el cual se le permite al lecho secarse. (Arteaga, y otros, 2019)

Los sistemas de humedales de flujo vertical con recirculación y de operación intermitente, incluso operando bajo altas cargas realizan una mejor mezcla en el lecho del humedal, acelerando la difusión de oxígeno y el aumento depurativo del DQO y NO_3 , reduciendo así la superficie que se utiliza en este tipo de sistemas, favoreciendo sobre todo a los humedales construidos en regiones montañosas, donde la disponibilidad de espacio es limitada (Arteaga, y otros, 2019).

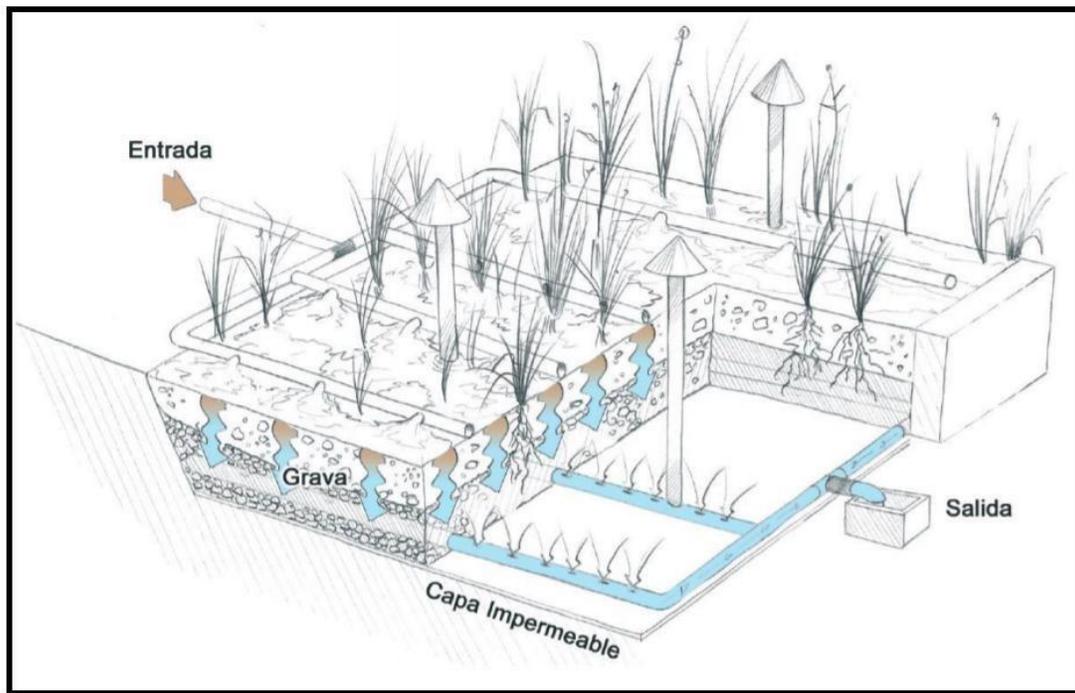
En este tipo de humedales, el agua circula verticalmente a través del sustrato de manera intermitente, de esta manera, las condiciones de saturación con agua en el lecho son seguidas de periodos de semisaturación para que se pueda estimular el suministro de oxígeno. (Arteaga, y otros, 2019).

Los humedales artificiales de flujo vertical tienen una efectividad relativamente baja en la eliminación de sólidos suspendidos y coliformes fecales, pero la eliminación de Nitrógeno a través de la secuencia nitrificación - desnitrificación es eficiente debido a la elevada oxigenación y a la alternancia óxica y anóxica, causada por la intermitencia en el flujo de agua. (Rabat, 2016)

Las aguas se infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte como la grava donde posteriormente se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal, además, la vegetación emergente se planta también en el medio granular. Por lo general, se adecuan chimeneas de aireación para favorecer las condiciones aerobias, mediante tuberías cribadas con salidas al exterior donde se suelen desarrollar procesos de nitrificación, entre otros. A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava en profundidad. (José Luis Soto Fuster, 2016)

Figura 15.

Componentes de un humedal con flujo subsuperficial vertical



Nota. Sistema de humedal subsuperficial de flujo horizontal. Tomado de: José Luis Soto Fuster. (2016). Estudio de aplicabilidad de humedales artificiales para la mejora de la calidad de las aguas en los meandros abandonados del río Segura. Universidad Politécnica de Valencia. Disponible: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/70818/01_Estudio%20de%20aplicabilidad%20de%20humedales%20artificiales%20para%20la%20mejora%20de%20la%20calidad%20de%20las%20aguas%20en%20los%20meandros%20abandonados%20del%20r%3ado%20Segura.pdf?sequence=1&isA

