 Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña - Colombia Virreinato Mineducación	<b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b>			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
<b>FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO</b>	<b>F-AC-DBL-007</b>	<b>08-07-2021</b>	<b>B</b>	
Dependencia	Aprobado		Pág.	
<b>DIVISIÓN DE BIBLIOTECA</b>	<b>SUBDIRECTOR ACADEMICO</b>		<b>1(150)</b>	

## RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

<b>AUTORES</b>	Ana María Manzano Barbosa Jasveily Yuliany Salazar Carrascal		
<b>FACULTAD</b>	Ingenierías		
<b>PLAN DE ESTUDIOS</b>	Ingeniería Civil		
<b>DIRECTOR</b>	Agustín Armando Macgregor Torrado		
<b>TÍTULO DE LA TESIS</b>	Estudio y análisis de los procesos que se llevan a cabo para el tratamiento de aguas residuales mediante métodos no convencionales como lo son los filtros percoladores y la fitorremediación		
<b>TITULO EN INGLES</b>	Study and analysis of the processes carried out for the treatment of wastewater using non-conventional methods such as trickling filters and phytoremediation		
<b>RESUMEN</b> (70 palabras)			
En la presente monografía se realizará una recopilación de información sobre los filtros percoladores y la fitorremediación como sistemas para el tratamiento de aguas residuales, donde se podrán observar sus procesos constructivos y especificaciones técnicas; además, se compararán sus porcentajes de remoción respecto a una PTAR y se planteará una propuesta donde se unan estos dos sistemas y poder así obtener mejores resultados en la descontaminación del agua.			
<b>RESUMEN EN INGLES</b>			
In this monograph, a compilation of information on trickling filters and phytoremediation as systems for wastewater treatment will be carried out, where their construction processes and technical specifications can be observed; In addition, their removal percentages will be compared with respect to a WWTP and a proposal will be put forward where these two systems are joined and thus be able to obtain better results in water decontamination.			
<b>CARACTERÍSTICAS</b>			
PÁGINAS: 152	PLANOS:	ILUSTRACIONES: 28	CD-ROM:



**Estudio y análisis de los procesos que se llevan a cabo para el tratamiento de aguas  
residuales mediante métodos no convencionales como lo son los filtros percoladores y la  
fitorremediación**

**Jasveily Yuliany Salazar Carrascal**

**Ana María Manzano Barbosa**

**Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña**

**Ingeniería Civil**

**Esp. Agustín Armando Macgregor Torrado**

**Marzo de 2023**

## Índice

Capítulo 1. Generalidades.....	18
1.1 Antecedentes del tratamiento de las aguas residuales, implementando sistemas como los filtros percoladores y la fitorremediación .....	18
1.1.1 Historia del tratamiento de aguas residuales.....	18
1.1.2 Evolución de las técnicas de tratamiento de aguas residuales: filtro percoladores y fitorremediación .....	20
1.1.3 Compilación de investigaciones para filtro percoladores y fitorremediación .....	22
1.2 Conceptos.....	26
Capítulo 2. Descripción de las características particulares en lo que respecta a los procesos que suceden en el tratamiento de las aguas residuales por medio de filtros percoladores y fitorremediación .....	39
2.1 Filtros percoladores.....	39
2.2 Fitorremediación .....	48
2.3 Similitudes y diferencias entre Filtros percoladores y Fitorremediación .....	54
Capítulo 3. Consideraciones para su diseño y construcción y funcionamiento .....	56
3.1 Filtros percoladores.....	56
3.1.1 Tipos de medios filtrantes .....	59
3.1.2 Sistemas de Drenaje Inferior.....	62
3.1.3 Ventilación.....	62

3.1.4 Distribución de flujo .....	62
3.1.5 Recirculación .....	65
3.2 Fitorremediación .....	66
3.2.1 Humedales artificiales.....	66
3.2.2 Lineamientos para la selección de especies de plantas para la fitorremediación .	74
3.2.3 Tipos y características de medios filtrantes .....	74
3.2.4 Factores ambientales.....	76
3.3 Caracterización de las aguas residuales .....	78
Capítulo 4. Proceso constructivo y especificaciones técnicas .....	80
4.1 Filtros percoladores.....	80
4.1.1 Forma del filtro .....	80
4.1.2 Paredes .....	80
4.1.3 Cúpula.....	81
4.1.4 Drenaje.....	81
4.1.5 Estructura de Soportes .....	82
.....	83
4.1.6 Especificaciones del medio de soporte .....	84
4.1.7 Proceso constructivo .....	85
4.2 Fitorremediación .....	86
4.2.1 Proceso constructivo.....	86

Capítulo 5. Marco Normativo .....	88
5.1 Normativas Nacionales .....	88
5.2 Normativas Internacionales .....	96
Capítulo 6. Comparación de los sistemas estudiados versus los sistemas convencionales tipo PTAR, analizando los porcentajes de remoción de contaminantes .....	98
6.1 Cuadro comparativo Filtros Percoladores.....	99
6.2 Cuadro comparativo Fitorremediación .....	101
6.3 Análisis de la investigación suministrada en las tablas 18 y 19 .....	104
6.4 Cuadro comparativo PTAR.....	107
6.5 Análisis de los sistemas estudiados versus una PTAR .....	109
Capítulo 7. Propuesta empírica de sistema de tratamiento .....	112
Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones .....	137
8.1 Conclusiones .....	137
8.2 Recomendaciones .....	138
Referencias.....	140

## Lista de figuras

Figura 1 Procesos en el tratamiento de las aguas residuales.....	29
Figura 2 Cribado .....	30
Figura 3 Desarenador.....	30
Figura 4 Puente desengrasador. ....	31
Figura 5 Rejas de desbaste.....	32
Figura 6 Decantador.....	34
Figura 7 Proceso de un sistema de Biomasa en Suspensión.....	35
Figura 8 Diseño de las lagunas de oxidación.....	36
Figura 9 Esquema de un filtro percolador.....	43
Figura 10 Proceso de formación de la biopelícula.....	44
Figura 11 Proceso del tratamiento de aguas residuales por fitorremediación .....	50
Figura 12 Técnicas de fitorremediación .....	52
Figura 13 Modelo de un filtro percolador.....	58
Figura 14 Corte y detalles de un filtro percolador típico .....	58
Figura 15 Medio de soporte de piedra .....	61
Figura 16 Medio de soporte de piezas de plástico .....	61
Figura 17 Distribuidor rotativo con chorro de frenado y accionamiento eléctrico.....	64
Figura 18 Humedal de flujo superficial con macrófitas flotantes.....	68
Figura 19 Humedal de flujo superficial con macrófitas sumergidas .....	69
Figura 20 Humedal subsuperficial de flujo horizontal .....	70
Figura 21 Humedal subsuperficial de flujo vertical.....	71

Figura 22 Sistemas de soporte (a).....	83
Figura 23 Sistemas de soporte (b).....	83
Figura 24 Filtrado de aguas residuales.....	118
Figura 25 Partes del filtro percolador. ....	120
Figura 26 Esquema funcionamiento filtro percolador + decantación secundaria.....	123
Figura 27 Eichhornia crassipes, el Camalote, Lirio o Jacinto de agua .....	129
Figura 28 Diagrama de flujo para tratamiento de aguas residuales propuesto .....	135

## Lista de tablas

Tabla 1 Investigaciones de Filtro Percoladores .....	23
Tabla 2 Investigaciones de Fitorremediación .....	25
Tabla 3 Tiempo de retención en horas para sedimentadores primarios.....	33
Tabla 4 Valores para cargas superficiales en $m^3/m^2 \cdot h$ para decantadores primarios.....	33
Tabla 5 Ventajas y desventajas de este método de tratamiento de aguas residuales. ....	53
Tabla 6 Similitudes y diferencias entre Filtros percoladores y Fitorremediación .....	54
Tabla 7 Resumen de los tipos de tratamiento y descripción de los tipos de contaminantes que elimina en el agua residual.....	54
Tabla 8 Información típica para el diseño de los filtros percoladores. ....	57
Tabla 9 Características de los medios filtrantes.....	60
Tabla 10 Efecto del diseño de distribuidor en el valor Spülkraft (SK).....	64
Tabla 11 Caracterización de parámetros fisicoquímicos .....	78
Tabla 12 Proceso constructivo de filtro percoladores.....	85
Tabla 13 Proceso constructivo de Humedales Artificiales .....	86
Tabla 14 Parámetros mínimos que se tienen que medir por cada nivel de complejidad .....	89
Tabla 15 Distancias mínimas para la localización de sistemas de tratamiento de aguas residuales con relación a otra infraestructura.....	91
Tabla 16 Rangos de eficiencia que se deben lograr en los procesos de tratamiento .....	91
Tabla 17 Niveles admisibles para verter una masa de agua natural. ....	96
Tabla 18 Cuadro comparativo Filtros Percoladores.....	99
Tabla 19 Cuadro comparativo Fitorremediación .....	101



Tabla 20 Cuadro comparativo PTAR .....	107
Tabla 21 Remoción de cada uno de los contaminantes .....	110
Tabla 22 Valores permisibles máx. de contaminantes en los vertimientos y la fase del tratamiento de aguas residuales en la que se eliminan.....	116
Tabla 23 Tamaño del tamiz y su respectivo porcentaje en peso.....	121
Tabla 24 Porcentajes de remoción esperados. ....	125
Tabla 25 Taxonomía <i>Eichornia crassipes</i> (Lirio acuático) .....	128
Tabla 26 Valores máximos admisibles para consumo humano .....	133
Tabla 27 Valores máximos admisibles para consumo humano .....	134

## Glosario

**Absorción:** en química hace referencia a retener una sustancia por las moléculas que tiene otra, ya sea en estado gaseoso o líquido. (Significados, 2017)

**Adsorción:** en este proceso se retienen o se atrapan en la superficie de un material átomos, moléculas o iones. (Quimica.es, 2004)

**Aeróbico:** Hace referencia a la forma en que el organismo obtiene su energía, este se da por una necesidad del oxígeno. (Lara, 2007)

**Afluente:** Ríos secundarios, que desembocan en ríos superiores o que tienen una mayor importancia. (Pérez Porto & Gardey, 2011)

**Agentes patógenos:** Son todas aquellas entidades biológicas que son capaces de producir enfermedades infecciosas en una persona, animal, incluso en una planta. (Alves T. , 2023)

**Aguas residuales:** Son aguas impuras que se originan en vertidos de distintos orígenes, principalmente de origen industrial y doméstico. (Ecomar, E., 2020).

**Anaeróbico:** Hace referencia a la forma en que el organismo obtiene su energía, este se da sin necesidad del oxígeno. (Lara, 2007)

**Bacterias:** Son microorganismos unicelulares, es decir, que son células procariotas, que no tiene núcleo, ni orgánulos fibrosos internos. (Alves T. , 2023)

**Biomasa:** Compuesto orgánico usado como fuente de energía. (APPA Renovables, 2021).

**Biopelícula:** conjunto de microorganismos y bacterias que se desarrollan y se fijan en la superficie de una estructura. (Diccionario de cáncer del NCI).

**Cauce:** terreno por donde corren cuerpos de agua, por lo general corresponde con la línea que junta los puntos bajos del valle de los ríos. (Comunidad planeta azul, 2017).

**Caudal:** Volumen de agua que viaja por el cauce de un cuerpo de agua. (Comunidad planeta azul, 2017).

**Coliformes fecales:** Por lo general son de origen fecal, y provienen de aguas que se comercializan como potables, aguas residuales industriales, materia vegetal en descomposición entre otros. (Microlab Industrial).

**Contaminación hídrica:** Es esa que tiene cambios en su composición por lo que ya no sirve para el consumo. (Iberdrola, 2021)

**Contaminantes orgánicos:** Conjunto de compuestos químicos donde en su composición siempre interviene el carbono, exceptuando al carbono mismo. (Tierra rediris. es).

**Demanda bioquímica de oxígeno (DBO):** Oxígeno que consumen los microbios, a lo largo de la degradación de la materia orgánica que contiene la muestra. (Induanalisis, 2019)

**Demanda química de oxígeno (DQO):** Oxígeno necesario para poder oxidar sustancias orgánicas a través de químicos y convertirla en agua y dióxido de carbono. (Induanalisis, 2019).

**Depuración:** Realizar operaciones físicas, químicas y biológicas para poder reducir la contaminación presente en el agua. (Pérez Porto & Gardey, 2012).

**Efluente:** Es agua contaminada que sale de un cuerpo de agua o de una planta de tratamiento. (Franchi & Asociados, 2019)

**Ex situ:** fuera del lugar

**Fitotecnologías:** Campo de la biología vegetal que investiga los métodos que facilitan el nacimiento y crecimiento de las plantas. (dicciomed, 2018)

**Granulometría:** Proceso por el cual se determina el tamaño de las partículas ya sean piedras o granos de arena. (Pérez Porto J. , 2021)

**Hidroponía:** sistema donde se cultivan plantas en superficies diferentes al suelo (Intagri, 2017).

**In situ:** Dentro del lugar o en el lugar.

**Lecho:** Método físico que desempeña la función de interceptar el paso de contaminantes presentes en el agua. (Donaldson, soluciones de filtración, 2012)

**Macrófito:** Especie de planta acuática macroscópica, puede estar emergente, flotando o sumergida. (boletín agrario, 2013).

**Metabolización:** Cambios que se muestran en células u organismos en procesos químicos. (Diccionario de cáncer del NCI)

**Plantas transgénicas:** Son plantas modificadas a través de la ingeniería genética. (Hernández, 2019).

**Purificación:** en este proceso se eliminan contaminantes presentes en la masa de agua y hacerla potable. (Rotoplas, 2018).

**Rizosfera:** Es el fragmento del suelo que está más cerca a la raíz de la planta. ( Márquez, 2021).

**Sedimentos:** materias que estuvieron en suspensión dentro de un líquido, pero por su peso y por gravedad terminan en el fondo. (Pérez Porto & Gardey, 2010).

**Sistema radicular:** Agrupación de raíces en las plantas. (Intagri, 2017)

**Sólidos suspendidos totales (SST):** se refiere a las partículas sólidas que permanecen en suspensión en la masa de agua superficial y residual. (CAN, 2005)

**Sostenibilidad:** se debe garantizar el equilibrio en aspectos económicos, ambientales y sociales. (Santander Universidades, 2022)

**Sustrato:** Medio de origen natural o residual que facilita la adhesión del sistema radicular. (Agroequipos del valle, 2018)

**TOC:** carbono orgánico total (HACH, 2020).

**Volatilización:** Aquí ocurre un cambio de estado donde una materia se convierte de sólido a gaseoso, sin pasar por el líquido, esto sucede por un aumento de temperatura. (Glosario Química, 2017)

## Resumen

La implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales puede ser una opción costosa, además, usan químicos para acelerar la depuración del agua y consumen un alto nivel de energía por lo que también causan efectos nocivos en el medio ambiente. Por consiguiente, en el presente trabajo de grado se exponen dos sistemas para el tratamiento de estas aguas, donde el uso de energía es muy reducido o en su defecto nulo, haciendo posible que el retorno de este preciado líquido al medio sea con una muy buena calidad y sin generar daños al ambiente; estos métodos hacen parte de un grupo de sistemas que dan paso a la construcción de infraestructuras sostenibles y sustentables. Los filtros percoladores se presentan como una opción sostenible y eficaz, puesto que no es necesaria la energía para su aireación por lo que su demanda energética es muy inferior a la de otros sistemas; y la fitorremediación utiliza las capacidades que tienen algunas plantas para absorber, metabolizar y también de estabilizar los contaminantes que trae el agua residual, mejorando la calidad del agua y brindándole al medio ambiente un equilibrio y a las personas una reutilización segura del agua. Por ello, para realizar el trabajo de grado presente, se efectuó una investigación en la cual se hizo una revisión de distintas referencias que fueron encontradas gracias a la recopilación de varias fuentes de información y dándoles un orden de tal manera que se implementara un sistema de forma empírica donde se mostrará la unión de los dos sistemas mencionados y además se realizó la evaluación de los resultados en porcentajes de remoción de químicos y sólidos que se hallan suspendidos y disueltos en aguas residuales.

## Introducción

La siguiente monografía consiste en el estudio y análisis de procesos para el tratamiento de aguas residuales mediante métodos no convencionales como lo son los filtros percoladores y la fitorremediación, puesto que son temas a los cuales se les han hecho poco seguimiento, teniendo en cuenta que estos son relevantes respecto a su economía y eficiente funcionalidad frente a los tratamientos convencionales.

Desde hace un tiempo, el mundo ha estado sufriendo una problemática que afecta directamente a los seres vivos, de manera especial a la población humana, esto se debe a la escasez que hay en las reservas de las fuentes de agua dulce las cuales se ven cada día más contaminadas y dan lugar al crecimiento de microorganismos que generan malestares en los seres humanos puesto que “más del 80% de las aguas residuales son resultado de la acción humana y estas son vertidas en ríos o mares sin ser tratadas provocando a su vez contaminación” (Organización de Naciones Unidas, 2020), también el calentamiento global ayuda a la disminución de las mismas, por lo que se hace cada vez más indispensable el tratamiento de las aguas ya usadas para eliminar o reducir la contaminación que se presentan en estas o en su defecto sustancias no deseables que traen consigo las aguas de lavado, las grasas, entre otras, y posteriormente a esto poder ser reutilizadas para el consumo.

El agua para este siglo se encuentra como un factor geopolítico de alto poder, ya que es indispensable en la vida de los seres humanos y no obstante por la escasez y poca disponibilidad que se tiene en este momento. Actualmente un aproximado de 2100 millones de personas no

tienen cómo acceder a una fuente de agua potable y se prevé que para el año 2025, es decir en 3 años aproximadamente más de 3500 millones de personas estarían sufriendo una escasez de agua por la que nunca antes habían atravesado en sus vidas y que la humanidad nunca había presenciado (ACNUR Comité Español, 2019). “Para el 2050 se tiene previsto que entre 4800 millones y 5700 millones de personas residirán en lugares con estrés hídrico, es decir, con alta demanda en la cantidad de agua lo que involucraría un crecimiento del 55% de esta, mayormente en el área industrial, y también en producción eléctrica y uso doméstico.” (CAMPUS revolución de las ideas, 2021)

A causa del alto costo y el complejo mantenimiento y operación ligados con la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales, se han estado estudiando diferentes alternativas que permiten hacer una depuración del agua, reemplazando en gran modo los métodos de tratamiento convencionales y con los cuales se consiguen unos porcentajes de remoción similares, o en caso tal, mayores que en estos sistemas; unas de estas alternativas que se han estudiado y con las cuales se han obtenido porcentajes de remoción de SST (Sólidos Suspendidos Totales), DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y DQO (Demanda Química de Oxígeno) considerables, son los filtros percoladores y la fitorremediación.

La implementación de estos sistemas es una manera novedosa y sostenible para el medio ambiente, pues para la construcción de estos no es necesario la utilización de muchos materiales de construcción y las plantas mismas se encargarán de realizar los procesos físicos, químicos y biológicos para descontaminar el agua. Dichos procedimientos traen consigo muchas bondades ya que para la mitigación de los agentes contaminantes no se utilizan componentes químicos,



puesto que existen plantas macrófitos emergentes que se encargan de realizar este proceso naturalmente.

La intención de este trabajo es compilar información sobre estudios realizados donde se hayan implementado sistemas como los filtros percoladores y también como la fitorremediación, para así tener un conocimiento sobre cuáles son sus procesos en el tratamiento de aguas residuales y de igual forma conocer como tal su proceso constructivo para la implementación, esto con el fin de establecer una hipótesis de cómo funcionaría una unión de estos dos tratamientos, como también las especificaciones técnicas que conlleva, y así mismo una comparación en los niveles de descontaminación que estos presentan frente a los requerimientos mínimos presentados por el Instituto Departamental de Salud (IDS) de descontaminación para las plantas de tratamiento convencionales, siendo el caso específico de estudio de esta monografía las PTAR.

Para poder cumplir con el propósito de este trabajo se ejecutará una compilación, la cual trata de realizar una recopilación y selección de información de diferentes referencias bibliográficas, procedentes de bibliotecas, libros, sitios web, periódicos, bases de datos y trabajos documentales como proyectos de grado, revistas científicas e informes técnicos, así como investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional, que tiene como objetivo brindar un documento académico que cumpla con propósitos de información y debate, donde se pueda hacer una interpretación y comparación entre métodos no convencionales para el tratamiento de aguas residuales como los son filtro percoladores y fitorremediación, con otros métodos

convencionales como lo son las PTAR, las cuales son usadas con mucha frecuencia para la purificación de aguas residuales.

En los próximos 8 capítulos se tienen: 1. Generalidades: Antecedentes. 2. Descripción de las características particulares en lo que respecta a los procesos que suceden en el tratamiento de las aguas residuales por medio de filtros percoladores y fitorremediación. 3. Consideraciones para su diseño y construcción y funcionamiento. 4. Proceso constructivo y especificaciones técnicas. 5. Marco normativo. 6. Comparación de los sistemas estudiados versus los sistemas convencionales tipo PTAR, analizando los porcentajes de remoción de contaminantes. 7. Propuesta empírica de sistema de tratamiento. 8. Conclusiones y recomendaciones.

## Capítulo 1. Generalidades

### 1.1 Antecedentes del tratamiento de las aguas residuales, implementando sistemas como los filtros percoladores y la fitorremediación

#### 1.1.1 Historia del tratamiento de aguas residuales

Para el tiempo transcurrido entre 4.000 y 2.000 a.C. ya se empleaban tratamientos de purificación, así como lo es ebulir el agua, colocarla al sol, filtrarla con carbón o arena, o también acumularla en envases de cobre, asimismo en el viejo Egipto, colocaban a reposar el agua durante unos meses en cántaros de arcilla para hacer que las partículas e impurezas se fueran al vacío y posteriormente ser separadas (decantadas) del fluido. (Higieneambiental, 2018).

Los antiguos griegos para los años 300 a. C. a 500 d. C. usaban retretes públicos que desembocaban en alcantarillas donde se trasladaban aguas residuales y de lluvia a un desagüe en las afueras de la población. Desde allí, el agua restante se canalizaba a través de abrevaderos de ladrillo a tierras agrícolas para fertilizar cultivos y huertas; sin embargo, la saturación de los terrenos con esta agua se convirtió en un grave problema, y la continua expansión de las ciudades dificultó la búsqueda de terrenos disponibles para este fin. ( López Vázquez, Buitrón Méndez, García, & Cervantes Carrillo, 2017).

Después de muchos años de estancamiento, Joseph Amy en 1749 patenta el primer diseño de filtro de agua en el mundo. Durante las siguientes décadas, los escoceses tomaron la iniciativa

y fue John Gibb quien inventó el filtro inicial apto para el suministro de agua depurada a toda la urbe de Paisley, poco después, se suministró a los consumidores de Glasgow. (Higieneambiental, 2018).

La primera planta de tratamiento de aguas residuales se construyó en París en 1806. El agua se sedimentaba allí durante 12 horas y se depuraba. Más tarde, a fines del siglo XIX, Inglaterra experimentó con la ventilación de alcantarillado, mientras que Estados Unidos introdujo por primera vez la rejilla gruesa, una herramienta para evitar la obstrucción de tuberías con objetos voluminosos. (Teamb, 2019).

En 1902 entra en operatividad el primer sistema permanente de tratamiento de aguas residuales con cloración de agua. Para este proceso, el cloruro de calcio y el cloruro férrico se agregan al agua a través del grifo antes de la filtración. La cloración continua del hídrico potable también inició en Gran Bretaña a inicios del siglo XX. (Higieneambiental, 2018).

Después de la buena acogida en Europa, la cloración del agua esterilizada se empezó a realizar en Jersey City, EE. UU., después de que el Dr. John L. Leal, médico y experto en tratamiento de agua, diseñó e implementó la primera planta depuradora en los Estados Unidos para proporcionar agua clorada. Para 1914, alrededor de 21 millones de individuos en los Estados Unidos bebían recursos hídricos clorados, y en el año 1918, se estableció que 1000 localidades de este país empleaban cloro para esterilizar sus abastecimientos de agua, abasteciendo aproximadamente 33 millones de personas. (Higieneambiental, 2018).

Aunque numerosos de los importantes hitos en la historia de la depuración del agua sucedieron en la época del XIX e inicios del XX, la industria continuó desarrollando y refinando el proceso de tratamiento del agua. El ritmo de la invención y la creación en el período de los XX y comienzos del siglo XXI ha destacado con creces a todos los períodos anteriores. (Higieneambiental, 2018).

### ***1.1.2 Evolución de las técnicas de tratamiento de aguas residuales: filtro percoladores y fitorremediación***

Para 1893 en Inglaterra se dio por primera vez el funcionamiento del filtro percolador; este concepto se originó por la utilización de filtros de empalme, los cuales fueron cisternas impermeables que estaban repletos de piedras trituradas. La forma en que funcionaba se trataba en que el lecho de contacto se llenaba por la parte superior con las aguas residuales y se dejaba que el agua tuviese contacto con el medio ambiente por un breve ciclo de tiempo. Luego de esto se disponía a drenarse el lecho (relleno o empaquetadura) y se dejaba una cantidad de tiempo en reposo para poderse repetir el ciclo. Un ciclo normal requería de una cantidad de 12 horas, y 6 de estas eran destinadas al reposo del filtro. (Eddy, 1995).

En la década de 1920 se lograron varios avances al introducirse por primera vez los sistemas aireados como los filtros percoladores, haciendo que estos fueran un sistema de tratamiento secundario muy utilizado. (Unesco, 2017).

En 1946 se publicó la primera fórmula para diseñar lechos bacterianos por medio del National Research Council (NRC) y más o menos en los años 60, se empiezan a realizarse estudios donde se miraba el comportamiento de los filtros percoladores. (salas, 2018)

En el año 1972 bajo la dirección del ing. Arturo Pazos S, quien fue profesor en la escuela regional de ingeniería sanitaria y recursos hidráulicos, comenzó a investigar para encontrar soluciones respecto al tratamiento de las aguas residuales domésticas, y dentro que las soluciones que encontró estuvieron presentes el filtro percolador. (Oakley, 2011).

En los últimos años los filtros percoladores empezaron a ser muy usados en acuicultura, ya que su construcción y manejo son fáciles y estos son autoaireantes, los cuales los hacen sumamente útiles para desgasificar dióxido de carbono. Aunque, actualmente la mayor parte de los filtros utilizan un medio plástico, porque su peso es bajo y también por su área específica y alta fracción de hueco. (Galli Merino & Sal, 2007).

Por otro lado, el proceso de fitorremediación comenzó en el siglo XVIII, cuando los químicos Joseph Priestley, Karl Scheele y Antoine Lavoisier, consiguieron exponer que las plantas tienen la capacidad de purificar el ambiente mediante la luz. En la década de 1960, la Unión Soviética llevó a cabo varios experimentos para limpiar el suelo contaminado con dinucleótidos utilizando plantas; pero data que para 1970, se confirmó que las plantas tienen propiedades naturales para purificar el suelo y el agua. (Virtual Pro, 2021)

Originalmente, la concepción de fitorremediación se relacionó con el uso viable de plantas hiperacumuladoras idóneas de bioconcentrar niveles anormales de metales en sus tejidos. Se componen principalmente de pequeñas vegetaciones herbáceas que crecen en áreas industriales nativas o en antiguos depósitos mineros. ( León Romero, 2017).

