

**MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL**



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FILTRO PERCOLADOR PILOTO DE LECHO  
DE CAUCHO GRANULADO, PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

**Suly Marcela Bravo Jiménez**

**Brajhan Orlando Zambrano Vargas**

**Bogotá, D.C., Febrero de 2024**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FILTRO PERCOLADOR PILOTO DE LECHO  
DE CAUCHO GRANULADO, PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
DOMÉSTICAS.**

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL, CON  
ÉNFASIS EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE**

**Suly Marcela Bravo Jiménez**

**Brajhan Orlando Zambrano Vargas**

**DIRECTOR**

**Ing. JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS**

**Bogotá, D.C. Febrero de 2024**

La tesis de maestría titulada “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FILTRO PERCOLADOR PILOTO DE LECHO DE CAUCHO GRANULADO, PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**”, presentada por **SULY MARCELA BRAVO JIMENEZ** y **BRAJHAN ORLANDO ZAMBRAO VARGAS**, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en **RECURSOS HIDRAULICOS Y MEDIO AMBIENTE**.

Director de la tesis



---

Jairo Alberto Romero Rojas

Firma del jurado 1

---

LAURA CRISTINA LESMES POSADA

Firma del jurado 2

---

HÉCTOR MATAMOROS RODRIGUEZ

Bogotá, D.C., día de mes de año (fecha de aceptación del trabajo por parte del jurado)

## **DEDICATORIA**

La presente tesis está dedicada a Dios ya que gracias a él y a sus bendiciones y a mis promesas cumplidas he logrado concluir mi carrera; a mi madre Esperanza Jiménez porque ella siempre estará a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos para hacerme una gran persona; a mis hermanos Wilson Gómez y Camilo Gómez y a mi tesoro más grande: mi hija Luziana Ballén a quien le muestro que todo lo que uno quiere alcanzar en la vida se puede lograr con mucho esfuerzo y amor; y a todas aquellas personas que de alguna u otra manera han contribuido para el logro de mis objetivos.

Suly Marcela Bravo

Hoy, en este día tan especial en mi vida, quiero darle gracias a la vida por permitirme sentir tan grata dicha y por poderla compartir con mi hijo Manuel Alejandro Zambrano. A ti hijo te dedico todos mis triunfos, ya que tú eres mi mayor inspiración. Agradezco a mí hermano Andrés Vargas su acompañamiento en este camino y por poder darle un ejemplo a seguir.

Brajhan Zambrano

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por aceptarnos como parte de esto y abrirnos las puertas de su comunidad científica para realizar nuestros estudios de posgrado en ingeniería civil. Así también a los diversos docentes que nos brindaron su conocimiento y su apoyo para seguir adelante día a día.

También agradecemos a nuestro director de tesis, Jairo Romero, por brindarnos la oportunidad de utilizar su talento y conocimiento científico, y por la paciencia del mundo para guiarnos durante el desarrollo de esta tesis.

Finalmente, también queremos agradecer a todos nuestros compañeros egresados, ya que su compañerismo, compañerismo y apoyo moral nos ayudaron a lograr nuestro objetivo de avanzar profesionalmente.

## **RESUMEN**

La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico del año 2010, establece objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción para el manejo del recurso hídrico en el país (IDEAM, 2015). Esta Política no es aplicada de manera eficiente (Ortiz & Rodríguez, 2014), entre otros efectos, deja como resultado la desconexión de asentamientos urbanos al sistema de alcantarillado municipal, generando claras afectaciones en la calidad ambiental de los principales afluentes que atraviesan el país, fuentes receptoras de aguas residuales domésticas.

Dada la vital importancia que tiene el recurso hídrico para que pueda haber vida en todo el planeta y también teniendo en cuenta el uso que se le da al agua por parte de las personas, se hace necesario realizar procesos de descontaminación, desinfección y, en términos generales, limpieza adecuada del agua utilizada ya que ésta misma es la que posteriormente será el líquido que utilicen otras personas para suplir todas sus necesidades; en otras palabras el agua que unas personas utilizan como potable pasará a ser residual luego de darle los distintos usos y esta misma agua más adelante tendrá que volver a utilizarse como potable por otras personas, es por esto que se debe dar un adecuado tratamiento de eliminación de impurezas.

Teniendo en cuenta los antecedentes citados anteriormente, se realiza este trabajo con el fin de diseñar un filtro biológico piloto para tratamiento de aguas residuales, empleando como medio de soporte del crecimiento biológico caucho de neumáticos.

Los resultados del diseño del filtro piloto se concretan con la construcción del filtro piloto y con su instalación en el laboratorio de procesos del Centro de Estudios Ambientales de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

# CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
2.1	Objetivo General .....	2
2.2	Objetivos Específicos. ....	2
<b>3</b>	<b>FILTRO PERCOLADOR</b> .....	<b>3</b>
3.1	Marco Teórico.....	3
3.1.1.	Características de los filtros percoladores.....	4
3.1.2.	Tipos de filtros percoladores. ....	5
3.1.3.	Filtros percoladores de tasa baja. ....	5
3.1.4.	Filtros percoladores de tasa alta.....	6
3.2.	Modelos De Diseño De Un Filtro Percolador.....	6
3.2.1.	Modelo general .....	6
3.2.2.	Modelo de Eckenfelder. ....	8
3.2.3.	Modelo de Germain.....	11
3.2.4.	Modelo de Velz.....	12
3.2.5.	Modelo de Schulze .....	13
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>15</b>
4.1.	Revisión Y Análisis De La Bibliografía Pertinente.....	15
4.2.	Definición De Los Parámetros De Diseño .....	15
4.3.	Elaboración Del Diseño .....	15
4.3.1.	Sistemas de drenaje inferior. ....	16
4.4.	Selección De Materiales Para La Construcción Del Piloto.....	17
4.5.	Construcción Del Filtro Percolador Piloto. ....	17
4.6.	Realización De Pruebas De Operación.....	18
<b>5.</b>	<b>FILTRO PILOTO.</b> .....	<b>19</b>
5.1.	Dimensionamiento .....	20
5.1.1.	Tanque de entrada .....	20
5.1.2.	Sistema de distribución. ....	21
5.1.3.	Tanque filtro.....	21
5.1.4.	Válvula de control del efluente.....	22
5.1.5.	Tanque de entrada. ....	23
5.1.6.	Placa metálica. ....	23
5.1.7.	Estructura metálica. ....	24
5.1.8.	Medio filtrante.....	25

5.2.	Marco Legal Del Medio Filtrante. ....	26
5.2.1.	Decreto 442 de 2015. ....	26
5.2.2.	Resolución 6981 de diciembre 2011. ....	27
5.2.3.	Resolución 1457 de julio de 2010. ....	27
5.2.4.	Ley 1333 de julio de 2009. ....	27
5.2.5.	Ley 1259 de diciembre de 2008. ....	27
5.3.	Caracterización Del Grano De Caucho De Llanta Triturada. ....	27
5.4.	Ensayo De Filtrabilidad. ....	31
5.5.	Pruebas De Operación ....	36
5.5.1.	Datos de operación. ....	36
5.5.2.	Volumen de agua del tanque de entrada. ....	36
5.5.3.	Volumen del medio filtrante. ....	37
5.5.4.	Porosidad del medio filtrante. ....	37
5.6.	Experiencia 1. ....	37
5.7.	Experiencia 2. ....	38
5.8.	Experiencia 3. ....	39
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>41</b>
	<b>ANEXO 1. PROCEDIMIENTO MANEJO FILTRO PERCOLADOR PILOTO .....</b>	<b>42</b>
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>49</b>



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 3-1. Filtro Percolador. ....	4
Ilustración 3-2. Corte Transversal Filtro Percolador .....	5
Ilustración 3-3. Modelo Filtro Percolador Sin Recirculación.....	6
Ilustración 3-4. Modelo Filtro Percolador con Recirculación. ....	7
Ilustración 4-1. Sistema de Drenaje Inferior para Filtros de Piedra.....	16
Ilustración 5-1. Filtro percolador piloto. ....	20
Ilustración 5-2. Tanque de distribución.....	21
Ilustración 5-3. Sistema de Distribución. ....	21
Ilustración 5-4. Tanque Filtro.....	22
Ilustración 5-5. Válvula control del efluente. ....	23
Ilustración 5-6. Tanque de Entrada. ....	23
Ilustración 5-7. Placa Metálica. ....	24
Ilustración 5-8. Estructura Metálica. ....	25
Ilustración 5-9. Tamices utilizados en ensayo. ....	28
Ilustración 5-10. Diagrama de Flujo Granulometría NTC77.....	29
Ilustración 5-11. Funcionamiento de la Probeta. ....	32
Ilustración 5-12. Montaje sistema de Filtración.....	32
Ilustración 5-13. Llenado de la probeta con Material Filtrante. ....	33
Ilustración 5-14. Agua Utilizada en el ensayo.....	33
Ilustración 5-15. Llenado del Sistema con Agua.....	34
Ilustración 5-16. Sistema en Funcionamiento.....	34
Ilustración 5-17. Salida del agua Filtrante. ....	35
Ilustración 5-18. Toma del tiempo de salida del agua filtrante.....	35

## ÍNDICE DE GRAFICAS

Grafica 5-1. Granulometría Grano Fino R-3. ....	30
Grafica 5-2. Granulometría R-6 Grueso. ....	31

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Parámetros de Diseño para Filtro Percolador.....	15
Tabla 5-1. Composición de las llantas (Departamento ingeniería Mecánica F.I.U.B.A). ....	26
Tabla 5-2. granulometría grano Fino R-30. ....	29
Tabla 5-3. Granulometría Grano Grueso R-60. ....	30
Tabla 5-4. Tanque de entrada.....	36
Tabla 5-5. Tanque de filtro. ....	36
Tabla 5-6. Tanque de salida.....	36
Tabla 5-7. Tanque de entrada.....	36
Tabla 5-8. Medio filtrante. ....	37
Tabla 5-9. Datos entrada. ....	37
Tabla 5-10. Datos experiencia 1. ....	37
Tabla 5-11. Tiempo de filtrado experiencia 1. ....	38
Tabla 5-12. Datos experiencia 2. ....	38
Tabla 5-13. tiempo de filtrado experiencia 2.....	38
Tabla 5-14. Datos entrada experiencia 3.....	39
Tabla 5-15. Tiempo de filtrado experiencia 2. ....	39

## 1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento continuo de la población, de las actividades económicas, así como de las condiciones socio territoriales, trae como consecuencia el aumento en las cargas contaminantes de las aguas residuales y la disminución de la capacidad auto depuradora de los cuerpos de agua receptoras. En este sentido, las operaciones unitarias de separación física no son suficientes para alcanzar la calidad de agua requerida para los diferentes usos de dichos cuerpos, debido predominantemente a los contaminantes solubles, los cuales pueden ser removidos mediante procesos bioquímicos.

Dentro del tratamiento de las aguas residuales se busca la sostenibilidad de los procesos, así como la reutilización de las aguas residuales tratadas.

El objetivo principal del tratamiento es que el efluente producido pueda ser amigable para el medio ambiente. Para lograr esto, los contaminantes que contiene el agua residual son eliminados por métodos físicos, químicos o biológicos.

El diseño y construcción de un filtro percolador piloto, de lecho de caucho granulado, para tratamiento de aguas residuales, busca brindar la oportunidad de evaluar el uso de un medio de material reciclado para tratamiento biológico, mediante la realización de pruebas futuras de tratamiento que permitan conocer su rendimiento y factibilidad de uso en plantas prototipo de tratamiento de aguas residuales.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

- Diseño y construcción de un filtro percolador piloto de laboratorio, de lecho de caucho granulado, para tratamiento de aguas residuales.