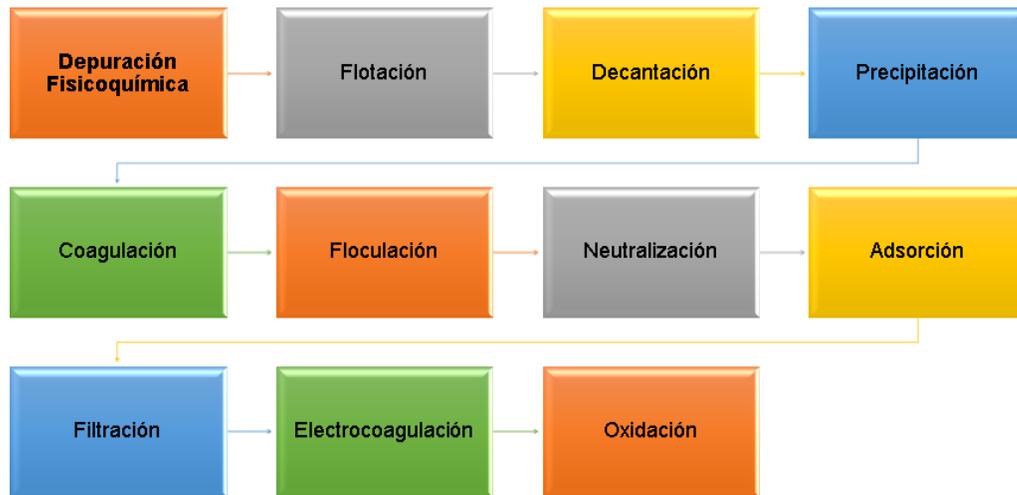
7.3 Objetivo 3: Establecer las especificaciones de un humedal artificial para su potencial uso como sistema de tratamiento de aguas residuales de la industria textil.

La industria textil genera aguas residuales con alto contenido contaminante, es por esto que se deben tener en cuenta los sistemas de tratamiento convencional de aguas residuales industriales, realizados previamente a los efluentes como los procesos fisicoquímicos y biológicos, además de técnicas como evaporadores al vacío, filtración y ósmosis inversa. (Condorchem Envitech, 2019)

A continuación se presentan las etapas del tratamiento físico químico:

Figura 16.

Etapas del tratamiento físico químico



Nota. En la figura anterior se evidencian las fases del tratamiento primario o físico químico.

El tratamiento de aguas residuales de origen textil tiene tres posibilidades diferentes:

- Tratamiento centralizado en una depuradora biológica in situ.
- Tratamiento centralizado externo en una depuradora municipal.
- Tratamiento descentralizado in situ (o externo) de determinados flujos de aguas residuales segregados. (Ministerio de Ambiente; Universidad Nacional de Colombia, 2015)

Teniendo en cuenta estas posibilidades de tratamiento, se considera que los humedales artificiales tendrían la posibilidad de tratar el agua la resultante de los tratamientos convencionales mencionados inicialmente y que los sistemas de humedales artificiales se aplicarán como segundo o tercer eslabón según el caso, con el fin de aportar mejor calidad del agua que se va a verter en el cuerpo hídrico.

Según Moksa, los sistemas de humedales artificiales sirven para tratar en general aguas grises provenientes de actividades como del lavado de ropa, de la cocina y ducha o como fase complementaria en el tratamiento de agua residual de tipo industrial.

Para lo anterior se recomienda que estos vertidos tengan un tratamiento previo para facilitar el funcionamiento y hacer más eficiente el biofiltro (Moksa, 2020), además, según Rivas y Paredes, el humedal asegura el tratamiento de efluentes industriales de hasta $1.32 \text{ kg DQO m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ y apoyan la tesis que indica que este sistema podría acoplarse como postratamiento de un proceso anaeróbico y/o convencional. (Rivas & Paredes, 2014)

En cuanto a la aplicabilidad de este tipo de tecnologías para la industria propiamente textil, en México se desarrolló un estudio denominado “*Uso de humedales artificiales de flujo subsuperficial para postratamiento de aguas residuales de la industria textil*” el cual tuvo como objetivo identificar la eficiencia de remoción de contaminantes en agua residual con desengrasantes y otros productos de industria textil dedicada a la litografía en ropa mediante un humedal artificial de flujo subsuperficial usando especies como el Alcatraz (*Zantedeschia Aethiopica*), Cuna de Moisés (*Spathiphyllum*) y achira o coyol (*Canna Spp*). (Espinoza & Barbosa, 2015)

Para lograr este objetivo se colocaron tres humedales con réplica, colocando tres plantas distintas para comparar resultados y eficiencia de estas para la remoción de contaminantes. Los resultados obtenidos indicaron que para la disminución de la DQO es mejor la implementación de la *Zantedeschia Aethiopicaya* que la disminución de dicho parámetro es mayor; para la disminución de sólidos resulta más eficiente la *Spathiphyllum* o *Canna Spp*. (Espinoza & Barbosa, 2015)