Fitorremediación se refiere a una gama de tecnologías basadas en la utilización de plantas para depurar o restituir ambientes contaminados como el agua, la superficie o inclusive el aire. Este es un vocablo respectivamente nuevo que se introdujo en 1991. Más precisamente, la fitorremediación es posible definirla como una técnica sostenible basada en la utilización de plantas para disminuir in situ la concentración o el riesgo de contaminantes orgánicos e inorgánicos en el suelo, el agua y el aire derivados de materiales bioquímicos. El proceso conduce a la disminución, mineralización, degradación, destilación y transformación de diversos contaminantes por parte de estas especies y microorganismos asociados a sus raíces. ( Núñez López, Meas Vong, & Olgún, 2004).

Actualmente, las investigaciones respecto a los filtros percoladores y la fitorremediación no se centran solamente en la eliminación de los residuos inorgánicos (metales, haluros y radionúclidos), sino también en la depuración de residuos orgánicos. ( León Romero, 2017).

### ***1.1.3 Compilación de investigaciones para filtro percoladores y fitorremediación***

**Tabla 1***Investigaciones de Filtro Percoladores*

<b>Investigaciones de Filtro Percoladores</b>					
<b>País</b>	<b>Institución</b>	<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Año</b>	<b>Sinopsis</b>
Pakistán	Revista Tecnología ambiental	Iffat Naz, Devendra P. Saroj, Sadia Muntaz, Naeem Ali, Safia Ahmed	Evaluación de sistemas biológicos de filtración percoladora con varios materiales de empaque para mejorar el tratamiento de aguas residuales. (Traducido al español)	2014	El objetivo de este artículo es evaluar medios de relleno seleccionados para filtros percoladores y desarrollar un modelo simplificado para describir la capacidad de eliminación de DBO. Se tomaron cuatro medios diferentes; caucho, poliestireno, plástico y piedra obteniendo una eliminación promedio de DBO superior al 80 y 90% para cada uno de ellos, llegando a la conclusión de que se pueden diseñar filtros altamente eficientes utilizando varios medios.
Indonesia e India	Revista internacional de ciencias de la ingeniería y tecnología de investigación	Sonali R. Dhokpande, Sunil J. Kulkarni, Dr. Jayant P. Kaware	Una revisión de la investigación sobre la aplicación de filtros percoladores en la eliminación de diversos contaminantes de los efluentes. (Traducido al español)	2014	La investigación realizada en este artículo se basa en el estudio de varios aspectos del sistema de filtro percolador con respecto a su eficiencia. Se logró eliminación de DQO hasta el 90% y eliminación de nitrógeno hasta el 99% concluyendo que los sistemas de filtrado percolador proporcionan alternativa muy factible y económica para tratamiento de aguas residuales.



Bangladesh, Pakistan e India	Revista polaca de estudios ambientales	Imran Ali, Zahid M. Khan, Muhammad Sultan, Muhammad H. Mahmood, Hafiz U. Farid, Mohsin Ali, Abdul Nasir	Estudio experimental sobre sistema de tratamiento de aguas residuales basado en filtro percolador de mazorca de maíz: diseño, desarrollo y evaluación de desempeño. (Traducido al español)	2016	En este artículo, se diseñó y desarrolló un filtro percolador de medios autóctonos utilizando mazorcas de maíz como material de empaque para el crecimiento de biopelículas. Los resultados experimentales mostraron que el sistema eliminó con éxito alrededor del 79 % de DBO y el 75 % de DQO en promedio.
Colombia	U. Nariño, San Pablo de Pasto.	Andrés Felipe Pasaje T. Y Catherine Natali Palacios O	Evaluación de remoción de carga contaminantes con sistema piloto para tratamiento de aguas residuales domésticas	2018	Este trabajo de investigación presenta la implementación de un sistema compacto de tratamiento de aguas residuales domésticas, se analizaron parámetros como; coliformes totales y fecales, sólidos totales, DQO y DBO5, los cuales dieron como resultado la factibilidad exitosa del sistema, con tasa de remoción superior al 80% de la carga contaminante.
Ecuador	Escuela superior politécnica agropecuaria de Manabí Manuel Félix López	Kelly Katherine Mendoza Ortega y José Maximino Roca Mancilla	Evaluación de filtro percolador a escala piloto para la remoción de carga orgánica del efluente residual del centro de faenamiento, Calceta-Bolívar	2021	El objetivo de esta investigación es la evaluación de un filtro percolador para la remoción de carga orgánica del efluente residual en Calceta. Obteniendo así una eficiencia alta en la remoción de carga orgánica (90,40% para DQO y 79,40% para DBO5) como también bajos costos en su utilización siendo esta una técnica viable para el tratamiento de aguas residuales.

**Tabla 2***Investigaciones de Fitorremediación*

<b>Investigaciones de Fitorremediación</b>					
<b>País</b>	<b>Institución</b>	<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Año</b>	<b>Sinopsis</b>
Nigeria	Revista de Desarrollo Sostenible	Ajayi, TO y Ogunbayo, AO	Alcanzar la sostenibilidad ambiental en el tratamiento de aguas residuales mediante la fitorremediación con jacinto de agua ( <i>Eichhornia crassipes</i> ).	2012	Este artículo investiga la efectividad del jacinto de agua en el tratamiento de aguas residuales. Dando como resultado que la remoción promedio de contaminantes fue de 53.03%, 64.41%, 65.4%, 47.22%, 94.67% y 30.30% para SST, DBO, DQO, nitrato-nitrógeno, cadmio y hierro respectivamente. Siendo este un método económicamente viable, ecológicamente adecuado y socialmente aceptable, y por lo tanto puede decirse que es una técnica más sostenible que los convencionales.
Malasia	Revista de ingeniería Ain Shams	Hauwa M. Mustafá y Gasim Hayder.	Estudios recientes sobre aplicaciones de malezas acuáticas en la fitorremediación de aguas residuales: artículo de revisión	2021	Este documento de revisión muestra los principales roles de las plantas acuáticas en la fitorremediación de aguas residuales. Se establece una mejora significativamente la calidad de las aguas residuales con una reducción del 85,66% en la turbidez; DBO en un 83,43 %, DQO 58% y NO3 50 %, mostrando así que la aplicación de plantas acuáticas en la fitorremediación de aguas residuales es beneficiosa porque tienen una gran capacidad para absorber y degradar los contaminantes (nitratos, fosfatos, metales pesados, etc.) de las aguas residuales. Por lo tanto, mejora la calidad del efluente antes de su vertido en cuerpos naturales.
Indonesia	Diario de Ingeniería Ecológica	Yuliasni, R., Kurniawan, SB, Marlina, B., Hidayat, MR, Kadier, A., Ma, PC e Imron, MF	Avances recientes de las tecnologías basadas en la fitorremediación para el tratamiento de aguas residuales industriales.	2023	El objetivo de este artículo fue revisar brevemente los procesos básicos de fitorremediación, sus mecanismos y parámetros, y su interacción entre rizerremediación y microbio-planta. Se evidencia que las plantas acuáticas se han ganado una inmensa reputación debido a

					su capacidad para limpiar cuerpos de agua contaminados. Con su extenso sistema de raíces, estas plantas se convierten en la mejor opción para degradar contaminantes en un sistema de fitorremediación.
Peru	Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas	Rosmery Yakelini Ayala Tocto, Edith Calderón Ordoñez, Jesús Rascón, Roicer Collazos Silva.	Fitorremediación de aguas residuales domésticas utilizando las especies <i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Nymphoides humboldtiana</i> y <i>Nasturtium officinale</i>	2018	Este estudio implementó un sistema de fitorremediación a escala de laboratorio o piloto para evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes de jacinto de agua, berro y capuchina, que se integró con cuatro sistemas de tratamiento de flujo discreto, dando como resultado que la especie de jacinto de agua lograron un mayor porcentaje de eficiencia en la eliminación de contaminantes.

## 1.2 Conceptos

Los efluentes residuales se definen como esas aguas que traen consigo impurezas que proviene de vertidos de orígenes varios, por lo que estas, pueden tener elementos contaminantes producidos por desechos urbanos y/o industriales, las cuales suelen ser tratadas para alcanzar un cierto nivel de calidad y posteriormente ser reutilizadas. (Hidrotec, 2022)

Las aguas residuales se categorizan dependiendo ya sea del consumo humano o de los procesos productivos:

**Aguas residuales domésticas:** Estas se originan en viviendas, y son producidas en cocinas, cuartos de baño. Cuartos de lavado y/o patios, los cuales están compuestas de aceite, jabón, materia fecal y orina. (Hidrotec, 2022).

**Aguas industriales:** Estas se producen en empresas durante su proceso de producción. Dentro de estas, están categorizadas las aguas residuales producidas por la industria, ya sea fábricas o centros de producción, como también por la agricultura y la ganadería, incluyendo así contaminantes de procedencia orgánica y microorganismos. (Hidrotec, 2022).

**Aguas urbanas:** Aquí se incluyen las aguas que son resultado de uso en calles y edificios en la ciudad, entrando en ellas aguas de usos domésticos e industriales y también pluviales. (Hidrotec, 2022).

El tratamiento de las aguas residuales, sea domésticas, industriales, agrícolas o urbanas, se realizan mediante Plantas de Tratamiento de aguas residuales (PTAR), estas plantas deben cumplir con ciertas especificaciones tanto técnicas como de ubicación, ya que deben estar localizadas en puntos estratégicos que permitan o lleven toda el agua residual o pluvial hacia un sitio donde serán posteriormente tratadas; de tal forma que existen diferentes procesos por los que el agua debe pasar; para poder ser enviada a un efluente procurando mitigar el impacto que puedan generar las sustancias que esta lleva consigo a causa del uso que se le haya dado.

Los sistemas de tratamiento pueden llegar a clasificarlos según el tipo de proceso que se realizará para la depuración del agua residual, estos son:

**Procesos Físicos:** Este es el predebaste y se basa en aplicar fenómenos físicos; existen diversos tratamientos de aguas que responden a estos procesos con lo son el desarenador, la sedimentación, desbaste de sólidos, entre otros.

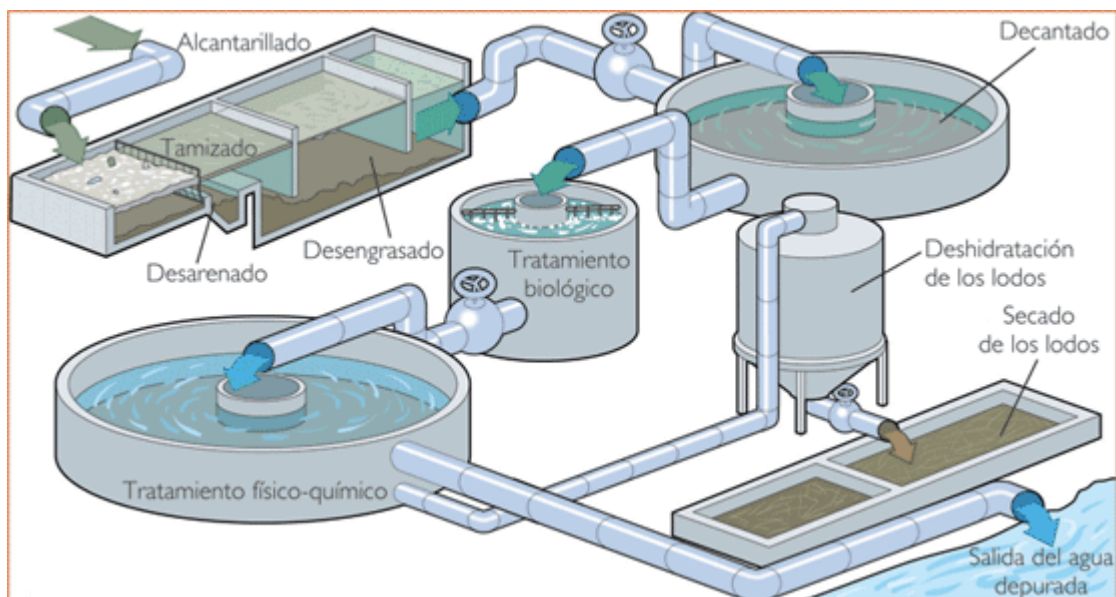
Procesos Químicos: En estos procesos se adicionan productos químicos que favorecen en la eliminación de la contaminación que se encuentra en el agua; algunos de los tratamientos que responden a estos procesos son la floculación, la oxidación, la desinfección, entre otros.

Procesos Biológicos: Este es el proceso más complejo, pero también en el que mejores resultados se ven respecto a la depuración de contaminantes de aguas residuales, ya que favorece la actividad biológica de algunos microorganismos y bacterias los cuales se mantienen de materias orgánicas biodegradables, a partir de un proceso que implica que estas materias se conviertan en gases, se dispersen en la atmósfera o se transformen en tejido celular biológico para que al final se sedimenten en el fondo; los tratamientos que responden a estos procesos son los fangos activos, los lechos de turba, los sistemas de filtración al suelo, entre otros.

Una planta de tratamiento de aguas residuales, se ocupa de purificar el agua usada para que logre regresar con seguridad al medio ambiente; esta se encarga de remover partículas sólidas y residuos, desde plástico, aceites, incluso arena y partículas más finas, además de aminorar la sustancia orgánica y los contaminantes. (Spena Group, 2016).

**Figura 1**

*Procesos en el tratamiento de las aguas residuales.*



Fuente: (Webmaster, 2021)

El tratamiento de aguas residuales de una Planta de Tratamiento de Agua Residual se efectúa en las siguientes fases:

**Tratamiento inicial y primario que elimina entre 40-60% de sólidos (Spena Group, 2016)**

**El Cribado:** Es lo primero que se debe tener en cuenta en una planta de tratamiento, ya que esta obstaculiza cuerpos gruesos antes de que estos estropeen o pongan lento el proceso depurativo. (Gomez, 2013).

**Figura 2***Cribado*

Fuente: (SynerTech SAS.)

**Desarenadores:** Son estructuras hidráulicas las cuales funcionan para remoción de arenas, gravas, pequeñas partículas de naturaleza mineral y sustancias orgánicas no recompensables. (Teamb, 2022).

**Figura 3***Desarenador*

Fuente: (Spena Group, 2017)

**Homogeneización:** Trata de mezclar las aguas residuales para así poder evitar que estas se sedimenten, se estratifiquen o que aparezcan olores. (Sulzer, 2022)

**Desengrasadores:** Es una máquina y/o equipo automático, el cual está completamente cerrado para así poder evitar que salgan malos olores; además, permite realizar el lavado de la arena previo a la descarga. (Seftgroup, 2020).

#### Figura 4

*Puente desengrasador*



*Fuente: ( Estruagua, 2019)*

**Rejas De Desbaste:** eliminan los sólidos gruesos que vienen en el agua, como los son piedras, ramas, entre otros. (Caldes, 2020)



**Figura 5**

*Rejas de desbaste.*



Fuente: (Deyma, 2020)

**El decantador:** Tratar las aguas residuales por medio del decantador es esencial, dado que mediante este se pueden realizar la separación y la concentración de fango, como también de los sólidos suspendidos (SS) que se hallen en el agua; aquí se pueden distinguir varios SS: (Ontiveros, 2015).

**Sólidos sedimentables:** Son los SS que asientan después de abandonar el agua residual en condiciones estáticas por alrededor de una hora, este tiempo también depende de la dimensión del sedimentador. (Ontiveros, 2015).

**Sólidos líquidos:** Se refiere a SS que no se ha sedimentado, incluso si el agua restante no ha sido perturbada durante mucho tiempo. (Ontiveros, 2015).

**Sólidos coloidales:** Forma parte del SS, de pequeño tamaño y su composición química hace que su superficie contenga carga eléctrica. (Ontiveros, 2015).

Hay que tener en cuenta diferentes parámetros para poder diseñar un decantador primario:

**Tiempo de retención:** Se determina como el volumen del tanque de sedimentación dividido por el caudal de entrada. (Ontiveros, 2015).

**Tabla 3.**

*Tiempo de retención en horas para sedimentadores primarios*

Sedimentación primaria	Mínimo	Medio	Máximo
Caudal medio	1.5	2.0	3.0
Caudal Máximo	1.0	1.5	2.0

Fuente: (Ontiveros, 2015).

**Carga superficial:** Determinada como el caudal del cuerpo hídrico que se debe tratar, sobre la superficie del tanque de decantación. (Ontiveros, 2015).

**Tabla 4.**

*Valores para cargas superficiales en  $m^3/m^2 \cdot h$  para decantadores primarios.*

Sedimentación primaria	Mínimo	Típico	Máximo
<b>Sedimentadores Circulares</b>			
Caudal Medio	1	1.5	2
Caudal Máximo	2	2.5	3
<b>Sedimentadores Rectangulares</b>			
Caudal Medio	0.8	1.3	1.8
Caudal Máximo	1.8	2.2	2.6

Fuente: (Ontiveros, 2015).

**Figura 6**

*Decantador.*



Fuente: (SynerTech SAS.)

**Flotación:** Se separan los sólidos del agua por medio de la presencia de burbujas de aire que han sido introducidas en la fase líquida. Cuando estas ascienden, por adherencia se hace que floten los sólidos que se buscan separar del agua. (Farias de Marquez, 2016)

**Filtración Gruesa:** También llamados filtros gruesos de grava, estos pueden ser de flujo vertical u horizontal, el cual radica en un procedimiento importante en el cual se dispone un lecho filtrante de la grava y la dimensión de esta se reduce con la dirección del flujo. (UNATSABAR., 2005)

Tratamiento secundario, que depura cerca del 90% de la contaminación y completa la separación de la parte líquida de las aguas residuales (Spena Group, 2016).

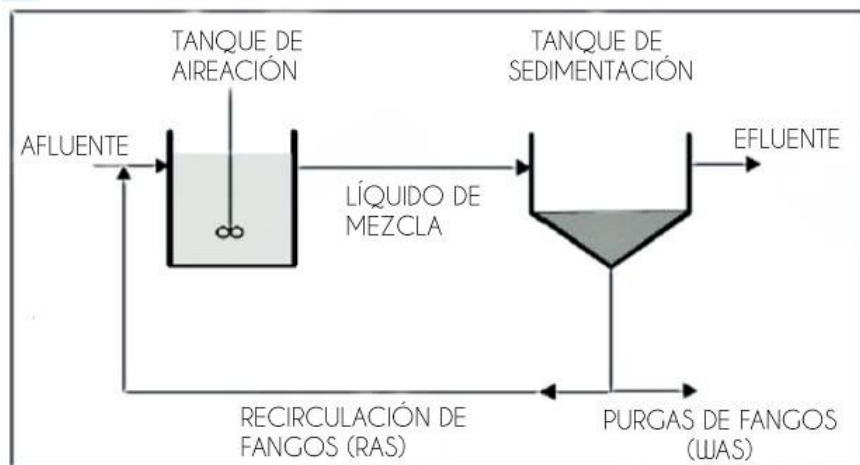
Por lo general usan procesos biológicos aeróbicos y se define como aquel que se realiza por un grupo específico de microorganismos como lo son especialmente las bacterias y los protozoos, estos en presencia del oxígeno, operan sobre las materias orgánicas disueltas,

suspendidas y coloidales existentes en las aguas residuales, haciendo que se transformen en gases, materias celulares y demás sustancias simples. Hay dos clases de tratamiento biológicos aeróbicos, están los procesos de cultivo en suspensión (fangos o lodos activados) y los procesos de cultivo fijo (lechos activados) (Ontiveros, 2015).

**Sistemas De Biomasa En Suspensión – Lodos Activados:** El objetivo de esta técnica es la eliminación de compuestos orgánicos solubles y coloidales que no pudieron ser separados en el tratamiento preliminar o primario y también simplificar la eliminación de sólidos en suspensión. (Acura, G, 2022)

### Figura 7

*Proceso de un sistema de Biomasa en Suspensión.*



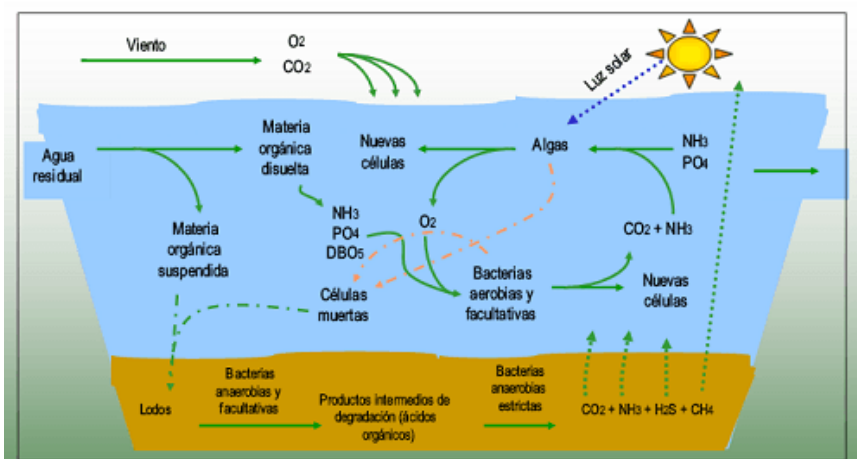
Fuente: (iAgua., 2020).

**Sistemas de Biomasa Adherida:** Las bacterias se adhieren a materiales inertes, los cuales pueden ser cerámica, piedras, plástico, entre otros. (Urrego, Sánchez, & Moreno, 2014)

**Lagunas de Oxidación:** Son utilizadas normalmente en zonas rurales, municipios pequeños y una que otra industria. Requieren un mantenimiento mínimo y son almacenes contruidos por extracción y compresión de tierra a una pequeña profundidad que admite el almacenamiento del agua de cualquier calidad por periodos mayores de tiempo.

**Figura 8**

*Diseño de las lagunas de oxidación.*



Fuente: ( Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2019)

### **Tratamiento Terciario y supresión de lodos (biosólidos) (Spena Group, 2016).**

Disminuye notablemente de coliformes fecales y coliformes totales, disminución de sólidos en suspensión, elimina agentes patógenos. (Nuevo, 2022)

Cabe resaltar que no todas las aguas residuales deben atravesar el mismo proceso para obtener su depuración, cada una de estas etapas se deben llevar a cabo de acuerdo al grado de contaminación que se presente en los afluentes de agua, también en el proceder de la mismas, por lo que cada ciclo se maneja de forma diferente y conlleva diversos costos, por ejemplo, de las tres clases de tratamiento de aguas residuales el terciario es más costoso que los demás y es usado en ocasiones específicas como lo puede ser, la purificación de desechos industriales. (Spena Group, 2016).

La fitorremediación y los filtros percoladores se presentan como alternativa viable tanto técnica, económica como ambientalmente, puesto que, para la construcción, funcionamiento y/o mantenimiento de estos sistemas no convencionales, no se necesita de una gran inversión ni la implementación de materiales poco comunes ni costosos para su construcción.

**Fitorremediación:** Por un lado, se tiene que “la fitorremediación se realiza por medio de las plantas, las cuáles utilizan sustancias excretadas por sus raíces, tallos u hojas que se encargan de aportar nutrientes a los microorganismos con el fin de mejorar sus procesos biológicos”. Mediante los subprocesos que suceden en este proceso en general tenemos primero que todo sucede con una Fitoextracción o Fitoacumulación, donde se toman los contaminantes por las raíces puesto que es aquí donde estos se almacenan y se pueden unir a sus tejidos, absorbiendo y concentrando el compuesto para posteriormente dirigirlos hacia sus tallos y hojas; luego sucede una Rizodegradación que representa la absorción de contaminantes por medio de la raíz de la planta, aquí los exudados juegan un rol significativo, por que originan proteínas y enzimas que colaboran para crear los mejores ambientes para el desarrollo microbiano, posteriormente sucede

la Fitoestabilización, la cual se realiza a través de la fabricación de compuestos químicos en las raíces de las plantas, limitando el movimiento y la biodisponibilidad de los agentes contaminantes en el suelo, y por último tenemos la Fitodegradación donde como última instancia se convierten los contaminantes dentro de los tejidos de las plantas por medio de las enzimas que se encargan de catalizar la degradación de estos. ( Reyes Alarcón , 2016).

**Filtros percoladores:** Los filtros percoladores corresponden a reactores de crecimiento asistido, los cuales son un tipo de reactor que se utilizan como soporte para el crecimiento biológico, y este se mantiene fijo en él. (Ramalho, 2009).

Se puede establecer que los filtros percoladores pueden ubicarlos en un tratamiento primario del agua residual, en lo que respecta a la retención de sólidos y en lo que hace referencia a la generación de la biopelícula y la posterior depuración del agua gracias a esta, se puede situar también en un tratamiento secundario. (Lizarazo Becerra & Orjuela Gutiérrez, 2013).

## **Capítulo 2. Descripción de las características particulares en lo que respecta a los procesos que suceden en el tratamiento de las aguas residuales por medio de filtros percoladores y fitorremediación**

### **2.1 Filtros percoladores**

Los filtros percoladores se han estado estudiando e implementando desde hace un tiempo atrás, logrando reducir costos en el tratamiento de aguas residuales. Estos filtros están conformados por una serie de materiales sintéticos o material granular que contenga una alta relación entre su área y volumen, las cuales se distribuyen sobre un recipiente, en su defecto de forma rectangular o circular y sobre el cual se vertieran las aguas residuales de forma constante o discontinua, mediante un sistema de distribución por aspersores fijos o móviles; como producto del vertimiento de las aguas residuales se va adhiriendo un material al medio filtrante que da lugar a la creación de la biopelícula, la cual es una capa bacteriana formada por diversidad de microorganismos que se adhieren a la estructura, esta será la encargada de desechar los agentes contaminantes que se hallan en el agua residual. (Jaramillo Mondragón & Paredes Togas, 2019).

Los filtros percoladores son estructuras con un relleno cubierto de limo biológico, por el que se percolan las aguas residuales; estas, comúnmente son distribuidas sobre el lecho de relleno por medio de un distribuidor rotativo (Brazo de distribución) del flujo en forma de llovizna uniforme y se percolan de manera descendente por el medio del relleno, este efluente es recogido en la base del filtro percolador. (Ramalho, 2009).



Para eliminar la materia orgánica es necesario la presencia de microorganismos, los cuales se originan en el filtro, asociado a esto se produce un crecimiento biológico y esos microorganismo que crecen usan también nutrientes (fósforo y nitrógeno) de otros micronutrientes para su crecimiento por lo tanto también se eliminan nutrientes, un fragmento de los patógenos que se hallan en estas aguas residuales se eliminan en el proceso biológico y una vez el efluente salga del filtro percolador, se transporta a un decantador donde se eliminan los sólidos. El conjunto de filtro percolador más un decantador secundario es lo que componen el tratamiento biológico en el cual se van a eliminar todos los contaminantes nombrados anteriormente.

El tipo de proceso que se utiliza en este tratamiento es uno aeróbico, es decir que se aporta oxígeno para que los microorganismos puedan desarrollar una degradación de la materia orgánica y así mismo crecer, este es un proceso de cultivo fijo o en soporte sólido, este soporte puede ser grava o relleno plástico y sobre este soporte se desarrolla una biopelícula, la cual puede tener un espesor que varía en el rango de entre 0.1mm a 2mm, e irá creciendo y desarrollándose conforme la biomasa va aumentando al ir alimentándose de los contaminantes que se encuentran en el agua y los contaminantes se eliminan conforme la biomasa los utiliza para su crecimiento, ese crecimiento se produce sobre la biopelícula que será regulada por la proporción de agua que se va echando.

Con la finalidad de que el agua sea pasada por el filtro percolador se hace necesario que esta esté libre de sólidos grandes, por lo que es pretratada y tratada posteriormente por medio de un decantador primario, luego se lleva a cabo el proceso del filtro percolador, el cual se trata en

impulsar el agua por la parte de arriba, con un sistema móvil, es decir un distribuidor de agua, que va a esparcirla por encima del filtro; el giro del brazo de distribución puede ser autónomo, o sea, que a medida que el agua va saliendo, se va impulsando el movimiento giratorio o, puede ser por medio de un motor, este último es el más recomendado ya que puede regular la velocidad independientemente del caudal.

