



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA DE
CONSTRUCCIONES**

**Elaboración del modelo físico y la guía metodológica de una
columna de filtración de arena, antracita y carbón activado
para la asignatura de Hidrosanitaria de la Universidad del
Azuay**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERA CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE
CONSTRUCCIONES**

Autoras:

**DAYANA ELIZABETH CALLE PADILLA
MAYRA DEL CARMEN ROMERO ZAMBRANO**

Director:

JOSUÉ BERNARDO LARRIVA VÁSQUEZ

CUENCA, ECUADOR

2019

DEDICATORIA

A Dios por ser un guía en mi vida y brindarme fortaleza en todo momento.

A mis padres, Blanca y Augusto, por todo el amor que me brindan, por cada uno de los sacrificios que han realizado para que pueda cumplir esta meta y por guiarme e incentivar a no darme por vencida por más difícil que sea el camino.

A mis hermanos Angélica, Verónica y Carlos, a mis sobrinos y cuñado porque son una parte importante en mi vida, me han llenado de muchos momentos de felicidad y han estado siempre para mí.

De una manera especial a mi tío, Edwin Padilla, por brindarme su apoyo desde el inicio de esta etapa.

Dayana

A Dios, quien supo guiarme por el buen camino, por permitirme llegar a este momento tan especial, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres por su apoyo incondicional, sus palabras de aliento, amor y la confianza depositada en mí. Me han inculcado todo lo que soy como persona mis valores y principios, lo que me ha permitido llenarme de coraje y perseverancia para conseguir cumplir mis sueños.

A mis hermanos por su cariño y apoyo, durante todo este proceso, por estar siempre presentes.

Mayra

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradecemos a nuestros padres por ser el principal apoyo durante cada etapa de nuestras vidas porque nos han impulsado a no rendirnos y luchar siempre por nuestros sueños.

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad del Azuay por permitir formarnos como profesionales.

A nuestro director de tesis, Ing. Josué Bernardo Larriva Vásquez, por la dedicación y apoyo brindando durante la elaboración de este trabajo, quien con sus conocimientos ha logrado que podamos culminarlo con éxito.

A los miembros del tribunal designado, Ing. Belén Arévalo e Ing. César Arévalo, por brindarnos su tiempo para la revisión y corrección del presente proyecto.

También nos gustaría agradecer a todos los profesores que nos han acompañado durante toda la carrera porque cada uno de ellos han aportado con un granito de arena a nuestra formación profesional.

Finalmente, a todos nuestros familiares y amigos quienes siempre han estado cuando los hemos necesitado, por su gran apoyo, paciencia y comprensión porque han contribuido positivamente para llevar a cabo este proyecto.

A todos, muchas gracias.

Dayana y Mayra

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE ECUACIONES	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN	1
PROBLEMÁTICA	2
JUSTIFICACIÓN	2
OBJETIVOS	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
1. CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	4
1.1. Filtración	4
1.1.1. Definición	4
1.1.2. Clasificación de los filtros.....	5
1.1.3. Mecanismos de filtración	6
1.1.4. Variables del proceso de filtración.....	9
1.1.5. Descripción de los elementos básicos de un filtro	10
1.1.6. Métodos usados para controlar la tasa de filtración	15
1.2. Sistemas de filtración.....	17
1.2.1. Filtración con arena.....	17
1.2.2. Filtración con antracita.....	18
1.2.3. Filtración con carbón activado.....	18
1.3. Características físicas del agua	19
1.3.1. Turbiedad	19
1.3.2. Requisitos físicos	20
2. CAPÍTULO II: DISEÑO DEL ENSAYO DE LABORATORIO.....	21
2.1. Determinación de variables dependientes e independientes	21
2.2. Diseño geométrico del modelo	21
2.2.1. Dimensionamiento	21
2.2.2. Cálculo	28
2.3. Construcción	29