Figura 17.
Adición de agua industrial a humedales experimentales

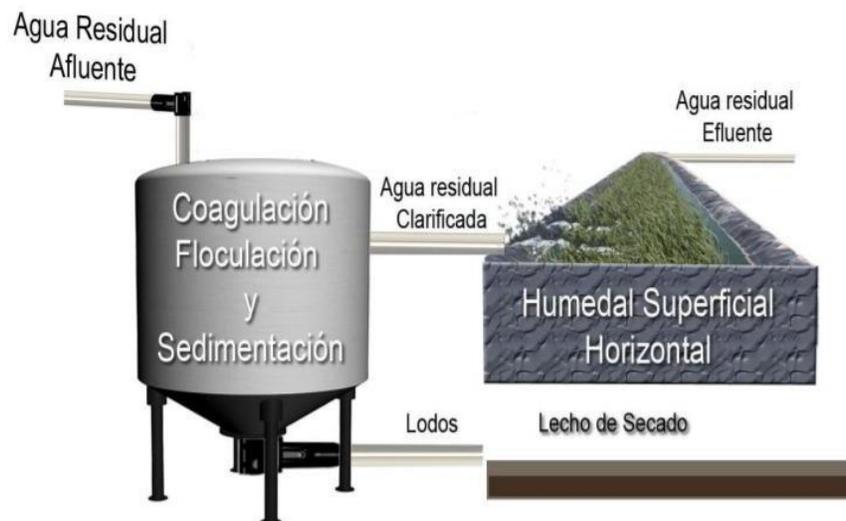


Nota. En la figura anterior se observa la adición de agua industrial a humedales de pequeña escala en caso de estudio. Tomado de: Espinoza, D. V., & Barbosa, R. G. (2015). *Uso de humedales artificiales de flujo subsuperficial para postratamiento de aguas residuales de la industria textil. Universidad de Guanajuato.* Disponible: <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/98/pdf1>

Por otra parte, en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas en Cuba se desarrolló el trabajo “*Diseño de un humedal subsuperficial para la depuración de las aguas residuales de la industria Lava Jeans*” en el cual se evaluó la remoción de colorantes y materia orgánica en dos humedales experimentales, obteniéndose como resultado un mejor comportamiento del humedal plantado. Posteriormente se evaluó la cinética de remoción de dos colorantes y materia orgánica en un humedal subsuperficial de flujo horizontal experimental plantado con *Cyperus Alternifolius* y con suelo pardo como sustrato. (Rojas, 2018)

Figura 18.

Esquema de tratamiento propuesto en el caso de estudio



Nota. En la imagen anterior se observa el esquema de fases para el tratamiento de agua residual. Tomado de: Rojas, W. I. (2018). *Diseño de un humedal subsuperficial para la depuración de las aguas. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas de Cuba.* Disponible: <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/10828/Willian%20Israel%20Barreno%20Rojas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

El humedal experimental mostró eficiencias de 70 % de remoción de color y de 80 % de remoción de materia orgánica, logrando la disminución de la concentración de la DQO por debajo del límite de vertimiento. Se realizó el diseño del humedal subsuperficial de flujo horizontal como

tratamiento secundario de las aguas residuales de la industria Lava Jeans. Finalmente, se realizó la evaluación económica del humedal subsuperficial, demostrándose la factibilidad de este, recuperándose la inversión al año de la puesta en funcionamiento. (Rojas, 2018)

Por otra parte, el estudio “*Tratamiento de aguas residuales por medio de un sistema acoplado de fotocatalisis – humedales*” evaluó el acoplamiento entre fotocatalisis y humedales artificiales como sistema de tratamiento para aguas residuales provenientes del proceso de producción de resinas fenólicas.

Los experimentos se desarrollaron en un fotoreactor a escala laboratorio compuesto por 4 lámparas con sistema de agitación y aireación. Posteriormente se realizaron ensayos preliminares en fotocatalisis variando el tiempo de exposición, adicionalmente, se construyeron 4 humedales artificiales de flujo horizontal con *Pistia stratiotes*, *Eichornia crassipes*, *Salvinia minima* y *Phragmites australis* respectivamente, con una concentración de fenol de 60 ppm. Después de 4 días de seguimiento solo sobrevivieron la *Eichornia crassipes* y la *Salvinia mínima*. (López & Rojas, 2008)

Tabla 9.