El agua atraviesa el filtro, que está relleno ya sea de material granular (gravas) o de material plástico, y sobre este filtro se desarrolla la biomasa. En el efluente, los microorganismos se desarrollan y van eliminando los contaminantes presentes y el agua ya tratada se recoge en la parte de abajo del filtro; el aire entra a este por la parte de abajo a contra corriente, es un proceso en el que no se hace necesario suministrar el aire sino por la diferencia de temperatura, entre la temperatura del agua residual y la temperatura ambiente, por ventilación natural asciende el aire y va aportando el oxígeno que necesitan los microorganismos para hacer la degradación, el efluente filtrado que ya se encuentra recogido en la parte de abajo es llevado a un decantador secundario en donde es separada la biomasa formada del agua, y esta que sería ya el efluente final, se puede recircular. (Guado García, 2020).

Los filtros percoladores se clasifican en función de las cargas orgánicas e hidráulicas, dicha clasificación es la siguiente:

**Baja Carga:** Es diseñada para una carga hidráulica entre  $1.1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$  a  $4.3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$  y para una carga orgánica de  $0.08 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^3 \cdot \text{día}$  a  $0.4 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^3 \cdot \text{día}$ . Generalmente, se distribuyen de manera alterna con sifones automáticos o por bombeo constante. El espacio entre

cada dosis cambiará dependiendo del caudal del agua residual, sin embargo, tiene que ser suficientemente pequeño para poder evitar que el material filtrante se reseque. Algunas veces se verá necesario realizar una recirculación de las aguas ya tratadas. En su normal funcionamiento, se va a desarrollar una película biológica de cierto grosor y esto cambia al presentarse una temperatura o caudal diferente ya que parte de esta película biológica se desprende. La producción de fango o lodo se ve en pequeñas cantidades, por lo que su arrastre por el efluente del lecho puede ser admisible, y por ello se ve innecesario realizar una decantación secundaria. (GEDAR, 2017).

**Media Carga:** Esta se diseña para una carga hidráulica entre  $4 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$  hasta  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$  y para una carga orgánica de  $0.24 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^3 \cdot \text{día}$  a  $0.48 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^3 \cdot \text{día}$ , incluida la recirculación. (GEDAR, 2017).

**Alta Carga:** Los materiales filtrantes de alta carga es diseñada para cargas hidráulicas entre  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$  hasta  $36 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$  y para una carga orgánica de  $0.4 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^3 \cdot \text{día}$  a  $4.8 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^3 \cdot \text{día}$ , incluida la recirculación. Se diseñan para recoger aguas residuales constantemente, estas altas cargas hidráulicas se consiguen a través de la recirculación del agua residual que ya ha atravesado el lecho. Esta alta carga ocasiona un desprendimiento continuo de la película biológica, por lo que el fango debe separarse por decantación secundaria. (GEDAR, 2017).

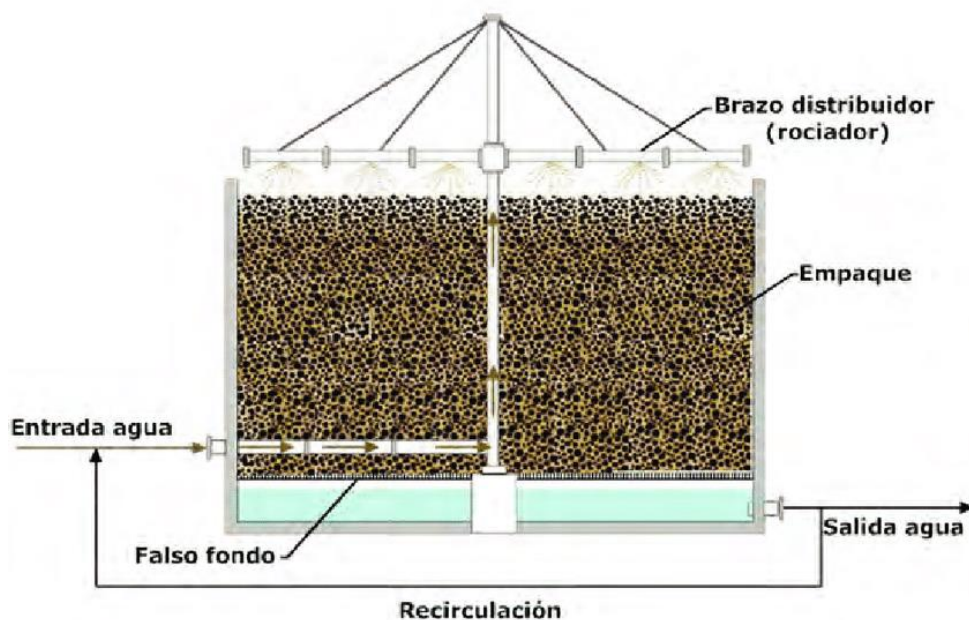
**Muy alta carga:** La diferencia que se encuentra entre alta carga y muy alta carga es que las cargas hidráulicas y alturas del lecho son mayores. Algunos lechos de este tipo de carga se

diseñan para cargas hidráulicas superiores a  $162 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$  y por lo general estos lechos se realizan con alturas de 12 m. (GEDAR, 2017).

A continuación, se presenta una imagen donde se ve el esquema de un filtro percolador.

### Figura 9

*Esquema de un filtro percolador.*



Fuente: (Noyola, 2013)

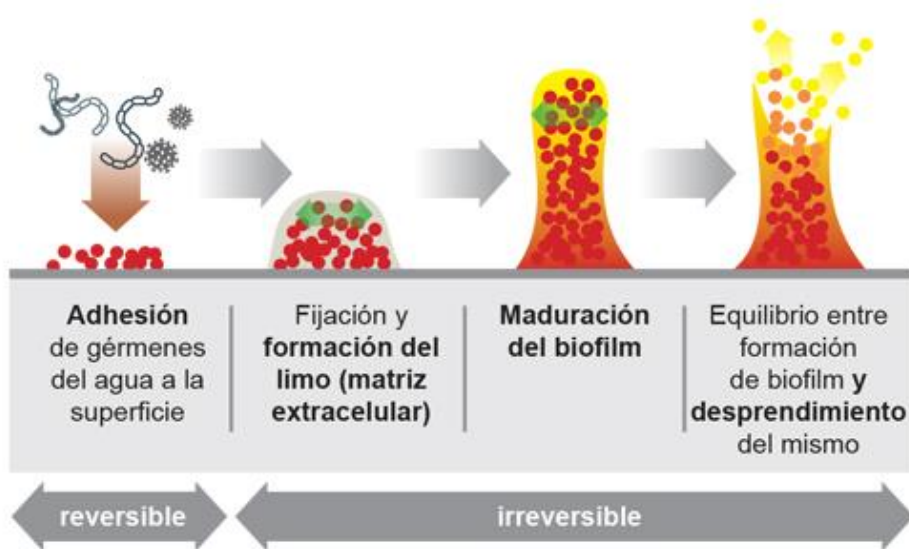
Dentro de una planta de tratamiento se van a encontrar algunos problemas, lo mismo pasa en los filtros percoladores por lo que en estos se deben eliminar no solo sus efectos, si no lo que lo ocasiona. Las problemáticas más frecuentes que se presentan son las siguientes:

**Se necesitan entre 10 a 15 días para que se forme la biopelícula**, si el proceso se encuentra demorado puede ser a causa de una carga volumétrica insuficiente, por lo que se debe

reducir la recirculación; también hay vertidos industriales que modifican el PH y pueden inhibir el crecimiento microbiano, para esto se debe corregir el PH, puede ser con cal, y se debe evitar que este tipo de vertidos sigan produciéndose. (Menéndez Gutiérrez, Pérez Olmo, & García Zumalacárregui, 2013)

### Figura 10

*Proceso de formación de la biopelícula*



Fuente: (Aqua free, 2019).

**Desaparición de la biopelícula de manera repentina:** Esto se puede dar a causa de vertimiento de ácidos o tóxicos puntuales y se puede remediar aplicando un lavado energético del lecho y posteriormente reiniciar el ciclo. (Menéndez Gutiérrez, Pérez Olmo, & García Zumalacárregui, 2013).

**Inundación en la superficie del lecho:** Es más común ver esto en lechos de roca, por lo que el agua se tiene que eliminar, las causas de este acontecimiento se deben a que posiblemente hay una granulometría errónea del material, en caso de que este sea su causa se debe cambiar el medio poroso. (Menéndez Gutiérrez, Pérez Olmo, & García Zumalacárregui, 2013)

**Un crecimiento desmesurado de la biomasa** dado por una alta carga volumétrica, para eliminar su efecto, no se debe tratar el caudal o también se debe aumentar las recirculaciones. (Menéndez Gutiérrez, Pérez Olmo, & García Zumalacárregui, 2013)

**Obstrucción del empaque** a causa de una baja efectividad al eliminar fangos en tratamientos previos y una cantidad excesiva de biomasa dentro del lecho y la superficie de este, para evitarlo, se recurre a tratar las aguas antes de entrar con cloro, para que se produzca la muerte de una parte de la biomasa, y luego un lavado enérgico al ser retirada. (Menéndez Gutiérrez, Pérez Olmo, & García Zumalacárregui, 2013)

**Mal olor en el filtro,** esto está asociado con problemáticas de extralimitación de sobrecarga volumétrica del filtro y del crecimiento desmesurado del espesor de la capa del limo sobre el lecho, por lo que la aireación que ofrece el filtro no es suficiente; esto se puede solucionar aumentando la aireación, pero eso no es posible puesto que depende de factores climáticos que puedan influir en las temperaturas del aire y del agua, por lo anterior, se debe aumentar la recirculación para que haya disminución en la carga volumétrica que se aplicó, también se puede emplear la cloración, pero el riesgo que esta última puede ocasionar es que se elimine la biomasa. (Menéndez Gutiérrez, Pérez Olmo, & García Zumalacárregui, 2013).

Para controlar los malos olores se puede aumentar la recirculación, para así disminuir también el contaminante DBO del afluente al filtro. Al aumentar la carga hidráulica, se aumenta a su vez el poder abrasivo y así se elimina el incremento biológico desmesurado manteniendo así sus condiciones aeróbicas. También se pueden eliminar obstrucciones que haya en el filtro, desechar depósitos que estén en el fondo, y esto se hace enjuagando o raspando. Otra forma de controlar los malos olores es agregar sustancias químicas apropiadas a la entrada del filtro, esto bajo supervisión técnica. (Menéndez Gutiérrez, Pérez Olmo, & García Zumalacárregui, 2013)

**Plagas en los filtros,** El tener una gran cantidad de plaga en los filtros puede ocasionar molestias en general, este fenómeno sucede ya que dentro del lecho del filtro se genera un incremento de larvas, las moscas suelen tener una vida de 5 a 7 días, esto dependiendo de la temperatura que haya. (Menéndez Gutiérrez, Pérez Olmo, & García Zumalacárregui, 2013).

Una opción para poder solucionarlo es inundar la superficie del lecho y se debe disminuir el intervalo en el que el distribuidor pasa, esto hace que las moscas no puedan salir, si el problema persiste se debe tomar como última instancia el empleo de insecticidas, sólo debe hacerse bajo dirección de personal calificado, el empleo de estas sustancias química puede tener impactos negativos, los cuales son contraproducentes sobre el cuerpo receptor y la biomasa, por ello se debe siempre preferir las primera medidas. La siembra de plantas cerca al filtro percolador ayuda a disminuir estas molestias ocasionadas por insectos. (Menéndez Gutiérrez, Pérez Olmo, & García Zumalacárregui, 2013).

**Creación de espumas en los canales de recolección.** Es causado por la presencia de detergentes, para poder deshacerse de estas espumas se aconseja aplicar agua a presión en los lugares donde se produce la acumulación de ellas, también se pueden emplear productos antiespumantes, los cuales se verterían antes de que el agua pase al lecho; aquí también se encuentran efectos secundarios, ya que, al introducir un nuevo producto, existe la posibilidad de aumentar la macro contaminación. (Menéndez Gutiérrez, Pérez Olmo, & García Zumalacárregui, 2013).

**Obstrucción en los distribuidores.** Se necesita que haya un control constante en las aperturas de los distribuidores, los cuales también se pueden denominar brazos rotatorios, para que no se bloqueen u obstruyan. Este sistema se debe lavar todos los días, también se deben lubricar periódicamente en sus puntos de rozamiento. (Menéndez Gutiérrez, Pérez Olmo, & García Zumalacárregui, 2013).

**Obstrucción en los sistemas de desagües inferiores.** Se deben limpiar con agua ya que la parte inferior del filtro recoge el agua residual que está tratada y la lleva hacia el canal principal de evacuación. Los sistemas de desagüe se pueden obstruir por amontonamiento de grasas y aumento biológico. (Menéndez Gutiérrez, Pérez Olmo, & García Zumalacárregui, 2013).



## 2.2 Fitorremediación

La fitorremediación se define como un conjunto de técnicas sostenibles la cual se apoya en la utilización de vegetación para la reducción in situ de la concentración y toxicidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos que se encuentran en los suelos, sedimentos, agua y aire; esto se logra por medio de procesos bioquímicos que realizan las plantas y bacterias vinculadas a su método radical que llevan a la degradación, disminución, estabilización, mineralización y volatilización de los diferentes contaminantes. ( Núñez López, Meas Vong, & Olgún, 2004).

Comúnmente, los procesos implicados en la eliminación de los contaminantes presentes en las aguas residuales son 3 tipos:

**Físicos:** Aquí se encuentran los procesos de filtración, sedimentación, absorción y volatilización de los contaminantes encontrados en el agua.

**Químicos:** En este espacio se ven los procesos de precipitación, hidrólisis, reacciones de óxido-reducción o fotoquímicas.

**Biológicos:** Aquí están los resultados del metabolismo microbiano, del metabolismo de plantas y de procesos de bioadsorción. ( Núñez López, Meas Vong, & Olgún, 2004).

De los procesos más importantes que suceden al tratar las aguas residuales, se encuentra la degradación de materias orgánicas que se efectúan por medio de microorganismos que habitan en los alrededores y sobre la raíz de la planta. Los productos que generan la degradación se absorben por las plantas a la par de fósforo, nitrógeno y demás minerales. Así mismo, los

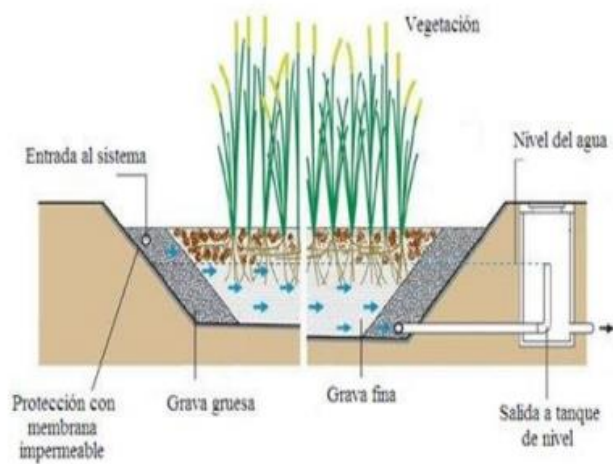
microorganismos utilizan como método de alimentación algunos o todos los metabolismos que han sido eliminados por las plantas por medio de su raíz.

Otro proceso que también es primordial es el concerniente a la atracción electrostática que hay entre las cargas eléctricas de las raíces de las plantas con cargas opuestas de partículas disueltas suspendidas, que se fijan a la parte más superficial de las raíces para luego ser absorbidas y digeridas por las plantas y bacterias. Asimismo, las plantas poseen capacidades para transferir oxígeno comenzando con sus partes distales hasta llegar a su raíz, originando una zona aeróbica a su alrededor que beneficia los diferentes procedimientos que suceden a lo largo del tratamiento de aguas residuales de uso doméstico. ( Núñez López, Meas Vong, & Olguín, 2004).

Como se mencionó antes, la raíz de la planta utilizada en la fitorremediación, sirve principalmente como soporte para la comunidad microbiana, por lo que su actividad disminuye grandemente la cantidad de sólidos suspendidos, así como los valores de nitrógeno y también el gasto de oxígeno. Luego, las mismas plantas, por medio de sus actividades metabólicas, se ocupan de digerir, convertir y almacenar las distintas clases de contaminantes. ( Núñez López, Meas Vong, & Olguín, 2004).

**Figura 11**

*Proceso del tratamiento de aguas residuales por fitorremediación*



Fuente: ( Haro González & Aponte Hernández, 2010).

Los mecanismos de fitorremediación se consideran un método de limpieza pasiva estético, que utiliza la capacidad de las plantas y la energía del sol para tratar una variedad de contaminantes ambientales. En esta tecnología, las especies operan como trampas o biofiltros que deshacen los contaminantes y estabilizan los metales encontrados en el suelo y el agua, anclándolos en raíces y tallos, o pueden metabolizarlos y transformarlos como microbios en compuestos menos nocivos como el dióxido de carbono. ( Rodríguez Maya & Zafra Prieto , 2005).

Por lo cual, dependiendo de la parte de la planta, existen diferentes técnicas de fitorremediación como se puede apreciar en la figura 12 y se presentan a continuación:

**Rizofiltración:** Usa las plantas para deshacerse de los contaminantes que se encuentren en el recurso hídrico, esto lo logra por medio de su raíz. La forma en la que se cultivan estas

plantas se hace por medio de la hidroponía y cuando la raíz de la planta está bien desarrollada, se introduce al agua para que sus raíces absorban los contaminantes y los metales presentes en ella. (Delgadillo López, González Ramírez, Acevedo Sandoval, Prieto García, & Villagómez Ibarra, 2011).

**Fitoestabilización:** Esta tecnología permite la contención de los contaminantes que estén presentes en el suelo, al igual que la rizofiltración, sus raíces se hacen cargo de absorber y retener los contaminantes, al hacer esto se evita que ellos viajen hasta las aguas subterráneas o queden dispersos en el aire. La Fitoestabilización es adecuada para realizarse en suelos con texturas finas y que tengan alto contenido de materia orgánica. (Delgadillo López, González Ramírez, Acevedo Sandoval, Prieto García, & Villagómez Ibarra, 2011).

**Fitoimmobilización:** Ayuda a reducir la biodisponibilidad de contaminantes ya que produce compuestos químicos en la interfase suelo-raíz, estos detienen a los elementos tóxicos, ya sea absorbiendo, adsorbiendo o precipitando. (Delgadillo López, González Ramírez, Acevedo Sandoval, Prieto García, & Villagómez Ibarra, 2011).

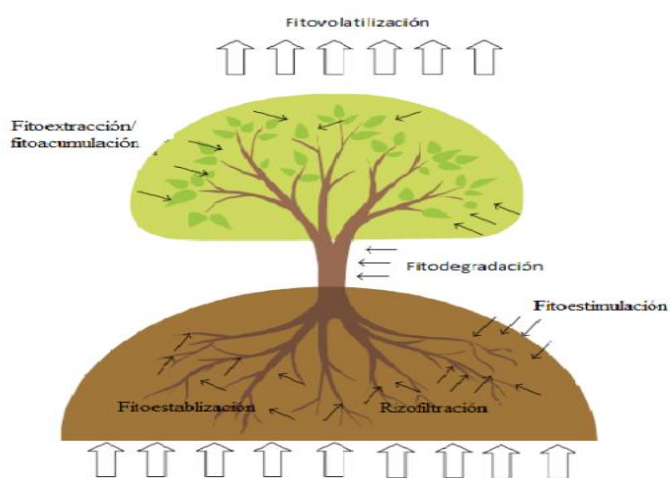
**Fitodegradación:** Dicha tecnología degrada los contaminantes orgánicos en sustancias no dañinas o mineralizadas hasta H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>; aquí, los contaminantes son descompuestos en el interior de sus tejidos vegetales y la planta produce enzimas como lo son dehalogenasa y oxigenasa, las cuales contribuyen para acelerar su degradación. (Delgadillo López, González Ramírez, Acevedo Sandoval, Prieto García, & Villagómez Ibarra, 2011).

**Fitoextracción:** Se establece también como Fito acumulación, reside en la absorción de los metales que contaminan por medio de las raíces de las plantas y se acumulan en sus tallos y sus hojas, se debe realizar una buena selección de especies que sean adecuadas para la eliminación de estos contaminantes. La Fitoextracción puede repetirse un número de veces ilimitada, porque se busca como fin que la concentración de metales no sobrepase los límites aceptables. (Delgadillo López, González Ramírez, Acevedo Sandoval, Prieto García, & Villagómez Ibarra, 2011).

**Fitovolatilización:** Se realiza cuando por medio de árboles y plantas que están en proceso de crecimiento se absorbe el agua con materias contaminantes ya sean orgánicas e inorgánicas; estas se pueden evaporar o volatilizar en la atmósfera una vez lleguen hasta las hojas. (Delgadillo López, González Ramírez, Acevedo Sandoval, Prieto García, & Villagómez Ibarra, 2011).

## Figura 12

### *Técnicas de fitorremediación*



Fuente: (Castrillón Trujillo & Navarro Aguirre, 2016)

En la práctica de la fitorremediación se encuentran muchas ventajas las cuales son destacables y de mucho beneficio para quienes tienen pensado implementar esta técnica, pero también se pueden observar desventajas de esta. Seguidamente, se expone un cuadro donde se detallarán las ventajas y las desventajas de este método de tratamiento de aguas residuales:

**Tabla 5**

*Ventajas y desventajas de este método de tratamiento de aguas residuales.*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Costos energéticos casi que nulos, debido a que la fuente de energía de las plantas es la energía solar.	El crecimiento de las plantas es limitado ya que si hay muchas concentraciones tóxicas de contaminantes estas dejan de crecer, por lo que se recomienda su uso en ambientes con bajas concentraciones de contaminantes.
El tratamiento del agua se ejecuta in situ, reduciendo los costos y riesgos para los seres humanos.	Puede ser un proceso lento en especies como árboles o arbustos.
La velocidad con que se degradan ciertos contaminantes es elevada	Se requieren terrenos con áreas grandes
No se producen tantos residuos que pueden generar contaminación ambiental.	Este sistema puede ayudar a que la producción de plagas como lo son los mosquitos, incremente.
El sistema se adapta para depurar en grandes superficies	Algunas especies de plantas retienen en sus raíces metales venenosos que pueden afectar a la cadena alimenticia.
No es necesaria la mano de obra especializada	
Posee muy altas posibilidades de ser aceptada por el usuario, puesto que su aspecto es agradable estéticamente.	

Fuente: (Delgadillo López, González Ramírez, Acevedo Sandoval, Prieto García, & Villagómez Ibarra, 2011).

## 2.3 Similitudes y diferencias entre Filtros percoladores y Fitorremediación

**Tabla 6**

*Similitudes y diferencias entre Filtros percoladores y Fitorremediación*

	<b>Filtros Percoladores</b>	<b>Fitorremediación</b>
<b>Similitudes</b>	Bajo costo Tecnologías sostenibles y sustentable No requieren consumo de energía	
<b>Diferencias</b>	El agua es bombeada hasta el Filtro Requiere personal especializado  Necesita constante atención para su operación	El agua es tratada In situ No requiere personal autorizado No necesita atención constante

En la tabla 7, se detalla en resumen cada tipo de tratamiento existente para tratar las aguas residuales y qué tipos de contaminantes presentes en esta elimina cada uno, además también se presenta el proceso escogido para cada tipo de tratamiento y una breve explicación del por qué se eligió.

**Tabla 7**

*Resumen de los tipos de tratamiento y descripción de los tipos de contaminantes que elimina en el agua residual*

<b>Tipo de tratamiento</b>	<b>¿Qué elimina?</b>	<b>Proceso elegido para cada tipo</b>	<b>¿Por qué se eligió?</b>
Tratamiento primario	Elimina entre el 40-60% de los sólidos suspendidos, también ayuda a reducir ciertos contaminantes biodegradables puesto que algunos sólidos están conformados por sustancias orgánicas y reduce la aparición de aceites y grasas presentes en el agua; se realiza por medio de un proceso de sedimentación gravitatoria o también precipitación	Decantación Primaria	Tratar el agua residual mediante un decantador primario es de suma importancia, ya que este cumple con las funciones que se establecen en un tratamiento primario, en esta se puede separar y concentrar fango y también se eliminan SS

Tratamiento secundario	Depura alrededor del 90% de la contaminación orgánica disuelta y que se encuentra en estado coloidal, elimina desechos orgánicos que provienen de diferentes residuos humanos, de alimentos, así como jabones y detergentes y completa la separación de la parte líquida de las aguas residuales	Filtros percoladores + Fitorremediación	Filtro percolador: El tipo de proceso que se utiliza en este tratamiento es uno aeróbico y el objetivo de tratar las aguas residuales por medio de filtros percoladores es eliminar contaminantes que se encuentran presentes en estas, los cuales son: Materia orgánica (MO), sólidos, nutrientes y patógenos. Fitorremediación: Apoya la utilización de vegetación para la reducción in situ de la concentración de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el suelo. Posee un gran rendimiento al eliminar metales pesados y es un proceso amigable con el medio ambiente
Tratamiento terciario	Esta es la etapa final para poder aumentar la calidad del agua que luego será vertida a los afluentes, aquí se disminuyen notablemente la aparición de coliformes fecales y coliformes totales, disminución de sólidos en suspensión, elimina agentes patógenos.	Desinfección y/o Cloración	Elimina bacterias y patógenos que persisten en el agua, al no ser eliminados estos contaminantes se corre el riesgo de contraer algunas enfermedades.



## Capítulo 3. Consideraciones para su diseño y construcción y funcionamiento

### 3.1 Filtros percoladores

Las consideraciones de diseño para los sistemas de biodiscos comparten muchas similitudes con las de los filtros percoladores, ambos sistemas desarrollan una biopelícula superficial bacteriana y dependen de la transmisión de oxígeno y sustratos del efluente a la biopelícula.

Existen diferentes tipos de filtros percoladores dependiendo de su utilización. Fueron diseñados originalmente con énfasis en las cargas hidráulicas y orgánicas. La eficiencia de remoción es alrededor del 80% al 90% de la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) afluente. Al ir avanzando la tecnología actualmente se clasifican por parámetros de diseño, donde la carga orgánica es expresada en kg DBO tratados en el transcurso del día por el volumen de llenado en metros cúbicos. Dependiendo de la carga orgánica relevante, los filtros se pueden clasificar como de bajo, medio o alto rendimiento. (Carvajal Fuentes, 2020).

Los datos más importantes al crear un filtro percolador se muestran en la tabla 8. Se comienza primordialmente escogiendo el tipo de filtro requerido por la carga que se debe trabajar, para dar continuidad con el diseño se pretende elegir el lecho filtrante, la profundidad y diámetro del estanque, determinando así el efluente que se desea depurar. (Larriva Vásquez, Ormaza Cárdenas, & Ortiz Ortiz, 2020).

Para la construcción de un filtro percolador, hay muchos factores a considerar, principalmente el tipo de medios de apoyo, carga orgánica aplicada, velocidad de rotación del brazo distribuidor y su ventilación. ( Ruiz Cortines, 2021).