2.3.1. Modelo físico de prueba.....	29
2.3.2. Modelo físico definitivo.....	32
2.4. Pruebas.....	59
2.5. Validación de datos.....	60
3. CAPÍTULO III. ELABORACIÓN DE LA GUÍA METODOLÓGICA.....	62
Introducción.....	62
3.1. Ensayo en el modelo físico de columnas de filtración.....	62
3.1.1. Equipo y herramientas.....	62
3.1.2. Metodología.....	63
3.2. Guía metodológica para la realización del ensayo de laboratorio en el modelo físico de columnas de filtración - Sistema individual.....	68
3.2.1. Introducción.....	68
3.2.2. Objetivos del ensayo de laboratorio.....	68
3.2.3. Descripción.....	68
3.2.4. Equipo y herramientas.....	68
3.2.5. Fórmulas.....	70
3.2.6. Esquema del modelo físico definitivo.....	71
3.2.7. Metodología.....	73
3.3. Guía metodológica para la realización del ensayo de laboratorio en el modelo físico de columnas de filtración - Sistema combinado.....	84
3.3.1. Introducción.....	84
3.3.2. Objetivos del ensayo de laboratorio.....	84
3.3.3. Descripción.....	84
3.3.4. Equipo y herramientas.....	84
3.3.5. Fórmulas.....	86
3.3.6. Esquema del modelo físico.....	87
3.3.7. Metodología.....	89
3.4. Mantenimiento del modelo físico.....	99
3.4.1. Mantenimiento rutinario.....	99
3.4.2. Mantenimiento periódico.....	100
3.4.3. Recomendaciones para el lavado de los materiales.....	102
CONCLUSIONES.....	104
RECOMENDACIONES.....	105
BIBLIOGRAFÍA.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema de un filtro abierto a gravedad	4
Figura 1.2 Interacción de los diferentes mecanismos de filtración por transporte de partículas	7
Figura 1.3 Mecanismo de intercepción	8
Figura 1.4 Mecanismo de sedimentación.....	8
Figura 1.5 Mecanismo de difusión.....	8
Figura 1.6. Grava de soporte para filtros de agua	11
Figura 1.7 Esquema de un filtro lento con control en la entrada	14
Figura 1.8 Esquema de un filtro lento con control en la salida.....	15
Figura 1.9 Esquema de un filtro de tasa constante (con aforador y controlador)	15
Figura 1.10 Esquema de un filtro de nivel constante (control del afluente, sensor de nivel y controlador).....	16
Figura 1.11 Esquema de filtración con afluente igualmente distribuido.....	16
Figura 1.12 Arena para filtros de agua.....	17
Figura 1.13 Antracita para filtros de agua.....	18
Figura 1.14 Carbón activado para filtros de agua	19
Figura 2.1 Esquema de las principales partes del modelo físico (vista frontal).....	22
Figura 2.2 Dimensiones del tanque de almacenamiento de agua turbia	24
Figura 2.3 Dimensiones de los lechos filtrantes. a) Arena, b) Antracita y, c) Carbón activado	26
Figura 2.4 Dimensiones del tanque de falso fondo.....	27
Figura 2.5 Modelo físico de prueba	31
Figura 2.6 Materiales dentro del modelo físico de prueba. a) Capa de grava y, b) Capa de arena	31
Figura 2.7 Modelo físico definitivo con sus principales partes	33
Figura 2.8 Tanques de almacenamiento de agua turbia del modelo físico definitivo.....	34
Figura 2.9 Plancha de vidrio de 4 mm (0.3 m x 0.3 m)	34
Figura 2.10 Plancha de vidrio de 4 mm (0.3 m x 0.2 m)	35
Figura 2.11 Silicón para vidrios.....	35
Figura 2.12 Broca para vidrio	35
Figura 2.13 Máquina perforadora de vidrio	36
Figura 2.14 Base del tanque de almacenamiento de agua turbia	36
Figura 2.15 Laterales del tanque de almacenamiento de agua turbia. a) Lateral posterior y b) Lateral frontal, izquierdo y derecho.....	37
Figura 2.16 Tanque de almacenamiento de agua turbia con sus respectivas perforaciones ..	37

Figura 2.17 Sello para medir el volumen en el tanque de almacenamiento de agua turbia ...	38
Figura 2.18 Columnas de filtración del modelo físico definitivo	39
Figura 2.19 Plancha de vidrio de 6 mm (0.3 m x 0.3 m)	39
Figura 2.20 Plancha de vidrio de 4 mm (0.3 m x 0.9 m)	40
Figura 2.21 Plancha de vidrio de 4 mm (0.15 m x 0.3 m)	41
Figura 2.22 Laterales de la columna de filtración. a) Lateral frontal, b) Lateral posterior y, c) Lateral izquierdo y derecho.....	42
Figura 2.23 Base de la columna de filtración.....	42
Figura 2.24 Columna de filtración con sus respectivas perforaciones	43
Figura 2.25 Sello para medir las diferentes alturas en la columna de filtración	43
Figura 2.26 Tanques de falso fondo del modelo físico definitivo.....	44
Figura 2.27 Plancha de vidrio de 4 mm (0.3 m x 0.17 m)	45
Figura 2.28 Base del tanque de falso fondo	45
Figura 2.29 Laterales del tanque de falso fondo. a) Lateral frontal y b) Lateral posterior, izquierdo y derecho.....	46
Figura 2.30 Tanque de falso fondo con sus respectivas perforaciones	46
Figura 2.31 Sello para medir el volumen de agua tratada en el tanque de falso fondo.....	47
Figura 2.32 Sistema de circulación del modelo físico definitivo	48
Figura 2.33 Bomba de agua centrífuga eléctrica de 0.5 HP	48
Figura 2.34 Tee de PVC plegable (1/2'').....	48
Figura 2.35 Adaptador de tanque PVC (1/2'').....	49
Figura 2.36 Válvula de esfera PVC (1/2'')	49
Figura 2.37 Codo roscable PVC (1/2'')	49
Figura 2.38 Adaptador macho PVC (1/2'').....	49
Figura 2.39 Nudo PVC (1/2'')	50
Figura 2.40 Tubería PVC (1/2'').....	50
Figura 2.41 Tapón hembra PVC plegable (1/2'')	50
Figura 2.42 Codo plegable PVC (1/2'').....	50
Figura 2.43 Neplo roscable PVC (1/2'').....	51
Figura 2.44 Sifón recto PVC (1/2'')	51
Figura 2.45 Bushing roscable PVC (1'' a 1/2'')	51
Figura 2.46 Cruz plegable PVC (1/2'').....	51
Figura 2.47 Unión plegable PVC (1/2'')	52
Figura 2.48 Pega para tubos CPVC Arrow	52
Figura 2.49 Cinta de teflón	52
Figura 2.50 Sellador IPS	52