Porcentaje de degradación del fenol por medio de humedales artificiales

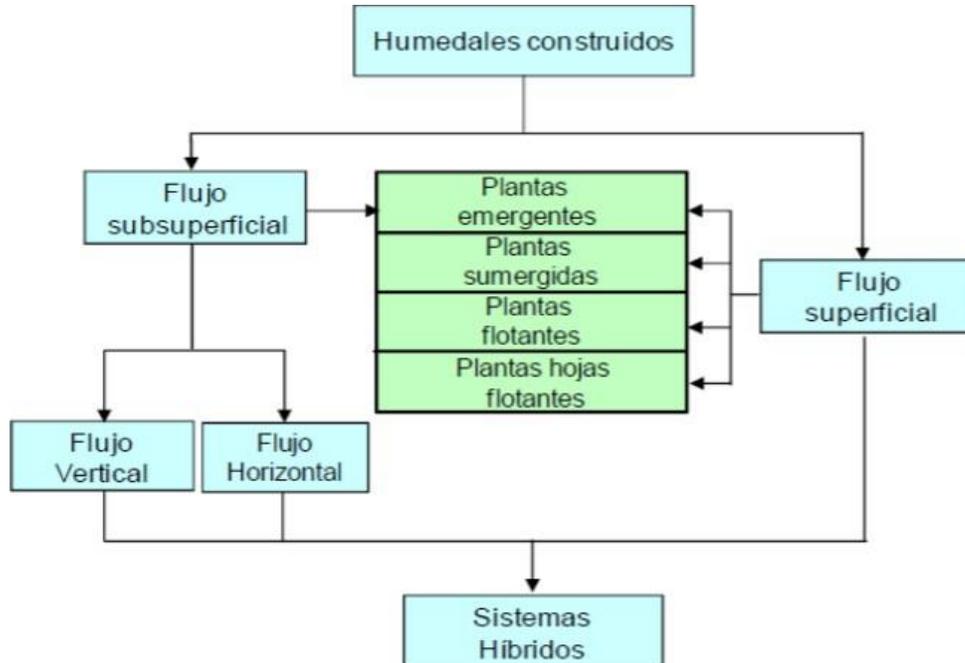
Especie	Concentración inicial de fenol (ppm)	Concentración final de fenol (ppm)	% de degradación del fenol
<i>Eichornia crassipes</i>	60.52	42.70	29.44
<i>Pistia stratiotes</i>	59.01	48.14	18.42
<i>Salvinia minima</i>	57.80	14.25	75.35
<i>Phragmites australis</i>	34.18	26.03	23.84

Nota. En la adaptación de los humedales al fenol el humedal con *Salvinia minima* fue uno de los que presentó mejor degradación de fenol (75.35%), lo que puede indicar que los microorganismos lograron adaptarse completamente a este contaminante. Tomado de: López, F. A., & Rojas, G. M. (2008). *Tratamiento de aguas residuales por medio de un sistema acoplado de fotocatalisis - humedales*. Disponible: https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/364/Fabian_ArroyaveLopez_2008.pdf;jsessionid=3585F6998E857DD3FA847F4ACBC013B8?sequence=1

A partir de esto, es importante tener presente las especificaciones de los diferentes tipos de humedales artificiales expuestos anteriormente y de esta manera conocer otro sistema el cuales conformado por la combinación de estos, denominados humedales combinados o híbridos como se evidencia en la figura 19.

Figura 19.

Conformación de humedales artificiales combinados o híbridos

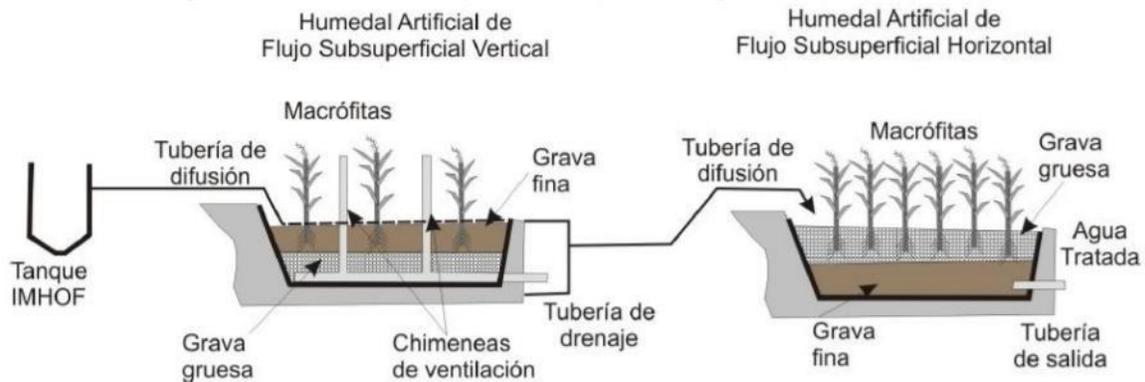


Nota. Los humedales artificiales híbridos son la combinación de los tipos de humedales expuestos a lo largo del documento. Tomado de: Rabat, J. (2016). *Escuela Politécnica Superior. Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración.* Disponible: <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm10/tfm10-jorge-rabat-blazquez.pdf>

Estos están conformados con el fin de complementar funciones depuradoras entre los mismos, por ejemplo, los humedales de flujo horizontal se caracterizan por mantener condiciones anóxicas, las cuales proporcionan condiciones adecuadas para la desnitrificación; en cambio, los humedales de flujo vertical mantienen condiciones aerobias, que favorecen el proceso de la nitrificación; de esta manera, estos humedales construidos en serie o con alternancia podrían potencializar la remoción de nitrógeno total, combinación la cual se puede ver en la figura 20 (Arteaga, y otros, 2019). También se podrían establecer combinaciones con humedales de flujo libre obteniendo resultados óptimos para el proceso de tratamiento del agua.