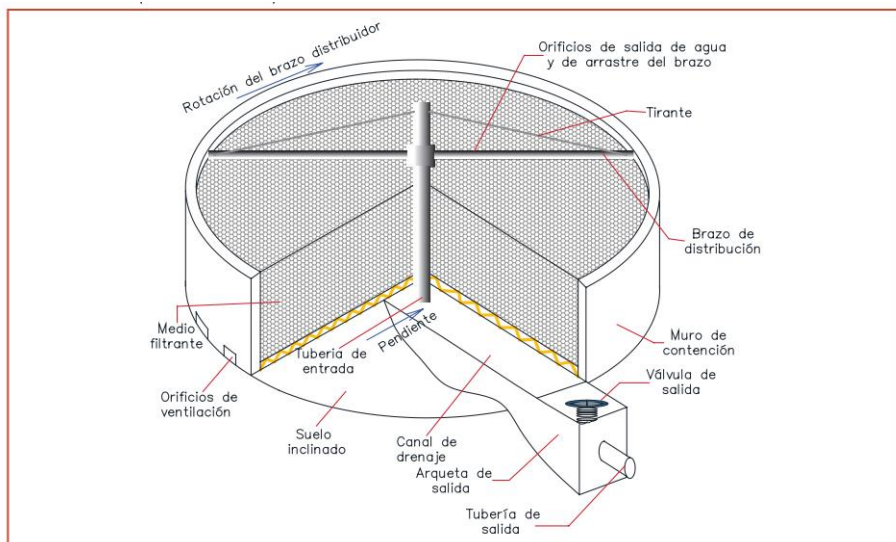
**Tabla 8**

*Información típica para el diseño de los filtros percoladores.*

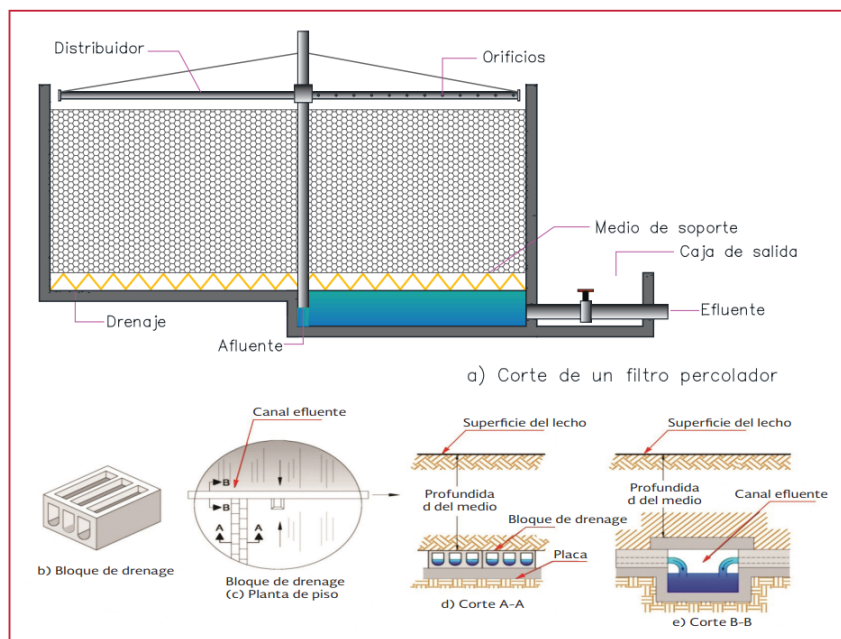
Elemento	Baja carga	Carga intermedia	Carga alta	Muy alta carga	De desbaste	Doble etapa
Medio filtrante <sup>b</sup>	Piedra, escoria	Piedra, escoria	Piedra	Piedra	Plástico, madera	Roca, plástico
Carga hidráulica m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·día	1,20-3,50	3,50-9,40	9,40-37,55	11,70-70,40	47,0-188,0	9,40-37,55
Carga orgánica, kg DBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> ·día	0,08-0,40	0,25-0,50	0,50-0,95	0,48-1,60	1,6-8,0	0,95-1,80
Profundidad, m	1,80-2,40	1,80-2,40	0,90-1,80			
Relación de recirculación	0	0-1	1-2	1-2	1-4	0,5-2
SK (mm)	-	-	4-8	4-8	-	-
Moscas en el filtro	Abundante	Algunas	Escasas	Escasas o ninguna	Escasas o ninguna	Escasas o ninguna
Arrastre de sólidos	Intermitente	Intermitente	Continúo	Continúa	Continúa	Continúa
Eficiencia de eliminación de la DBO, %	80-90	50-70	65-85	65-80	40-65	85-95
Efluente	Bien nitrificado	Parcialmente nitrificado	Escasamente nitrificado	escasamente nitrificado	no nitrificado	bien nitrificado

Fuente: (Larriva Vásquez, Ormazá Cárdenas, & Ortiz Ortiz, 2020).

A continuación, se presenta en la figura 13 el modelo primordial de un filtro percolador y en la figura 14 se muestra un corte de la figura preliminar para examinar su distribución interna. ( Ruiz Cortines, 2021).

**Figura 13***Modelo de un filtro percolador*

Fuente: ( Ruiz Cortines, 2021)

**Figura 14***Corte y detalles de un filtro percolador típico*

Fuente: ( Ruiz Cortines, 2021)

### ***3.1.1 Tipos de medios filtrantes***

La elección del material del lecho filtrante está claramente relacionada con la utilidad y la eficacia del filtro percolador, esta juega un papel significativo en el adelanto de la capa microbiana, por lo tanto, ha sido testada con diferentes materiales, como es roca triturada o rodada, es decir medio natural y aquel hecho por material sintético como el plástico.

En la indagación de optimizar el rendimiento del dispositivo, se deben considerar diferentes parámetros al diseñar un filtro percolador, lo que significa que la elección correcta de los materiales puede aumentar significativamente su eficiencia. (Carvajal Fuentes, 2020).

Se han utilizado muchos materiales de filtro: grava, escombros, madera, ladrillos, carbón, escorias, crustáceos, latas, tiras de polietileno de varias formas, módulos de láminas y plástico moldeado, pero el agente tradicionalmente utilizado es la piedra y su principal ventaja es el bajo costo, otras características importantes son: fuerte resistencia, uniforme, resistente a la degradación por la intemperie, no tóxico, inmunidad al ataque bacteriano y descomposición por rayos de luz ultravioleta, entre otros. (Carvajal Fuentes, 2020).

En la Tabla 9 se muestran las características de algunos medios filtrantes.

**Tabla 9***Características de los medios filtrantes.*

<b>Medio</b>	<b>Tamaño nominal mm</b>	<b>Masa/volumen kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Superficie específica m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup></b>	<b>Porosidad</b>
Gravas de río				
Pequeñas	25-65	1250-1450	55-70	40-50
Grandes	100-120	800-1000	40-50	50-60
Escorias de río				
Pequeñas	50-80	900-1200	55-70	40-50
Grandes	75-125	800-1000	45-60	50-60
Plástico				
Convencional	600x600x1200 <sup>a</sup>	30-100	80-100	94-97
Alta sup. Especif.	600x600x1200 <sup>a</sup>	30-100	100-200	94-97
Madera	1200x1200x500 <sup>a</sup>	150-175	40-50	70-80

a: Tamaño del módulo

Fuente: (Larriva Vásquez, Ormazza Cárdenas, &amp; Ortiz Ortiz, 2020)

Si bien los materiales plásticos amplían el campo de las aplicaciones de Filtros Percoladores, el rendimiento de los filtros de roca a menudo se puede mejorar en gran medida cambiando las operaciones de distribución o proporcionando ventilación forzada. Si el material rocoso es de mala calidad, el espacio es limitado y se espera que el filtro se expanda, a menudo es necesario reemplazar o profundizar el filtro con materiales plásticos. Sin embargo, si está perfectamente diseñado y aplicado o modificado, un filtro de roca con una profundidad de 1 a 2 m brindará un excelente rendimiento de operación y remoción orgánica. ( Ruiz Cortines, 2021).

**Figura 15**

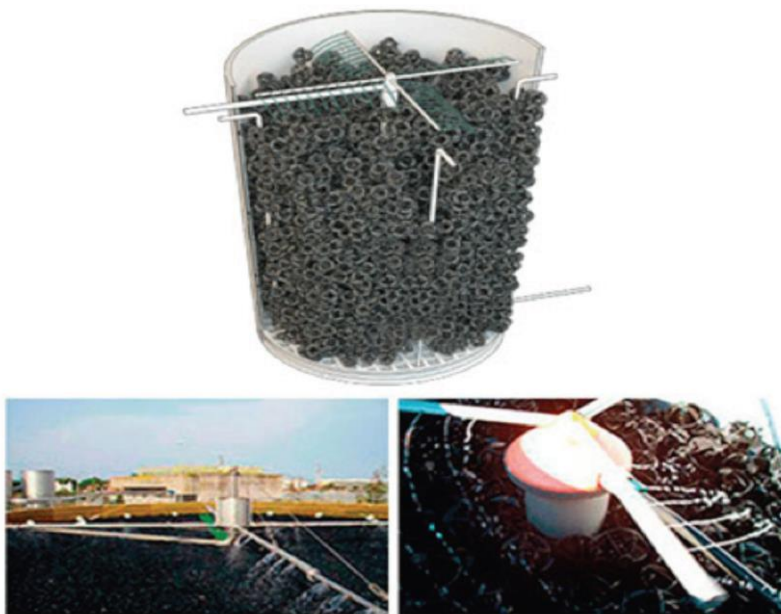
*Medio de soporte de piedra*



Fuente: ( Ruiz Cortines, 2021)

**Figura 16**

*Medio de soporte de piezas de plástico*



Fuente: ( Ruiz Cortines, 2021)

### ***3.1.2 Sistemas de Drenaje Inferior***

Un filtro percolador debe contar con un método de desagüe para recolectar las aguas residuales tratadas, constan de dispositivos encargados de recoger el agua y los sólidos liberados del material del filtro y dirigirlos a un depósito de sedimentación. Cuando se manejan componentes filtrantes tipo roca, el drenaje de fondo generalmente se construye con bloques de barro vitrificado colocados en un piso falso sobre el lecho del filtro, igualmente se usa rejilla de fibra de vidrio como material de construcción para el sistema de drenaje. (Larriva Vásquez, Ormaza Cárdenas, & Ortiz Ortiz, 2020).

### ***3.1.3 Ventilación***

Una de las partes más importantes de un filtro percolador es la ventilación, ya que la corriente de aire adecuada es fundamental para regular la temperatura del sistema de tratamiento. El elemento principal de la ventilación es su parte superior, que proporciona ventilación natural y la influencia del viento. (Larriva Vásquez, Ormaza Cárdenas, & Ortiz Ortiz, 2020).

### ***3.1.4 Distribución de flujo***

La estructuración del flujo es un rasgo significativo de los sistemas de filtro percolador, el agua debe agregarse uniformemente a una velocidad que mantenga el filtro completamente húmedo y limpio. La aplicación de flujo desigual y las tasas que no brindan un correcto enjuague pueden conducir a una operatividad deficiente, esto se convierte en mal olor, acumulación de

sólidos y embotellamiento parcial del filtro. Para optimizar el rendimiento del filtro percolador, se debe suministrar una tasa hidráulica apropiada. Por lo tanto, la totalidad de filtros percoladores se montan cíclicamente para operar con dispensadores rotativos. ( Ruiz Cortines, 2021).

Un distribuidor rotativo tradicional es accionado por una descarga hidráulica, no obstante, se ha suministrado poco cuidado a la velocidad de rotación, que establece parcialmente la tasa de dosis instantánea (mm/paso). El distribuidor rotativo Por lo general, está suministrado con dos a seis brazos, los flujos distribuidos se pueden intercalar para proporcionar una cobertura completa de cada brazo, es decir, cada brazo puede proporcionar una cobertura del 50 % o del 100 % por revolución; La tabla 10 muestra el número de brazos y cobertura/brazo que afectan el valor calculado de la SK. Cuantos menos brazos, mejor será el diseño del distribuidor y mejor el equilibrio hidráulico. ( Ruiz Cortines, 2021).

$$SK = \frac{(q + r)(1000)}{(a)(n)(60)}$$

SK= Intensidad de rociado (mm/paso de un brazo)

q + r = Carga hidráulica promedio (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h)

a= Número de brazos

n= Velocidad de rotación (rev/min)



**Tabla 10**

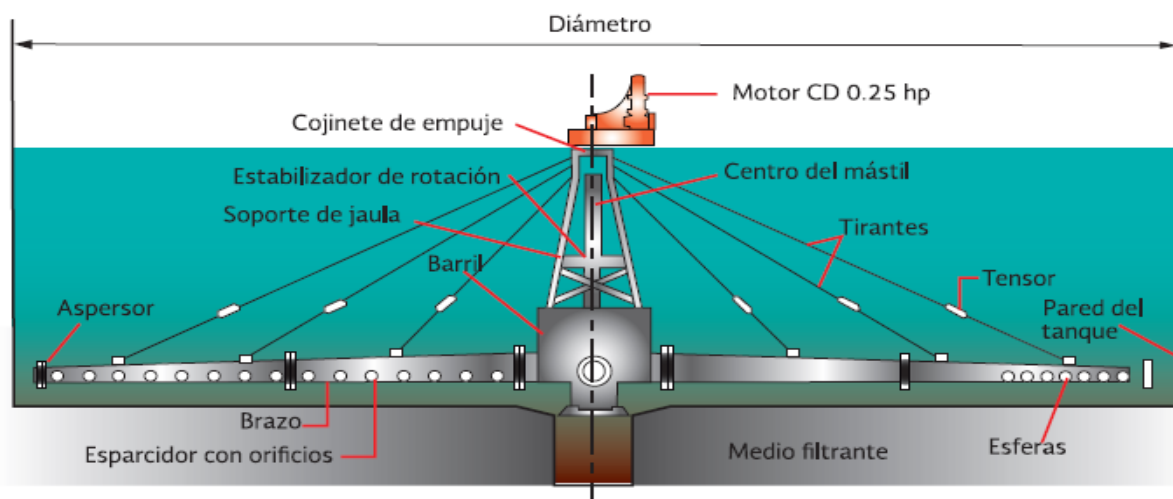
*Efecto del diseño de distribuidor en el valor Spülkraft (SK)*

No. De brazos	Valor de a	
	50% de cobertura	100% de cobertura
2	1	2
3	-	3
4	2	4
6	3	6

Fuente: ( Ruiz Cortines, 2021)

**Figura 17**

*Distribuidor rotativo con chorro de frenado y accionamiento eléctrico*



Fuente: ( Ruiz Cortines, 2021)

En la figura 17 anterior se observa como en el eje estacionario, el cual está trazado con líneas discontinuas, el cojinete de empuje puede extenderse para poder soportar el accionamiento eléctrico, este accionamiento puede ser utilizado ensamblado periféricamente para poder dirigir el distribuidor rotativo. La unidad de tracción se puede utilizar en el exterior de la parte interior de la pared o en la parte superior de esta. ( Ruiz Cortines, 2021).

Una unidad de impulso eléctrico con temporizadores y controladores de velocidad inconstantes puede funcionar independiente de la carga hidráulica y es de mucha ventaja para los filtros que no disponen de suficiente flujo de recirculación para poder disminuir la velocidad de rotación. ( Ruiz Cortines, 2021).

Los brazos del distribuidor normalmente son en forma de tubo en las pequeñas unidades y en las grandes unidades en forma rectangular, en esta última operan tasas altas; las materias primas más usuales para su fabricación son el acero galvanizado o el aluminio, pero también se utiliza el acero inoxidable para medios donde se presenten ambientes corrosivos. La repartición del agua se hace por medio de unas boquillas estas cuentan con puertas corredizas para poder tener control del flujo, así como de las salpicaduras y para tener una distribución uniforme sobre la cubierta; en ciertos diseños, las boquillas se sitúan en el fragmento superior del distribuidor. ( Ruiz Cortines, 2021).

### ***3.1.5 Recirculación***

Las ventajas que se le encuentra a la recirculación es que ayuda a humedecer el filtro, además que reduce olores, ayuda a tener una distribución uniforme sobre el lecho reduciendo obstrucciones presentados en él, también ayuda a reducir el volumen de sólidos que se encuentran en el agua, dicha recirculación en lechos de piedra se implementa para así poder aumentar la remoción de contaminantes DBO; Al realizar la recirculación, se puede mantener un buen estado en el filtro ya que esta, a través de decantación primaria se diluyen las aguas residuales y esto evita la formación de espumas. ( Ruiz Cortines, 2021).

Normalmente se usan bombas para levantar el afluente y realizar la recirculación, estas bombas deben poder manejar la basura que pasa por el decantador primario sin obstruirse, las más comunes para realizar la recirculación en los filtros percoladores son las bombas de flujo constante, su funcionamiento se puede controlar con un mando de forma manual. ( Ruiz Cortines, 2021).

### **3.2 Fitorremediación**

En los que últimamente han avanzado en tecnologías para prevenir la contaminación ambiental utilizando plantas y organismos afines. La fitorremediación es un conjunto de técnicas cuya principal finalidad es eliminar metales tóxicos y desechos orgánicos (en suelo, aire, agua y sedimentos) afectando los organismos vivos. (Delgadillo López, González Ramírez, Acevedo Sandoval, Prieto García, & Villagómez Ibarra, 2011).

#### ***3.2.1 Humedales artificiales***

Para poner en práctica un sistema de fitorremediación se debe llevar a cabo bajo el diseño de un humedal artificial, este se define como:

Un sistema de tratamiento de efluentes que consiste en canales o lagunas sembradas con especies que son nativas o endémicas del área, los humedales creados se han convertido en métodos naturales de tratamiento de aguas residuales y se han incorporado como tecnologías

económicas efectivas para el tratamiento hídrico en países europeos y los Estados Unidos. (Quevedo Quispe , 2021).

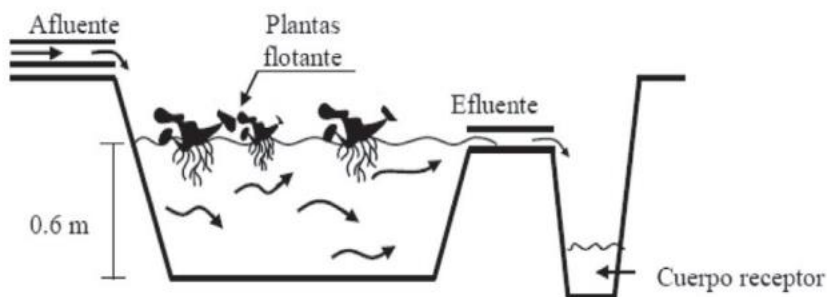
Se han desarrollado dos técnicas de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales: flujo superficial (FWS) y flujo subsuperficial (SFS). A continuación, se expondrá cada uno de estos.

**Humedal artificial de flujo superficial:** Radica en un canal cuya superficie de agua está expuesta al ambiente, y la base, en un suelo respectivamente impermeable o una cubierta impermeable, con una vegetación elevada y un nivel freático poco profundo de 0,1 a 0,6 m. El procedimiento tiene lugar durante la circulación lenta del agua a través de la planta en sus tallos y raíces. Este se divide de acuerdo al tipo de macrófitas utilizadas. ( Arias Martínez, Betancur Toro, Gómez Rojas , Salazar Giraldo, & Hernández Ángel , 2010).

***Sistema de plantas acuáticas flotantes:*** Forma una gran laguna con un nivel de agua bajo y proporciona hidrófitas que flotan libremente en la superficie del agua. Sus raíces hundidas están bien desarrolladas. ( Arias Martínez, Betancur Toro, Gómez Rojas , Salazar Giraldo, & Hernández Ángel , 2010).

## Figura 18

### *Humedal de flujo superficial con macrófitas flotantes*

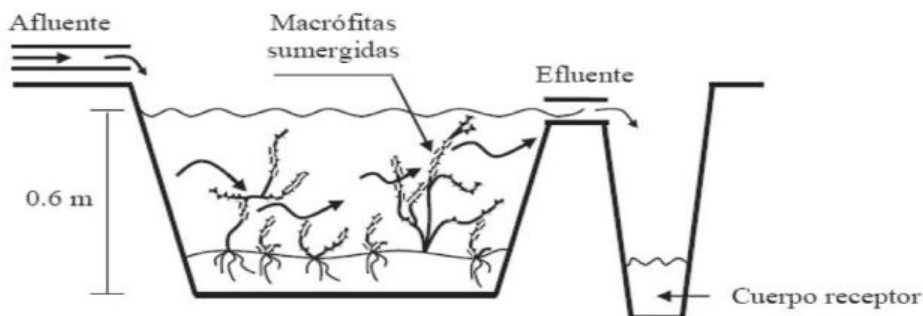


Fuente: ( Arias Martínez, Betancur Toro, Gómez Rojas , Salazar Giraldo, & Hernández Ángel , 2010).

***Sistema de plantas sumergidas:*** Consiste en una laguna poco profunda y crecen plantas grandes cuyos tejidos fotosintéticos están completamente sumergidos. Estas especies solo pueden crecer bien en agua que contenga oxígeno disuelto, por lo que no son adecuadas para efluentes contaminados con un elevado contenido de materia orgánica biodegradable, ya que la remoción microbiana daría lugar a ambientes anóxicos. ( Arias Martínez, Betancur Toro, Gómez Rojas , Salazar Giraldo, & Hernández Ángel , 2010).

**Figura 19**

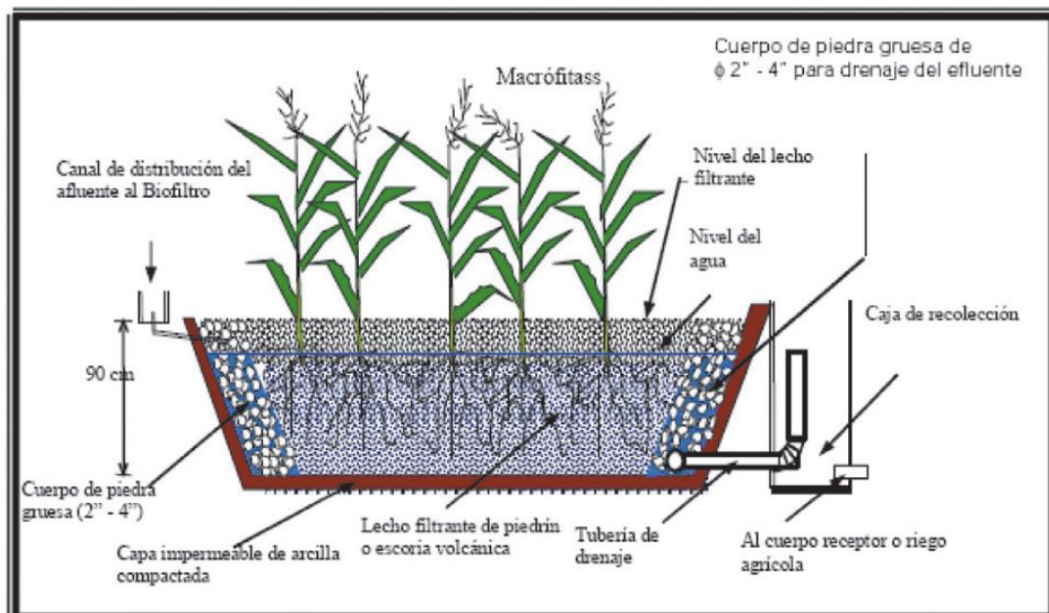
*Humedal de flujo superficial con macrófitas sumergidas*



Fuente: ( Arias Martínez, Betancur Toro, Gómez Rojas , Salazar Giraldo, & Hernández Ángel , 2010)

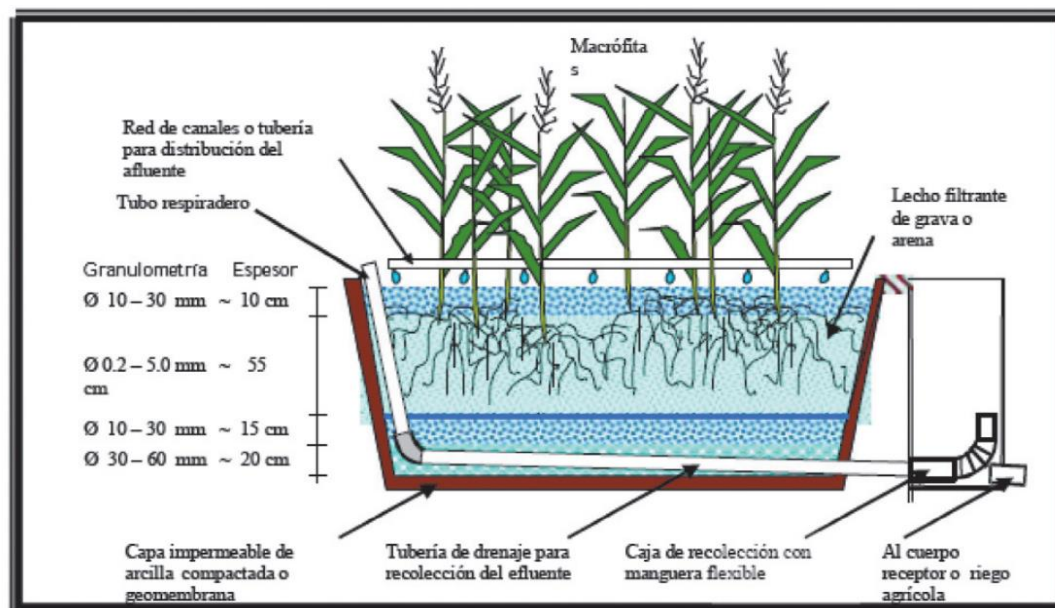
**Humedal artificial de flujo subsuperficial:** dichos métodos con plantas acuáticas flotantes consisten en biofiltros llenos de medios porosos (roca volcánica, grava), donde las hidrófitas se plantan en la superficie del medio del filtro y las aguas contaminadas pretratadas pasan a través del lecho del filtro horizontal o verticalmente. El nivel del agua se mantiene más bajo de la superficie del lecho granular. Estos humedales se dividen además en humedales artificiales de flujo horizontal y humedales artificiales de flujo vertical, según cómo pasen las aguas residuales pretratadas a través de los lechos de filtración. ( Arias Martínez, Betancur Toro, Gómez Rojas , Salazar Giraldo, & Hernández Ángel , 2010).

**Humedales de flujo horizontal:** en este tipo de humedales, las aguas residuales fluyen lentamente a través del lecho del filtro a lo largo de un camino horizontal desde el área de distribución en la boca de descarga hasta la superficie de recolección de aguas residuales.

**Figura 20***Humedal subsuperficial de flujo horizontal*

Fuente: ( Arias Martínez, Betancur Toro, Gómez Rojas , Salazar Giraldo, & Hernández Ángel , 2010)

***Humedales artificiales de flujo vertical:*** en este procedimiento el agua pretratada se suministra de modo uniforme e intermitente sobre la superficie del medio del filtro antes de infiltrarse en el área de recolección. ( Arias Martínez, Betancur Toro, Gómez Rojas , Salazar Giraldo, & Hernández Ángel , 2010).

**Figura 21***Humedal subsuperficial de flujo vertical*

Fuente: ( Arias Martínez, Betancur Toro, Gómez Rojas , Salazar Giraldo, & Hernández Ángel , 2010)

El mecanismo de funcionamiento de estos humedales se basa en el importante papel de las plantas en la purificación de las aguas residuales, así como de los microorganismos que se encuentran en el medio filtrante. Algunos de estos procedimientos son: ( Arias Martínez, Betancur Toro, Gómez Rojas , Salazar Giraldo, & Hernández Ángel , 2010).

Filtración a través de medios de cultivo de plantas y raíces para reducir los sólidos en suspensión.

Depuración de materia orgánica por la acción de microorganismos, primariamente en bacterias aeróbicas, las plantas se airean a través de las raíces. Solo en el lugar más



profundo, después de un período de operación, se formará una zona anaeróbica y las sustancias orgánicas también sufrirán un proceso de descomposición.