Figura 2.51 Silicón ABRO.....	53
Figura 2.52 Sistema de circulación del modelo físico definitivo.....	53
Figura 2.53 Tubería tipo flauta para distribución del agua turbia.....	54
Figura 2.54 Estructura metálica del modelo físico definitivo	54
Figura 2.55 Tubo cuadrado de aluminio (4 cm x 4 cm).....	55
Figura 2.56 Tubo de aluminio (7 cm x 4 cm)	55
Figura 2.57 Plancha de madera (27 cm x 34 cm).....	55
Figura 2.58 Rueda con seguro.....	56
Figura 2.59 Rueda sin seguro.....	56
Figura 2.60 Dimensiones de la estructura metálica del modelo físico definitivo (vista frontal)	57
Figura 2.61 Dimensiones de la estructura metálica del modelo físico definitivo (vista lateral)	58
Figura 2.62 Distribución de las ruedas en la base de la estructura metálica	58
Figura 3.1 Modelo físico.....	69
Figura 3.2 Esquema Modelo físico (vista frontal)	71
Figura 3.3 Esquema Modelo físico (vista posterior).....	72
Figura 3.4 Esquema Modelo físico (vista lateral).....	73
Figura 3.5 Caolín	74
Figura 3.6 Muestra de agua turbia sintética	74
Figura 3.7 Muestra de agua turbia sintética a la entrada del filtro	75
Figura 3.8 Válvulas de esfera. a) Válvula de esfera abierta y b) Válvula de esfera cerrada..	75
Figura 3.9 Tanque de almacenamiento de agua turbia lleno hasta el nivel correspondiente a 10 Lt.....	76
Figura 3.10 Válvula de esfera A en la posición 2	76
Figura 3.11 Nivel de agua que se forma sobre la capa filtrante	77
Figura 3.12 Muestra de agua turbia sintética a la salida del filtro de arena	78
Figura 3.13 Válvula de esfera B en la posición 2	78
Figura 3.14 Muestra de agua turbia sintética a la salida del filtro de antracita.....	79
Figura 3.15 Válvula de esfera C en la posición 2	80
Figura 3.16 Muestra de agua turbia sintética a la salida del filtro de carbón activado	80
Figura 3.17 Colocación de agua en la bomba	93
Figura 3.18 Funcionamiento filtro arena – antracita.....	93
Figura 3.19 Funcionamiento filtro antracita – carbón activado	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Límites permisibles de las características físicas	20
Tabla 2.1 Criterios de diseño	23
Tabla 2.2 Dimensionamiento del tanque de almacenamiento de agua turbia, de la caja del filtro y del tanque de falso fondo	60
Tabla 2.3 Especificaciones del lecho filtrante y del drenaje	61
Tabla 3.1 Caudales de ingreso a los filtros obtenidos.....	65
Tabla 3.2 Tasas de filtración obtenidas.....	65
Tabla 3.3 Caudales filtrados obtenidos	66
Tabla 3.4 Resultados de turbiedad	67
Tabla 3.5 Valores de caudal de ingreso en el filtro.....	81
Tabla 3.6 Valores de tasa de filtración en el filtro	81
Tabla 3.7 Valores de caudal filtrado	81
Tabla 3.8 Valores de turbiedad a la entrada y salida del filtro.....	82
Tabla 3.9 Valores de turbiedad a la entrada y salida del filtro (sistema combinado)	97

ÍNDICE DE ECUACIONES

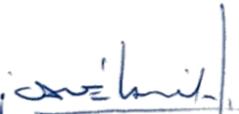
Ecuación 1. Área del tanque de almacenamiento de agua turbia	23
Ecuación 2. Volumen del tanque de almacenamiento de agua turbia.....	24
Ecuación 3. Área de la columna de filtración	25
Ecuación 4. Área del lecho filtrante.....	25
Ecuación 5. Volumen del lecho filtrante.....	26
Ecuación 6. Volumen del tanque de falso fondo	27
Ecuación 7. Caudal que ingresa al filtro	28
Ecuación 8. Velocidad de filtración.....	28
Ecuación 9. Volumen de filtrado	29
Ecuación 10. Caudal filtrado.....	29
Ecuación 11. Eficiencia de remoción de la turbiedad	67

**ELABORACIÓN DEL MODELO FÍSICO Y LA GUÍA METODOLÓGICA
DE UNA COLUMNA DE FILTRACIÓN DE ARENA, ANTRACITA Y
CARBÓN ACTIVADO PARA LA ASIGNATURA DE HIDROSANITARIA DE
LA UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza el modelo físico y la guía metodológica para la práctica de columnas de filtración de la asignatura de Hidrosanitaria. En el documento se detalla el fundamento teórico, cálculos, proceso de construcción y validación de datos del modelo físico que será utilizado para la práctica de laboratorio. Finalmente, se desarrolla la guía metodológica a utilizarse para el desarrollo de la práctica, en la misma se especifican los pasos a seguir y los resultados a obtenerse, a partir de los cuales, los estudiantes van a adquirir las destrezas necesarias para la comprensión del funcionamiento de un sistema de filtración.

Palabras clave: sanitaria, columnas de filtración, modelo físico, guías metodológicas.



Ing. José Bernardo Larriva Vásquez

Director del trabajo de titulación



Ing. José Fernando Vázquez Calero

Director de la Escuela



Dayana Elizabeth Calle Padilla



Mayra del Carmen Romero Zambrano

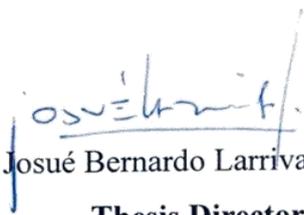
Autoras

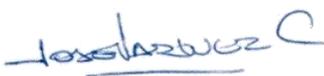
**DEVELOPMENT OF THE PHYSICAL MODEL AND THE
METHODOLOGICAL GUIDE OF AN ARENA, ANTHRACITE AND
ACTIVATED CARBON FILTRATION COLUMN FOR THE
HYDROSANITARY SUBJECT OF THE UNIVERSITY OF AZUAY**

ABSTRACT

In this work, the physical model and the methodological guide were developed for the practice of filtration columns of the Hydrosanitary subject. The document details the theoretical basis, calculations, construction process and data validation of the physical model that will be used for this laboratory practice. Finally, the methodological guide to be used for the development of the practice is presented. It specifies the steps to be followed and the expected results. From these, students will acquire the necessary skills to understand the operation of a filtration system.