Figura 20.

Humedal artificial híbrido horizontal- vertical



Nota. Sistema de humedal híbrido. Tomado de: Rabat, J. (2016). *Escuela Politécnica Superior. Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración.* Disponible: <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm10/tfm10-jorge-rabat-blazquez.pdf>

Una de las desventajas de los sistemas híbridos es su alto costo de construcción y mantenimiento en comparación con los no híbridos, sin embargo, en los últimos años se ha incrementado el interés en estos por las propiedades complementarias que poseen. Los sistemas híbridos están ganando atención en la mayoría de los países europeos debido a los mayores requerimientos en la depuración de agua respecto a la reducción de la concentración de amonio. (Rabat, 2016)

La combinación de estos humedales brinda una mayor eficiencia en la depuración de aguas residuales en diferentes etapas del tratamiento, así que dependiendo de los contaminantes será la combinación óptima de estos sistemas híbridos. (Arteaga, y otros, 2019) A continuación se hace una recopilación de la información acerca de las distintas combinaciones de sistemas híbridos con relación a los diferentes tipos de afluentes usados para cada sistema:

Tabla 10.*Combinaciones de sistemas híbridos con relación a los diferentes tipos de afluentes*

TIPO DE HUMEDAL	PAÍS	TIPO DE AGUARESIDUAL
VF / HF	Reino Unido	Doméstica
VF / HF	Estados Unidos	Doméstica
VF / HF	Estonia	Doméstica
VF / HF	Francia	Doméstica
VF / HF	Irlanda	Doméstica
VF / HF	Túnez	Doméstica
HF / VF	Dinamarca	Doméstica
HF / VF	Polonia	Doméstica
HF / VF	México	Doméstica
FL / HF	Grecia	Doméstica
HF / FL	Canadá	Doméstica
HF / FL	Kenia	Doméstica
HF / VF / HF	Polonia	Doméstica
VF / HF / FL / P	Estonia	Doméstica
VF / HF / FL / P	Tailandia	Doméstica
HF / VF / HF / FL	Italia	Doméstica
VF / HF	Eslovenia	Lixiviados de rellenos sanitarios
HF / FL	Noruega	Lixiviados de rellenos sanitarios
HF / FL	Canadá	Lixiviados de rellenos sanitarios
FL / HF	Estados Unidos	Lixiviados de rellenos sanitarios
VF / HF / P	Portugal	Lixiviados de rellenos sanitarios
HF / VF	Nepal	Hospitalarios
VF / HF	Japón	Industria láctea
VF / HF	Francia	Industria láctea
VF / HF	Tailandia	Granjas porcinas
FL / HF	Taiwán	Acuicultura
FL / HF	China	Industrial
FL / HF	Uganda	Minería
VF / HF	Francia	Lixiviados de composta

Nota. En la tabla anterior se evidencia una recopilación de la información acerca de las distintas combinaciones de sistemas híbridos con relación a los diferentes tipos de afluentes usados para cada sistema VF: flujo vertical, HF: flujo horizontal, FL: flujo libre, P: estanque. Tomado de: *Arteaga, V., Quevedo, A., Paniagua, D., Castro, M., Bravo, Á., & Ramírez, J. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los*

mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Disponible: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v10n5/2007-2422-tca-10-05-319.pdf>

Teniendo en cuenta la tabla anterior, en la cual Arteaga y demás autores recopilan los tipos de combinaciones de los humedales híbridos y los efluentes donde fueron utilizados en diferentes países, en primer lugar, se presenta una serie de combinaciones para tratar aguas residuales domésticas, lixiviados de residuos presentes en los rellenos sanitarios, vertidos hospitalarios, industria alimenticia, minería, entre otros.

Sin embargo, se cuenta con la información de un tipo de vertido industrial relacionado con el sector objeto de estudio, el cual fue trabajado en China por medio de la combinación de un humedal de flujo libre con uno de tipo subsuperficial de flujo horizontal, por lo tanto se considera que esta combinación es la más adecuada como última etapa de tratamiento de los vertimientos textiles.

A continuación, se presenta la tabla 11, en la cual se utilizaron como datos base los valores promedio presentados en la tabla 7 de los parámetros que conforman los vertimientos textiles, además de enfatizar en los parámetros que no cumplen con la norma evidenciados en la tabla 8.