Eliminación de fósforo mediante la transformación inmediata de la planta y adhesión de los componentes del suelo.

Los patógenos se destruyen adsorbiéndose sobre las partículas del sustrato procedentes por las raíces de las plantas, así como por los depredadores bacterianos y protozoarios, lo que tiene un efecto nocivo sobre los organismos patógenos. ( Arias Martínez, Betancur Toro, Gómez Rojas , Salazar Giraldo, & Hernández Ángel , 2010).

Al ser construido un humedal artificial, se deben considerar algunas características para aumentar su eficiencia de modo que pueda funcionar a su máximo potencial, es decir, realizar mejor sus procesos. Las cuales son las siguientes: ( ARCE CARDONA, 2018)

**Estratificación del lecho.** Los humedales deben tener dos capas, primero la capa subterránea donde se debe restringir el flujo de agua, la segunda capa superficial actúa como base para plantas o vegetales. Las capas de suelo no deben tener más de 2 pies de profundidad y las capas superficiales no deben tener más de 6 pulgadas. ( ARCE CARDONA, 2018)

**Protección del lecho.** Para proteger los humedales construidos, se debe evitar la erosión y el desplazamiento de la tierra, por lo que se recomienda o fomenta el uso de revestimientos sintéticos, para evitar la infiltración. ( ARCE CARDONA, 2018)

**Topografía.** En cuanto al terreno, se espera que sea plano con una ligera pendiente del 1%, ya que a mayor pendiente, mayor excavación y mayor costo. Por otro lado, si el humedal se va a construir en un canal de agua, se recomienda usar suelo de baja permeabilidad, de lo contrario se recomienda usar sistema de flujo superficial para la impermeabilización del suelo, más para el tratamiento de agua de ríos y arroyos. En todos los casos, la compactación de la arcilla suele ser un método adecuado para preparar un canal o un área de zanja. ( ARTEAGA CORTEZ, 2018)

**Riesgos de inundaciones.** En la fitorremediación implementada por humedales debe construirse lejos de la comunidad, el flujo de agua tratada debe conocerse para evitar posibles inundaciones y no exceder la capacidad del humedal construido. ( ARCE CARDONA, 2018)

**Clima.** En este caso, el rendimiento del proceso de tratamiento depende mucho de la climatología, ya que, si el humedal artificial se instala en una zona invernada, su rendimiento dependerá en gran medida de la temperatura de esa zona. Esto es muy importante para la eficiencia de este sistema, por lo que es muy sensible a la temperatura, ya que es el principal mecanismo de procesamiento es biológico. ( ARCE CARDONA, 2018)

Si el área experimenta invierno y no se puede cumplir con el objetivo del tratamiento, se requiere almacenamiento de agua; por otro lado, se necesitan fuentes de agua alternativas en climas cálidos para evitar que los humedales se sequen. ( ARCE CARDONA, 2018)

### ***3.2.2 Lineamientos para la selección de especies de plantas para la fitorremediación***

La efectividad de la eliminación de contaminantes durante la fitorremediación dependerá primeramente de los tipos de plantas utilizadas, las condiciones de desarrollo de las especies, estacionalidad y tipo de metal a eliminar. Por lo tanto, para obtener excelentes resultados, las plantas a emplear deben tener las siguientes características: (Castrillón Trujillo & Navarro Aguirre, 2016).

Tolerancia a altísimas concentraciones de metales.

Excelente aglomeración de metales y sustancias tóxicas.

Que tenga rápida tasa de crecimiento y alta productividad.

Que sea de fácil acceso y rápida cosecha.

### ***3.2.3 Tipos y características de medios filtrantes***

Filtrar a través de materiales granulares en los tratamientos de aguas residuales, es uno de las técnicas más utilizadas y conocidas en el sistema de fitorremediación, pero estos medios filtrantes se consiguen dividir en dos grupos:

Los que operan creando una barrera delgada que accede el paso sólo del fluido y no de las partículas sólidas en suspensión en él. Modelos notorios son los filtros de tela, los de criba y el papel de filtro. (Cuero Caicedo, 2019).

También están los que se presentan formando una barrera gruesa obstruyendo el paso de líquidos. Los más manejados son los filtros de lecho de grava, arena, la cerámica porosa, el metal poroso y los pre-capas utilizados en ciertos filtros industriales que incluyen depósitos de gelatina. (Cuero Caicedo, 2019).

Los medios filtrantes poseen diferentes características que se deben tener en cuenta como son las que se presentan a continuación:

El tipo de medio: es seleccionar el lecho de acuerdo a la calidad deseada del agua filtrada. Además, se debe considerar la estabilidad de la ejecución del filtro. Un medio filtrante ideal es uno de partículas de un tamaño y peso específico, que requiere al menos un gran aumento de agua para ser limpiado de manera efectiva, obteniendo un efluente de alta calidad. (Cuero Caicedo, 2019).

Tamaño efectivo (TE) del material filtrante: es el porcentaje (en peso) de mallas que pasan por un rango de tamaños de partículas, estableciendo el tamaño efectivo el 10% del material que pasa por ellas. (Cuero Caicedo, 2019).

Coefficiente de uniformidad del material filtrante (CU): en relación al porcentaje de partículas que transitan a través de una sucesión de mallas de diferente grosor, el coeficiente de uniformidad es igual a la relación entre el tamaño de los granos que representa el 60% de las partículas que pasan a través de la malla más gruesa y el tamaño de los granos más pequeños. La tasa de descuento correspondiente al 10% del medio. (Cuero Caicedo, 2019).

Peso específico del material filtrante: es igual al peso de los gramos multiplicado por el volumen que ocupan. (Cuero Caicedo, 2019).

También, una de las características fundamentales de los medios filtrantes debe ser; su alta dureza, durabilidad, densidad específica, y solubilidad en ácido, asimismo de estar claramente libres de partículas foráneas a éstos.

### ***3.2.4 Factores ambientales***

Los factores ambientales son necesarios para suministrar escenarios óptimos para el desarrollo de microorganismos renovables. Los microorganismos son muy sensibles a los cambios climáticos, pH, nutrientes y disponibilidad de oxígeno. ( Guio Arteaga & Toscano Hernández, 2018).

La temperatura es uno de los componentes ambientales más significativos que afectan las actividades metabólicas microbianas y las tasas de biodegradación. Regularmente, las especies bacterianas crecen dentro de un rango de temperatura bastante estrecho entre 20 y 30 °C. Se reduce la biodegradación por enzimas desnaturizantes por encima de 40 °C e inhibe la biodegradación por debajo de 0 °C. Sin embargo, también se ha producido la biodegradación de hidrocarburos a temperaturas exageradas. ( Guio Arteaga & Toscano Hernández, 2018).

Para llevar a cabo el método de fitorremediación, el contaminante debe estar disponible para el proceso de remoción que realizan las plantas. Las condiciones ambientales pueden determinar la eficiencia de un proceso.

Para los metales pesados, las plantas a menudo necesitan encontrar formas solubles en agua de los elementos químicos para incorporarlos en sus procesos metabólicos. En este sentido, el pH juega un papel importante, ya que suelen existir de esta forma en ambientes ácidos. De manera que aumenta el pH, disminuye la disponibilidad de metales pesados en forma diluida, y tienden a formar otros compuestos que las plantas no pueden utilizar. (González Gómez, 2010).

El pH tiene un efecto significativo sobre la actividad microbiana, por lo tanto, entre más alta sea la diversidad de microorganismos presentes, posiblemente tenga un mayor rango de tolerancia. No coexisten ambientes predeterminados que sean óptimos para todos los casos, pero en general, la totalidad de los microorganismos crecen mejor en el rango de pH de 6 a 8. Generalmente, el pH óptimo para las bacterias heterótrofas es neutral. (pH 6 - 8), mientras que para las setas es más ácido (pH 4 - 5). El pH óptimo determinado para el proceso de biodegradación es neutro (pH 7,4 - 7,8). Asimismo, el pH afecta claramente la solubilidad del fósforo y el transporte de metales pesados en el suelo o agua. (Guio Arteaga & Toscano Hernández, 2018).

### 3.3 Caracterización de las aguas residuales

Para fitorremediación y filtros percoladores se caracterizan aguas residuales, tanto domésticas como industriales, determinando los parámetros de calidad más importantes. Primeramente, en este proceso se deben tomar muestras del efluente y así poder evaluar indicadores como los son la temperatura, DBO, DQO, pH, conductividad, sólidos totales, nitrógeno, metales y también una caracterización microbiológica para los coliformes como se muestra en la tabla 11.

**Tabla 11**

*Caracterización de parámetros fisicoquímicos*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>
Temperatura	°C
Oxígeno disuelto	mg O <sub>2</sub> /L
Demanda Química de Oxígeno	mg O <sub>2</sub> /L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg O <sub>2</sub> /L
Carbono orgánico total	mg O <sub>2</sub> /L
Sólidos suspendidos totales	mg/L
Mercurio	mg/L
Color aparente	UC
pH	U de pH
Turbiedad	UNT
Fósforo particulado	mg/L
Nitrógeno total	mg N/L
Alcalinidad total	mg CaCO <sub>3</sub> /L
Acidez total	mg CaCO <sub>3</sub> /L
Conductividad	microsiemens/cm

Fuente: (Niño , Aponte , Rodríguez , & Granados , 2018).

Las características biológicas en aguas residuales domésticas muestran alto contenido de materia orgánica, como lo son carbohidratos, lípidos, proteínas y principalmente fecales, estas

albergan organismos patógenos, como virus y bacterias, que en su mayoría son vertidas a cuerpos hídricos (ríos, quebradas, entre otros) produciendo elevados grados de contaminación que afectan directamente el ecosistema. ( Carreño Sayago, 2020).

Las aguas residuales industriales no poseen carga orgánica tan elevada como las domésticas, sus compuestos son más inorgánicos, por ejemplo: colorantes, metales y fenoles. El vertimiento de estos efluentes mayormente viola la normatividad, por su gran contenido de cromo, arsénico, plomo y mercurio, entre otros, siendo contaminantes altamente tóxicos. ( Carreño Sayago, 2020).

El DBO es un parámetro de calidad del agua que sirve para determinar el grado de contaminación, siendo uno de los indicadores más importantes debido a que establece la concentración de materia orgánica contaminante respecto a la cantidad de oxígeno que utiliza para su degradación en condiciones aeróbicas. ( Carreño Sayago, 2020).



## Capítulo 4. Proceso constructivo y especificaciones técnicas

### 4.1 Filtros percoladores

#### 4.1.1 Forma del filtro

La estructura del filtro está relacionada con el tipo de dispensador utilizado. Dado que la totalidad de las máquinas están construidas con distribuidores rotativos, los filtros suelen ser redondos, pero también se utilizan filtros hexagonales y octogonales. Las unidades con una disposición de boquilla fija suelen tener filtros rectangulares, pero se puede utilizar cualquier forma. ( Ruiz Cortines, 2021).

#### 4.1.2 Paredes

La mayoría de los filtros tienen paredes de hormigón armado alrededor de su perímetro, normalmente de 0,2 a 0,3 m de espesor. En climas fríos, la pérdida de calor a través de las paredes puede afectar la toma de decisiones, por lo cual, se ha encontrado que es beneficioso proporcionar protección contra el viento extendiendo las paredes laterales de 1,5 a 2,5 m por encima de la parte superior del material del filtro o instalando una barrera sobre el filtro de pared. Dado que generalmente los materiales sintéticos son autoportantes, las paredes de estos filtros se usan solo para controlar el flujo hídrico residual y ayudar a conservar la temperatura de los efluentes. Uno de los tipos de paredes más baratos son las secciones de edificación en fibra de vidrio unidos a una sola pieza de aluminio o acero. ( Ruiz Cortines, 2021).

Si bien, un análisis del costo del ciclo de vida debe tener en cuenta la vida limitada de los soportes de estructuras metálicas en comparación con la vida útil de una estructura de hormigón. Al usar bloques de concreto y paredes prefabricadas u otra materia prima económica, se debe tener cuidado para impedir fugas, que pueden debilitar la pared y causar un blanqueamiento exterior antiestético. En algunos casos son utilizadas juntas, pero pueden tener una vida útil más corta que el material de soporte y también se deben considerar en el análisis del costo del ciclo de vida. ( Ruiz Cortines, 2021).

#### ***4.1.3 Cúpula***

En ocasiones, se recomienda tapar el filtro, por lo cual los domos se emplean para contener el aire de escape de las torres de los lavadores químicos, estos suelen estar hechos de aluminio o fibra de vidrio. Cuando usan Techo abovedado, el flujo de aire puede subir o bajar y hasta el 75% de los gases de escape se pueden reutilizar directamente, lo que conlleva a un Flujo reducido de gases y contaminantes, reduciendo así costos de productos químicos. ( Ruiz Cortines, 2021).

#### ***4.1.4 Drenaje***

El piso del filtro debe poder aguantar la técnica de drenaje, los medios y la carga de agua si el filtro se inunda. Los pisos de hormigón con malla de acero de 100-200 mm se utilizan generalmente como losas de piso. Este piso desciende hasta el pasaje del alcantarillado; los gradientes usados están de 0.5 a 5%, dependiendo de la dimensión del filtro. Los canales de drenaje central o periférico se pueden usar para la reducción de fluidos y aire.

#### ***4.1.5 Estructura de Soportes***

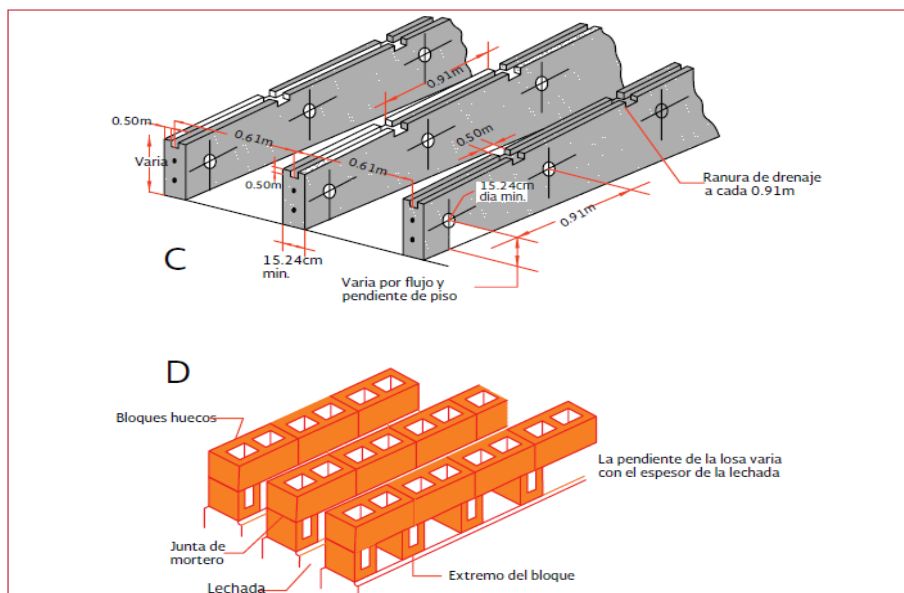
Los bloques de filtros prefabricados hechos de barro vitrificado u hormigón se utilizan para instalaciones de material de piedra. Estos bloques suelen ser rectangulares con una abertura en la parte superior igual o al menos el 20% de la superficie del bloque. Las aguas contaminadas que transitan por el filtro ingresan al módulo y fluyen a través de conductos dentro del módulo. Estos pasajes tienen capacidad suficiente para contener un flujo de no más del 50% del área de la sección transversal.

El diseño de los sistemas de soporte puede cambiar según el tipo de soporte. Los materiales tubulares semi corrugados verticales (VSC), donde los líquidos y los sólidos no logran fluir horizontalmente, necesitan un área abierta en la parte inferior de la tubería para evitar que se acumulen sólidos. En este caso se utilizan vigas de rejilla o soporte con canales o taludes o ranuras en las vigas. Para materiales FC o VTC que proporcionan flujo horizontal, las vigas sólidas son una práctica común. ( Ruiz Cortines, 2021).

Los bloques deben limitarse a la profundidad del medio de soporte está entre 1,8 y 2,4 metros. Si los bloques se utilizan en instalaciones de soporte para VTC y para madera, puede haber pocas aberturas y ventilación insuficiente bajo cargas pesadas. Es necesario conservar suficiente área de contacto con el soporte para evitar la compresión del soporte. En la figura 22 se muestran los bloques y los soportes de vigas acanaladas. ( Ruiz Cortines, 2021).

**Figura 22**

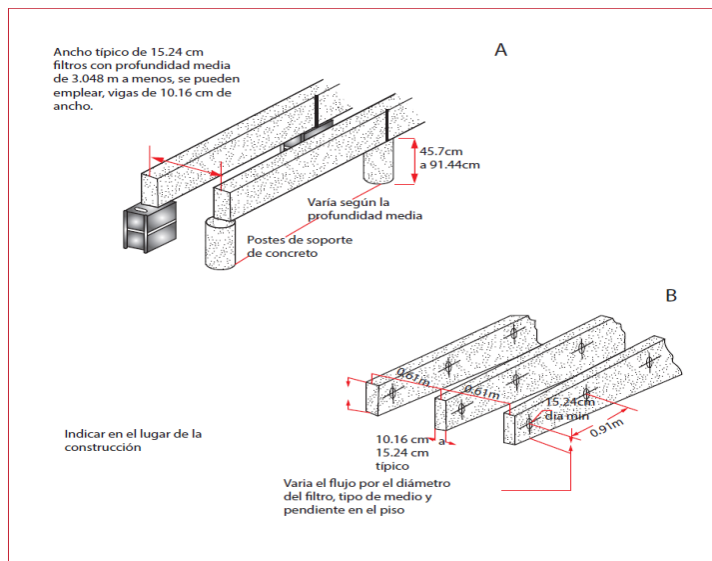
Sistemas de soporte (a)



Fuente: ( Ruiz Cortines, 2021)

**Figura 23**

Sistemas de soporte (b)



Fuente: ( Ruiz Cortines, 2021)

#### ***4.1.6 Especificaciones del medio de soporte***

Elegir la roca como medio de soporte a menudo depende de los materiales aprovechables localmente o de los costos de transporte. Para ello se utilizan piedras, grava, roca triturada, desecho de alto horno y antracita. Además, se utilizan bloques de caoba y materiales inactivos desarrollados en formas apropiadas. El material que elija debe ser sano, duro, limpio, libre de polvo e insoluble en agua residual. ( Ruiz Cortines, 2021).

Existe cierto desacuerdo sobre el tamaño óptimo de los medios de rocas. Un requisito es que el 95% o más de los medios pasen a través de la malla de 2600 mm<sup>2</sup> y permanezcan en la malla de 1600 mm<sup>2</sup>. Las rocas generalmente se especifican como de tamaño uniforme, con las tres dimensiones lo más iguales posibles. Estas no deben desintegrarse en su vida útil. ( Ruiz Cortines, 2021).

Las especificaciones de colocación de piedra suelen incluir lo siguiente:

Al colocar los medios, se debe evitar la rotura y la separación en partículas de diferentes tamaños.

El material debe limpiarse inmediatamente antes de la colocación

El material se colocará sobre las piedras ya puestas mediante métodos que no requieren mucho tráfico.

Se recomienda utilizar una cinta transportadora o una grúa para colocar el material. (Ruiz Cortines, 2021).

#### 4.1.7 Proceso constructivo

**Tabla 12**

*Proceso constructivo de filtro percoladores*

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
1	Actividades preliminares	
1.1	Reconocimiento del terreno	GLOBAL
1.2	Desbroce y limpieza del terreno	M2
1.3	Localización y replanteo	M2
1.4	Campamento e instalaciones provisionales	GLOBAL
1.5	Cerramiento en lona verde	ML
2	Movimiento de tierras	
2.1	Excavación mecánica	M3
2.2	Compactación del suelo de soporte con material de excavación	M3
3	Estructura y fundiciones	
3.1	Armado de la estructura metálica de acuerdo a lo estipulado en el diseño	KG
3.2	Fundición de base	M3
3.3	Encofrado y apuntalamiento para fundir el filtro	M3
3.4	Fundición de las paredes del filtro	M3
4	Acabados	
4.1	Tallado	GLOBAL
4.2	Obra gris	M3
5	Ensamblado del sistema de drenaje o recolección	
5.1	Instalación de tuberías de recolección y recirculación	ML
6	Llenado del filtro con el lecho	
6.1	vaciado y extensión del medio filtrante ya sea de piedra, PET u otro material especial para la eliminación de contaminantes	M3
7	Retiro de escombros	M4

Fuente: (Castañeda Ceja, 2015)

## 4.2 Fitorremediación

### 4.2.1 Proceso constructivo

Para todo sistema de aguas residuales se debe llevar a cabo un proceso constructivo, donde se implementa la ingeniería civil en cada una de las actividades a realizar, teniendo como objetivo una ejecución óptima y eficiente. En la tabla 13 se mencionan las actividades más relevantes en las etapas constructivas para el sistema de fitorremediación en un orden preciso que se deben ejecutar.

Tabla 13

#### *Proceso constructivo de Humedales Artificiales*

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
1	Actividades preliminares	
1.1	Reconocimiento del terreno	GLOBAL
1.2	Desbroce y limpieza del terreno	M2
1.3	Localización y Replanteo	M2
1.4	Campamento e instalaciones provisionales	GLOBAL
1.5	Cerramiento en lona verde	ML
2	Movimiento de tierras	
2.1	Excavación mecánica para dique de contención	M3
2.2	Relleno compactado para suelo de soporte con material de excavación	M3
3	Construcción de cámaras de registro de entrada y salida (Arquetas)	UND
4	Impermeabilización del dique de contención	
4.1	Excavación manual para zanja perimetral	M3
4.2	Extensión de geo membrana	M2
4.3	Relleno de zanja perimetral con material de excavación	M3

5	Ensamblado del sistema de drenaje o recolección	
5.1	Instalación de tubería de recolección	ML
5.2	Ensamblado con cámaras de registro	GLOBAL
6	Llenado de grava y/o arena	
6.1	Vaciado y extensión de colchón de arena para soporte	M3
6.2	Vaciado y extensión de capa de grava (Sustrato)	M3
7	Selección y colocación de la capa vegetal	UND
8	Retiro de escombros	M3

Fuente: (Sanjuan Carreño & Rojas Sanguino, 2020).

Las principales consideraciones para el sistema de fitorremediación es una buena compactación de la base, teniendo en cuenta la pendiente de diseño y el llenado cuidadoso de la zanja con el material granular utilizado, generando protección frente a problemas como cortocircuitos, flujo preferencial o fallo de aislamiento, así como el cuidado de una distribución uniforme de la arena para evitar posibles fallos de aislamiento por contacto con material granular. ( Aravena Fica, 2018).



## Capítulo 5. Marco normativo

### 5.1 Normativas nacionales

La Resolución 0330 de 2017 expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – Ras y se anulan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009”, determina los requerimientos técnicos que deben desempeñarse en las fases de diseño, construcción, comienzo de la construcción, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura vinculada con las prestaciones públicas de acueducto, alcantarillado y también de aseo. (MINVIVIENDA, 2017).

La normatividad anteriormente dicha, tiene especificaciones de interés para el presente trabajo de grado:

La calidad del agua debe cumplir con unos parámetros mínimos, para esto se realizan mínimo cinco jornadas de medición y de muestreo horario que deben durar 24h, el caudal y la temperatura se determina en campo. En la tabla 14 se detallan qué parámetros se tiene que medir por nivel de confiabilidad. (RAS, 2000)

**Tabla 14***Parámetros mínimos que se tienen que medir por cada nivel de complejidad*

<b>Parámetro</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Medio Alto</b>	<b>Alto</b>
Oxígeno disuelto	—	—	—	—
DBO				
Soluble	—	—	—	—
Total	—	—	—	—
SS				
SST	—	—	—	—
SSV	—	—	—	—
DQO				
Soluble	—	—	—	—
Total	—	—	—	—
<b>NITRÓGENO</b>				
Total	—	—		
Orgánico				
Soluble				—
Particulado				—
Amoniacal				
Soluble				—
Particulada				—
Nitritos				—
Nitratos				—
<b>FÓSFORO TOTAL</b>				
Soluble	—	—	—	—
Particulado	—	—	—	—
<b>CLORUROS</b>			—	—
<b>ALCALINIDAD</b>				—
<b>ACEITES Y GRASAS</b>			—	—
<b>COLIFORMES</b>				
Fecales			—	—
Totales			—	—
PH	—	—	—	—
ACIDEZ	—	—	—	—
<b>DETERGENTES</b>			—	—

Fuente: (RAS, 2000)

Se deben realizar estudios de tratabilidad y/o toxicidad en el que se medirán los metales pesados; estas se deben hacer en plantas de tratamiento biológico al presentarse un nivel de complejidad alto. Estos estudios se realizan según la norma GTC 31 (GUÍA PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE TOXICIDAD), del Instituto Colombiano De Normas Técnicas Y Certificación. (RAS, 2000)

En el apartado E.4.3 SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO del Título E de la RAS 2000 se muestran diferentes factores que se deben tener en cuenta a la hora de escoger el tratamiento que se le va a realizar al efluente, dentro de estos se encuentra que se le deben realizar estudios de calidad al agua, ya que esta se debe garantizar para poderle dar el uso deseado y que se cumpla lo establecido en el Decreto 1594 de 1984, por lo tanto se tiene que realizar un tratamiento al agua antes de ser vertida que cumpla con los criterios estipulados en el decreto ya mencionado; mínimamente, deben realizarse los estudios de calidad al efluente mencionados a continuación: Oxígeno disuelto (OD), DQO, DBO, Coliformes fecales y totales, N<sub>t</sub>, P<sub>t</sub>, SST. (RAS, 2000)

ARTÍCULO 183. Recorridos cortos para instalación de sistemas de tratamiento de aguas residuales centralizados. La instalación de la PTAR debe tener en cuenta que se cumplan las siguientes distancias mínimas. (MINVIVIENDA, 2017)

**Tabla 15**

*Distancias mínimas para la localización de sistemas de tratamiento de aguas residuales con relación a otra infraestructura.*

<b>Tecnología</b>	<b>Con respecto a</b>	<b>Distancia (metros)</b>
Filtros percoladores de baja tasa (problemas con moscas)	Centros poblados	200
Filtros percoladores de media y alta tasa	Centros poblados	100

Fuente: (MINVIVIENDA, 2017)

ARTÍCULO 184. Eficacia en los procesos de tratamiento. Acorde con la eficacia que se necesita para el tratamiento se encuentran varias opciones para alcanzar el objetivo.

**Tabla 16**

*Rangos de eficiencia que se deben lograr en los procesos de tratamiento*

		Eficiencia mínima de remoción de parámetros, porcentajes (%)						
Unidades de tratamiento		DBO5	DQO	SST	SSED	Grasas y aceites	Patógenos	Obs.
Tratamiento secundario	Filtros percoladores de alta tasa, roca de alta tasa, plástico	65-90	55-70	60-85	N/A	N/A	80-90	-
	Filtros percoladores de alta tasa, plástico	75-95	60-80	68-85	N/A	N/A	80-90	-

Fuente: (MINVIVIENDA, 2017)

ARTÍCULO 194. Requisitos mínimos de diseño para filtros percoladores. El reactor o filtro puede componerse de un recipiente cilíndrico o rectangular con diferentes diámetros, logrando alcanzar máximo los 60 m y con profundidades que varían de 1.50 m a 12 m. el medio filtrante pudiendo ser de piedra triturada, medio plástico y también de madera, que se manufacturan principalmente para tal fin, el medio tiene que ser duradero, resistente al

agrietamiento, no puede disolverse ni diluirse, y tampoco puede proporcionar sustancias no deseadas al agua ya tratada. En la siguiente tabla se muestran los parámetros de diseño para filtros percoladores. (MINVIVIENDA, 2017).