Keywords: sanitary, filtration columns, physical model, methodological guides.


Ing. Josué Bernardo Larriva Vásquez
Thesis Director


Ing. José Fernando Vázquez Calero
Faculty Director


Dayana Elizabeth Calle Padilla


Mayra del Carmen Romero Zambrano

Authors


UNIVERSIDAD DEL
AZUAY
Dpto. Idiomas


Translated by
Ing. Paúl Arpi

Calle Padilla Dayana Elizabeth

Romero Zambrano Mayra del Carmen

Trabajo de titulación

Ing. Josué Bernardo Larriva Vásquez, M. Sc.

Octubre, 2019

**ELABORACIÓN DEL MODELO FÍSICO Y LA GUÍA METODOLÓGICA
DE UNA COLUMNA DE FILTRACIÓN DE ARENA, ANTRACITA Y
CARBÓN ACTIVADO PARA LA ASIGNATURA DE HIDROSANITARIA DE
LA UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

INTRODUCCIÓN

La hidrosanitaria es la rama que se encarga de la captación, conducción, tratamiento y distribución del agua. Existen varios mecanismos para el tratamiento de aguas crudas, su implementación depende del lugar y la cantidad de residuos que serán tratados.

La filtración a más de ser uno de los procesos de purificación del agua más antiguos que han sido usados por la humanidad; es también, una alternativa de desinfección muy simple y efectiva, puesto que actúa del mismo modo en que lo hace la naturaleza cuando filtra el agua de la lluvia o escorrentías superficiales. Uno de los principios básicos del proceso de filtración es que remueve microorganismos y material particulado. La ventaja de este proceso ante otras alternativas de desinfección se debe a que la filtración en ciertos casos no requiere el uso de algún químico para lograr la desinfección del agua, energía, ni mano de obra calificada que controle el proceso; convirtiéndole en una de las alternativas más económicas para el proceso de desinfección del agua (Jarrín Pérez, Ramos Marcial, & Matamoros, 2009, pág. 3).

En el presente trabajo de titulación se muestra el estudio y diseño de tres columnas filtrantes, se explica detalladamente el cálculo, dimensionamiento y la construcción del modelo físico que muestra todo el proceso de operación de los sistemas de filtración.

Por último, se propone una guía metodológica para que otros estudiantes puedan hacer uso del modelo físico ya construido, con el objetivo que refuercen los conocimientos

adquiridos al largo del curso relacionado con este campo por medio de una práctica de laboratorio.

PROBLEMÁTICA

La Universidad del Azuay, respectivamente, la Escuela de Ingeniería Civil requiere que sus laboratorios tengan los equipos necesarios para las distintas áreas de estudio, en este caso la de Hidrosanitaria.

Actualmente, no se cuenta con métodos didácticos como un equipo que permita entender y observar el proceso de filtración y mucho menos manuales o guías para la realización de una práctica de laboratorio en este tema.

La hidrosanitaria es una disciplina donde no basta con tener solamente conocimientos teóricos, sino también que deben ser combinados con la parte práctica para así poder mejorar el entendimiento de la misma, de ahí surge la necesidad de elaborar un modelo físico de columnas de filtración conformado por materiales como arena, antracita y carbón activado con su respectiva guía metodológica.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la escuela de Ingeniería Civil no cuenta con un modelo didáctico que ayude a un mejor entendimiento de los estudiantes a cerca de la teoría de los sistemas de filtración, motivo por el cual, se aspira dotar al laboratorio de un modelo físico conformado por tres columnas filtrantes con su respectiva guía metodológica para la realización de la práctica de laboratorio.

El prototipo no sólo permitirá observar todos los elementos que componen el sistema sino también apreciar su proceso, es decir, como entra el agua por la parte superior y a través de su paso por las capas filtrantes, se obtiene al final un agua con menos sólidos en suspensión. De igual manera, la guía metodológica detalla paso a paso el proceso a seguir lo que permitirá simplificar la práctica de laboratorio y garantizar su ejecución de manera más eficiente.

OBJETIVOS

Objetivo general

Elaboración del modelo físico de una columna de filtración de arena, antracita y carbón activado y la guía metodológica para su uso en el laboratorio utilizando agua turbia sintética.

Objetivos específicos

- Definir conceptos básicos sobre sistemas de filtración.
- Construir un modelo físico que indique el funcionamiento del sistema de filtración propuesto.
- Elaborar una guía metodológica de la práctica de laboratorio.

1. CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Filtración

1.1.1. Definición

La filtración del agua es un proceso físico - químico que separa los sólidos suspendidos y la materia coloidal de la fase líquida por medio de materiales porosos (Jiménez Cisneros, 2001, pág. 217).

Los sistemas de filtración tratan el agua pasándola a través de lechos de materiales granulares que retiran y retienen los contaminantes del agua como se puede observar en la Figura 1.1.