### **2.2 Objetivos Específicos.**

- Efectuar una revisión bibliográfica de las características y uso de filtros percoladores piloto para tratamiento de aguas residuales.
- Conocer los principios del tratamiento de aguas residuales en filtros biológicos.
- Definir los parámetros de diseño y operación de un modelo de filtro percolador piloto de laboratorio.
- Evaluar las características y factibilidad del caucho granulado como medio de soporte para la construcción del filtro piloto.
- Definir el material para construcción del filtro percolador piloto de laboratorio y las condiciones para su operación y control bajo diferentes cargas hidráulicas y orgánicas.
- Realizar la construcción del filtro percolador piloto en el laboratorio de procesos del CEA de la Escuela.
- Verificar el funcionamiento apropiado del filtro piloto construido.

### 3 FILTRO PERCOLADOR

#### 3.1 Marco Teórico.

El filtro percolador o biofiltro es un proceso muy usado para el tratamiento de aguas residuales. El filtro biológico no es un proceso diseñado para ejercer una verdadera acción de tamizado o filtración del agua residual sino para poner en contacto aguas residuales con biomasa adherida a un medio de soporte fijo, constituyendo un lecho de oxidación biológica. (Romero, 2013).

Un filtro biológico tiene por objeto reducir la carga orgánica existente en aguas residuales domesticas o industriales. Consiste en un lecho de piedras, u otro medio natural o sintético, sobre el cual se aplican las aguas residuales. (Romero, 2013).

Los inicios de la experimentación con aguas residuales se datan en las pruebas realizadas en la Estación Experimental Lawrence en Massachussets en Las Vegas. Estos experimentos se realizaron entre los años 1887 y 1890, con muestras tomadas del Río Merrimac. El objetivo principal de estos experimentos era que las aguas residuales pasaran por un medio poroso, para ello se utilizaron diez tanques circulares de madera de ciprés de 5,2 m de diámetro y 1,8 m de altura, los cuales se llenaron con varios materiales: arena, grava, turba, aluvión del río, marga, tierra vegetal y arcilla. (Romero, 2013).

Los resultados de las pruebas mostraron que cuando se pasa agua negra a través de un medio, la purificación del agua ocurre principalmente por oxidación biológica, más que por el efecto mecánico de cribado. (Romero, 2013).

En 1893, Joseph Corbett, en Salford, Inglaterra, tomando como base los resultados de Lawrence, construyó el primer filtro percolador, aplicando agua rociada sobre el medio, en lugar de contenerla en el filtro. (Romero, 2013).

Para el año de 1901 en los Estados Unidos de América, más exactamente en Madison, Wisconsin, se construyó el primer filtro percolador, el cual fue hecho con carácter experimental. Por otro lado, la primera planta que implemento el filtro percolador a su estructura fue la planta ubicada en Columbus, Ohio, en el año de 1908. Pero no fue sino hasta el año de 1930, donde se utilizó el primer distribuidor rotatorio. Por otro lado, en el año de 1936, en algunas plantas de tratamiento, la recirculación fue implementada por primera vez. (Romero, 2013).

La primera ecuación de cinética biológica para predecir el funcionamiento de los filtros biológicos fue desarrollada en el año de 1940 y en el año de 1950 fueron utilizados por primera vez los medios plásticos. (Romero, 2013).

El uso de los filtros biológicos decreció en la década de los años sesenta y al principio de los años setenta, debido a la necesidad de obtener mejores efluentes, lo cual se lograba con las plantas de lodos activados. Sin embargo, al final de los años setentas, el creciente costo de la energía y los avances en el diseño de filtros (como la mayor altura del filtro y aplicación de cargas más altas) debido al mejoramiento de medios sintéticos, causo un renovado interés por el uso de los filtros rociadores, incrementado actualmente por el creciente empleo de las plantas duales o combinadas

que producen efluentes de muy alta calidad, acordes con las mayores exigencias que demandan los organismos responsables del control de la calidad en las descargas a cuerpos receptores. (Romero, 2013).

### 3.1.1. Características de los filtros percoladores.

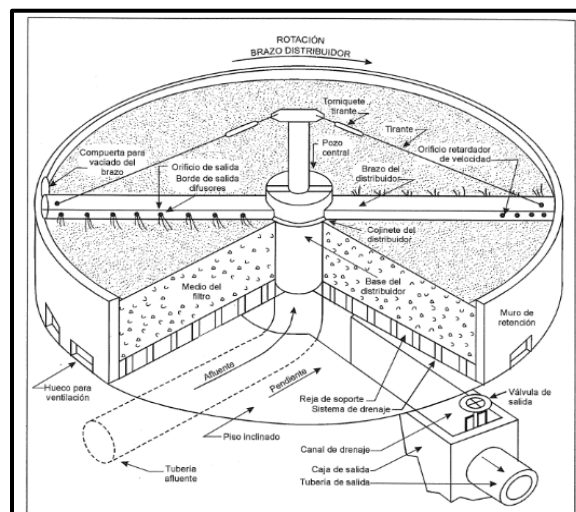
Un filtro percolador tiene por objeto reducir la carga orgánica existente en aguas residuales domésticas o industriales. Consiste en un lecho de piedras, u otro medio natural o sintético, sobre el cual se aplican las aguas residuales, con el consecuente crecimiento de microorganismos, lamas o películas microbiales sobre el lecho. En un filtro percolador, las aguas residuales se riegan sobre el lecho filtrante y se dejan percolar. El lecho del filtro percolador consiste en un medio altamente permeable, al cual se adhieran los microorganismos y a través del cual el residuo líquido se infiltra.

Usualmente el medio filtrante es piedra de tamaño cambiante entre 2,5 y 10 cm, profundidad variable según el diseño, generalmente 1 a 2,5 m, en promedio 1,8 m. Filtros percoladores con medio plástico, biorreactores, se construyen con profundidades hasta de 12 m. (Romero, 2013).

El filtro es usualmente circular con distribuidor rotatorio superficial del agua. También se usan filtros percoladores rectangulares, con sistemas de aplicación del agua mediante tuberías y toberas fijas. Cada filtro tiene un sistema de drenaje inferior para recoger el agua residual tratada y los sólidos biológicos que se desprendan del medio. (Romero, 2013).

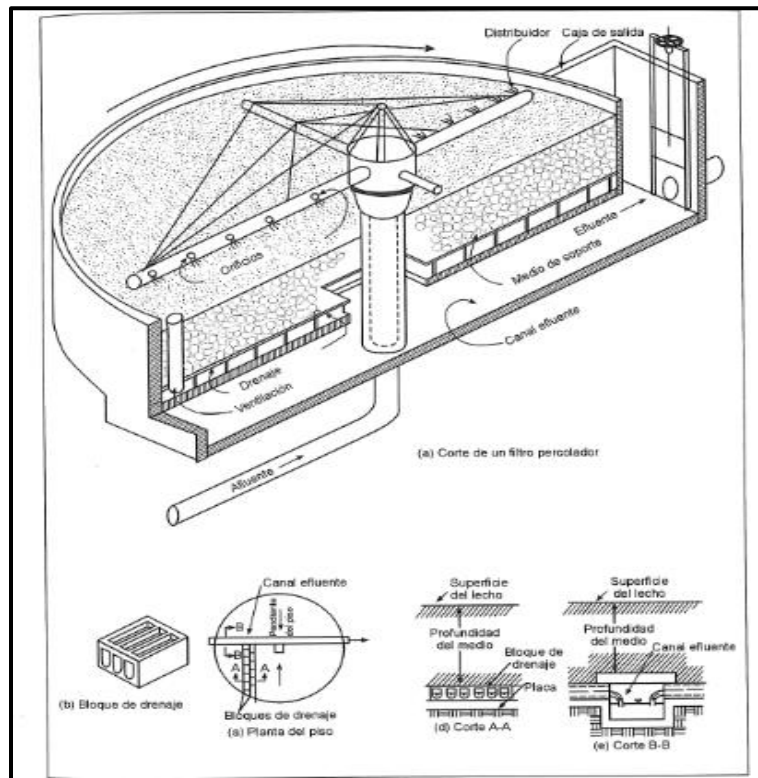
El sistema de drenaje es importante como unidad de recolección y como estructura porosa, a través de la cual circula el aire. El material orgánico presente en el agua residual es absorbido y descompuesto por la biomasa adherida al medio filtrante; en la porción interior, cerca de la superficie del medio, predominan condiciones anaerobias; en la parte externa, condiciones aerobias. (Romero, 2013).

Ilustración 3-1. Filtro Percolador.



FUENTE. ROMERO ROJAS, J. A. (2021). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEORIA Y PRINCIPIOS DE DISEÑO

Ilustración 3-2. Corte Transversal Filtro Percolador



FUENTE. ROMERO ROJAS, J. A. (2021). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEORÍA Y PRINCIPIOS DE DISEÑO

### 3.1.2. Tipos de filtros percoladores.

Originalmente los filtros percoladores eran diseñados con base en cargas hidráulicas y orgánicas que produjeran una remoción del 80 - 90 % de la DBO del afluente. En la actualidad los filtros percoladores se clasifican por carga orgánica o por carga hidráulica. A continuación, se describen las características y parámetros de diseño más representativos de cada tipo de filtro. (Cabrera & Cabrera, 2019).

### 3.1.3. Filtros percoladores de tasa baja.

Pueden soportar cargas inferiores de  $0,4 \text{ kg DBO/m}^3 \cdot \text{d}$ , suelen tener lecho de piedra de 1,5 a 2,5 m de altura y se alimentan a intervalos cortos mediante sifones que proporcionan la carga hidráulica requerida. No requieren recirculación en condiciones normales de funcionamiento, es decir sin carga máxima y objetivos de rendimiento por debajo del 90%. Por lo general, una altura hidráulica constante no se mantiene mediante circulación, sino mediante control de nivel o medidores que proporcionan un flujo intermitente cada 2 a 5 minutos. El rendimiento de DBO alcanzado en la nitrificación de aguas residuales es de aproximadamente el 85%. (España, Quintero y Reyes, 2017).



### 3.1.4. Filtros percoladores de tasa alta.

Tratan cargas entre 0,8 - 1,6 kg DBO/m<sup>3</sup>.d. Trabajan normalmente en continuo, con cargas hidráulicas elevadas, por lo que precisan de una recirculación de entre 1-2 veces el caudal medio de entrada, para mantener estas condiciones. Este tipo de filtros suele utilizar plástico como relleno. (Menéndez & Dueñas, 2018)

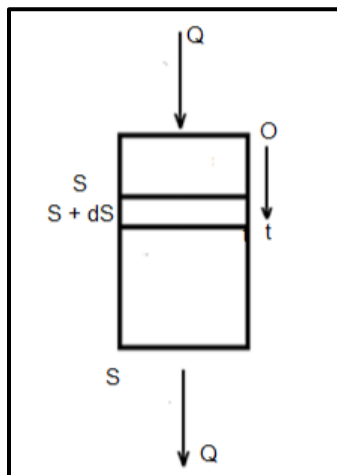
## 3.2. Modelos De Diseño De Un Filtro Percolador.

### 3.2.1. Modelo general

Teniendo en cuenta que el agua residual sigue una trayectoria vertical, con poco movimiento lateral, se puede considerar al filtro percolador como un ejemplo de proceso con flujo en pistón. Además, aunque se reconoce que la remoción de DBO es función de muchas variables (profundidad, textura, permeabilidad, configuración y área superficial específica del medio; naturaleza del agua residual, carga hidráulica superficial, carga orgánica, relación de recirculación, tiempo de contacto y temperatura, principalmente), se utilizan aproximaciones y se ignoran variables, o se da mayor énfasis a un parámetro sobre otro, para formular los diferentes modelos matemáticos de diseño. (Romero, 2013).

Para un filtro percolador, sin recirculación, suponiendo modelo de flujo en pistón y tasa de remoción de DBO, según una ley de primer orden, se tiene:

Ilustración 3-3. Modelo Filtro Percolador Sin Recirculación.