La Resolución 1256 del 23 de noviembre del 2021, expedida por el ministro de Ambiente y desarrollo sostenible, permite el reúso de las aguas residuales con el fin de preservar los recursos naturales para poder conservarlos, restaurarlos y usarlos de forma sostenible. (MINAMBIENTE, 2021).

### **Constitución de Colombia**

La Constitución Política de Colombia, menciona que, dentro de los derechos fundamentales, colectivos y del ambiente que se encuentran en ella, está el derecho a disfrutar y poseer un ambiente saludable, a la protección de la integridad del espacio público, la integridad y diversidad del ambiente, la organización del manejo y provecho de los recursos naturales. Respecto a la contaminación del recurso hídrico no es preciso, no obstante, sobresalen los artículos de mayor interés para el presente trabajo de grado. (Asamblea Constituyente de Colombia, 1991).

**Artículo 79:** Todo ser humano posee el derecho a disfrutar de un ambiente saludable. La ley responderá ante la intervención de la sociedad en la toma de decisiones que lleguen a afectar el ambiente. Es obligación del Estado salvaguardar la integridad y diversidad del medio

ambiente, preservar las áreas de particular interés ecológico e impulsar la educación para lograr dichos objetivos. (Asamblea Constituyente de Colombia, 1991).

**Artículo 80:** El estado tendrá que evitar y vigilar los factores de daño en el medio ambiental, aplicar las sanciones legales y reclamar el arreglo de los daños ocasionados. (Asamblea Constituyente de Colombia, 1991).

**Artículo 95:** Es deber tanto de las personas como del ciudadano, preservar los recursos naturales y culturales que trae consigo el país y ayudar para conservar un ambiente sano. (Asamblea Constituyente de Colombia, 1991).

**Artículo 333:** La empresa, como fundamento del progreso, posee un oficio social que involucra compromisos. El estado consolidará las organizaciones solidarias e incentivará el desarrollo empresarial. (Asamblea Constituyente de Colombia, 1991).

### **Ley 99 de 1993**

Esta Ley insta que el ministerio, tiene que establecer medidas de índole general con el objetivo de controlar y disminuir la contaminación de la fauna y flora de todo el territorio nacional.

**Artículo 66:** Señala las facultades para cada autoridad correspondiente en su zona, por lo que tiene que certificar y comprobar el manejo conveniente de los vertimientos ocasionados por

distintas actividades industriales, que puedan crear un deterioro inminente al medio ambiente. (Congreso de Colombia, 2022).

### **Código de recursos naturales (decreto-ley 2811 de 1974)**

Decreta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. En el capítulo II de este código se concreta la regulación desde una perspectiva de previsión e inspección de contaminación del recurso hídrico. (Función Pública , 2022).

### **Decreto 1594 de 1984**

Pauta los criterios de calidad del agua y se instauran las reglas de vertimiento las cuales se pueden aplicar en todo el territorio nacional, en sus artículos muestran las consecuencias que puede presentar el vertimiento de forma inesperada.

**Artículo 93:** En el momento en que en una masa de agua se muestren vertimientos imprevistos o por fuerzas superiores o un caso accidental, como lo es en el caso de petróleos, hidrocarburos y demás sustancias, que ocasionen escenarios de desastre, el Ministerio de Salud establecerá con las EMAR los procedimientos destinados para el control de tal situación. (Función Pública, 2015).

**Artículo 96:** Los usuarios que tengan la intención de explorar, explotar, manufacturar, refinar, transformar, procesar, transportar o almacenar hidrocarburos o sustancias que sean perjudiciales para la salud y para los recursos hidrobiológicos, deben estar provisionados de un

plan de contingencia para prevenir y controlar los derrames, por lo que tendrán que disponer de la aprobación de la EMAR y el Ministerio de Salud o de su entidad delegada. (Función Pública, 2015).

**Artículo 168:** A los usuarios que tiene intereses sanitarios cuyo vertimiento presente riesgo para la salud y a los usuarios que tengan almacenados, produzcan, o trasladen hidrocarburos o demás sustancias nocivas para la salud o para los recursos naturales renovables, el Ministerio de Salud, las EMAR o las entidades delegadas pueden ordenarles la presentación y el desarrollo de un plan de riesgos y control de accidentes, sin perjuicio del cumplimiento de la Ley 09 de 1979 y las disposiciones reglamentarias sobre la materia. (Función Pública, 2015).

#### **Resolución 3956/2009**

Pauta las propiedades del vertimiento y sus rangos admisibles de contaminación para poder verterse a una masa de agua, estos son regularizados por la secretaria distrital de ambiente en el casco urbano de la capital.

**Artículo 10:** Vertimientos permitidos a corrientes principales. Se admitirá el vertimiento del agua residual a las corrientes más importantes bajo las circunstancias presentes:

Agua residual no doméstica: Usuarios que derramen aguas residuales no domésticas con autorización de vertimiento válido y que obedezca a los valores de referencia y propiedades establecidas en los objetivos de calidad de las masas de agua en el distrito capital para cada tramo en particular determinado por la autoridad ambiental calificada y muestren propiedades



físicas y químicas con los mismos valores de referencia establecidos en la tabla 17 o que sean inferiores. (Secretaría distrital del ambiente, 2009).

**Tabla 17**

*Niveles admisibles para verter una masa de agua natural.*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor tramo 1</b>	<b>Valor tramo 2,3 y4</b>
Color	Unidades Pt-Co	50 unidades	80 unidades
S. sedimentables	mL/L	2	2
Temperatura	°C	15	20
Coliformes fecales	NMP 100mL		
DBO5	mg/L		
DQO	mg/L		
Fósforo total	mg/L		
Grasas y aceites	mg/L		
Nitrógeno total	mg/L		
Oxígeno disuelto	mg/L		
PH	Unidades		
S. suspendidos totales	mg/L		
Tensoactivos	mg/L		

Fuente: (Secretaría distrital del ambiente, 2009).

## 5.2 Normativas internacionales

La Organización Internacional de Normalización ISO (Internacional Organization for Standardization, por sus siglas en inglés) como entidad encargada de elaborar normas técnicas internacionales, ha establecido directrices partiendo de las necesidades mundiales referentes a los escasos del agua para poder controlar el consumo de esta y reducir de igual manera las pérdidas generadas. (ISOfocus, 2018)

Teniendo en cuenta que la agricultura consume una gran cantidad de agua en el mundo, la ISO 16075-1 define las normas básicas para poder reutilizar el agua residual en proyectos de riego. (ISOfocus, 2018)

Reducir las pérdidas del agua a la mitad ayudaría a que más personas en el mundo tuvieran acceso al preciado líquido, por lo que la ISO 24528 establece normas para la reducción en la pérdida del agua en sistemas de suministros urbanos. (ISOfocus, 2018)

La ISO 14046 asiste a las empresas para que vigilen su huella hídrica, siendo este un indicador del agua que se utiliza diariamente; de igual manera se crea la ISO 22524 como plan piloto en las instalaciones de tratamiento del agua residual industrial con la finalidad de lograr la reutilización del agua. (ISOfocus, 2018).

La ISO 24516-3 ayuda con las redes de captación del agua residual a gestionar de mejor manera el recurso hídrico, teniendo como base que un porcentaje elevado de las aguas residuales es devuelto al ecosistema sin ser tratado ni reutilizado. (ISOfocus, 2018),

## **Capítulo 6. Comparación de los sistemas estudiados versus los sistemas convencionales tipo PTAR, analizando los porcentajes de remoción de contaminantes**

Al revisar la bibliografía que ha sido recopilada referente a los sistemas de filtros percoladores y fitorremediación versus los sistemas convencionales tipo PTAR; han sido construidos y evaluados para poder medirse la eficiencia que tienen en los porcentajes de remoción y si están realizando adecuadamente su trabajo al filtrar el agua; se realizó una recopilación de diferentes fuentes de información, tomando como referencia distintos factores como el lugar donde se realizó el estudio, los tipos de filtros percoladores y las especies que se utilizaron en la fitorremediación, modelos matemáticos usados para el diseño y porcentajes de remoción obtenidos sobre cada uno en particular. En las tablas 18, 19 y 20 se muestra donde se almacena esta información para posteriormente ser analizada.

## 6.1 Cuadro comparativo Filtros Percoladores

**Tabla 18**

*Cuadro comparativo Filtros Percoladores*

Título	Autores	Universidad o Institución	Año	Ubicación Modelo	Sección utilizada	T <sub>prom</sub> (°C)	Lecho	Modelo matemático de diseño utilizado	%Eficiencia de remoción			
									DBO5	DQO	SST	Coliformes totales
Estudio de la eficiencia de un filtro sumergido y un filtro percolador en el tratamiento secundario de las aguas residuales domésticas, Moyobamba, 2014	Alberth Anthony Rodríguez Tuesta	U. Nacional de San Martín-Tarapoto	2014	Moyobamba-Perú	Circular	22.2	Plástico	Campbell y Stanley	74	72	64	x
Implementación de material de desecho PET como elemento filtrante en filtros biológicos	Jimmy Obdulio Cáceres	U. San Carlos de Guatemala	2012	Ciudad de Guatemala	Circular	22-25	Plástico	Eckenfelder, Germain y Schultz	91	91	x	x
Evaluación de filtro percolador a escala piloto para la remoción de carga orgánica del efluente residual del centro de faenamiento, Calceta- Bolívar	Kelly Katherine Mendoza Ortega y José Maximino Roca Mancilla	Escuela superior politécnica agropecuaria de Manabí Manuel Félix López	2021	Calceta-Bolívar	Circular	22	Piedra	Lemji y Eckstädt	79,4	90,4	92,71	x

Evaluación de la eficiencia de un sistema de dos filtros percoladores en serio para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la urbanización Santa Lucía- Morales, 2018	Ander Jaramillo Mondragón y Jesús Jhoel Paredes Togas	U. Peruana Unión	2019	Provincia de San Martín-Perú	Hexagonal	22	Piedra Pómez	x	98.12	96.36	95.76	x
Evaluación de remoción de carga contaminantes con sistema piloto para tratamiento de aguas residuales domésticas	Andrés Felipe Pasaje T. Y Catherine Natali Palacios O	U. Nariño, San Pablo de Pasto.	2018	San Fernando, Vereda de Dolores, Nariño	Circular	18	Grava y arena	Metcalf y Eddy	99,5	97,9	80,2	100
Estudio experimental sobre sistema de tratamiento de aguas residuales basado en filtro percolador de mazorca de maíz: diseño, desarrollo y evaluación de desempeño.	Imran Ali, Zahid M. Khan, Muhammad Sultan, Muhammad Mahmood, Hafiz U. Farid, Mohsin Ali, Abdul Nasir	Revista polaca de estudios ambientales.	2016	Bangladesh, Pakistan e India	Circular	25-40	mazorca de maíz	x	79	75	30	X
Una revisión de la investigación sobre la aplicación de filtros percoladores en la eliminación de diversos contaminantes de los efluentes.	Sonali R. Dhokpande, Sunil J. Kulkarni, Dr. Jayant P. Kaware	Revista internacional de ciencias de la ingeniería y tecnología de investigación	2014	Indonesia e India	circular	25	Grava	x	80	90	x	x

## 6.2 Cuadro comparativo Fitorremediación

**Tabla 19**

*Cuadro comparativo Fitorremediación*

Título	Autores	Universidad o Institución	Año	Ubicación Modelo	Especie utilizada	Tprom (°C)	Lecho	%Eficiencia de remoción						
								DBO5	DQO	SST	Nt	Pt	Metales Pesados	Coliformes totales
Fitorremediación de mercurio presente en aguas residuales provenientes de la industria minera	María C. Domínguez, Sara Gómez S. Alba N. Ardila A.	Universidad La Gran Colombia.	2016	Municipio de Cisneros, Antioquia	Eichornia crassipes (Lirio acuático).	22.2	Grava	38,5	46.0	71.4	50	x	70,8	x
Fitorremediación como alternativa de tratamiento para aguas residuales domésticas de la ciudad de Riohacha (Colombia)	Yoma Isabel Mendoza Guerra, Fernando Luis Castro Echavez, Julio César Marín Leal, Elisabeth Hedwig Behling Quintero	La Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.	2016	la Guajira, Riohacha, Colombia	Eichhornia crassipes	x	Grava y arena	91,6	93,9	x	75	87,5	75	99,9
Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación	Peña-Salamanca Enrique, Madera-Parra Carlos A, Sánchez, Jesús M, Medina-	Universidad del Valle	2013	Cali, Valle del Cauca	Heliconia psittacorum, Phragmites australis	25.1	Grava	68	65	78	50	x	60	x



---

de agua  
(Eichhornia  
crassipes).

---

Estudios  
recientes  
sobre  
aplicaciones  
de malezas  
acuáticas en la  
fitorremediación  
de aguas  
residuales:  
artículo de  
revisión

---

Hauwa M. Mustafá y Gasim Hayder.	Revista de ingeniería Ain Shams	2021	Malasia	estratigotas de Pistia	21-30	grava	83,43	65	98	65	81,6	90	x
----------------------------------	---------------------------------	------	---------	------------------------	-------	-------	-------	----	----	----	------	----	---

---



### 6.3 Análisis de la investigación suministrada en las tablas 18 y 19

En las fuentes bibliográficas que fueron recopiladas para realizar el trabajo de grado, se encontraron varios estudios en los que se diseñó, se construyó o simplemente se evaluó cada sistema de filtros percoladores y fitorremediación. Estos, son muy notables, puesto que actualmente construir plantas de tratamiento convencionales para tratar las aguas residuales trae consigo un costo elevado, por ende, es necesario encontrar alternativas que sean económicas, eficientes y también sostenibles con el ambiente.

En los resultados que fueron suministrados por los trabajos de investigación, recopilados en la tabla 18, con respecto de los filtros percoladores, se puede observar cómo los porcentajes de la eficiencia de remoción de contaminantes como la DBO, DQO, SST, coliformes fecales, entre otros, están en valores superiores al 80%, esto se ve evidenciado en el proyecto realizado en la Universidad de Nariño, en el corregimiento de San Fernando (Pasaje & Palacios, 2018) en el que utilizó una sección circular, con un lecho de grava y arena, donde los porcentajes de remoción que se presentaron fueron de 99.5% para DBO, 97.9% para DQO, 80.2% para SST y 100% para coliformes fecales, esto con un caudal de diseño de 510 L/día para un tiempo de retención de 48 horas.

En otro estudio que fue realizado en la Universidad de San Carlos de Guatemala se (Cáceres, 2012) utilizaron materiales reciclables PET para el estudio y se construyó una unidad experimental la cual constó de tres etapas y su evaluación se dividió en seis evaluaciones para la calidad del agua, en cada una de estas el caudal fue aumentando, comenzando desde 0,01 L/s

hasta llegar a un caudal de 0,05 L/s; en este estudio se advirtió de una deficiencia en el sistema cuando el caudal aumenta por lo que se concluyó que para tener mejores resultados se debería mantener un caudal constante, para de esta forma evitar que haya un barrido de bacterias que conformen la biopelícula que hay en el lecho. En esta evaluación se obtuvieron resultados en el porcentaje de remoción de 91% en DBO y DQO.

También se encontró un proyecto en el que utilizaron como lecho piedra pómez y su sección fue hexagonal el cual fue construido en vidrio transparente, este fue realizado en la Universidad Peruana Unión (Jaramillo Mondragón & Paredes Togas, 2019). Este trabajo fue realizado en un tiempo de retención hidráulico de 40 días y en este periodo de tiempo se vio que los porcentajes de remoción fueron aumentando gradualmente, ya que a los 15 días los valores para DBO, DQO y SST fueron de 77.35%, 91.85% y 95.76% respectivamente, a los 30 días fueron de 98.12% para DBO, 93.41% para DQO y disminuye su porcentaje de remoción en SST a 90.40%, y ya para su día final de estudio, es decir el día 40 el valor para DBO se mantuvo constante, para DQO siguió en aumento llegando a 96.36% y ya para SST su valor volvió a 95.76%.

Por otra parte, en los datos recolectados para la fitorremediación de acuerdo a la tabla 19 se evaluaron los parámetros DBO5, DQO, SST, metales pesados entre otros, donde presentan variabilidad en los porcentajes de remoción, estableciendo así que unas de las especies evaluadas son más eficientes que otras, como es el caso de *Eichhornia crassipes* que obtiene remociones superiores al 70 %, observado en el estudio realizado por la Universidad del Zulia en Maracaibo, Venezuela. ( Mendoza Guerra , Castro Echavez, Marín Leal , & Behling Quintero , 2016).

La fitorremediación es una opción eficaz, económica y factible para la recuperación de ambientes contaminados y aguas residuales, según los estudios investigados se logró un porcentaje alto en la remoción de variables fisicoquímicas y microbiológicas para todos los indicadores. En la remoción de DBO la *Eichhornia crassipes* alcanza un 91,6% seguido de *Nymphoides humboldtiana* que obtiene un 84,19%, consiguiendo así una excelente eficiencia en este parámetro. La DQO es un indicador de materias orgánicas biodegradables y no biodegradables, los valores de la tabla 19 muestran que la especie con mayor eficiencia en este parámetro sigue siendo la *Eichhornia crassipes* con resultados que han llegado a superar el 90%, siendo una de las plantas con mejor desempeño para poder ser utilizadas en el tratamiento de la fitorremediación.

Las aguas residuales tratadas tanto por filtro percoladores como por fitorremediación lograron grandes remociones en los diferentes parámetros evaluados, evidenciando así nuevas tecnologías que permiten la transformación de compuestos utilizando parámetros como la DBO, DQO y SST, logrando también eliminar en gran cantidad la acumulación de sustancias tóxicas y metales pesados encontrados en los efluentes.

## 6.4 Cuadro comparativo PTAR

**Tabla 20**

*Cuadro comparativo PTAR*

Título	Autores	Universidad	Año	Ubicación Modelo	T <sub>prom</sub> (°C)	%Eficiencia de remoción		
						DBO5	DQO	SST
Evaluación de la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas ubicadas en el municipio de La Tebaida	Angela Viviana Cadena Cardona	U. del Quindío	2006	La Tebaida-Quindío	22.7	70,99	65.35	71.16
Evaluación a nivel laboratorio de la capacidad de remoción de materia orgánica de <i>Chlorella vulgaris</i> en las aguas residuales de la PTAR Salitre	Juan Andrés Sandoval Herrera	UIS	2018	Bogotá	17-25	X	81,8	89,91
	Brian Orlando Malo Malo	U. de América						
	Julián Camilo Cartagena Arévalo	U. de América						
	Diego Rubio Fernández	U. Nacional						
Aporte ambiental de la planta de tratamiento de aguas residuales Los Tajos en la remoción de contaminantes físicoquímicos y microbiológicos	Carmen Mora-Aparicio, Carolina Alfaro-Chinchilla, Junior Pastor Pérez-Molina, Ilena Vega-Guzmán.	U. Nacional Costa Rica	2022	San José, La Uruca, Costa Rica	16-25	52,2	49,8	68,5

Determinación de la eficiencia de remoción de contaminantes en la planta de tratamiento de aguas residuales de Jepelacio, 2019	Julio Cesar Arbaiza Rojas	U. Nacional de San Martín	2021	Jepelacio, Perú.	20,3	75,2	75,3	82,5
--	---------------------------	---------------------------	------	------------------	------	------	------	------

---

“Mejoramiento de la eficiencia de remoción de materia orgánica y coliformes termo tolerantes en la ptar del distrito de huáchac-chupaca”	Villanueva Aliaga Lizeth, Yance Soto Jackeline Yuleisi	U. Nacional del centro del Perú	2017	distrito de Huáchac-Chupaca, Perú.	19-22	23	25,61	X
--	--	---------------------------------	------	------------------------------------	-------	----	-------	---

---

## 6.5 Análisis de los sistemas estudiados versus una PTAR

Al revisar los resultados arrojados por los estudios recopilados en la tabla 20, se aprecia que los porcentajes de remoción para la mayoría de los estudios estuvo sobre un valor del 50%, notándose que el estudio donde se vio más remoción para DBO y DQO fue el realizado en la Universidad Nacional de San Martín (Arbaiza Rojas, 2021) en el que sus valores estaban en 75.2% y 75.3% respectivamente, y el estudio donde se vio una mayor eficiencia en el porcentaje de remoción para SST fue en el estudio titulado “ *Evaluación a nivel laboratorio de la capacidad de remoción de materia orgánica de *Chlorella vulgaris* en las aguas residuales de la PTAR Salitre*” ( Sandoval Herrera, Malo Malo, & Rubio Fernández, 2018), donde se obtuvo un valor de 89.91%.

Al hacer la comparación del sistema convencional PTAR con los otros sistemas no convencionales que están en estudio, se vio que, a la hora de remover los contaminantes DBO, DQO, SST,  $N_t$ ,  $P_t$  metales pesados y coliformes fecales presentes en el agua, existe una mayor remoción en los métodos de filtros percoladores y fitorremediación, teniendo una diferencia considerable en sus porcentajes. La tabla 21 se realizó tomando los valores del estudio que arrojó mejores resultados en la remoción de cada uno de los contaminantes que se hallaron en las investigaciones expuestas en las tablas anteriores.

**Tabla 21***Remoción de cada uno de los contaminantes*

Tratamiento	Título	%DBO	%DQO	%SST	%N <sub>t</sub>	%P <sub>t</sub>	%Metales Pesados	%Coliforme Fecales
Filtros percoladores	Evaluación de remoción de carga contaminantes con sistema piloto para tratamiento de aguas residuales domésticas	99.5	97.9	80.2	x	x	x	100
Fitorremediación	Fitorremediación como alternativa de tratamiento para aguas residuales domésticas de la ciudad de Riohacha (Colombia)	91.6	93.9	x	75	87.5	75	99.9
PTAR	Evaluación a nivel laboratorio de la capacidad de remoción de materia orgánica de <i>Chlorella vulgaris</i> en las aguas residuales de la PTAR Salitre	X	81.8	89.91	x	x	x	x

Revisando la tabla 21, se puede observar que los valores más altos de remoción para contaminantes como DQO y DBO los obtuvo el tratamiento por medio de los filtros percoladores, luego de este se encuentra la fitorremediación, que al igual que el tratamiento mencionado anteriormente, consiguió valores superiores a un 90% y respecto a los porcentajes de remoción de los SST, se vio un mejor resultado en las PTAR. Cabe resaltar que al tabular los valores de la tabla anterior se tuvo en cuenta que el lecho presente en filtros percoladores y fitorremediación fueran iguales, para tener un punto más objetivo a la hora de realizar la comparación entre ellos y con la PTAR.

En conclusión, estas nuevas tecnologías de tratamientos no convencionales poseen una efectividad mayor a la eficiencia de remoción que ofrece la PTAR, siendo este un método deficiente para eliminar contaminantes orgánicos emergentes, como los que incluyen sustancias tóxicas y de alto riesgo para los organismos, lo que determina la viabilidad en la utilización de estos tipos de procedimientos como es el caso de filtros percoladores y fitorremediación.



## Capítulo 7. Propuesta empírica de sistema de tratamiento

Actualmente, uno de los retos más grandes que existen a nivel mundial es el de tratar la mayor cantidad de agua posible; el tratamiento de las aguas residuales, independientemente de sus usos ya sean domésticas, industriales, agrícolas o urbanas, se deben realizar mediante las Plantas de Tratamiento de aguas residuales, estas deben contar con algunas especificaciones tanto técnicas como también de ubicación, puesto que se necesita que estén localizadas en puntos estratégicos que permita llevar toda el agua residual o pluvial hacia un lugar donde sean tratadas y posteriormente poder ser devuelta a los cauces de agua y por consiguiente a las personas para poder ser reutilizada en sus actividades diarias, por ello hay diferentes procesos por los que el agua debe atravesar; para que pueda ser llevada a un efluente procurando aminorar el impacto que posiblemente pueden ocasionar las sustancias que esta lleva consigo a causa del uso que se le haya dado. El Tratamiento de las aguas residuales normalmente se dividen en 4 etapas, estas son el tratamiento preliminar, primario, secundario y terciario, de los cuales ya se ha hablado en este trabajo de grado.

Cada vez, se ve más la necesidad de aumentar el número de individuos que tengan acceso al agua potable y saneamiento, y en su defecto este acto tendrá como consecuencia un aumento de vertidos de aguas residuales, por lo que se requiere que el tratamiento de las aguas residuales sea más eficientes, asequibles, sostenibles y sustentables para que haya mayor aprovechamiento del recurso. (Basso, 2022).

Según la UNESCO, en América Latina el tratamiento de las aguas residuales se ha duplicado en los últimos 20 años (Basso, 2022), pero aun así el porcentaje de aguas residuales que son vertidas sin tratarse es elevado aún y esto genera que los efluentes de agua dulce se vean cada vez más disminuidos; por ellos existen diferentes sistemas que han estado estudiándose y desarrollándose, que permiten establecer alternativas que suplan en funcionamiento y economía los sistemas de tratamiento convencionales, puestos que estos sistemas resultan inviables bien sea en su parte técnica, económica o ambiental, en cualquiera de sus fases, construcción, operación y/o mantenimiento.

Debido a la alta contaminación que presentan los afluentes con los cuales se abastecen las poblaciones de las diferentes comunidades en el mundo y que existen tantos agentes contaminantes que afectan al ambiente así como a la salud pública, la ingeniería debe tratar de plantear soluciones sostenibles a los problemas en cuanto a obras civiles para la mitigación de los impactos ambientales que estas puedan generar; los sistemas de tratamiento mediante la implementación de los filtros percoladores y la fitorremediación son un tipo de tratamiento de agua residual, esto lo concibe como un tema de índole civil, por lo tanto la labor como Ingenieros Civiles no radica solamente en la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, sino también en buscar alternativas que se enfoquen en la solución, pero que además no dejen de un lado al medio ambiente brindando una opción sostenible para ello. Dicho esto, para la ejecución de este trabajo de grado se desea plantear una propuesta en la que se junten dos sistemas de tratamientos de aguas residuales tales como filtros percoladores y fitorremediación, para que cada uno cumpla con una función para la eliminación de contaminantes que se encuentren en cuerpos de agua.

Mediante cada uno de los dos sistemas se realiza una depuración del agua residual en lo que respecta a agentes contaminantes que se hallan suspendidos o disueltos en ella, esto se realiza en ambos casos mediante procesos biológicos, ya que en lo que respecta a la fitorremediación, son las plantas las encargadas de depurar el agua y referente a los filtros percoladores, además de que el material filtrante se encarga de retener sólidos en el transcurso del percole del agua, también se genera una biopelícula que depurara los agentes disueltos en el agua residual; cada uno de estos tiene ciertos porcentajes de disminución en referencia a los factores que más se miden en el agua como lo son la DBO, la DQO y los SST.

Para esta propuesta empírica se deben tener en cuenta diferentes parámetros entre ellos se encuentra las características que tiene el agua residual, para conocer la caracterización del agua se debe realizar un muestreo adecuado para asegurar que las propiedades que presenta la muestra no se vean alteradas a la hora de ser tomada, luego deben realizarse estudios de laboratorio de acuerdo a las normas estándar puesto que los resultados obtenidos deben ser exactos y precisos; para poder realizar esta caracterización se debe tener en cuenta otro parámetro importante y es el tipo de agua a tratar, por lo tanto, para poder aplicar a estudios posteriores se propone la utilización de aguas residuales de origen doméstico, las cuales están conformadas por diferentes sustancias excretadas por individuos, donde se incluyen la materia fecal, orines, aguas de lavado, productos químicos utilizados en la limpieza, farmacéuticos, grasas, nitrógeno y fósforo, además de otros en menor cantidad.