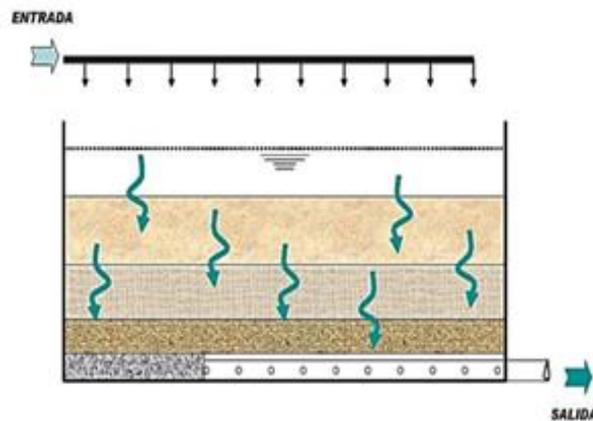


Figura 1.1 Esquema de un filtro abierto a gravedad

Fuente: (Rocha Castro, 2010)

El agua cruda que ingresa al filtro se mantiene de tres a doce horas en el lecho filtrante, dependiendo de las velocidades de filtración adoptadas. Durante ese tiempo las partículas que son más pesadas se encuentran en suspensión y se sedimentan, mientras que, las partículas más ligeras se aglutinan llegando a removerse más fácilmente (Canepa & Pérez, 1992).

La superficie del lecho filtrante está formada por una capa de material orgánico; conocida como piel de filtro, por medio de la cual pasa el agua antes de llegar al lecho filtrante. La capa de piel de filtro atrapa, digiere y degrada la materia orgánica que se encuentra en el agua (Huisman, 1974).

Los filtros utilizados convencionalmente eliminan en un 95% la mayoría de los sólidos suspendidos, sin embargo, gran parte de la eficiencia de este proceso mecánico de

filtrado está dada en función del tipo de material que se utilice (Díaz Restrepo & Niño Lozada, 2018).

Entre otras propiedades, la filtración:

- Remueve partículas y material coloidal no sedimentable después de la floculación biológica o química, o de ambas.
- Incrementa la remoción de sólidos suspendidos, turbiedad, fósforo, DBO, DQO, metales pesados, asbestos, bacterias, huevos de helmintos, virus y otras sustancias.
- Mejora la eficiencia y reduce el costo de desinfección a través de la remoción de materia orgánica suspendida y otras sustancias interferentes (Jiménez Cisneros, 2001).

1.1.2. Clasificación de los filtros

De acuerdo a Jiménez Cisneros (2001), los filtros se clasifican en referencia a cinco parámetros:

i. Dirección del flujo

- Descendente: dirección de flujo de arriba hacia abajo.
- Ascendente: dirección de flujo de abajo hacia arriba.
- Biflujo: o también llamado flujo mixto, es aquel conformado por una parte ascendente y otra descendente.
- Escurrimiento horizontal.

ii. Tipo de medio filtrante

- Medio único: se conforma por un solo tipo de material filtrante que puede ser arena, carbón activado, etc.
- Medio dual: se conforma por dos tipos de materiales filtrantes que pueden ser arena - antracita, carbón activado - arena, resina - arena, resina - antracita y otros.
- Medios múltiples: se conforma por más de dos tipos de materiales filtrantes que pueden ser antracita - arena - granate, carbón activado - antracita - arena y otros.

iii. Velocidad de flujo

- Filtros lentos: cuando se tiene baja carga superficial, presentan una tasa de filtración en intervalos de $2 - 5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d} < 12 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ (Romero Rojas, 1999, pág. 199).

Los valores utilizados por ETAPA (Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y saneamiento de Cuenca) son 0.1 – 0.2 m/h.

- Filtros rápidos: cuando se tiene alta carga superficial, presentan una tasa de filtración en intervalos de $120 \text{ a } 360 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ (Romero Rojas, 1999, pág. 199).

iv. Fuerza motriz de flujo

- A presión.
- Por gravedad: consiste en dejar que el agua escurra y por acción de la gravedad pase a través de los medios filtrantes.

v. Método de clarificación

- Filtración directa: se da cuando no hay un tratamiento previo por floculación ni sedimentación.
- Filtración después de sedimentación.

1.1.3. Mecanismos de filtración

Al tratar el agua ya sea por filtración directa o por filtración después de sedimentación, ésta contiene una gran cantidad de partículas en suspensión cuyo tamaño puede variar desde diámetros de 1mm hasta 10^{-3}mm (1μ).

Considerando esto, los mecanismos de filtración actuantes estarán en función del tamaño de las partículas y su densidad.

De acuerdo con Arboleda Valencia (2000), el proceso de filtración se puede considerar que ocurre en dos etapas distintas pero complementarias que son:

- a. Transporte de las partículas dentro de los poros.
- b. Adherencia a los granos del medio.

De acuerdo con Huisman (1974), existiría un tercer mecanismo; el cual se caracteriza porque los microorganismos mueren como consecuencia de procesos de degradación biológica, siendo éste el mecanismo biológico.

1.1.3.1. Mecanismos de transporte

En esta etapa intervienen fenómenos físicos e hidráulicos. Los mecanismos de filtración por transporte son: cernido, sedimentación, intercepción, difusión, impacto inercial y acción hidrodinámica. En la Figura 1.2 se observa de manera esquemática los diferentes mecanismos de transporte de partículas en el medio filtrante; también se observa la interacción de los diferentes mecanismos en un mismo proceso de filtración (Arana Correa, 2016, pág. 7).