FUENTE. CARVAJAL FUENTES, C.A (2020). MODELO PARA COMPARAR DISEÑOS DE FILTROS PERCOLADOR.

$$q_a = \frac{dS}{dt} = -cS \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

**S** = concentración del sustrato, generalmente mg/L de DBO soluble

$c$  = constante de remoción de sustrato, base natural, d

$t$  = tiempo de contacto, d

De la Ecuación 1 se obtienen las ecuaciones 2 y 3.

$$-\int_{S_a}^{S_e} \frac{dS}{S} = -c \int_0^t dt \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-ct} \quad \text{Ecuación 3}$$

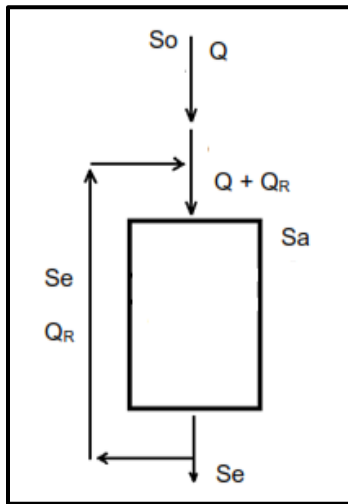
Donde:

$S_e$  = **DBO** soluble del efluente del filtro, mg/L

$S_a$  = **DBO** soluble del afluente del filtro, mg/L

Para filtros percoladores con recirculación, es decir, cuando la **DBO** del caudal del afluente  $Q$  es diluida con un caudal recirculado  $Q_R$ , se tiene:

**Ilustración 3-4. Modelo Filtro Percolador con Recirculación.**



FUENTE. CARVAJAL FUENTES, C.A (2020). MODELO PARA COMPARAR DISEÑOS DE FILTROS PERCOLADOR.

$$QS_0 + Q_R S_0 = (Q + Q_R) S_a \quad \text{Ecuación 4}$$

Llamando  $R$ , la relación de recirculación:

$$R = \frac{Q_R}{Q} \quad \text{Ecuación 5}$$

Entonces,

$$S_0 + RS_e = (1 + R)S_a \quad \text{Ecuación 6}$$

Por tanto,

$$S_a = \frac{S_0 + RS_e}{1+R} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$S_0 = \text{DBO}$  soluble del agua residual, sin incluir recirculación, mg/L

$S_a = \text{DBO}$  soluble del afluente del filtro, mg/L

En la ecuación anterior se observa que cuando no hay circulación:

$$R = 0_0 \quad ; \quad S_a = S_0 \quad \text{Ecuación 8}$$

Reemplazando la Ecuación 6 en la Ecuación 7, se obtiene la Ecuación 9.

$$\frac{S_e(1+R)}{S_0 + RS_e} = e^{-ct} \quad \text{Ecuación 9}$$

Para realizar el diseño se requieren los siguientes datos:

- Caudal a tratar
- Carga orgánica a la entrada del filtro
- Carga orgánica con la que se debe salir del filtro (según normatividad)
- Profundidad del filtro
- Relación de recirculación
- Material del medio filtrante
- Temperatura del agua
- 

Teniendo los datos antes mencionados se podrá calcular:

- Área superficial del filtro
- Volumen del filtro
- Carga hidráulica superficial
- Carga hidráulica volumétrica
- Carga orgánica volumétrica
- Carga orgánica superficial

### 3.2.2. Modelo de Eckenfelder.

(Eckenfelder, 1980) modifica la ecuación 3 así:

$$S_e \frac{S_e}{S_a} = e^{-cst} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

$S_e = \text{DBO}$  soluble del efluente del filtro, mg/L

$S_a = \text{DBO}$  soluble del afluente del filtro, mg/L

$C =$  constante de remoción, m/d

$S =$  área superficial específica del medio,  $\text{m}^2/\text{m}^3$

$t =$  tiempo de contacto, d

Se toma el tiempo de contacto, o tiempo de retención en el filtro percolador, como lo hace Velz, Schulze, Howland, Sinkoff y otros así:

$$t = \frac{CD}{q^n} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

$D =$  profundidad del filtro, m

$Q =$  carga hidráulica superficial, m/d

$C$  y  $n =$  constantes que caracterizan el medio y cuyos valores dependen de las unidades utilizadas para cuantificar  $t$  de remoción, m/d

Remplazando la Ecuación 11 en la Ecuación 10, se tiene:

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-KSD/q^n} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

$K = cC =$  constante modificada de remoción de sustrato, base natural  $(\text{m/d})^n$ .

En la Ecuación 12,  $K$  tiene unidades de m/d para  $n=1$  y  $C$  es adimensional. Sin embargo, los valores de  $K$  son función de las unidades usadas para expresar las diferentes variables y del valor de  $n$ .

La ecuación anterior es la recomendada por Eckenfelder para predecir la remoción de la materia orgánica en el filtro percolador. La Ecuación 12 también suele expresarse así:

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-KSD/q^n} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

$k$  = constante modificada de remoción de sustrato, base decimal (m/d)<sup>n</sup>.

Para filtros percoladores con recirculación, de la Ecuación 6 y Ecuación 10, se despeja directamente la carga hidráulica superficial requerida  $q$ , para una DBO específica del efluente  $S_e$  y una DBO afluente del agua residual  $S_0$ , con un medio de soporte de crecimiento de superficie específica  $S$  y profundidad  $D$ .

$$q = \left[ \frac{KSD}{\ln \left( \frac{1+R(S_e/S_0)}{(1+R) \cdot (S_e/S_0)} \right)} \right]^{1/n} \quad \text{Ecuación 14}$$

Para filtros percoladores, sin recirculación, de la Ecuación 13 se obtiene la Ecuación 15.

$$q = \left[ \frac{KSD}{\ln \left( \frac{S_0}{S_e} \right)} \right]^{1/n} \quad \text{Ecuación 15}$$

Para tener en cuenta el efecto de la temperatura sobre el valor de  $K$ , se puede usar la ecuación clásica de Arrhenius, Ecuación 16.

$$K_T = K_{20} \theta^{T-20} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

$K_T$  = constante de remoción a la temperatura  $T$ .

$K_{20}$  = constante de remoción a 20°C.

$T$  = temperatura del agua, °C.

$\theta$  = coeficiente de temperatura

$\theta = 1,035$  para filtros percoladores.

Otros autores consideran

$\theta = 1,0$  para temperaturas mayores a 10°C, o sea que no sería necesario hacer la corrección por temperatura.

Cuando con la Ecuación 16 no se encuentran correlaciones experimentales apropiadas, Eckenfelder recomienda usar el modelo expresado por la Ecuación 17 y Ecuación 18, con el cambio correspondiente en las unidades de expresión de  $K$  y  $k$ : (m/d)<sup>n</sup> (mg/L).

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-KSD/q^n S_a} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-kSD/q^n S_a} \quad \text{Ecuación 18}$$

### 3.2.3. Modelo de Germain

La fórmula propuesta por Germain, para diseño de filtros percoladores de medio plástico, es la Ecuación 19.

$$\frac{S_e}{S_0} = e^{-KD/qn} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

**S<sub>0</sub>** = DBO soluble del afluente, sin incluir recirculación, mg/L.

**S<sub>e</sub>** = DBO soluble del efluente, mg/L.

**D** = profundidad, m.

**q** = carga hidráulica, sin recirculación, m/d

**n** = exponente característico del medio de soporte.

**K** = constante de tratabilidad, m<sup>-0,5</sup>d<sup>-0,5</sup>

**K = 2,21 (m.d)<sup>-0,5</sup>** para aguas residuales domésticas, a 20°C.

**K = 0,25 – 2,51 (m.d)<sup>-0,5</sup>** para aguas residuales industriales, a 20°C.

El valor de **K** se debe deducir de estudios con planta piloto. Los valores citados se pueden usar para filtros con profundidades de 6 m.

La constante de tratabilidad se corrige por temperatura según la Ecuación 20.

$$K_T = K_{20}(1,035)^{T-20} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde

**K<sub>T</sub>** = constante de tratabilidad a la temperatura T.

**K<sub>20</sub>** = constante de tratabilidad a 20°C.

**T** = temperatura mínima esperada, °C.

En los estudios de Germain se indicaba que la recirculación no tenía influencia apreciable sobre la tasa de reacción **K**.

No obstante, en la actualidad se reconoce el efecto de la recirculación para diseño de biofiltros de medio plástico o biorreactores. Para tener en cuenta la recirculación, la ecuación de Germain se modifica como se indica en la ecuación 21

$$S_a = \frac{S_0 + RS_e}{1+R} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$S_e = S_a e^{-KD/qn} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:

**S<sub>a</sub>** = DBO del afluente del filtro, incluyendo la recirculación, mg/L

**R** = relación de recirculación o razón entre el caudal recirculado y el caudal afluente de aguas residuales.

**n** = coeficiente dependiente del medio de soporte, igual a 0,5 para medio plástico, según Germain.

En diseño generalmente se requiere determinar la carga hidráulica, para lo cual es útil la expresión Ecuación 23 o Ecuación 24

$$q = \left[ \frac{KD}{\ln \left( \frac{S_a}{S_e} \right)} \right]^{1/n} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$q = \left[ \frac{KD}{\ln \left( \frac{S_0 + RS_e}{(1+R)S_e} \right)} \right]^{1/n} \quad \text{Ecuación 24}$$

### 3.2.4. Modelo de Velz

“A diferencia de las demás fórmulas que son netamente empíricas y se basan en datos específicos, Velz propuso en 1948 la primera fórmula significativa que delineó una ley fundamental, basada en análisis de datos” (ESPAÑA LEAL L. M., QUINTERO DUQUE D. F., & REYES AGUIRRE S. 2017). *Sistemas Aerobios Adheridos: Filtros Percoladores.*, . Esta relación es aplicable a todos los procesos biológicos concernientes a biorreactores de bajo y alto rendimiento. Su ecuación parte de consideraciones teóricas sobre la remoción de la materia orgánica por los microorganismos. La cantidad de microorganismos la hace proporcional a la profundidad del lecho. Por consiguiente, la fórmula de Velz indica la DBO remanente a una profundidad D como se muestra a continuación:

$$\frac{S_D}{S_0} = 10^{-KD} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde:

**S<sub>0</sub>** = Concentración de DBO removible, mg/L

$S_D$  = Concentración de DBO removido a una profundidad  $D$ , mg/L

$D$  = Profundidad del filtro.

$K$  = Constante de tratabilidad de rango de primer orden,  $d^{-1}$

La concentración de DBO removible significa para Velz la fracción máxima de la DBO aplicada que es posible remover para una carga hidráulica dada. Esta ecuación tiene utilidad cuando se consideran sistemas sin recirculación. En esta fórmula se toma  $K$ , como una constante para todos los rangos hidráulicos. Sin embargo, se demostró que esta constante varía de acuerdo con los rangos del sistema, así que, para los filtros de alto rango,  $K$  es igual a  $0,1505d^{-1}$  y para las bitorres de bajo rango  $K$  es igual a  $0,175 d^{-1}$ . (España, Quintero & Reyes, 2017).

### 3.2.5. Modelo de Schulze

En esta fórmula, propuesta en 1960, se postula que el tiempo de contacto del líquido con la masa biológica es directamente proporcional a la profundidad de la bitorre e inversamente proporcional al rango de carga hidráulica, como se muestra a continuación: (España, Quintero & Reyes, 2017).

$$T = \frac{CD}{q^n} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

$T$  = Tiempo de contacto del líquido, min.

$C$  = Constante.

$D$  = Profundidad, pies.

$q$  = Rango de carga hidráulica, gpm/pie<sup>2</sup>

$n$  = Constante, característico del medio de soporte.

Schulze derivó la fórmula que se muestra a continuación, combinando el tiempo de contacto con la ecuación de primer orden para la remoción del DBO, propuesta por Velz.

$$\frac{S_e}{S_0} = e^{-\frac{kD}{q^n}} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde:

$S_e$  = DBO del efluente, mg/L.

$S_0$  = DBO del afluente, mg/L.