A partir de los cuales se aplicará el porcentaje de remoción de cada humedal identificado anteriormente, se debe tener en cuenta que los humedales de flujo libre o superficial se utilizan como tratamiento secundario en la depuración de aguas residuales, con una efectividad de remoción del 96% para SST, 96% para DBO, 87% para DQO y 30% para PT (fósforo total). (Arteaga, y otros, 2019)

Tabla 11.

Matriz de remoción de contaminantes aplicada

Parámetro	Proceso	Fibra	Valores (mg/L)		%		mg/L
			Vertimiento que no cumple con la norma	Res. 631 de 2015	Remoción humedal FL	Remoción humedal HF	Remoción del sistema de humedal aplicado
DBO ₅ mg/L	Descrude	Lana	1.500	200	96	/	60
	Batanado	Lana	1.400	200			56
DQO mg/L	Descrude	Lana	2.750	400	87	/	357
	Batanado		1.400	400			182
Grasas mg/L	Descrude	Lana	200	20	NA		
	Batanado		165				
pH	Descrude	Algodón	10 - 12	6-9	NA		
		Poliéster	8 - 10				
	Batanado	Lana	9 - 12				
	Carbonizado		3 - 10				
	Mercerizado	Lana, algodón, poliéster, entre otros	11 - 14				
Teñido	Algodón	6,9 - 10,7					
SST (mg/l)	/	Lana	1.212	50	96	/	49
Fenoles (mg/l)	/	/	0,60	0,20	/	75	0.15

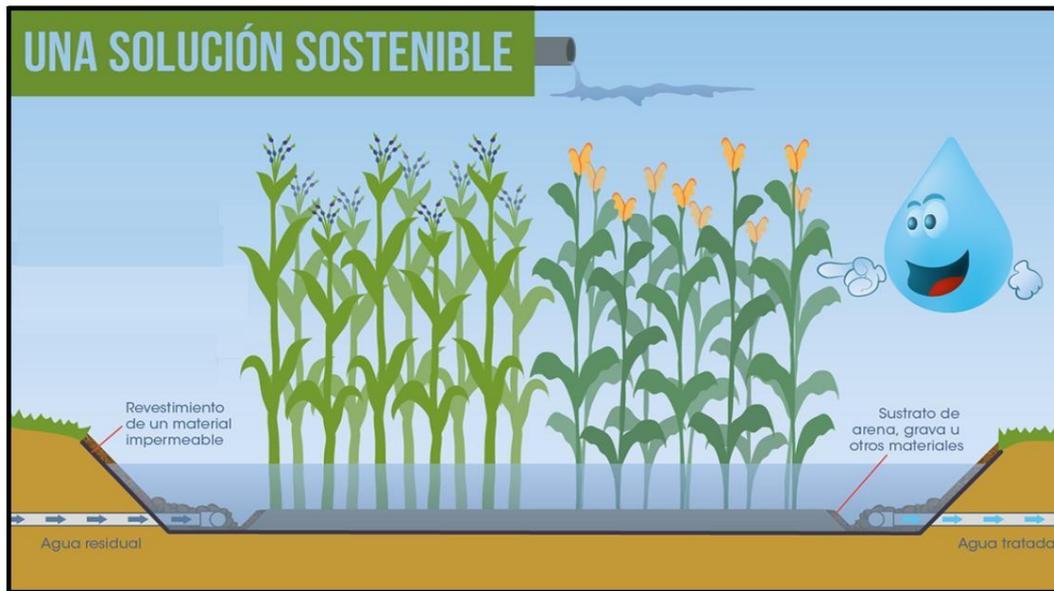
Nota. En esta tabla se utilizaron como datos base los valores promedio presentados en la tabla 7 de los parámetros que conforman los vertimientos textiles, además de enfatizar en los parámetros que no cumplen con la norma que resultan de la tabla 8. (NA: No Aplica)

Los resultados obtenidos en la tabla anterior, una vez aplicados los porcentajes de remoción de los sistemas de humedales propuestos, indican que este método de tratamiento resulta eficiente y un adecuado complemento a los tratamientos primarios y/o convencionales, ya que contribuye en la disminución de contaminantes y permiten que los parámetros fisicoquímicos que no alcanzan a

tener valores menores a los estipulados en la normatividad sean reducidos hasta cumplir con dicho requisito legal.

Figura 21.

Humedal artificial una solución sostenible



Nota. Humedal artificial como una solución sostenible para los procesos de depuración de agua residual. Tomado de: Aguilar, R., & Espinoza, R. (2019). *Humedal artificial: una propuesta para el manejo de aguas residuales*. Universidad de Costa Rica. Disponible: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/02/15/humedal-artificial-una-propuesta-para-el-manejo-de-aguas-residuales.html>

Por lo cual se puede considerar esta alternativa como una solución sostenible como se puede ver en la Figura 21, en el postratamiento de aguas residuales con el fin de reducir el impacto socioambiental presente en los cuerpos de agua.