Figura 1.2 Interacción de los diferentes mecanismos de filtración por transporte de partículas

Fuente: (Arboleda Valencia, 2000)

- a. **Cernido:** Actúa en la superficie del medio filtrante, quedando las partículas de mayor tamaño atrapadas y retenidas. Su eficiencia es negativa debido a que la superficie se puede colmatar acortando carreras de filtración.
- b. **Intercepción:** Este mecanismo se producirá sólo si los tamaños de las partículas son grandes, pudiendo las partículas que circulan por la línea de flujo colisionar con los granos del lecho filtrante (ver Figura 1.3).



Figura 1.3 Mecanismo de intercepción
Fuente: (Ahumada Theoduloz, 2011)

- c. **Sedimentación:** Puede causar la colisión de las partículas con los granos del lecho filtrante debido a la atracción provocada por las fuerzas de gravedad (ver Figura 1.4).

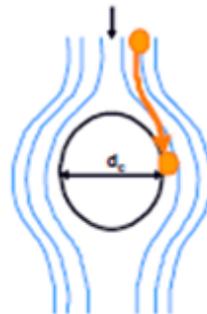


Figura 1.4 Mecanismo de sedimentación
Fuente: (Ahumada Theoduloz, 2011)

- d. **Difusión:** Este mecanismo puede cambiar la trayectoria de las partículas que circulan por las líneas de flujo, pudiendo provocar colisión con los granos del lecho filtrante. La probabilidad de colisión aumenta conforme la velocidad decrece, de igual manera si la temperatura se incrementa la probabilidad de colisión aumenta (ver Figura 1.5).



Figura 1.5 Mecanismo de difusión
Fuente: (Ahumada Theoduloz, 2011)

- e. Impacto inercial:** Los cambios continuos de dirección del flujo tienen mayor probabilidad de colisión debido a la unión y bifurcación de líneas de flujo.

1.1.3.2. Mecanismos de adherencia

En esta etapa intervienen fenómenos de acción superficial, en donde se consideran parámetros físicos y químicos.

Estos mecanismos facilitan la adherencia entre las partículas transportadoras y los gránulos, principalmente por parte de las características de las superficies de las partículas suspendidas y de los gránulos, las cuales son fácilmente adheribles a los gránulos y también a partículas previamente retenidas (Arana Correa, 2016, pág. 8).

1.1.3.3. Mecanismos biológicos

Este mecanismo funciona efectivamente cuando trabaja en conjunto con el mecanismo de adherencia.

Al iniciar el proceso, los microorganismos utilizan como fuente de alimentación el lecho y se van multiplicando severamente formándose una película biológica la cual proporciona a los granos de arena una superficie absorbente que favorece el mecanismo de adherencia.

La actividad bacteriológica es más eficiente en la superficie y va disminuyendo a medida que aumenta la profundidad del lecho filtrante.

1.1.4. Variables del proceso de filtración

1.1.4.1. Características del medio filtrante

En el proceso de filtración el tamaño del material filtrante es importante porque éste afecta a la pérdida de carga y a la gradiente de velocidad durante dicho proceso. Si el tamaño del material filtrante es demasiado pequeño, la fuerza actuante del fluido reducirá la resistencia de fricción originada por el lecho filtrante y si es demasiado grande, las partículas de menor tamaño presentes en el agua a tratar no serán retenidas al momento de ser filtradas.

Los materiales filtrantes se identifican de acuerdo a los siguientes parámetros (Di Bernardo, 1993):

- **Granulometría:** Se determina por una curva formada por los porcentajes en peso del material que pasas a través de las mallas de un grupo de tamices normalizados.
- **Diámetro efectivo:** Representa el 10% (en peso acumulado) que pasa y determina la eficacia de filtrado.
- **Coefficiente de uniformidad (Cu):** Es la relación de los tamaños pertenecientes al 60% y 10% que pasan (d_{60}/d_{10}). Si el Cu es mayor que 3, el material tiende a ser heterogéneo caso contrario suele ser homogéneo.
- **Forma de los granos:** Angular o redondo.
- **Peso específico:** El peso específico del material es igual al peso de los granos dividido por el volumen efectivo que ocupan los granos.

1.1.5. Descripción de los elementos básicos de un filtro

Los filtros contienen los siguientes componentes:

- **Caja de filtro:** Conformada por el lecho de material filtrante, capa de soporte, sistema de drenaje, altura de agua sobrenadante y borde libre.
- **Sistema de drenaje:** Sirve como soporte del material filtrante y asegura la recolección uniforme del agua.
- **Estructura de entrada y salida:** Utilizadas para regular caudales de ingreso, ingreso de flujo uniforme, drenaje y graduación del agua sobrenadante.
- **Dispositivos de regulación y control:** Sirve para controlar operaciones mediante válvulas y otros dispositivos.

1.1.5.1. Capa de agua sobrenadante

La capa de agua sobrenadante proporciona una carga hidráulica que es suficiente para hacer pasar el agua a través del lecho de material filtrante, a la par que crea un período de retención de varias horas para el agua (Visscher, Paramasivam, Raman, & Heijnen, 1992).

1.1.5.2. Sistema de drenaje

En un filtro lento, las funciones del sistema de drenaje son:

- Soportar el material filtrante e impedir que sea transportado por el sistema de drenaje, de tal forma que se asegure que la velocidad de filtración sea uniforme sobre toda el área del filtro.
- Asegurar una recolección uniforme de agua filtrada a través de toda el área de filtración.

Se pueden emplear diferentes tipos de sistema de drenaje, como pueden ser una capa de grava gruesa o de piedra triturada durable, estructuras compuestas por un dren principal y ramificaciones o drenes laterales mediante tuberías perforadas o separadas, o mediante fondos falsos (Van Dijk & Oomen, 1978).