Usualmente los vertederos urbanos están conformados por residuos sólidos como lo son el papel, la madera, el vidrio, el metal, entre otros, y el 55% al 65% son de uso doméstico y del 35% al 45% restante es de uso comercial. El porcentaje de contaminantes que se generan en las aguas residuales domésticas se dividen de la siguiente manera: 40% se origina del sanitario, el 30% procedente del aseo personal, 15% del cuarto de lavados y 10% de la cocina. En la tabla 22 se muestran los valores típicos de contaminantes que se presentan en el agua residual doméstica. (Lledó, 2002).

Las aguas residuales domésticas poseen una gran variedad de contaminantes como se puede observar en la tabla 22, es por esto que cada uno de ellos deben cumplir con unos valores máximos permisibles para poder ser vertidos o reutilizados como lo estipula la resolución 0631 del 2015. A la hora de plantear un sistema de tratamiento de aguas residuales, se debe tener en cuenta qué contaminantes se van a depurar en cada fase del tratamiento y así poder escoger qué método es el más adecuado para la depuración y purificación del efluente, este debe garantizar tanto técnica como económicamente una calidad en el agua tratada que sea apropiada para ser vertida o reutilizada y así mismo se disminuyan riesgos de salud pública o daños al medio ambiente.

**Tabla 22**

*Valores permisibles máx. de contaminantes en los vertimientos y la fase del tratamiento de aguas residuales en la que se eliminan.*

Parámetros	Unidades	Valores Máx permisibles en los vertimientos	Contaminantes que se remueven en cada fase			
			Tratamiento Preliminar	Tratamiento primario	Tratamiento secundario	Tratamiento terciario
<b>Generales</b>						
pH	Unidades de pH	6-9	X	X	X	
DQO	Mg/L O <sub>2</sub>	200		X	X	
DBO	Mg/L O <sub>2</sub>	100	X	X	X	X
SST	Mg/L	100	X	X	X	X
SSED	ml/L	1.15	X	X		
Grasas y aceites	Mg/L	15	X	X		
Fenoles totales	Mg/L	0.1			X	
Sustancias activas azul de metileno (SAAM)	Mg/L	0.5			X	
<b>Hidrocarburos</b>						
Hidrocarburos Totales (HTP)	Mg/L	1		X		
<b>Compuestos de fósforos</b>						
Ortofosfatos	Mg/L	0.3			X	X
Fósforo total (P)	Mg/L	0.4			X	X
<b>Compuestos de nitrógeno</b>						
Nitratos	Mg/L	0.1			X	X
Nitritos	Mg/L	0.02			X	X
Nitrógeno amoniacal	Mg/L	0.3			X	X
Nitrógeno total	Mg/L	1			X	X
<b>Metales y metaloides</b>						
Zinc (Zn)	Mg/L	3			X	X
Cobre (Cu)	Mg/L	1			X	X
Cromo (Cr)	Mg/L	0.2			X	X
Hierro (Fe)	Mg/L	1.7			X	X
Magnesio (Mn)	Mg/L	1.7			X	X
Níquel (Ni)	Mg/L	0.4			X	X
Plata (Ag)	Mg/L	0.03			X	X
Plomo (Pb)	Mg/L	0.1			X	X
<b>Otros parámetros a evaluar</b>						
Acidez total	Mg/L	Análisis y reporte			X	
Alcalinidad Total	Mg/L	Análisis y reporte			X	
Color	m <sup>-</sup>	Análisis y reporte			X	
Coliformes totales	NMP/100ml	Análisis y reporte			X	X
Escherichia Coli	NMP/100ml	Análisis y reporte			X	X

El tratamiento que se le vaya a aplicar al efluente depende netamente del uso que se le quiera dar luego de ser tratada, una selección o combinación apropiadas para el tratamiento ayudará a cumplir con los requisitos de reutilización o vertimientos estipulados en la normativa vigente. En esta propuesta se van a tener en cuenta las cuatro fases del tratamiento del agua residual, siendo el tratamiento secundario el más importante y en el que más se va a enfocará esta monografía, ya que se planteará la unión de dos tecnologías estableciendo un tratamiento secundario compacto.

La primera fase del tratamiento para la depuración del agua residual que se debe efectuar es el tratamiento preliminar, este es un tratamiento físico en el que por medio de tuberías el agua es transportada junto con los sólidos de gran tamaño sin ningún problema hasta donde finalmente estos últimos son filtrados comenzando así con la descontaminación del efluente, aquí se remueven cerca del 10% de SST y DBO. (Torres, 2012).

En este diseño se propone el uso de rejillas y sistemas de desarenado, la localización de estos debe estar aguas arriba de la estación de bombeo, se recomienda que tenga varios filtros de diferentes tamaños para así poder filtrar los sólidos de mayor a menor tamaño como se aprecia en la figura 24.

**Figura 24***Filtrado de aguas residuales*

Fuente: (Areaciencias, 2021)

La segunda fase del tratamiento de aguas residuales se realiza mediante un tratamiento primario, este al igual que el preliminar se encarga de realizar el tratamiento mediante procesos físicos, respecto a sus porcentajes de remoción de contaminantes, se alcanzan a reducir entre el 40% al 50% de los SST, del 25%-35% de DBO, 30%-40% de Coliformes totales y cerca del 20% de nutrientes. (Torres, 2012).

Se plantea el uso de un decantador primario de sección circular en esta fase del tratamiento, ya que este separa contaminantes que presentan mayor densidad que el agua haciendo que estos se sitúen en el fondo y el agua clarificada queda en la superficie, pueden utilizarse coagulantes o floculantes para facilitar la separación de SS en este proceso. (Gedar, 2017).

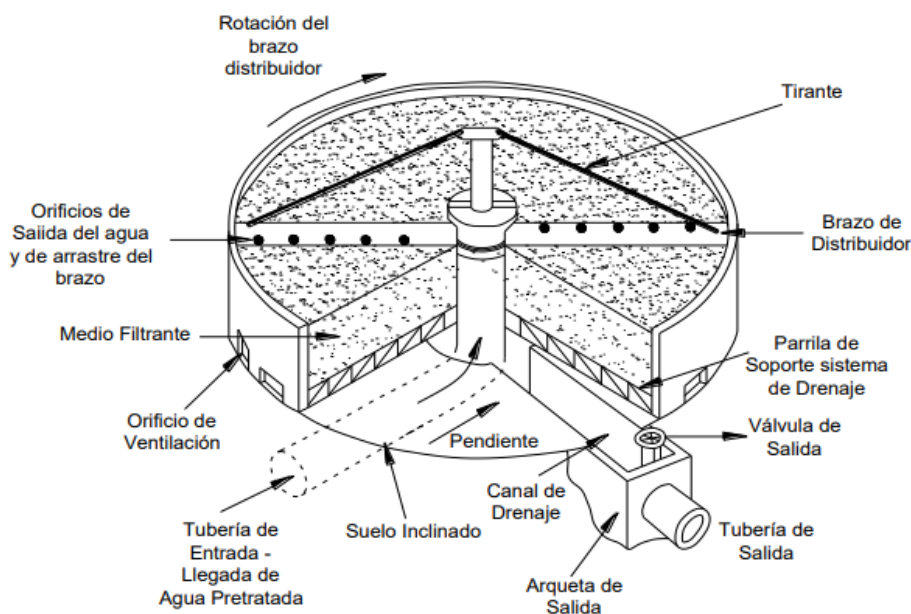
Al haber realizado el tratamiento primario, se dispone a hacerse un tratamiento secundario, en este se realizan procesos biológicos o químicos donde se eliminan restos de partículas sólidas orgánicas que no se pudieron eliminar en el tratamiento anterior, sus porcentajes de remoción para SST, DBO y Coliformes totales son del 60% al 99% y para nutrientes se cuenta con una remoción de contaminantes del 10% al 50%. (Torres, 2012).

Para esta propuesta empírica se plantea el uso de un sistema de tratamiento compacto, en el que se realiza la unión de dos sistemas, en este caso filtros percoladores + fitorremediación, con el fin de aprovechar las ventajas que trae consigo cada una y poder obtener un resultado más favorable respecto a la calidad que se busca en el agua tratada.

El tratamiento secundario se comenzará con el filtro percolador, el cual está clasificado dentro de los procesos de cultivo fijo, también conocido como tanque de aireación; se diseña para proporcionar un tiempo de hospedaje en particular, garantizando que el lodo activado y las aguas residuales se mezclen por un tiempo determinado en un régimen determinado. (Ontiveros, 2015).

En el diseño de un filtro percolador se deberán tener en cuenta diferentes parámetros como la sección del tanque, el medio filtrante o lecho, la carga hidráulica y carga orgánica a aplicarse, velocidad en la que rotan los brazos distribuidores y la ventilación. ( Ruiz Cortines, 2021).



**Figura 25***Partes del filtro percolador.*

Fuente: ( Ruiz Cortines, 2021).

En la actualidad, se usan diferentes lechos, como lo son la grava, la piedra, el plástico, la madera y en diferentes estudios se han realizado con otros tipos de materiales; en este caso se planteará la utilización de la piedra o roca como lecho del filtro percolador ya que trae beneficios consigo, dado que es un material que se encuentra muchas veces de forma local por lo que su costo sería muy bajo, esta debe tener una dimensión uniforme que pueda garantizar el volumen de vacíos apropiado para que el agua pueda pasar y haya buena circulación de aire, su tamaño efectivo debe rondar entre los 75 mm a los 125 mm. ( Ruiz Cortines, 2021).

Otras propiedades que se deben tener en cuenta al seleccionar la piedra o roca y es de carácter importante es que deben tener gran resistencia, no pueden tener finos, tienen que ser insoluble y resistente a sustancias químicas que estén en el agua, no deberían desintegrarse por

intemperismo, ni traer consigo sustancias tóxicas; las piedras que se tengan, tienen que estar de acuerdo a la granulometría estipulada a continuación: ( Ruiz Cortines, 2021).

**Tabla 23**

*Tamaño del tamiz y su respectivo porcentaje en peso.*

<b>Tamiz</b>	<b>Porcentaje por peso</b>
Pasando Tamiz de 11.4cm (4 1/2")	100% por peso
Retenido en tamiz de 7.62cm (3")	95%-100% por peso
Pasando por tamiz de 5.08cm (2")	0%- 2% por peso
Pasando por tamiz de 2.54cm (1")	0%-1% por peso

Fuente: (RAS, 2000)

Referente a la sección del filtro percolador, las más usuales son las circulares y las cuadradas, sin embargo, hay quienes utilizan secciones diferentes para la construcción de estos filtros, en este caso se plantea el uso de una sección circular, ya que en la rotación de los brazos distribuidores se esparcirá de manera uniforme el efluente; de lo contrario, si se llegase a escoger otra sección diferente se correría el riesgo de dejar espacios sin recubrimiento del agua residual, lo cual podría generar malos olores y crecimiento de plagas no deseadas. La profundidad del tanque está entre 1.5m a 3m, debido al peso del material filtrante.

Respecto a los valores de la carga hidráulica se debe utilizar una para cada tipo de filtro percolador. La piedra es utilizada en diferentes percoladores, como lo son los de tasa baja, tasa media y tasa alta, donde sus valores de tasa de carga hidráulica están entre  $0.9 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$  hasta  $37.4 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ . La carga orgánica trabaja con valores de carga volumétrica que varía desde  $0.1 \text{ Kg DBO}/\text{m}^3 \cdot \text{día}$  hasta  $8 \text{ Kg DBO}/\text{m}^3 \cdot \text{día}$ . RAS. (2000). (RAS, 2000).

Para conocer la carga hidráulica que se debe aplicar en un filtro percolador hay tres indicadores que se deben tener en cuenta: La profundidad, el área y el caudal de operación, estos indicadores se recolectan mediante observación. Para obtener la carga hidráulica, primero se debe calcular el caudal de operación. (Luna Huaman, 2022).

$$Q = \frac{V}{T}$$

Q= Caudal (l/s)

V= Vol. del filtro (l)

T= Tiempo (seg)

$$CH = A_n * Q_n$$

CH= Carga Hidráulica (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día)

A= Área (m<sup>2</sup>)

Q= Caudal (m<sup>3</sup>/día)

Para la carga orgánica se deben realizar una serie de pruebas estandarizadas donde se midan el potencial de hidrógeno, la temperatura, DBO, conductividad y el caudal de operación. (Luna Huaman, 2022).

$$CO = DBO_n * Q_n$$

CO= Carga orgánica (Kg DBO/m<sup>3</sup>\*día)

Q= Caudal (m<sup>3</sup>/día)

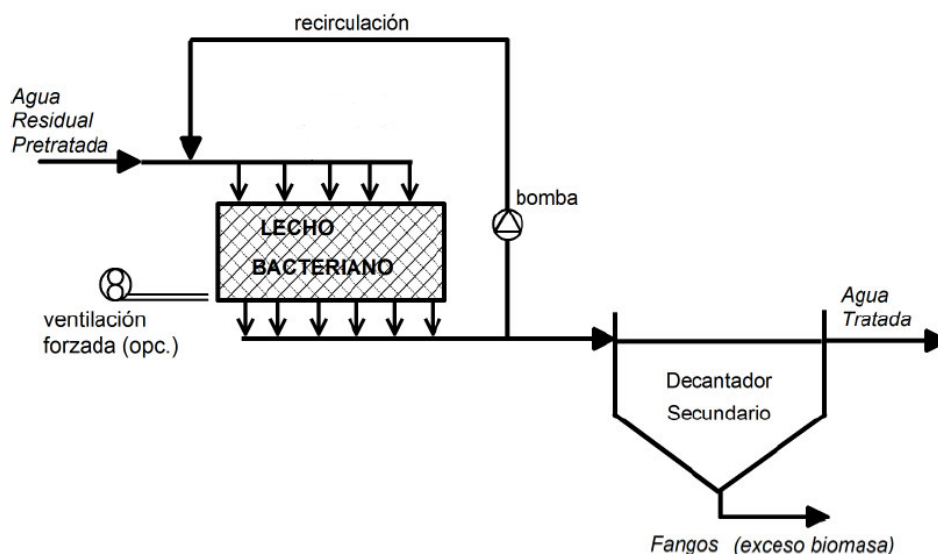
DBO= Demanda Bioquímica de Oxígeno (Kg/l)

En la recirculación, es de suma importancia establecer si esta se hará antes o después del decantador primario, ya que esto altera considerablemente el diseño del filtro percolador,

igualmente se debe tener presente esta consideración en el tratamiento terciario. Al realizarse el diseño, se debe definir de forma clara por qué se escogió el tipo de recirculación, cuál es su objetivo, su ventaja e implicaciones operacionales tanto de diseño como económicas. (RAS, 2000)

### Figura 26

*Esquema funcionamiento filtro percolador + decantación secundaria*



Fuente: (GEDAR, 2017)

Para un distribuidor hidráulico no hay una velocidad mínima, algunos distribuidores reducen su velocidad con marcha atrás o chorros de frenado; pero, aun así, hay inmobilizaciones a velocidades inconstantes de 4 rev/min a 20 rev/min. Existen plantas de tratamiento donde no es posible maniobrar a una velocidad mínima mientras estén en la carga media o pico, excepto que el filtro percolador maniobre a un flujo constante. Las bajas velocidades de rotación pueden

lograrse en ciclos donde el caudal es bajo, el cual es el momento deseado para realizar el lavado. ( Ruiz Cortines, 2021)

En varias ocasiones, los distribuidores constan de cuatro brazos para así poder manipular una capacidad mayor de flujo, dos de esos brazos maniobran con caudales por encima del flujo promedio. En el transcurso de los caudales máximos, se usan los demás brazos; es por ello que se plantea realizar este diseño porque posee una gran ventaja al proporcionar una mayor intensidad de lavado durante el flujo crítico bajo que contiene la mayor concentración de DBO, además provee una distribución adecuada del flujo ya que la velocidad en los brazos es menor; se recomienda que la cantidad de brazos a utilizar sea pequeña para así poder tener un buen rendimiento y disminución en los problemas de operación. ( Ruiz Cortines, 2021)

Para una operación correcta de un distribuidor, se necesita que la carga hidráulica este entre 400mm- 1000mm, puesto que una distribución buena se realiza al mantener una mínima velocidad en el flujo de la boquilla; ya que, si es alta la velocidad, la distribución del flujo no será adecuada. ( Ruiz Cortines, 2021)

El diseñador del filtro percolador debe tener en cuenta dentro de su diseño la adición de aire controlado; con la ayuda de una adecuada implementación de la carga hidráulica puede controlar los malos olores a un nivel aceptable: Normalmente se desea enviar el aire hacia abajo en el filtro percolador si es solo una torre, pero si hay dos torres en serie, se dispone a transportar el aire de forma descendente en la primera torre y en la segunda torre de manera ascendente. ( Ruiz Cortines, 2021)

Los medios de soporte, las paredes y la columna central deben tener sellos de aire para que no haya fugas y transportar el aire de manera descendiente elimina la necesidad de cubiertas. Pueden presentarse flujos de aire desigual por entre los medios de soporte si la pérdida de cargas por medio de estos es bajas, esto puede llegar a ser un inconveniente cuando se cuenta con diferencias grandes entre la temperatura, el aire y el agua, también cuando la ventilación forzada está en una dirección contraria a la ventilación natural. ( Ruiz Cortines, 2021)

Si hay una gran diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura del agua, se hace imprescindible realizar un desagüe subterráneo de descarga, para así tener un control en la distribución del aire; si el flujo de aire es muy bajo, deben tener puertos de entrada para así impedir el arrastre de gotas de agua. Dependiendo del tipo de ventilación, se puede realizar un diseño de uno, dos, cuatro hasta 6 ventiladores puestos en el perímetro del filtro percolador. ( Ruiz Cortines, 2021)

Respecto a la eficiencia en los porcentajes de remoción de contaminantes, esta depende netamente de la carga orgánica. El rendimiento esperado para la eliminación de contaminantes según el título de la RAS 2000 se ve reflejado en la tabla 24.

**Tabla 24.**

*Porcentajes de remoción esperados.*

<b>Parámetro</b>	<b>Remoción</b>
Sólidos en suspensión	75%-95%
DBO	80%-90%
DQO	70%-85%

Nitrógeno	20%-35%
Fósforo	10%-30%
Coliformes fecales	100%

---

Fuente: (RAS, 2000)

Algunos estudios realizados han obtenido porcentajes de remoción para SST, DBO y DQO que varían en el rango estipulado o presentan valores incluso mayores que estos, demostrando que este sistema es muy eficiente como tratamiento secundario para deshacerse de los contaminantes que se encuentran en el agua.

Una de las grandes desventajas que se presentan en los filtros percoladores es el desprendimiento de la biopelícula y la generación de fango y por ello la fitorremediación es la continuación del tratamiento del agua en la fase secundaria, ya que cuenta con una gran eficiencia en la eliminación de este tipo de contaminantes, además de remover satisfactoriamente los metales pesados que se encuentre en el efluente; es un proceso amigable con el medio ambiente, siendo una tecnología de relación costo-beneficio muy favorable. Esta técnica permite eliminar, reducir, transformar y estabilizar los contaminantes en el agua con la ayuda de diferentes especies de plantas. Algunas de ellas utilizan sus raíces, tallos u hojas para este proceso, que se produce como resultado de reacciones químicas propias de sistemas metabólicos. ( Briñez Vásquez, Solano Aconcha, Sandoval Echavarría, Rojas Lomelin, & Agudelo Jiménez, 2019).

La facultad de acumular metales no es característica de la mayoría de especies; más bien, es el resultado de una respuesta evolutiva porque los altos niveles de metales en la biosfera son

esporádicos. Especialmente entre las plantas acumuladoras de metales, se han encontrado especies que pueden acumular grandes cantidades de metales a tasas significativamente más altas que las consideradas tóxicas para el estado de la planta. Estas especies se conocen como hiperacumuladoras de metales. ( Sepúlveda Asprilla, 2013).

Al realizar diferentes investigaciones sobre las especies de plantas que actúan de mejor manera en la eliminación de contaminantes para aguas residuales se recomienda usar *Eichhornia crassipes* (Lirio acuático) puesto que esta especie resulta ser económica al implementarse en Colombia, ya que es originaria de la cuenca amazónica y es por ello que la planta que se adecúa muy bien a las condiciones climáticas del país; además es una planta acuática perteneciente a la familia *Pontederiaceae*, utilizada con fines ornamentales, y es conocida por su alto rendimiento en la depuración de contaminantes en el agua ya que absorbe los nutrientes directamente del cuerpo hídrico, haciendo de esta especie un excelente purificador de efluentes residuales. Tiene facilidad de adaptarse a una amplia escala de condiciones ambientales y climáticas. Esta planta crece rápidamente, prospera en una diversidad de tipologías de humedales y prefiere aguas ricas en nutrientes. (Castrillón Trujillo & Navarro Aguirre, 2016)

La *Eichhornia crassipes* tiene la capacidad de producir oxígeno a través de la fotosíntesis, estimular el crecimiento bacteriano para descomponer y absorber materia orgánica que puede eliminarse biológicamente, también facilita el proceso de remoción de sólidos en suspensión, por filtración a través de las raíces de las plantas formando una red que filtra las partículas sólidas, también utiliza la sedimentación (por gravedad) y la floculación (por recombinación de partículas). ( Jiménez Rodríguez, 2021)



Esta especie realiza el proceso de eliminación de patógenos, los cuales pueden ser hongos, bacterias, protozoos, virus o parásitos. Estos son removidos por los antibióticos producidos en las raíces de las plantas por filtración o adsorción. ( Jiménez Rodríguez, 2021). En la tabla 25, se puede evidenciar la taxonomía de esta especie.

**Tabla 25**

*Taxonomía Eichornia crassipes (Lirio acuático)*

Taxonomía	
Reino	<i>Plantae</i>
Subreino	<i>Traqueobionta</i>
Supervisión	<i>Spermatophyta</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Liliopsida</i>
Sub Clase	<i>Lilidae</i>
Orden	<i>Liliales</i>

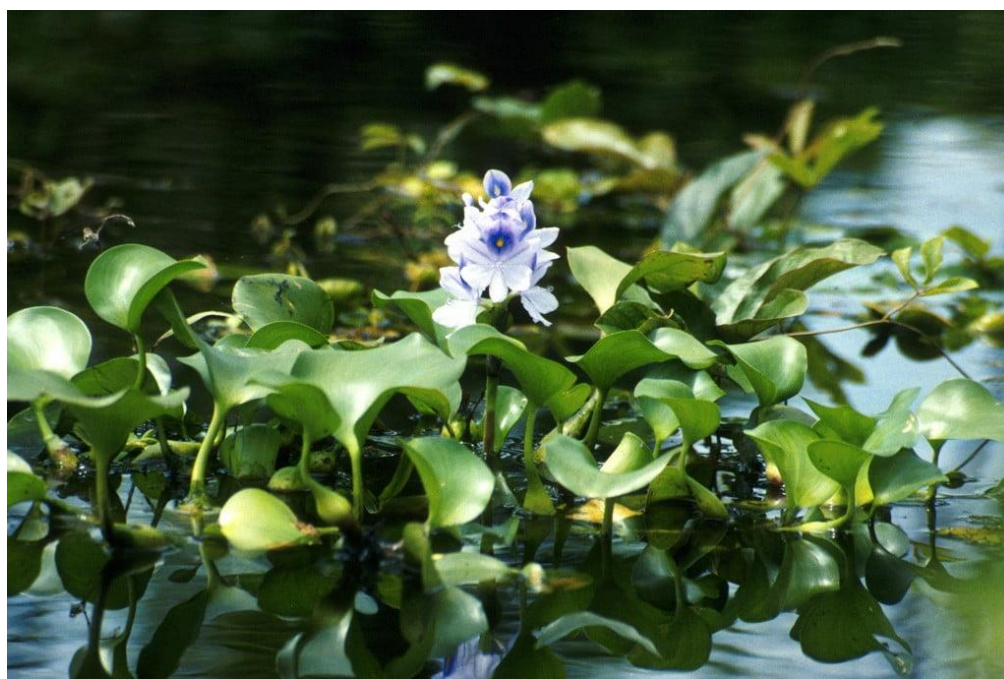
Fuente: (Hanan Alipi & Mondragón Pichardo , 2009)

El desarrollo del jacinto de agua se ve significativamente favorecido por el alto contenido de nutrientes en el recurso hídrico, principalmente por nitrógeno, fósforo y potasio, además es ideal para la eliminación de metales pesados. Logra soportar fluctuaciones en los niveles de agua y acidez. No soporta el agua salada y la salinización puede alterar su distribución. Necesita irradiación fuerte, temperaturas entre 20-30°C y tiene poca resistencia al frío (por debajo de los 15°C). A medida que bajan las temperaturas, el incremento se ralentiza "El pH óptimo para el crecimiento del jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) es de 6-8". (Castrillón Trujillo & Navarro Aguirre, 2016).

En Colombia su crecimiento es favorable ya que es una zona climática con una temperatura promedio de 27°C, posee una adaptación adecuada, por lo cual genera mayor eficiencia en la remoción de contaminantes, obteniendo resultados entre 70% y 86% en la eliminación de materia orgánica (DBO5). ( Jiménez Rodríguez, 2021).

**Figura 27**

*Eichhornia crassipes*, el Camalote, Lirio o Jacinto de agua



Fuente: (Plantas & Jardin , 2012).

A continuación, se muestran las técnicas de fitorremediación hídrica en las cuales se puede desarrollar con gran eficiencia para la planta *Eichhornia crassipes*:

**Humedal artificial:** Son sistemas diseñados por la ingeniería que utilizan recursos naturales para eliminar los desechos del agua. Absorben las partículas de contaminación y las

emplean como nutrientes. De esta forma, el agua se vuelve más limpia y puede reutilizarse para determinadas actividades, como el riego, o incorporarse a cuerpos de agua. (Universidad de Costa Rica., 2019)

Sistema de tratamiento de plantas de agua: Puede ser un estanque semi-artificial o un estanque natural donde se cultivan plantas flotantes para el sistema de aguas residuales. ( Núñez López, Meas Vong, & Olguín, 2004)

Rizofiltración: Se precisa como uno de los componentes de fitorremediación en el que las plantas acumulan la mayor concentración de metales en las raíces, que son las partes más expuestas a los iones metálicos. ( PARRA GALLEGOS, 2017)

Para este sistema empírico se comparó diferentes técnicas de humedales, considerando sus características y ventajas, se recomienda elegir un humedal subsuperficial de flujo horizontal, ya que estos humedales permiten el buen desarrollo de la planta porque brindan condiciones excelentes como la temperatura, que es muy importante para el metabolismo de estas.