8. CONCLUSIONES

Las etapas de la cadena de valor textil que contemplan procesos húmedos son la preparación, teñido y acabados los cuales aportan la mayor parte de los efluentes acuosos de esta industria.

Los sistemas de humedales artificiales resultan ser una opción sostenible para la depuración de aguas residuales domésticas y como método complementario para el tratamiento de las aguas residuales industriales, teniendo en cuenta su respectiva clasificación como los humedales de flujo libre o superficial, subsuperficial de flujo horizontal y vertical, entre otros.

La combinación propuesta de un humedal subsuperficial de flujo horizontal y uno de flujo libre resulta ideal para la disminución de los valores que no cumplían con la Resolución 0631 de 2015 en relación con la fabricación de productos textiles.

BIBLIOGRAFÍA

Agencia de Cooperación Internacional de Alemania. (2011). *Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas*. Disponible: https://www.susana.org/_resources/documents/default/2-1235-giz2011-technology-review-constructed-wetlands-in-spanish.pdf

Agua Simple. (2015). *Aguas residuales de la industria textil*. Disponible: http://aguasimple.org.mx/revistav4/index.php?option=com_content&view=article&id=272:i-que-podemos-hacer-contral-las-sequias&catid=45:notas-de-agua-v4&Itemid=6#:~:text=El%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales,r%C3%A9a%20permaneciendo%20en%20el%20ambien

Aquaberri. (2017). *Tecnologías naturales de depuración y tratamiento de aguas. Humedales artificiales*. Disponible: <http://aquaberri.com/>

Aguilar, R., & Espinoza, R. (2019). *Humedal artificial: una propuesta para el manejo de aguas residuales*. Universidad de Costa Rica. Disponible: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/02/15/humedal-artificial-una-propuesta-para-el-manejo-de-aguas-residuales.html>

Arteaga, V., Quevedo, A., Paniagua, D., Castro, M., Bravo, Á., & Ramírez, J. (2019). *Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Disponible: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v10n5/2007-2422-tca-10-05-319.pdf>

Baldeón, H., & Carrión, L. (2015). *Remoción de cromo de agua residual de la industria textil con filtros de arcilla*. Universidad Nacional del Centro del Perú. Disponible: <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3727/Balde%c3%b2n%20Garcia-Carri%c3%b2n%20Espinoza.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Condorchem Envitech. (2019). *Tratamiento de aguas. Sector textil*. Disponible:

<https://condorchem.com/es/sectores/textil/>

Consejo intertextil español. (2014). *Proyecto Textil*. Disponible: <https://textil.ibv.org/el-proyecto/el-sector-textil/siniestralidad/#>

Cortez, V. M. (2018). *Propuesta metodológica para la construcción de humedales artificiales*. Disponible: <https://www.biopasos.com/biblioteca/Propuesta-metodologica-construccions-humedales-artificiales.pdf>

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Vegetación*. Universidad Mayor de San Simón Bolivia. Disponible: <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>

Espinoza, D. V., & Barbosa, R. G. (2015). *Uso de humedales artificiales de flujo subsuperficial para postratamiento de aguas residuales de la industria textil*. Universidad de Guanajuato. Disponible: <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/98/pdf1>

Gilpavas, E., Arbeláez, P., Medina, J., & Gómez, C. (2017). *Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante ultrasonido de baja frecuencia*. Universidad Escuela de Administración, Finanzas y Tecnología. Disponible: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v34n1/0188-4999-rica-34-01-157.pdf>

Guerra, J. T., Vargas, J. M., Aguirre, R. P., & Huaranga, M. C. (2015). *Evaluación de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales para riego mediante Humedales Artificiales de flujo libre superficial (FLS) con las especies Cyperus Papyrus y Phragmites Australis, en Carapongo Lurigancho*. Disponible: <file:///C:/Users/DANIEL/Downloads/637-Texto%20del%20art%C3%ADculo-817-1-10-20180524.pdf>

José Luis Soto Fuster. (2016). *Estudio de aplicabilidad de humedales artificiales para la mejora de la calidad de las aguas en los meandros abandonados del río Segura*. Universidad Politécnica de Valencia. Disponible: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/70818/01_Estudio%20de%20aplicabilidad%20de%20humedales%20artificiales%20para%20la%20mejora%20de%20la%20calidad%20de%20las%20aguas%20en%20los%20meandros%20abandonados%20del%20r%C3%ado%20Segura.pdf?sequence=1&isA

Latarjere, J. (2018). *Saneamiento sostenible y caja de herramientas de gestión del agua. Humedal artificial de flujo superficial libre*. Disponible: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/humedal-artificial-de-flujo-superficial-libre>

lanotapositiva. (2020). *Colombia es uno de los países con mayor riqueza hídrica del mundo*. Disponible: https://lanotapositiva.com/actualidad/colombia-es-uno-de-los-paises-con-mayor-riqueza-hidrica-del-mundo_34870