El dimensionamiento de los drenes se efectuará con el criterio de que la velocidad límite en cualquier punto de estos no sobrepase de 0.30 m/s.

Grava de soporte

La grava (ver Figura 1.6) es tendida en capas, en el fondo se encuentran los granos mayores y se va reduciendo progresivamente el diámetro de forma ascendente.

Con el fin de evitar pérdidas de medio filtrante se coloca una serie de capas de grava de tamaño creciente entre el medio filtrante y el sistema de drenaje propiamente dicho.

El tamaño y la profundidad del lecho de grava dependerá del sistema de drenaje usado y del tamaño de la capa del medio filtrante.



Figura 1.6 Grava de soporte para filtros de agua

Fuente: <https://hermanosblancosl.com/aridos/>

Características:

Profundidad del lecho de grava: 15 – 60 cm

Color: amarilla / marrón

Forma: esférica - redondeada

Tamaño:

- Grava: 1 – 2.5cm
- Grava Fina: 0.5 – 1 cm

Dureza: 7 – 8 de la escala MO (Rueda Usme & Romero González, 2017, pág. 30).

Falso Fondo

Se denomina falso fondo al canal ubicado debajo del drenaje, por donde sale el agua filtrada o asciende el agua para el retrolavado.

El falso fondo tiene dos funciones:

- Dejar una cámara en la parte inferior del filtro que recoge toda el agua de filtrado uniforme.
- Distribuir el agua de lavado con presión uniforme.

1.1.5.3. Estructuras de entrada y salida

Estructuras de entrada

Las funciones de la estructura de entrada pueden ser:

1. Asegurar una distribución pareja del agua cruda sobre el área del lecho filtrante.
La velocidad de ingreso del agua entrante debe ser baja.
2. Reducir la energía del agua entrante con el fin de prevenir turbulencias en la capa de agua sobrenadante. También se requiere una baja velocidad de ingreso.
3. Drenar el agua sobrenadante cuando es necesario limpiar el filtro.
4. Graduar la altura del agua sobrenadante, esto puede realizarse por medio de un flotador con válvula de mariposa, de una válvula de compuerta operada a mano o mediante un vertedero de rebose (Van Dijk & Oomen, 1978).

Estructuras de salida

Las funciones de la estructura de salida pueden ser:

1. Asegurar que se elimine la posibilidad de presiones negativas en el lecho filtrante.
Se emplea usualmente en la línea del efluente un simple vertedero de rebose cuya

cresta queda ligeramente por encima del lecho. Otras posibilidades pueden ser un tubo de salida vertical cuya entrada esté por encima del nivel superior del lecho.

2. Contar con un medio para poder medir el flujo a través del lecho filtrante.
3. Contar con un medio para fijar la tasa de filtración, graduando a mano la válvula de mariposa.
4. Poder cerrar el filtro (mediante una válvula de compuerta) y drenarlo (Van Dijk & Oomen, 1978).

1.1.5.4. Dispositivos de regulación y control

Entre las operaciones a ser reguladas y controladas están:

- Medida del caudal del agua efluente por medio de un dispositivo calibrado de medición de caudal.
- Regulación de la tasa de filtración.
- Entrada de agua cruda al reservorio de agua sobrenadante hasta un nivel constante dentro del filtro.
- Eliminación del exceso de agua por medio de un vertedero.
- Descarga del agua tratada al tanque de almacenamiento de agua tratada o al desagüe.

Control a la entrada

En un filtro con control a la entrada (ver Figura 1.7), la velocidad de filtración se regula mediante la ayuda de la válvula de ingreso de agua cruda al sistema. Una vez que se obtenga el valor deseado no se requieren más manipulaciones de ésta.

El filtro funciona a una velocidad constante, lo cual se mantiene a través del tiempo, por el incremento gradual de la capa de agua sobrenadante para compensar el aumento de pérdida de carga al pasar el flujo a través del lecho. Este incremento de pérdida de carga también es gradual, y se presenta principalmente por el aumento de espesor de la membrana biológica.

Una vez que el agua sobrenadante alcanza el nivel de la altura de rebose, la unidad de filtración debe salir de funcionamiento para su limpieza correspondiente.

La velocidad de filtración será siempre constante y el aumento de la resistencia hidráulica en la superficie del filtro (membrana biológica) podrá ser observada en forma directa (Universidad del Valle, 1987).