$k$  = constante experimental de rango entre 0,51 y 0,76  $d^{-1}$

$D$  = profundidad, pies.



**Q** = rango de carga hidráulica, mgd/ac

**n** = Constante, característico del medio de soporte.

## 4 METODOLOGÍA.

### 4.1.Revisión Y Análisis De La Bibliografía Pertinente

Se seguirá con la recopilación de informes de investigación, textos teóricos, tesis de grado, etc., que estén relacionados con el tema del presente trabajo, enfocándonos en la metodología empleada, resultados obtenidos, en los aspectos que pueden mejorarse con el presente trabajo y en las conclusiones y recomendaciones de cada uno de ellos; lo que permitirá conocer mejor el problema y enfocar la estructuración del estado del arte.

### 4.2.Definición De Los Parámetros De Diseño

El filtro percolador o también conocido como biofiltro, es un proceso muy utilizado en el tratamiento de aguas residuales, se encarga de poner en contacto estas aguas con biomasa adherida a un medio de soporte fijo generando un lecho de oxidación biológica.

Su objetivo es el reducir la carga orgánica presente en el agua residual, vertiendo la misma sobre un lecho de material natural o artificial como piedras o rosetas plásticas respectivamente.

El lecho del filtro percolador debe ser de materiales altamente permeables en el mismo que se adhieran microorganismos y a través del cual el residuo líquido se infiltra, por lo general el tamaño de la piedra a utilizarse es de 2,5 a 10 cm de diámetro colocados en un tanque de profundidad variable en dependencia del diseño a realizar, estos tanques pueden ser de 1 a 2,5 m con un promedio de 1,8 m (Romero Rojas, 2010). Estos filtros poseen sistemas de drenaje inferior para recolectar el agua residual tratada y los sólidos que se desprenden del mismo. El sistema debe ser poroso permitiendo el acceso del aire pues se trata de un sistema de tratamiento facultativo. El residuo orgánico presente en el agua residual es absorbido por la biomasa adherida al lecho filtrante (Romero Rojas, 2021).

### 4.3.Elaboración Del Diseño

Los datos principales al momento de construir un filtro percolador se encuentran en la Tabla 1. Se parte principalmente del tipo de filtro que se requiere en dependencia de la carga orgánica e hidráulica, en este proyecto se determinó que será de carga alta. Para continuar con el diseño se requiere escoger el medio filtrante, profundidad y diámetro del tanque conociendo el caudal que se requiere depurar.

Tabla 4-1. Parámetros de Diseño para Filtro Percolador.

CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO	BAJA TASA	TASA INTERMEDIA	ALTA TASA ROCA	ALTA TASA PLÁSTICO	TRATAMIENTO GRUESO
Tipo de lecho	Roca,	Roca	Roca	Plástico	Roca/Plástico
Carga hidráulica, m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> *d)	1 - 4	4 - 10	10 - 40	10 - 75	40 – 200

Carga orgánica kgDBO/m <sup>3</sup> *d	0,07 – 0,22	0,24 – 0,48	0,4 – 2,4	0,6 – 3,2	>1,5
Relación de circulación	0	0 - 1	1 - 2	1 - 2	0 – 2
Moscas de filtro	Muchas	Varias	Pocas	Pocas	Pocas
Desprendimientos	Intermitentes	Intermitentes	Continuos	Continuos	Continuos
Profundidad, m	1,8 – 2,4	1,8 – 2,4	1,8 – 2,4	3 – 12,2	0,9 - 6
Remoción DBO %	80 - 90	50 - 80	65 - 90	75 - 95	40 – 70
Calidad del Efluente	Bien Nitrificado	Someramente Nitrificado	Sin Nitrificado	Sin Nitrificado	Sin Nitrificado
Consumo energético KW/103m <sup>3</sup>	2 - 4	2 - 8	6 - 10	6 - 10	10 - 20

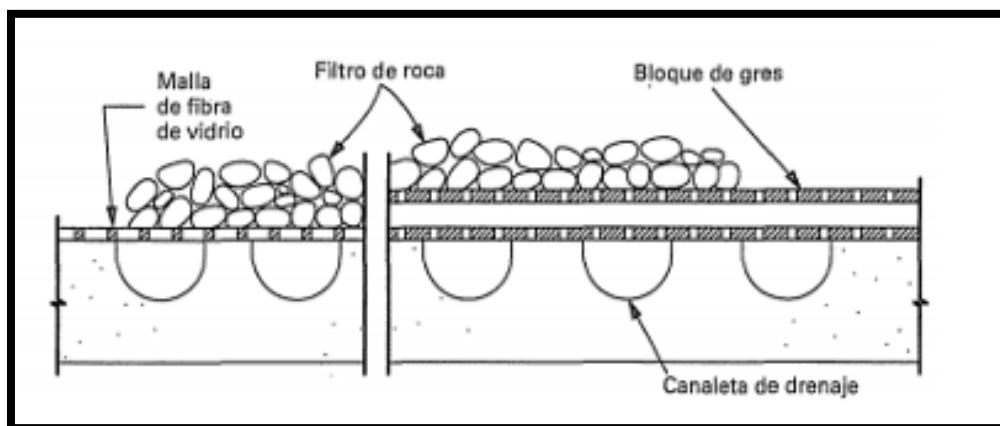
Fuente: Resolución 330 del 2017, Ministerio de vivienda, ciudad y territorio.

#### 4.3.1. Sistemas de drenaje inferior.

El filtro percolador debe poseer un sistema de drenaje que recoja el agua residual y los sólidos desprendidos del material filtrante y guiarlos hasta el tanque de sedimentación. Cuando se utilizan materiales filtrantes de tipo rocoso, el drenaje inferior se suele construir de bloques de arcilla vitrificada que descansan sobre un falso fondo por encima de la solera del filtro, también se utilizan parrillas de fibra de vidrio como material para la construcción del sistema de drenaje (METCALF & EDDY, INC., 1995)

Este drenaje requiere ranuras u orificios para admitir el agua del efluente, estos son colocados con pendientes del 1 al 2% hasta la sección de recolección (Orozco Jaramillo, 2005).

Ilustración 4-1. Sistema de Drenaje Inferior para Filtros de Piedra.



Fuente: (METCALF & EDDY, INC., 1995)

#### **4.4. Selección De Materiales Para La Construcción Del Piloto**

En esta sección se describirá cada uno de los materiales y elementos que componen la construcción de cada sección del modelo físico del filtro percolador; además se consideraron los materiales para el prototipo de este proyecto.

- Vidrio de 9mm de espesor prensado
- Manguera de ½” Calibre 40
- Bomba peristáltica
- Caucho molido
- Caneca plástica de 50 L
- Base metálica

#### **4.5. Construcción Del Filtro Percolador Piloto.**

Un Filtro Percolador es un filtro biológico de lecho fijo que opera bajo condiciones principalmente aeróbicas. Se “deja caer” o rocía agua de desecho decantada sobre el filtro. Al migrar el agua por los poros del filtro, la materia orgánica se degrada por la biomasa que cubre el material del filtro.

El Filtro Percolador se llena con material de alta superficie específica, tales como piedras, grava, botellas de PVC trituradas, o material filtrante preformado especialmente. Para prevenir obstrucciones y asegurar un tratamiento eficiente es esencial un pretratamiento. El agua residual pretratada se “deja caer” sobre la superficie del filtro. Los organismos que se desarrollan en una delgada capa en la superficie del material oxidan la carga orgánica produciendo dióxido de carbono y agua, generando nueva biomasa.

El agua residual entrante es rociada sobre el filtro con el uso de un rociador. De esta manera, el material del filtro pasa por ciclos de saturación y de exposición al aire. Sin embargo, el oxígeno se reduce en la biomasa y las capas más internas pueden ser anóxicas o anaeróbicas. El filtro normalmente tiene de 1 a 3 m de profundidad, pero los filtros hechos con material plástico más ligero pueden ser de hasta 12 m de profundidad.

El material ideal para el filtro tiene una elevada relación superficie/volumen, es ligero, duradero y permite que el aire circule. Siempre que estén disponibles, las piedras trituradas o la grava son la opción más económica. Las partículas deben ser uniformes de manera que el 95% de las partículas tengan un diámetro entre 7 y 10 cm.

Ambos extremos del filtro están ventilados para permitir que el oxígeno pase a lo largo de su superficie. Una losa perforada sostiene el fondo del filtro y permite que el efluente y el exceso de lodo se recolecten.

Con el tiempo la biomasa engrosará y la capa sujeta se quedará sin oxígeno; entrará en un estado endógeno, perderá su habilidad de mantenerse sujeta y se liberará. Las condiciones de alta carga

provocarán también la separación. El efluente recolectado debe ser clarificado en un tanque de sedimentación para eliminar cualquier biomasa que se haya desprendido del filtro. La carga hidráulica y de nutrientes está determinada por las características del agua residual, el tipo del material del filtro, la temperatura ambiental y las necesidades de descarga.

#### **4.6. Realización De Pruebas De Operación.**

El agua a analizar se verterá dentro de los tanques de almacenamiento y se aplicará al filtro construido para comprobar el comportamiento hidráulico del piloto.

## 5. FILTRO PILOTO.

El filtro percolador piloto tiene como destino ser una herramienta de gran utilidad para el laboratorio de procesos del Centro de Estudios Ambientales de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Su uso se destina para evaluar, por estudiantes y docentes, el tratamiento biológico de aguas.

El modelo del filtro percolador funciona en caída libre, es decir que por medio de la carga hidráulica se genera el paso del agua a través de todo el sistema.

El filtro percolador piloto cuenta con tres secciones: tanque de entrada, sistema de distribución, tanque filtro, tanque de salida (Ilustración 4-1).

- Tanque de Entrada: el modelo de filtro percolador piloto posee en la parte superior un tanque rectangular que alimenta el sistema de distribución.
- Sistema de Distribución: Este sistema, compuesto por una serie de tubos en PVC, es el encargado de distribuir el agua que se encuentra en el tanque de entrada hacia el filtro.
- Tanque Filtro: en el centro del sistema se encuentra este tanque de forma rectangular que lleva a cabo la biofiltración del agua.
- Tanque de Salida: En la parte inferior del filtro piloto se encuentra el tanque rectangular de salida, donde se va a recolectar el agua filtrada.

## 5.1. Dimensionamiento

Ilustración 5-1. Filtro percolador piloto.



Fuente: Propia.

### 5.1.1. Tanque de entrada

El tanque de entrada cumple la función de almacenar agua que se someterá a tratamiento, posee una altura de 40 cm y una sección rectangular de 40 cm x 40 cm que permite 60 litros de almacenamiento sin desbordamientos.

**Ilustración 5-2. Tanque de distribución.**

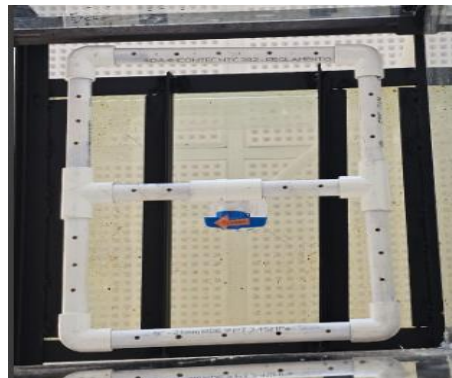


Fuente: Propia.

### **5.1.2. Sistema de distribución.**

Este sistema está compuesto por una válvula de bola, la cual controla el paso del agua del tanque de entrada al sistema de distribución. La red de distribución está compuesta por tubería en PVC de ½” pulgada, dispuesta para que el agua se distribuya de una forma homogénea sobre el filtro.

**Ilustración 5-3. Sistema de Distribución.**



Fuente: Propia.

### **5.1.3. Tanque filtro.**

El tanque filtro está compuesto por una estructura metálica de acero fijada a la placa inferior que sirve de colador y soporte para el medio filtrante. El tanque filtro se construye con paredes en vidrio templado de 9mm conectado a la estructura metálica mediante perfiles metálicos. Tiene una capacidad de 270 litros con una altura de 170 cm.