Linares, E. Y., & Álvarez, M. J. (2016). *Universidad de La Salle. 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*. Disponible: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1374&context=ing_ambiental_sanitaria

López, F. A., & Rojas, G. M. (2008). *Tratamiento de aguas residuales por medio de un sistema acoplado de fotocatalisis - humedales*. Disponible: https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/364/Fabian_ArroyaveLopez_2008.pdf;jsessionid=3585F6998E857DD3FA847F4ACBC013B8?sequence=1

López, V., & Crespi, M. (2015). *Gestión de los efluentes de la industria textil*. Disponible: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/87574/Gesti%C3%B3n%20efluentes%20textiles%20Num18.pdf>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Universidad Nacional de Colombia. (2015). Programas integrales de gestión ambiental sectorial. disponible: convenio interadministrativo un-mads no. 338/2015 - Subsector textil. Disponible: https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Sello_ambiental_colombiano/PGAS_Textil_final_.pdf*
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). Humedales. Disponible: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/411-plantilla-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos-13>*
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 0631. Disponible: https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf*
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Vertimiento. Disponible: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/1700-minambiente-presenta-nueva-norma-de-vertimientos-que-permitira-mejorar-la-calidad-agua-del-pais#:~:text=Re%C3%BAso%20de%20aguas%20residuales%20tratadas.&text=Vertimiento%3A%20Descarga%20final%20a%20un>*
- Ministerio de vivienda. (2017). Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. Disponible: <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/0330-2017.pdf>*
- Moksa. (2020). Ingeniería Verde. Humedales artificiales o biofiltración. Disponible: <https://moksa.com.co/biofiltracion/>*
- Mora, M. D. (2014). Fitodepuración en humedales. Conceptos generales. Disponible: <https://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion/Cap%EDtulos%20Manual/Cap%EDtulos%205.pdf>*
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2012).*

Educación para el desarrollo sostenible. Disponible:
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000216756>

Paimed. (2021). Fitodepuración. Mecanismos de remoción de contaminantes. Disponible:
<https://paimed.com/fitodepuracion-de-aguas-residuales/>

Programa de las Naciones Unidas ONU. (2018). Manual de humedales artificiales. Disponible:
https://issuu.com/frederys1712doc/docs/manual_de_humedales_artificiales

Rabat, J. (2016). Escuela Politécnica Superior. Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración. Disponible: <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm10/tfm10-jorge-rabat-blazquez.pdf>

Ramírez, L. C., Echavarría, J. G. (2018). Construcción de un humedal artificial a nivel de laboratorio vivo, en el predio “Mi Ranchito”, en la vereda Olarte, Localidad Usme Bogotá. Universidad Católica de Colombia. Disponible:
<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16848/1/Trabajo%20de%20Grado.pdf>

Remtavares. (2013). Humedales artificiales como sistemas naturales de depuración de aguas residuales. Conceptos e historia. Disponible:
<https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2013/05/16/131891>

Rivas, A., & Paredes, D. (2014). Universidad Tecnológica de Pereira. Sistemas de humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua. Disponible: https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/sistemas-de-humedales/files/assets/common/downloads/publication.pdf

Rojas, W. I. (2018). Diseño de un humedal subsuperficial para la depuración de las aguas. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas de Cuba. Disponible:
<https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/10828/Willian%20Israel%20OBarreno%20Rojas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Salas, J. J. (2021). *Introducción a los Humedales Artificiales como tratamiento de las aguas residuales*. Disponible: <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/introduccion-humedales-artificiales-como-tratamiento-aguas-residuales>

Secretaria Distrital de Ambiente. (1974). *Código de los Recursos Naturales Renovables y Protección del Medio Ambiente. Artículo 137*. Disponible: <http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/normatividad2>

Sifuentes, K. (2018). *Universidad César Vallejo, Perú*. Eficiencia del berro (*Nasturtium officinale*) de diferentes edades en humedales artificiales para la depuración de los purines de la porcícola comunal de Acopalca-Huari-Ancash-2018. Disponible: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/18314/SiNota:s_RLK.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Suárez, A., Agudelo, N., Rincón, J., & Millán, N. (2014). *Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Disponible: <https://revistas.utadeo.edu.co/index.php/mutis/article/view/905/945>

Unigarro, G. D., Zambrano, H., & Gallo, S. C. (2015). *Tratamiento de aguas residuales textiles a partir de métodos biológicos*. Disponible: <https://biblat.unam.mx/hevila/RevistaCintex/2015/vol20/no1/6.pdf>

Valencia, N. R. (2020). *Federación Nacional de cafeteros de Colombia*. *Humedales artificiales: Una alternativa para el postratamiento de aguas residuales agroindustriales. Componentes de un humedal artificial*. Disponible: https://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/2_Humedales_artificiales_Conceptos_y_resultados_en_el%20sector_cafetero.pdf