La importancia y trascendencia de los humedales artificiales de flujo horizontal radica principalmente en una serie de beneficios los cuales son: reducción de plagas y olores desagradables en la superficie del material filtrante, además es fácil de operar y el efluente tratado puede ser reutilizado, también es amigable con el paisaje y existe la posibilidad de combinarlos con otros tratamientos existentes para optimizar su rendimiento, como en el caso de la presente propuesta , el cual es el encargado de remover en su mayor porcentaje fosfatos,

nitratos, fenoles, pesticidas, metales pesados, elementos radiactivos, fluoruros, bacterias y virus que no hayan podido ser eliminados en los procesos anteriores. (Castrillón Trujillo & Navarro Aguirre, 2016)

Un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal es un gran canal lleno de grava y arena, plantado con flora acuática. A medida que las aguas residuales fluyen horizontalmente a través de los canales, el material filtra partículas y microbios y degrada la materia orgánica. (Tilley, Ulrich, Lüthi, Reymond , & Zurbrügg, 2014)

El nivel del agua del humedal artificial de flujo subsuperficial se mantiene entre 5 y 15 cm para garantizar el flujo de agua superficial. El medio debe ser ancho y poco hondo para maximizar el flujo de agua. Se debe utilizar un área de entrada amplia para distribuir uniformemente el flujo. El pretratamiento es fundamental para evitar obstrucciones y garantizar un tratamiento eficaz. (Tilley, Ulrich, Lüthi, Reymond , & Zurbrügg, 2014)

Se debe utilizar una cubierta impermeable (arcilla o geotextil) para impedir la infiltración. Por lo general, se utiliza balasto pequeño, redondo y de dimensión uniforme (3-32 mm de diámetro) para rellenar el lecho hasta una profundidad de 0,5-1 m. La grava debe estar limpia y libre de polvo para evitar obstrucciones. (Tilley, Ulrich, Lüthi, Reymond , & Zurbrügg, 2014)

La eficiencia de remoción de los humedales depende del área superficial (largo por ancho), mientras que el área transversal (ancho por profundidad) establece el flujo máximo

posible. Es trascendental que la entrada esté bien diseñada para permitir una distribución uniforme y así evitar el reflujo. La salida debe ser versátil para que la superficie del agua se pueda ajustar para optimizar el rendimiento de manejo. (Tilley, Ulrich, Lüthi, Reymond , & Zurbrügg, 2014)

El lecho filtrante actúa como colador para la eliminación de sólidos, como superficie estacionaria para la adhesión de bacterias y como base para la vegetación. Mientras que las bacterias facultativas y anaeróbicas pueden degradar la gran mayoría de la materia orgánica, la vegetación transfiere pequeñas cantidades de oxígeno a la zona de las raíces para que pueda ser colonizada por bacterias aeróbicas que también degradan la materia orgánica. Las raíces de las plantas juegan un papel importante en el mantenimiento de la permeabilidad del filtro. (Tilley, Ulrich, Lüthi, Reymond , & Zurbrügg, 2014)

La finalidad de realizarle un tratamiento a las aguas residuales es que estas puedan devolverse al entorno natural y también reutilizarse. La reutilización de efluentes tratados en las plantas de tratamiento es cada vez más común, ya que el agua es un activo limitado y valioso y su reutilización aumenta los recursos hídricos disponibles. Todo ello tiene un efecto muy beneficioso sobre el medio ambiente, a la vez que genera un importante ahorro económico. (Telwesa, 2021)

Si se requiere que el agua cumpla con condiciones para vertido estrictas o se necesita que alcance una calidad específica que no se logró con los tratamientos anteriores, se recomienda la ejecución de un tratamiento terciario donde se realicen procesos químicos o biológicos en el

efluente para que se cumpla con estas condiciones, en esta fase del tratamiento se encuentran porcentajes de remoción del 99% para SST y DBO, para coliformes y nutrientes el porcentaje de remoción es cerca del 99.9% y 90% respectivamente.

Se propone realizar una desinfección del agua por medio de cloración para el tratamiento terciario donde se emplee el hipoclorito de sodio o como normalmente se conoce cloro, se debe tener presente una adecuada dosificación para evitar que el color o sabor no sean los deseados, cabe aclarar que aun así el agua tomará un sabor diferente, pero este no será molesto a la hora de ser consumido.

Teniendo en cuenta que, para la reutilización o vertimiento del agua, se debe cumplir con unos valores máximos permisibles para cada contaminante que se encuentre presente en el efluente, estos se dividen según sus características, las cuales pueden ser físicas, químicas o microbiológicas; los valores máximos admisibles para consumo humano se presentan en las tablas 26 y 27 y para vertimiento en cuerpos hídricos en la tabla 22.

**Tabla 26**

*Valores máximos admisibles para consumo humano*

		<b>Expresadas como</b>	<b>Valor Máx. Permisible</b>
Características Físicas	Color aparente	Unidades de platino Cobalto (UPC)	15
	Olor y sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
	Turbiedad	Unidades nefelométricas de turbiedad (UNT)	2
Características Químicas (Mg/l)	Antimonio	Sb	0.02
	Arsénico	As	0.01
	Bario	Ba	0.7
	Cadmio	Cd	0.003

Cianuro libre y dissociable	CN	0.05
Cobre	Cu	1
Cromo Total	Cr	0.05
Mercurio	Hg	0.001
Níquel	Ni	0.02
Plomo	Pb	0.01
Selenio	Se	0.01
Trihalometanos totales	THMs	0.02
Carbono orgánico total	COT	5
Nitritos	NO2	0.1
Nitratos	NO3	1
Fluoruros	F	1
Calcio	Ca	60
Alcalinidad total	CaCO3	200
Cloruros	Cl	250
Aluminio	Al	0.2
Dureza Total	CaCO3	300
Hierro Total	Fe	0.3
Magnesio	Mg	36
Sulfatos	SO4	250
Zinc	Zn	3
Fosfatos	PO4	0.5

Fuente: (Minvivienda, 2007)

**Tabla 27**

*Valores máximos admisibles para consumo humano*

	<b>Técnicas utilizadas</b>	<b>Coliformes totales</b>	<b>Escherichia Coli</b>
	Filtración por membrana	0 UFC/ 100 cm <sup>3</sup>	1 UFC/ 100 cm <sup>3</sup>
Características microbiológicas	Enzima sustrato	< 1 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup>	< 1 microorganismo en 100 cm <sup>4</sup>
	Sustrato definido	0 microorganismos en 100 cm <sup>3</sup>	1 microorganismos en 100 cm <sup>3</sup>
	Presencia- Ausencia	Ausencia en 100 cm <sup>3</sup>	Ausencia en 100 cm <sup>4</sup>

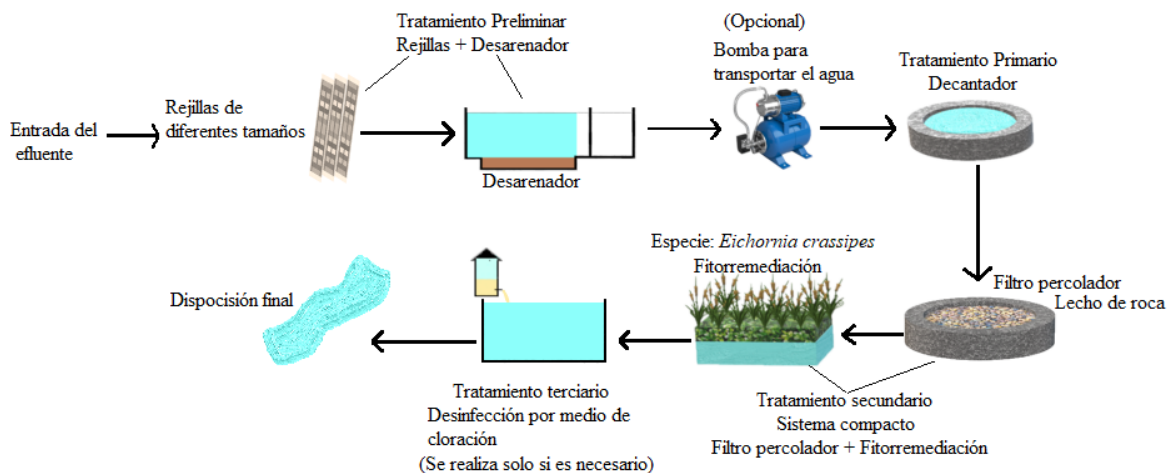
Fuente: (Minvivienda, 2007)

Posteriormente, al hacer el planteamiento de la unión de estos dos tratamientos trabajando juntos, se tuvo en cuenta un aspecto que para las autoras de esta monografía pareció algo importante, se trata de los porcentajes de remoción que cada uno de ellos podía ofrecer ya

que cada parte de un tratamiento de aguas residuales debe tener una función específica que cumplir, es por ello que se planteó como tratamiento secundario el uso de un sistema compacto comenzando por el filtro percolador ya que este es especial para remover SST, DBO y DQO demostrándose en la eficiencia de sus porcentajes de remoción, al observarse que estos tenían un bajo rendimiento al eliminar otras sustancias como el nitrógeno, el fósforo y los metales pesados, se necesitaba complementarse con otro tratamiento que cumpliera esta función, es por ello que se escogió la fitorremediación ya que esta presenta porcentajes altos en la eliminación de estos contaminantes, además de eso los filtros percoladores desechan fango que se transporta en el agua y la fitorremediación también remueve este tipo de contaminantes.

**Figura 28**

*Diagrama de flujo para tratamiento de aguas residuales propuesto*



En este diagrama de flujo se muestra la dirección del agua comenzando en el tratamiento preliminar, el cual se efectúa mediante el cribado y el desarenado; luego el agua es llevada a un decantador primario donde se empiezan a depurar grasas y sólidos que en la fase anterior no pudieron ser totalmente eliminados. Por medio de una bomba (opcional) el agua es transportada



hacia el tratamiento secundario, este comienza con el filtro percolador donde empiezan a eliminarse más a profundidad los contaminantes que se encuentran presentes y pasando así a realizarse la fitorremediación la cual completará y finalizará esta fase del tratamiento, si se llegase a encontrar que el agua no está cumpliendo con las condiciones para ser reutilizada o vertida, se puede realizar un tratamiento terciario mediante la desinfección, en esta se mejorará la calidad del agua para posteriormente poder ser reutilizada ya sea para consumo humano, ser vertida a cuencas hídricas con los valores admisibles estipulados en las tablas 22, 26 y 27, o en su defecto ser utilizadas en riego agrícola.

## Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones

### 8.1 Conclusiones

En la actualidad casi no se implementan estos tratamientos de aguas residuales no convencionales, sin embargo, los resultados que estos muestran en los estudios tomados para investigación son muy favorables a comparación con sistemas convencionales como lo es la PTAR; ya que los filtros percoladores y la fitorremediación, consiguieron remover altos porcentajes de contaminantes que estaban presentes en el efluente, ayudando así a que la calidad del agua mejorará haciéndola reutilizable o en su defecto confiable para ser vertida a un cuerpo hídrico.

La relación costos- beneficios que ofrecen cada una de estas tecnologías poco usadas, es que resultan ser bastante económicas a comparación de otros sistemas, ya que haciendo el diseño adecuado y aprovechando los recursos locales, su costo disminuirá; respecto a sus beneficios, estos son sustentables y amigables con el medio ambiente, puesto que no se generan contaminantes en el aire, en el agua y en la tierra.

Al hacer un análisis de cada sistema por separado se vio que los porcentajes de remoción de cada uno eran bastantes satisfactorios, por lo que al plantear la unión de estas dos tecnologías cumpliendo la función de un tratamiento secundario, se supone que estos porcentajes podrían aumentar, ya que cada uno de ellos tiene la capacidad de remover mejor unos contaminantes que el otro no; convirtiéndolo así, en un sistema más completo, eficiente y económico.

## 8.2 Recomendaciones

En la propuesta planteada en esta monografía se requiere conocer diferentes aspectos que son de suma importancia para poder realizar la ejecución de tratamientos de aguas residuales y estas deben abordarse con mayor profundidad. Como recomendaciones para futuros estudios de investigación presentadas en este documento, se pueden destacar las siguientes:

Se deben realizar estudios al agua que se planea tratar mediante ensayos de laboratorios, donde por medio de una muestra inalterada del efluente se conocerán los contaminantes presentes, sabiendo esto se procede a realizar el tratamiento adecuado, ya que no todas las aguas residuales tienen las mismas características y por ende no todas comienzan en la misma fase del tratamiento.

Para una posterior realización del tratamiento de agua residuales presentado en esta monografía, se recomienda hacer diferentes ensayos tanto experimentales como de laboratorio para verificar el cumplimiento con los valores límites máximos permisibles para consumo humano o vertimiento a cuerpos hídricos y así inferir la disposición final del efluente tratado, según la resolución 631 del 2015, la cual muestra los valores puntuales para aguas residuales domésticas.

Se evidenciaron excelentes resultados en la remoción de contaminantes en distintas investigaciones de filtros percoladores y fitorremediación, aunque estos fueron evaluados por separado, por lo tanto en una futura realización del diseño propuesto que implica la unión de

estos dos sistemas para un tratamiento secundario puede que los resultados obtenidos no sean precisamente los esperados y por ello, se recomienda una evaluación detallada de la eficiencia de remoción, teniendo en cuenta los contaminantes presentes en aguas domésticas y por ende poder determinar con exactitud la viabilidad de esta propuesta investigativa.

## Referencias

ACNUR Comité Español. (2019). Escasez de agua en el mundo: causas y consecuencias.

*Conciencia social y económica.*

Acura, G. (2022). Lodos activados: qué son y en qué consiste este proceso. *Grupo Acura.*

Agroequipos del valle. (2018). Los sustratos agrícolas y sus propiedades. *Agroequipos.*

Alves, T. (2023). Agente patógeno o infeccioso. *Ambientech: Ciencias, Salud y Medio ambiente.*

*Educación Secundaria. .*

Alves, T. (2023). Bacteria. *Ambientech: Ciencias, Salud y Medio ambiente. Educación*

*Secundaria.*

AMEZQUITA BEJARANO , D., & BEJARANO JIMENEZ, P. (2018). EVALUACION DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE GACHANCIPA. *UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.*

Aravena Fica, M. (2018). Conversión de una planta de lodos activos existente a un humedal artificial de flujo subsuperficial. *Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile.*

ARCE CARDONA, P. (2018). HUMEDALES ARTIFICIALES: UNA ALTERNATIVA PARA TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN. *FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.*

Arias Martínez, S., Betancur Toro, F., Gómez Rojas , G., Salazar Giraldo, J., & Hernández

Ángel , M. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Copyright & License, Sena.*

- ARTEAGA CORTEZ, V. (2018). PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES. *COLEGIO DE POSTGRADUADOS*.
- APPA Renovables. (2021). ¿Qué es la biomasa? *APPA Renovables*.
- Aqua free. (2019). ¿Qué es el biofilm? *Aqua free*.
- Areaciencias. (2021). Potabilización Y Depuración Del Agua. *Areaciencias*.
- Asamblea Constituyente de Colombia. (1991). Asamblea Constituyente de Colombia de 1991. *CONSTITUCIÓN POLITICA DE COLOMBIA*.
- Basso, S. (2022). Las 4 etapas de las plantas de tratamiento de aguas residuales. *IDRICA*.
- boletinagrario. (2013). Definición de macrófito. *boletinagrario*.
- Boss Tech . (2022). ¿Cuál es la importancia del tratamiento terciario de aguas residuales? *Boss Tech* .
- Caldes, J. (2020). Rejas de desbaste. *deagua tu blog de agua*.
- CAMPUS revolución de las ideas. (2021). ¿Cuál será la situación del agua en 2050? *Aquae Fundación*.
- CAN. (2005). FICHA TECNICA Sistema de Información del Medio Ambiente, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en las masas de agua. *COMUNIDAD ANDINA. Manual de Estadísticas Ambientales* .
- Carvajal Fuentes, C. (2020). MODELO PARA COMPARAR DISEÑOS DE FILTRO. *Escuela Colombiana de Ingenieria Julio Garavito*.
- Castañeda Ceja, R. (2015). Proceso constructivo de una planta de tratamiento de aguas residuales. *slideshare*.

- Castrillón Trujillo, V., & Navarro Aguirre, L. (2016). Evaluación de la Fitorremediación como Alternativa para el Tratamiento de Aguas Residuales Contaminadas con Mercurio Producto de la Minería Aurífera (artesanal y pequeña escala). *Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD*.
- Comunidad planeta azul. (2017). El cauce y el lecho de los rios. *Comunidad planeta azul*.
- Congreso de Colombia. (2022). Ley 99 de 1993 - Gestor Normativo. Función Pública. *Congreso de Colombia*.
- Cuero Caicedo, L. (2019). DISEÑO DE UN SISTEMA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES FUNDAMENTADO EN PROCESOS DE RIZOFILTRACIÓN Y LECHOS ORGANICOS FILTRANTES CAPACES DE DISMINUIR EL CONTENIDO DE GRASAS Y ACEITES PRESENTES EN UNA MUESTRA DE AGUA RESIDUAL. *UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS*.
- Delgadillo López, A., González Ramírez, C., Acevedo Sandoval, O., Prieto García, F., & Villagómez Ibarra, J. R. (2011). FITORREMEDIACIÓN: UNA ALTERNATIVA PARA ELIMINAR LA CONTAMINACIÓN. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*.
- Deyma. (2020). Rejas de desbaste. *Deyma, tratamiento de aguas*.
- dicciomed. (2018). fitotecnología. *diccionario médico-biológico, histórico y etimológico*.
- Diccionario de cáncer del NCI. (s.f.). biopelícula. *Diccionario de cáncer del NCI*.
- Diccionario de cáncer del NCI. (s.f.). metabolismo. *Diccionario de cáncer del NCI*.
- Donaldson, soluciones de filtracion . (2012). ¿Qué es un medio Filtrante? *ABC de filtracion, Tipos de Medios Filtrantes* .
- Ecomar, E. (2020). ¿Qué son las aguas residuales? *Fundacion ECOMAR, MEDIO AMBIENTE*.

- Eddy, M. &. (1995). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización, Volumen 1, 3ra Edición*. España: McGraw-hill.
- Farias de Marquez, B. (2016). Conocimientos básicos sobre Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (Módulo II). *iagua.es*.
- Franchi & Asociados. (2019). Sistemas de tratamiento de Efluentes. *Ingeniería Ambiental & Seguridad Laboral*. .
- Función Pública . (2022). Decreto 2811 de 1974 - Gestor Normativo. *Función Pública*.
- Función Pública. (2015). Decreto 1594 de 1984 - Gestor Normativo. *Función Pública*.
- Galli Merino, O., & Sal, F. (2007). Sistemas de Recirculación y Tratamiento de Agua. *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos CENADAC (Santa Ana- Corrientes)*.
- Gedar. (2017). Decantadores. *Gedar*.
- GEDAR. (2017). Filtro Percolador. *GEDAR – Soluciones para Tratamiento de Aguas*.
- Glosario Química. (2017). Volatilización. *Glosarios especializados* .
- Gomez, A. (2013). Cribado o rejillas. *slideshare*.
- González Gómez, J. (2010). Fitorremediación: una herramienta viable para la descontaminación de aguas y suelos. *UNIVERSIDAD DE LOS ANDES*.
- Guado García, D. (2020). Filtros Percoladores para el tratamiento de Aguas Residuales. *RiuNet repositorio UPV*.
- HACH. (2020). Carbono orgánico total (TOC). *HACH*.
- Hanan Alipi , A., & Mondragón Pichardo , J. (2009). Eichhornia crassipes - ficha informativa. *Conabio.gob*.
- Hernández, S. (2019). Qué son las plantas transgénicas y ejemplos. *unCOMO*.



- Hidrotec. (2022). Tipos de aguas residuales: por qué es importante conocerlas (Actualizado 2021). *Hidrotec*.
- Higieneambiental. (2018). La historia del tratamiento del agua potable: un camino hacia la mejora radical de la salud pública. *Higieneambiental.Com*.
- iAgua. (2020). ¿Qué es un sistema de lodos activados? . *iAgua*.
- Iberdrola. (2021). La contaminación del agua: cómo no poner en peligro nuestra fuente de vida. *Iberdrola*.
- Induanalisis. (2019). DBO y DQO. *Induanalisis*.
- Intagri. (2017). La Hidroponía: Cultivos sin Suelo. Serie Horticultura Protegida. *INTAGRI*.
- ISOfocus. (2018). Agua y saneamiento. *ISOfocus*.
- Jaramillo Mondragón, A., & Paredes Togas, J. (2019). Evaluación de la eficiencia de un sistema de dos filtros percoladores en serie para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la urbanización Santa Lucía – Morales, 2018. *repositorio.upeu*.
- Lara González, L. (2017). *Fitorremediación para la extracción del colorante “azul de metileno” mediante el uso de Eichhornia crassipes*. Toluca de Lerdo, Estado de México.
- Lara, J. (2007). Ejercicio aeróbico y anaeróbico: diferencias y beneficios. *Vitonica*.
- Larriva Vásquez, J., Ormaza Cárdenas, C., & Ortiz Ortiz, M. (2020). *Elaboración del Modelo Físico y Guía Metodológica para la Práctica de Tratamiento de Aguas Residuales Mediante un Filtro Percolador de la Asignatura de Hidrosanitaria de la Universidad del Azuay*. CUENCA, ECUADOR.
- Lesikar, B., & Enciso, J. (2017). Sistemas individuales para el tratamiento de aguas negras. *Promotores Especialistas en Ingeniería AgrícolaEl Sistema Universitario Texas A&M*.

- Lizarazo Becerra, J., & Orjuela Gutiérrez, M. (2013). Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. *repositorio.unal*.
- Luna Huaman, J. (2022). EFECTO DE CARGA HIDRÁULICA Y CARGA ORGÁNICA DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS EN EL DESARROLLO DE LA CAPA BIOLÓGICA EN EL MEDIO FILTRANTE FILTROS PERCOLADORES DE LA LOCALIDAD DE TUYURURI - 2019. *UNIVERSIDAD NACIONAL SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO*.
- Menéndez Gutiérrez, C., Pérez Olmo, J., & García Zumalacárregui, J. (2013). PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES MEDIANTE FILTROS PERCOLADORES [Tesis]. *INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO JOSÉ ANTONIO ECHEVERRÍA*.
- Menendez Gutierrez, C., Perez Olmo, J., & García Zumalacarregui , J. (2005). *PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES MEDIANTE FILTROS PERCOLADORES*. La Habana, Cuba: INSTITUTO SUPEROR POLITECNICO JOSÉ ANTONIO ECHEVERRIA.
- Microlab Industrial. (s.f.). Análisis de coliformes fecales. *Microlab Industrial*.
- MINAMBIENTE. (2021). Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones”. EL MINISTRO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. . *MINAMBIENTE*.
- Minvivienda. (2007). Resolución 2115 - 2007. *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial* .

- MINVIVIENDA. (2017). Resolución 0330/2017. Resolución 0330 de 08 de junio de 2017  
Bogotá D.C, Colombia: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. *Ministerio de  
Vivienda, Ciudad y Territorio.*
- Morales Cornejo, V., & Paucara Huamani, Y. (2021). *Fitorremediación con Plantas Acuáticas  
en Aguas Contaminadas.* Lima, Peru.
- Niño , I., Aponte , M., Rodríguez , L., & Granados , N. (2018). Fitorremediación en aguas  
residuales sin tratamiento previo. Caso: Tierra Negra, Boyacá. : *Investigación Científica  
y Tecnológica terminada.*
- Noyola, A. (2013). Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales  
Municipales: guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. *ResearchGate.*
- Nuevo, D. (2022). Los procesos de depuración de aguas residuales. *EDAR, Formación  
continua,TECPA.*
- Oakley, S. (2011). Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Centroamérica. Un manual  
de Experiencias, Diseño, Operación y Sostenibilidad. *EUA. USAID.*
- Ontiveros, G. (2015). Evaluación de tratamientos para aguas residuales contaminadas con  
fármacos y productos de higiene personal. *Universidad Nacional del Litoral.*
- Organización de Naciones Unidas. (2020). AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO: Por que es  
importante. *Objetivo de Desarrollo Sostenible, 01.*
- Pasaje, A., & Palacios, C. (2018). Evaluación de remoción de carga contaminante con sistema  
piloto para tratamiento de aguas residuales domésticas. *Universidad de Nariño, Pasto,  
Colombia.*
- Pérez Porto, J. (2021). Definición de granulometría - Qué es, Significado y Concepto.  
*Definicion.de.*

Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2010). Definición de sedimento - Qué es, Significado y Concepto.

*Definicion.de.*

Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2011). Definición de afluente - Qué es, Significado y Concepto. .

*definicion.de.*

Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2012). Definición de depuración - Qué es, Significado y

Concepto. *definicion.de.*

Plantas & Jardin . (2012). Eichhornia crassipes, el Camalote, Lirio o Jacinto de agua. *Plantas &*

*Jardin, pasion por la jardineria .*

Quevedo Quispe , A. (2021). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE HUMEDAL ARTIFICIAL PARA LA RECUPERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN LA POBLACIÓN DE ALCALÁ. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación, SciELO Analytics.*

Quimica.es. (2004). Adsorción. *Quimica.es.*

Ramalho, R. (2009). Tratamiento de aguas residuales (1.a ed.). *Editorial Reverté.*

RAS. (2000). Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento Básico – RAS Título E -

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. *República de Colombia Ministerio de Desarrollo Económico.*

Romero Ladino, , Y., Rojas Ordoñez, L., & Rodriguez Miranda, J. (2016). Evaluación de un filtro percolador sin recirculacion con medio de soporte en PVC para el tratamiento de las aguas residuales combinadas (Domésticas y pecuarias). *I+D Revista de Investigación*, 39-48.

Rotoplas. (2018). ¿Cómo se purifica el agua? Conoce el proceso. *Rotoplas.*

salas, J. (2018). Lechos bacterianos: una tecnología robusta, pero un tanto olvidada. *iagua.*

- Sanjuan Carreño , K., & Rojas Sanguino, J. (2020). Estudio y análisis del proceso constructivo de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales. *UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA*.
- Santander Universidades. (2022). Qué es la sostenibilidad: definición, tipos y ejemplos. *Becas Santander*.
- Secretaria distrital del ambiente. (2009). Resolución 3957/2009. Resolución 3957 de 19 de junio de 2009 Bogotá D.C, Colombia: secretaría jurídica distrital. *Secretaria distrital del ambiente*.
- Seftgroup. (2020). Desarenador y desengrasador de tratamiento de aguas residuales. *Seftgroup*.
- Significados. (2017). Significado de Absorción. *Significado*.
- Spena Group. (2016). Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR. *Spena Group*.
- Spena Group. (10 de diciembre de 2016). PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES – PTAR.
- Spena Group. (2017). Desarenador Vortex. Tratamiento de Aguas Residuales. *SPENA GROUP*.
- Sulzer. (2022). Homogeneización en el tratamiento de aguas residuales. *Sulzer*.
- SynerTech SAS. (s.f.). TRATAMIENTO DE LODOS PARA AGUAS RESIDUALES. *SynerTech SAS*.
- Teamb. (2019). Historia de las Plantas de Agua. *Teamb Alternativa Aplicada Ambiental*.
- Teamb. (2022). ¿Qué función tiene un desarenador en una PTAR? *Teamb*.
- Telwesa. (2021). Tratamiento terciario de aguas residuales. *Telwesa*.
- Tierra rediris. es. (s.f.). Tipos de contaminación, Contaminantes de naturaleza química. *Tierra rediris*.

- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2014). Humedal Artificial de Flujo de Horizontal subsuperficial. *akvopedia.org*.
- Torres, P. (2012). PERSPECTIVAS DEL TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN PAÍSES EN DESARROLLO. *Revista EIA*.
- UNATSABAR. (2005). GUÍA PARA DISEÑO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE FILTRACIÓN EN MÚLTIPLES ETAPAS. *Organización Panamericana de la Salud*.
- Unesco. (2017). Aguas residuales el recurso. *Unesco*.
- Universidad de Costa Rica. (2019). Humedal artificial: una propuesta para el manejo de aguas residuales. *Universidad de Costa Rica. Ciencia y Tecnología*.
- Urrego, N., Sánchez, G., & Moreno, D. (2014). Comparación de un reactor de biomasa suspendida y un reactor de biomasa adherida para la biodegradación de compuestos tóxicos presentes en aguas residuales de refinerías de petróleo. *Scielo*.
- Webmaster, W. (2021). Tratamiento de Agua Residual. *bosstech*.