**Ilustración 5-4. Tanque Filtro.**



Fuente: Propia.

#### **5.1.4. Válvula de control del efluente**

Esta válvula es la encargada de controlar el paso del agua filtrada hacia el tanque de entrada. Se instalo una válvula de bola con un diámetro de ½” pulgada.

**Ilustración 5-5. Válvula control del efluente.**



Fuente: Propia.

### **5.1.5. Tanque de entrada.**

El tanque de salida es la parte final del filtro percolador piloto, su función principal es recolectar el agua residual sometida a recorrer el sistema; tiene un volumen total de 64 litros. El modo de realizar el desagüe del tanque es prendiendo la bomba de impulsión, cerrando la válvula de distribución y abriendo la válvula (Naranja) de control de carga y/o distribución.

**Ilustración 5-6. Tanque de Entrada.**



Fuente: Propia.

### **5.1.6. Placa metálica.**

Las placas metálicas de acero tienen un espesor de 0,3 cm con el propósito de resistir las cargas a las que va a ser expuesta ante el peso del agua y el medio filtrante; cuentan con una misma sección transversal de 40 x 40 cm que permite su colocación sobre la estructura metálica general del filtro percolador piloto.

**Ilustración 5-7. Placa Metálica.**



Fuente: Propia.

#### **5.1.7. Estructura metálica.**

La estructura general del filtro percolador está compuesta por ángulos de acero de 1" y ¼" de ancho x ¼" de espesor, su función principal es soportar todos los tanques y la placa que conforman el sistema de filtración, así como el peso generado por el agua residual.

La estructura del filtro percolador piloto está dotada, para su movilidad, con cuatro ruedas de goma, distribuidas en pares de fijas y móviles, permitiendo transporte o movimiento dentro del laboratorio.

**Ilustración 5-8. Estructura Metálica.**



Fuente: Propia.

### **5.1.8. Medio filtrante**

El grano de caucho de llanta reciclada es una alternativa de medio filtrante que permitiría el reciclaje del caucho de las llantas desechadas.

El grano de caucho de llanta reciclada (GCR), es el resultado del reciclaje y la trituración de llantas de desecho. El GCR es usado actualmente en mezclas asfálticas para pavimentación de vías, para elaboración de parques infantiles y canchas sintéticas y como materia prima para fabricación de suelas para calzado. (Torres, 2014).

El reciclaje de llantas para la obtención del GCR se lleva a cabo en las siguientes fases: Una primera fase obligatoria llamada fase destalonadora, en la cual se extraen los anillos de acero que se encuentran en el interior de la llanta (en el talón o borde) y se recupera la lona. Una segunda fase, de trituración primaria, en la que las llantas se reducen a cortes de 50 x 50 mm aproximadamente, de acuerdo con las condiciones de la máquina. Finalmente, dos fases posteriores: una de pre- granulación en la que se obtienen granos de 10 a 8 mm y por último una fase de pulverización que ofrece un tamaño de polvo de malla 30 - 80. Las fases se seleccionan de

acuerdo con la necesidad y requerimientos del cliente. (Artículo Planta trituradores de llantas. Industrias Gercons Colombia- Productos plantas trituradoras de llantas)

Debido a que el material de interés es el caucho, es importante conocer la composición típica de las llantas de acuerdo con el destino para el cual se elaboran.

Existen variaciones en estas composiciones debido a las normas implementadas en cada país, así como a lo estipulado en cada empresa productora. Según el Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A, las composiciones típicas para las llantas se pueden observar en la tabla 5-1.

**Tabla 5-1. Composición de las llantas (Departamento ingeniería Mecánica F.I.U.B.A).**

<b>TIPO DE VEHÍCULO</b>			
<b>Componentes</b>	<b>Automóviles % en peso</b>	<b>Camiones % en peso</b>	<b>Función</b>
Caucho	48	45	Estructura/ deformación
Negro de humo	22	22	Mejora oxidación
Oxido de zinc	1,2	2,1	Catalizador
Material textil	5	0	Esqueleto estructural
Acero	15	25	Esqueleto estructural
Azufre	1	1	Vulcanización
Otros	12	0	Juventud

Fuente: Artículo Planta trituradores de llantas. Industrias Gercons Colombia- Productos plantas trituradoras de llantas

Las llantas son un producto de alto impacto en la contaminación, generan problemas de contaminación visual y son focos de infecciones en los acopios; además, sus compuestos son altamente contaminantes y grandes generadores de emisiones cancerígenas cuando son quemadas.

## **5.2.Marco Legal Del Medio Filtrante.**

### **5.2.1. Decreto 442 de 2015.**

Por medio del cual se crea el programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en el Distrito Capital, dirigido a todos los sectores que estén relacionados con la fabricación y venta de llantas, así como, a quienes desarrollen proyectos de construcción con asfalto modificado con GCR. Por su parte la secretaria de ambiente se ve obligada a coordinar las acciones para asegurar el cumplimiento del decreto y asegurar el seguimiento y el control de los proyectos que hagan parte del programa de aprovechamiento de llantas usadas. (DECRETO 442, 2015)

### **5.2.2. Resolución 6981 de diciembre 2011.**

Se dictan requisitos para el aprovechamiento de las llantas y neumáticos usados en el Distrito Capital. Determina que cualquier persona que ejecute una obra de infraestructura pública tiene como obligación hacer uso de materiales provenientes del aprovechamiento de llantas o neumáticos. (RESOLUCIÓN 6981, 2011)

### **5.2.3. Resolución 1457 de julio de 2010.**

Se direcciona el reciclaje de llantas fuera de uso. Prohíbe a las empresas y particulares el abandono o eliminación incontrolada de llantas usadas, ocupar el espacio público, depositarlas en rellenos sanitarios, enterrarlas, acumularlas a cielo abierto o incinerarlas. Exige la implementación de Sistemas de Recolección Selectiva de las llantas fuera de uso por parte de los productores e importadores de llantas en Colombia. (RESOLUCION 1457, 2010)

### **5.2.4. Ley 1333 de julio de 2009.**

En la que se dicta el procedimiento sancionatorio ambiental. Contiene el procedimiento sancionatorio ambiental en Colombia, para cualquier persona o empresa que atente contra el medio ambiente, los recursos naturales, el paisaje o la salud humana. Contempla sanciones como “multas diarias hasta por cinco mil (5.000) salarios mínimos mensuales legales vigentes; cierre temporal o definitivo del establecimiento, edificación o servicio; revocatoria de licencia ambiental; orden para restaurar el medio ambiente o los recursos afectados, entre otros”. (LEY 1333, 2009).

### **5.2.5. Ley 1259 de diciembre de 2008.**

En la que se encuentra el comparendo ambiental. Aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros. Impone sanciones a las personas y empresas que cometan faltas como: “Disponer residuos sólidos y escombros en sitios de uso público, arrojar basura y escombros a fuentes de aguas y bosques, Realizar quema de basura y/o escombros sin las debidas medidas de seguridad...” Estas sanciones pueden ser impuestas por la Policía Nacional. (LEY 1259, 2008)

## **5.3. Caracterización Del Grano De Caucho De Llanta Triturada.**

Cada año en Bogotá, según cifras oficiales, tres de cada diez llantas, de un reporte de 2.500.000 llantas que cumplen su vida útil al año, no se recogen debidamente y son desechadas en fuentes hídricas, enterradas en rellenos sanitarios, quemadas a cielo abierto o arrojadas a las calles; es decir, cada día se desechan cerca de 2.050 llantas, representando daños al medio ambiente y problemas de salud pública, ya que al quemar estas llantas se producen emisiones que provocan cáncer. Es evidente que el parque automotor en el país continúa creciendo y que cada día se desechan más llantas que pueden ser reutilizadas. Según reporta el IDU, con 250 llantas se puede producir una tonelada de grano de caucho de llanta reciclada, GCR. (GUEVARA, 2015)

En Colombia existen ya varias empresas dedicadas al reciclaje de llantas, entre ellas el Grupo Renova, empresa localizada en el sector de Cazucá, municipio de Soacha, dedicada a producir grano de caucho de llanta reciclada en diferentes especificaciones. El GCR se puede producir a partir de cualquier tipo de llanta de automóvil, sin importar su tamaño, adicionalmente se puede obtener en diferentes tamaños de grano. (GUEVARA, 2015)

El tamaño de las partículas de los diferentes agregados, arena, grava o agregado ligero GCR, tiene una afectación importante en la dosificación dentro del diseño del concreto. Mediante una evaluación granulométrica para seleccionar el material como un agregado fino o agregado grueso, se realizó la caracterización del material particulado de llanta reciclada, aplicando la NTC 77 Concreto, método de ensayo para el análisis por tamizado de agregados finos y gruesos (2007 segunda actualización), donde se describen los procesos necesarios para realizar un análisis granulométrico y sus propiedades físicas.

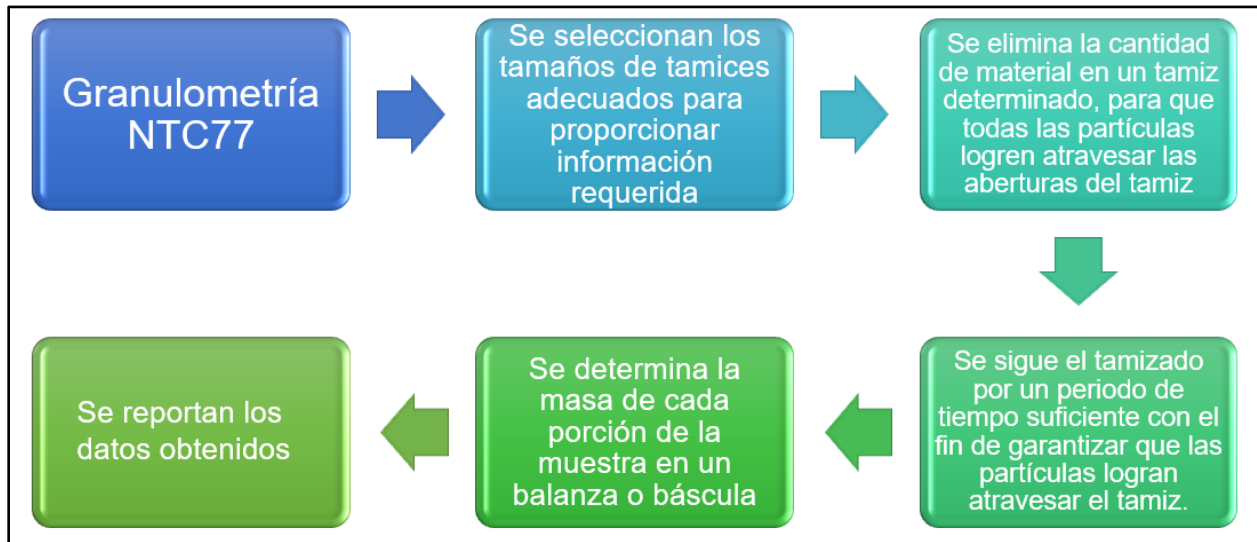
El ensayo de granulometría para el GCR se realizó en el laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Se utilizó un tamiz inicial de 3/8" y se finalizó con un tamiz número 200, como se puede observar en la ilustración 5-9. Adicionalmente, se utilizó, balanza y recipientes para separar y pesar el material retenido en cada una de las mallas. El procedimiento descrito por la norma se puede observar en la ilustración 5-9.

**Ilustración 5-9. Tamices utilizados en ensayo.**



Fuente: Propia

Ilustración 5-10. Diagrama de Flujo Granulometría NTC77.



Fuente: Propia

Los resultados se evidencian en la tabla 5-2 y en la gráfica 5.1, donde se pueden analizar los diferentes tamaños de partícula y los porcentajes que se encuentran de estos tamaños dentro de la muestra. De este análisis granulométrico se puede inferir que existe un rango de tamaños de partícula entre 0,16 mm y 0,075 mm, predominando con un 53,5% de masa retenida en el tamiz No. 30 que tiene un tamaño de partícula nominal de 0,16 mm.

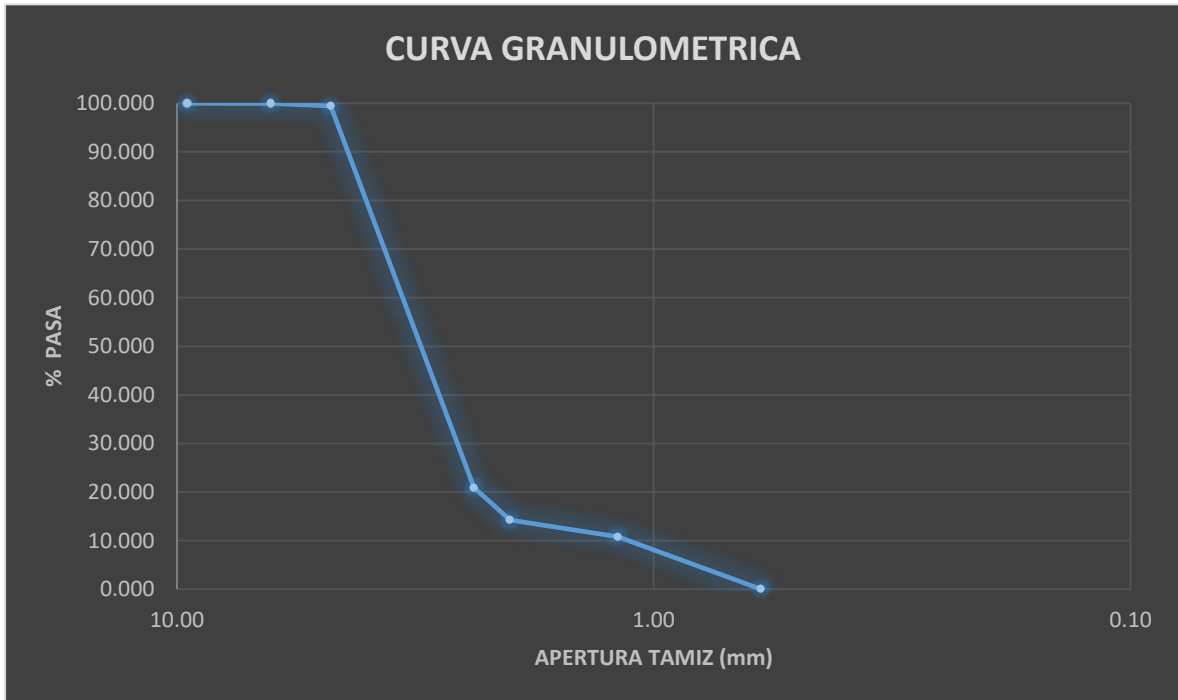
Tabla 5-2. granulometría grano Fino R-30.

No. Tamiz	Tamaño de partícula(mm)	Peso Retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	% Porcentaje Retenido acumulado	% Porcentaje Pasa
3/8	9,51	0,00	0,000	0,000	100,00
¼	6,35	0,300	0,031	0,031	99,969
4	4,76	5,300	0,548	0,579	99,421
8	2,38	759,800	78,565	79,144	20,856
10	2,00	64,300	6,649	85,793	14,207
16	1,19	33,100	3,423	89,215	10,785
30	0,60	104,300	10,785	100,00	0,000
<b>TOTAL</b>		<b>967,10</b>	<b>100,0</b>		

Fuente: Propia



Grafica 5-1. Granulometría Grano Fino R-3.



Fuente: Propia

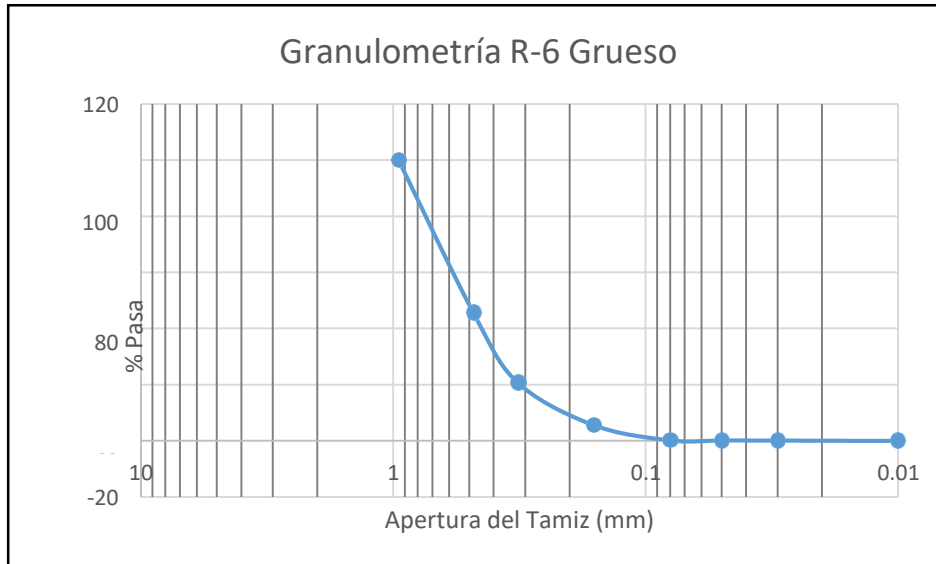
De igual manera, para grano grueso R-6 los resultados de la granulometría se reportan en la tabla 4-3 y gráfica 5-2 en la cual se puede observar que el rango para los tamaños de partícula de esta muestra va desde 0,48 mm hasta 0,075 mm, con predominio de 54% de retención de masa en el tamiz No. 4 con un tamaño nominal de partícula de 0,48 mm.

Tabla 5-3. Granulometría Grano Grueso R-60.

No. Tamiz	Tamaño de partícula(mm)	Masa (g)	Masa (%)	% Retenido acumulado	% Pasa
3/8	0,95	0	0,00	0,00	<b>100,00</b>
4	0,48	271,4	54,41	54,41	<b>45,59</b>
8	0,32	124,2	24,90	79,31	<b>20,69</b>
16	0,16	75,4	15,12	94,43	<b>5,57</b>
30	0,08	26,8	5,37	99,80	<b>0,20</b>
50	0,05	0,2	0,04	99,84	<b>0,16</b>
100	0,03	0,2	0,04	99,88	<b>0,12</b>
200	0,01	0,6	0,12	100,00	<b>0,00</b>
FONDOS		0	0,00	100,00	<b>0,00</b>
<b>TOTAL</b>		<b>498,80</b>	<b>100,0</b>	<b>727,67</b>	<b>172,33</b>

Fuente: Propia

**Grafica 5-2. Granulometría R-6 Grueso.**



Fuente: Propia

Con base en la información descrita anteriormente se puede concluir que el grano grueso y el grano fino se encuentran clasificados dentro del rango de las arenas puesto que las partículas se retienen entre el tamiz No. 4 con tamaño nominal de partícula de 0,48 mm y el tamiz No. 200 con tamaño nominal de partícula de 0,03 mm, es decir presentan un comportamiento como agregado fino.

La información técnica sobre la caracterización del material de caucho como agregado es escasa debido a que la mayoría de los proyectos están en desarrollo de la investigación y el uso comercial es aún limitado y por ende el conocimiento es restringido. Sin embargo, al realizar la caracterización del material se logra concluir que el GCR tiene un comportamiento como agregado ligero en cualquiera de las dos presentaciones de tipo de grano.

Como recomendación para trabajos y proyectos de investigación se sugiere profundizar en los métodos de caracterización del grano de caucho de llanta reciclada, así como también realizar una revisión sobre posibles pretratamientos al GCR para aumentar su propiedad de adherencia.

#### **5.4. Ensayo De Filtrabilidad.**

Para este experimento, se utilizó una probeta de aproximadamente 1 metro de longitud con diámetro interno 4,3 centímetros (Ilustración 5-11 a 5-18).

**Ilustración 5-11. Funcionamiento de la Probeta.**



Fuente: Propia

**Ilustración 5-12. Montaje sistema de Filtración.**



Fuente: Propia

Luego de que el sistema quedó instalado, se dispuso a realizar el llenado de la probeta con el material filtrante.

**Ilustración 5-13. Llenado de la probeta con Material Filtrante.**



Fuente: Propia

Se relleno hasta una altura de 64 cm, con el fin de tener visibilidad del proceso de filtración.

**Ilustración 5-14. Agua Utilizada en el ensayo.**



Fuente: Propia

**Ilustración 5-15. Llenado del Sistema con Agua.**



Fuente: Propia

**Ilustración 5-16. Sistema en Funcionamiento.**



Fuente: Propia

**Ilustración 5-17. Salida del agua Filtrante.**



Fuente: Propia

**Ilustración 5-18. Toma del tiempo de salida del agua filtrante.**



Fuente: Propia

De acuerdo con lo observado en el experimento, se puede indicar que la muestra de caucho molido fino presenta una gran capacidad de permeabilidad, su estructura denota que es un grano suelto y carece de una matriz cementante que una los granos de caucho molido. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede deducir que la estructura del caucho molido permite vacíos y espacios intersticiales.

La permeabilidad de la masa de caucho molido es importante en:

- La evaluación de la tasa de filtración para un prototipo de filtro percolador.
- La provisión de control de la tasa de filtración.

## 5.5.Pruebas De Operación

### 5.5.1. Datos de operación.

Tabla 5-4. Tanque de entrada.

TANQUE DE ENTRADA				
CARACTERÍSTICAS	VALOR	UNIDADES	VALOR	UNIDADES
Largo	40	cm	0,4	m
Ancho	40	cm	0,4	m
Alto	40	cm	0,4	m

Fuente: Propia

Tabla 5-5. Tanque de filtro.

TANQUE FILTRO				
CARACTERÍSTICAS	VALOR	UNIDADES	VALOR	UNIDADES
Largo	40	cm	0,4	m
Ancho	40	cm	0,4	m
Alto	170	cm	1,7	m

Fuente: Propia

Tabla 5-6. Tanque de salida.

TANQUE DE SALIDA				
CARACTERÍSTICAS	VALOR	UNIDADES	VALOR	UNIDADES
Largo	40	cm	0,4	m
Ancho	40	cm	0,4	m
Alto	40	cm	0,4	m

Fuente: Propia

### 5.5.2. Volumen de agua del tanque de entrada.

Tabla 5-7. Tanque de entrada.

TANQUE DE ENTRADA		
CARACTERÍSTICAS	VALOR	UNIDADES
Altura lámina de agua	0,43	m
Largo tanque	0,40	m
Ancho tanque	0,40	m

Volumen del agua	0,069	m <sup>3</sup>
<b>VOLUMEN DEL AGUA</b>	<b>69</b>	<b>L</b>

Fuente: Propia

### 5.5.3. Volumen del medio filtrante.

Tabla 5-8. Medio filtrante.

<b>MEDIO FILTRANTE</b>		
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDADES</b>
Altura medio filtrante	0,70	m
Largo tanque	0,40	m
Ancho tanque	0,40	m
Volumen del agua	0,112	m <sup>3</sup>
<b>VOLUMEN DEL AGUA</b>	<b>112</b>	<b>L</b>

Fuente: Propia

### 5.5.4. Porosidad del medio filtrante.

Tabla 5-9. Datos entrada.

<b>DATOS ENTRADA</b>	
Volumen material filtrante	112

Fuente: Propia

$$\text{Ecuación de porosidad } \emptyset = \frac{v\omega}{vm}$$

$$\text{POROSIDAD} = 62\%$$

### 5.6.Experiencia 1.

Tabla 5-10. Datos experiencia 1.

<b>DATOS</b>		
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDADES</b>
Cabeza hidráulica (h)	0,3	m
Volumen filtrado	0,048	m <sup>3</sup>
<b>VOLUMEN (Q)</b>	<b>48</b>	<b>L</b>

Fuente: Propia



Tabla 5-11. Tiempo de filtrado experiencia 1.

TIEMPO DE FILTRADO				
CARACTERÍSTICAS	VALOR	UNIDADES	VALOR	UNIDADES
Tiempo de filtrado	5,15	minutos	309	segundos

Fuente: Propia

- Tasa de Filtración

$$TASA DE FILTRACIÓN = \frac{CAUDAL * 1440 (TIEMPO DÍA EN MINUTOS)}{TIEMPO DE DESCARGA * ÁREA DEL FILTRO}$$

$$\underline{Tasa de filtración = 83.88 - Aprox. 84 \text{ m/d}}$$

## 5.7.Experiencia 2.

Tabla 5-12. Datos experiencia 2.

DATOS		
CARACTERÍSTICAS	VALOR	UNIDADES
Cabeza hidráulica (H)	0,6	m
Volumen (Q)	0,096	m <sup>3</sup>
<b>VOLUMEN (Q)</b>	<b>96</b>	<b>L</b>

Fuente: Propia

Tabla 5-13. tiempo de filtrado experiencia 2.

TIEMPO DE FILTRADO				
CARACTERÍSTICAS	VALOR	UNIDADES	VALOR	UNIDADES
Tiempo de filtrado	11,4	minutos	684	segundos

Fuente: Propia

- Tasa de Filtración

$$TASA = \frac{CAUDAL * 1440 (TIEMPO DÍA EN MINUTOS)}{TIEMPO DE DESCARGA * ÁREA DEL FILTRO}$$

$$\underline{Tasa de filtración = 75.78 - Aprox. 76 \text{ m/d}}$$

### 5.8.Experiencia 3.

Tabla 5-14. Datos entrada experiencia 3.

DATOS DE ENTRADA		
DESCRIPCION	VALOR	UNIDADES
Cabeza de carga (H)	0,9	m
Volumen (Q)	0,144	m <sup>3</sup>
<b>VOLUMEN (Q)</b>	<b>144</b>	<b>L</b>

Fuente: Propia

Tabla 5-15. Tiempo de filtrado experiencia 2.

TIEMPO DE FILTRADO				
CARACTERÍSTICAS	VALOR	UNIDADES	VALOR	UNIDADES
Tiempo de filtrado	17,08	minutos	1024.8	segundos

Fuente: Propia

- Tasa de Filtración

$$TASA = \frac{CAUDAL * 1440 (TIEMPO DÍA EN MINUTOS)}{TIEMPO DE DESCARGA * \text{ÁREA DEL FILTRO}}$$

$$\underline{Tasa de filtración = 75.87 - Aprox. 76 \text{ m/d}}$$

## 6. RESULTADOS.

- Se construyó un filtro piloto con dimensiones de alto 2,50 m, ancho 0.40 m y largo 0,40 m, compuesta por un ángulo de acero 1" y ¼" de ancho x ¼" de espesor, con una lámina de vidrio de grosor de 9mm templado, se incorporar el afluente mediante una bomba centrífuga ( $\emptyset$  *subcion*: 2", largo: 0,26 m, Potencia 370W, Voltaje 125V, amperaje 4,6 A,  $\emptyset$  descarga: 2", caudal máximo: 28l/m, altura máxima de elevación: 8m y tiempo de uso continuo: 20 minutos).
- El medio, grano de caucho granulado de llanta reciclada utilizada como medio futuro de crecimiento biológico, es un medio con partícula entre 0.48 hasta 0.75 mm con un ponderado de 54% de retención en el tamiz No. 4 con un tamaño nominal de partícula de 0,48 mm.
- Analizando los resultados de las experiencias 1, 2 y 3, se puede deducir que el filtro percolador piloto con el medio filtrante de caucho molido opera en el rango de tasa alta, 76 - 84 m/d, debido a su porosidad de 61%.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Es posible la reducción de tamaño del caucho a granulometrías adecuadas empleando un molino de cuchillas para utilizar el caucho como lecho de un filtro a escala piloto. El caucho sustituye la arena filtrante que se emplea en los filtros convencionales, pero se conserva el diseño usual de los filtros de arena.
- El caucho presenta un valor de permeabilidad alto, lo que significa que se trata de un medio semipermeable y en consecuencia proporciona una filtración moderada.
- Al analizar la porosidad de las partículas de caucho, se deduce que se trata de un medio de porosidad alta, facilitando el paso del efluente y disminuyendo la posibilidad de saturación del lecho.
- Del análisis estadístico de las variables de diseño se concluye que tanto la altura de lecho como la granulometría del mismo influyen separadamente en la eficiencia de la filtración, pero no se presentó influencia de la interacción entre ambos factores.
- Del análisis económico, se aprecia que, en comparación al costo de los accesorios para la implementación del filtro, la obtención de caucho molido no constituye un factor limitante y por lo tanto puede ser competitivo con filtros convencionales.
- El procedimiento empleado en el desarrollo experimental del presente trabajo es factible para todo tipo de neumático ya que todos contienen como materia prima principal el caucho. Para residuos de neumáticos que contengan una parte metálica, antes de emplear el caucho como medio de filtración, se debe emplear un sistema de separación magnética.
- Con base en este estudio se infiere que el uso de caucho como medio de filtración representa una buena alternativa para minimizar los desechos de neumáticos.

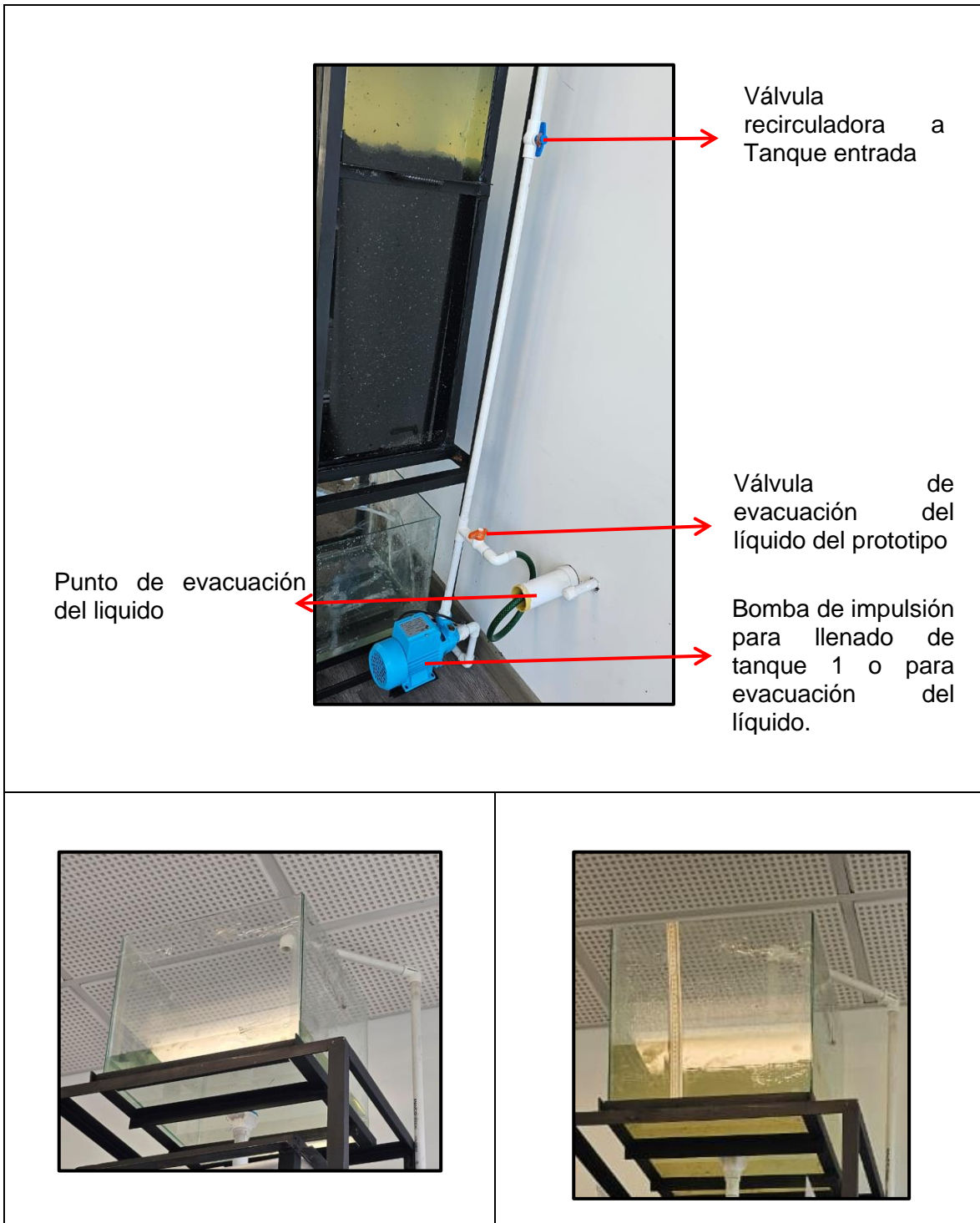
## ANEXO 1. PROCEDIMIENTO MANEJO FILTRO PERCOLADOR PILOTO



Fuente: Propia

- Llenar el tanque de salida con el agua que se desea filtrar, a una altura de aproximadamente 38 centímetros, con el fin de bombear el agua al tanque de entrada.
- El llenado de este tanque se debe realizar desde el tanque de salida el cual está ubicado en la parte inferior de la estructura, y por medio de la bomba se conduce el líquido filtrante al tanque de entrada que se encuentra en la parte superior de la estructura. Se debe tener presente las válvulas de control ya que la válvula de control color naranja tiene el

funcionamiento de evacuar el líquido del prototipo y la válvula de control de color azul es la que permite que el líquido recircule dentro del prototipo filtrante.



Fuente: Propia

- Para llevar el fluido del tanque de salida al tanque de entrada, se debe abrir la llave azul que se encuentra en el costado derecho de la estructura.
- Posteriormente, se enciende la motobomba que se encuentra en la parte inferior derecha, con el fin de que el fluido circule por una tubería que lo llevara al tanque de entrada.
- Luego de que el fluido se encuentre en el tanque de entrada, se debe abrir la llave que se encuentra en la parte inferior de este, con lo cual, se dejara pasar el agua del tanque de entrada al sistema de distribución.







Fuente: Propia

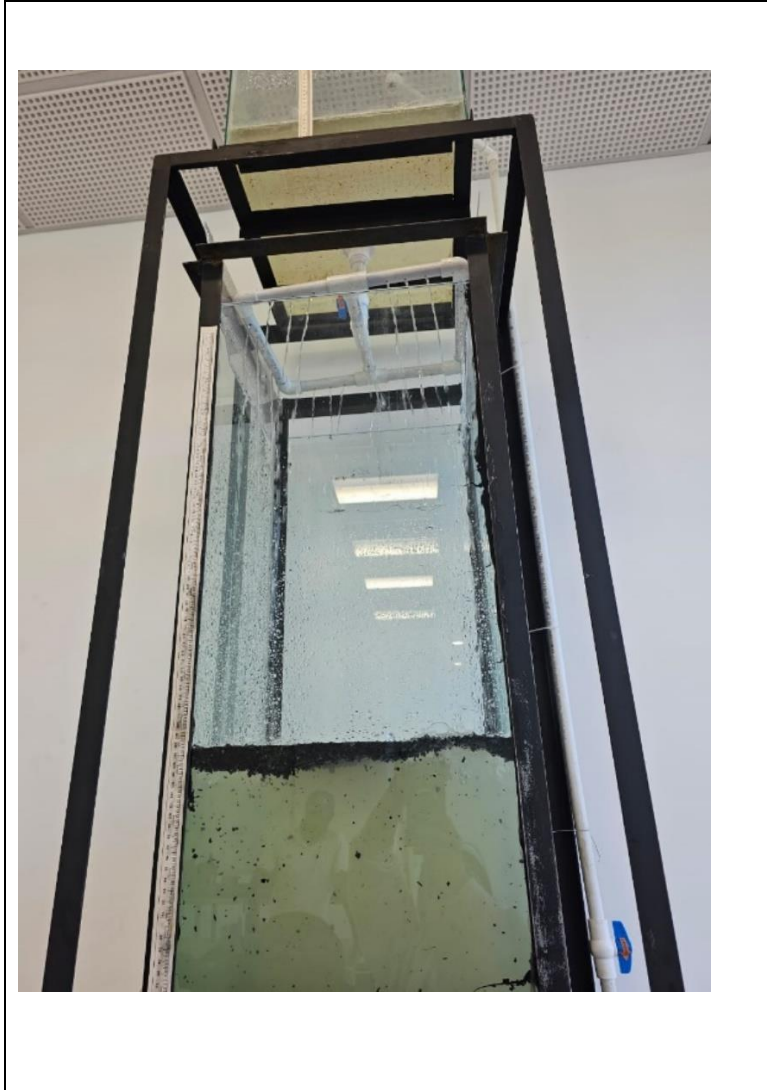
- Después de pasar por el sistema de distribución, el fluido llegara al filtro percolador, en donde empezara su proceso de filtración.





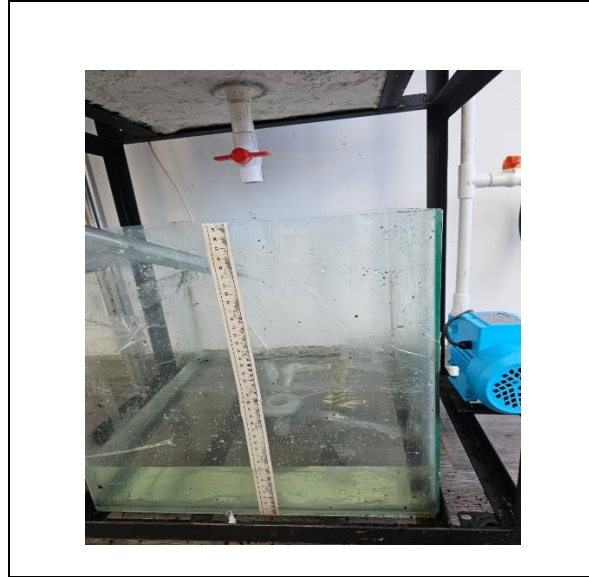
Fuente: Propia

- En la parte izquierda frontal del filtro, se encuentra una escala métrica, con la cual se observará cuanto material filtrante se tiene y cuanto fluido ingresa a este, de igual forma el tanque de entrada cuenta con una cintra métrica para tener el control de los litros del líquido entrante.
- Se determina cual será la cabeza de agua con la que se va a trabajar y con la escala métrica mencionada anteriormente, se procede a realizar el llenado del filtro con el fluido.



Fuente: Propia

- A continuación, se medirá el tiempo de salida del fluido filtrado, atendiendo que para esto se debe abrir la llave que se encuentra en la parte inferior del filtro.



Fuente: Propia

- Si el agua utilizada para llenar el filtro y alcanzar la cabeza de agua rebasa la capacidad del tanque de salida, se debe cerrar la llave azul que permite el paso del fluido del tanque de salida al tanque de entrada y se debe abrir la llave naranja que se encuentra al lado derecho de la estructura, para que este exceso sea evacuado hacia el desagüe.
- Por último, al terminar el ensayo, se debe esperar a que el fluido filtrado este en el tanque de salida, para poder evacuarlo por medio de la motobomba y la llave naranja mencionada anteriormente.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTH ANTHONY RODRIGUEZ TUESTA. (2014). *ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DE UN FILTRO SUMERGIDO Y UN FILTRO PERCOLADOR EN EL TRATAMIENTO SECUNDARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS, MOYOBAMBA, 2014*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTIN-TARAPOTO.

DECRETO 442 , Pub. L. No. DECRETO 449 (2015).

ANDER JARAMILLO MONDRAGON, & JESUS JHOEL PAREDES TOGAS. (2019). *EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE DOS FILTROS PERCOLADORES EN SERIE PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS EN LA URBANIZACION SANTA LUCIA - MORELOS, 2018* [ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL]. UNIVERSIDAD PERUANA UNION.

ANDRES EDUARDO PRIETO NUÑEZ. (2019). *IMPLEMENTACION Y EVALUACION DE DOS FILTROS DE CASCARILLA DE ARROZ Y LUFFA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE ESCORRENTIA DE TECHO DEL EDIFICIO I DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO*. ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA.

ANGELONE SILVIA, GARIBAY MARIA TERESA, & CAUHAPE CASAUX MARINA. (2006). *PERMEABILIDAD DE SUELOS*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO.

CAMARGO CALDERON DIANA CAROLINA. (2015). *DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA OBTENCION DE LA PERMEABILIDAD DE SUELOS CON CAMARA HORIZONTAL, ORIENTADO A PRUEBAS DE LABORATORIO*. UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA.

CAMILO ANDRES CARVAJAL FUENTES. (2020). *MODELO PARA COMPARAR DISEÑOS DE FILTRO PERCOLADOR*. ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA .

CARLOS GUEVARA. (2015). CADA DÍA MAS DE 2050 LLANTAS TERMINAN INVADIENDO EL ESPACIO PUBLICO . *EL TIEMPO*.

CARLOS MENDEZ GUTIERREZ. (2018, septiembre). LOS PROCESOS BIOLOGICOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DESDE UNA VISION NO CONVENCIONAL . *INGENIERIA HIDRAULICA Y AMBIENTAL*, 97–107.

CESAR ARTURO ORMAZA CARDENAS, & MARIA BELEN ORTIZ ORTIZ. (2020). *ELABORACION DEL MODELO FISICO Y GUIA METODOLOGICA PARA LA PRACTICA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE UN FILTRO PERCOLADOR DE LA ASIGNATURA DE HIDROSANITARIA DE LA UNIVERSIDAD DEL AZUAY*. UNIVERSIDAD DEL AZUAY.

LEY 1259, Pub. L. No. 1259 (2008).

LEY 1333, Pub. L. No. 1333 (2009).

LEY 1280, Pub. L. No. 1280 (2010).

ACUERDO 257, Pub. L. No. 257 (2011).

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL CONSERVATION. (2015). *DESIGN STANDARDS FOR WASTEWATER TREATMENT WORKS IN THE LAKE GEORGE BASIN*.

ESPAÑA LEAL L. M., QUINTERO DUQUE D. F., & REYES AGUIRRE S. (2017). *Sistemas Aerobios Adheridos: Filtros Percoladores*. UNIVERSIDAD DEL VALLE .

HAZEN AND SAWYER. (2011). *MEMORIA TECNICA DE LA SELECCION JUSTIFICADA DE TRES SISTEMAS DE TRATAMIENTO VIABLES* (pp. 1–66). BOGOTÁ.

HEBER BRANDON DIAZ RAMIREZ, & EDUAR ALEXIS MARTINEZ GIRALDO. (2018). *DISEÑO Y MEDICION DE LAS CARACTERISTICAS DE ESTRUCTURA Y OPERACION PARA LOS PROTOTIPOS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL VERTICAL Y FILTRO PERCOLADOR PARA REMOCION DE MATERIA ORGANICA*. UNIVERSIDAD CATOLICA DE MANIZALES .

HERNANDEZ CANALES J. C. (2013). DISEÑO DE UN MODELO EXPERIMENTAL DE FILTRO PERCOLADOR UTILIZANDO ESTOPA DE COCO COMO MEDIO FILTRANTE, PARA LA REDUCCION DE NITROGENO Y FOSFORO TOTAL DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS PROCEDENTES DE LA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO AURORA II “ING. ARTURO PAZOS SOSA”. *REVISTA CIENTIFICA*.

IMRAN ALI, ZAHID M. KHAN, MUHAMMED SULTAN, MUHAMMED H. MAHMOOD, HAFIZ U. FARID, MOSHIN ALI, & ABDUL NASIR. (2016). EXPERIMENTAL STUDY ON MAIZE COB TRICKLING FILTER-BASED WASTEWATER TREATMENT SYSTEM: DESIGN, DEVELOPMENT, AND PERFORMANCE EVALUATION . *POL. J. ENVIRON. STUD.*, 25(6), 2265–2273.

INDUSTRIAS GERCONS COLOMBIA. (2016, marzo 12). *PLANTAS TRITURADORES DE LLANTAS*.

JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS. (2013). *TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEORIA Y PRINCIPIOS DE DISEÑO* (ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA, Ed.).

JESSIE PRISCILA RIOS NUÑEZ. (2016). *EVALUACION Y DIAGNOSTICO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES USANDO SISTEMAS NATURALES Y SUS IMPACTOS AMBIENTALES: CASE DE ESTUDIO TENANGO OCOSINGO, CHIAPAS*. UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CHIAPAS .

JIMENEZ STEER IVAN, & RODRIGUEZ DOMINGUEZ LUIS. (2008). *DIAGNOSTICO DE LA INFILTRACION Y PERMEABILIDAD EN LOS SUELOS DE LA ZONA DE RECARGA DEL ACUIFERO MORROA EN EL AREA DE SINCELEJO, COROZAL Y MORROA*. UNIVERSIDAD DE SUCRE.

JIMMY OBDULIO CACERES. (2010). *IMPLEMENTACION DE MATERIAL DE DESECHO PET COMO ELEMENTO FILTRANTE EN FILTROS BIOLOGICOS*. UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.

JOSE MARIANO RIGOBERTO MONTEL GONZALEZ. (2001). *LOS FILTROS BIOLOGICOS AEROBIOS COMO UNA ALTERNATIVA PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA DE LAS LAGUNAS DE OXIDACION* . UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON .

RESOLUCION 1457, Pub. L. No. 1457 (2010).

RESOLUCION NUMERO 0330, Pub. L. No. 0330, MINVIVIENDA (2017).

NAVARRO LOZADA FABIO ARNULFO, & MEJIA VITTA JAIME ANDRES. (2012). *COMPARACION ENTRE LA PERMEABILIDAD EN CAMPO Y PERMEABILIDAD EN LABORATORIO DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS*. UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA .

R.S. RAMALHO. (s/f). *FILTROS PERCOLADORES*.

RYO KONDA, NAOYUKI KISHIMOTO, JOJI HINOBAYASHI, & TSUTOMU HASHIMOTO. (2016). EFFECTS OF RECIRCULATION RATE OF NITRIFIED LIQUIR AND TEMPERATURE ON BIOLOGICAL NITRIFICATION-DENITRIFICATION PROCESS USING A TRICKING FILTER. *WATER AND ENVIRONMENTAL JOURNAL*, 1–7.

RESOLUCIÓN 6981, Pub. L. No. 6981 (2011).

MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO, DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: PROCESOS DE OXIDACION BIOQUIMICA CON BIOMASA FIJA, Pub. L. No. 34.

MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO, DATOS BASICOS PARA PROYECTOS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO, Pub. L. No. 4.

SOTERO MEDINA CASTRO. (1996). *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DIDACTICO DE UN FILTRO PERCOLADOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES* . UNIVERSIDAD VERACRUZANA.

TORRES OSPINA ANDRES HERMES. (2014). *VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL ASFALTO MODIFICADO CON GRANO DE LLANTA RECICLADO*. ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAVITO.

YENNY TATIANA ROMERO LADINO, LUISA FERNANDA ROJAS ORDOÑEZ, & JUAN PABLO RODRIGUEZ MIRANDA. (2016, julio). *EVALUACION DE UN FILTRO PERCOLADOR SIN RECIRCULACION CON MEDIO DE SOPORTE EN PVC PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES COMBINADAS (DOMESTICAS Y PECUARIAS)*. 39–48.