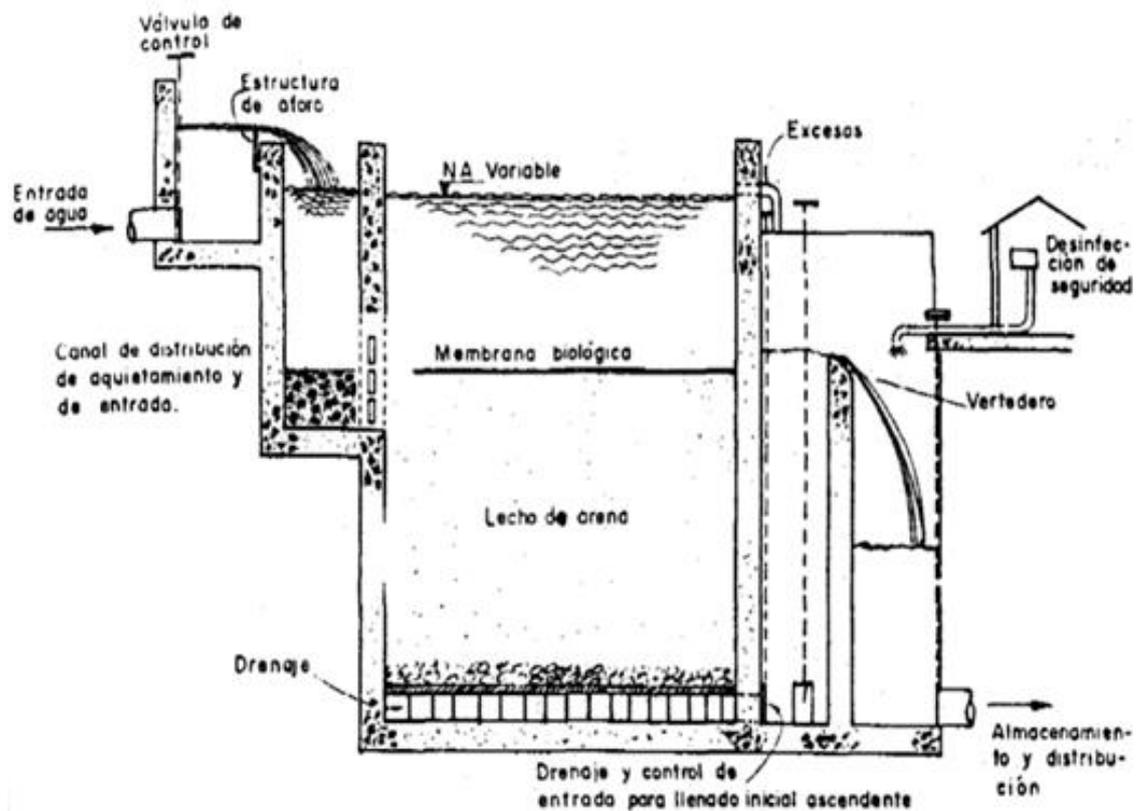


Figura 1.7 Esquema de un filtro lento con control en la entrada

Fuente: (Universidad del Valle, 1987)

Control a la salida

En un filtro con control a la salida (ver Figura 1.8), la velocidad de filtración se regula mediante la válvula de salida. Esta válvula debe abrirse gradualmente cada día para compensar el aumento de resistencia hidráulica del lecho filtrante, debido a que el espesor de la capa sobrenadante es constante, el aumento en la resistencia hidráulica ocasionaría una reducción en la velocidad de filtración. Se producen variaciones en la velocidad de filtración porque el aumento de la resistencia hidráulica es continuo, mientras que la compensación que se produce con la apertura gradual de la válvula es discontinua (Universidad del Valle, 1987).

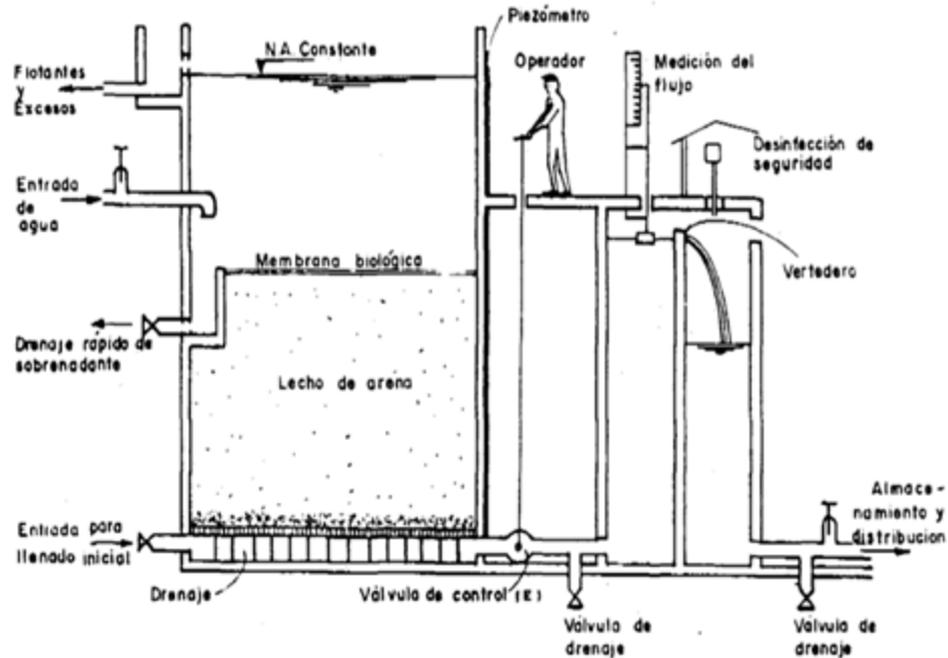


Figura 1.8 Esquema de un filtro lento con control en la salida
Fuente: (Universidad del Valle, 1987)

1.1.6. Métodos usados para controlar la tasa de filtración

1.1.6.1. Pérdida de carga constante, filtración de tasa constante

Al inicio de operación del filtro, éste se halla limpio y tiene poca resistencia. Si una fuerza impulsadora se aplicará totalmente al filtro, el caudal sería muy grande. Para mantener constante la tasa de filtración o un nivel del agua (ver Figura 1.9), parte de la fuerza impulsora se consume por una válvula de control de caudal efluente.

Al inicio, la válvula de control está casi cerrada para proveer la resistencia adicional requerida para mantener el caudal o el nivel de agua deseado; a medida que la filtración procede y aumenta la resistencia, la válvula se abre lentamente (Romero Rojas, 1999).

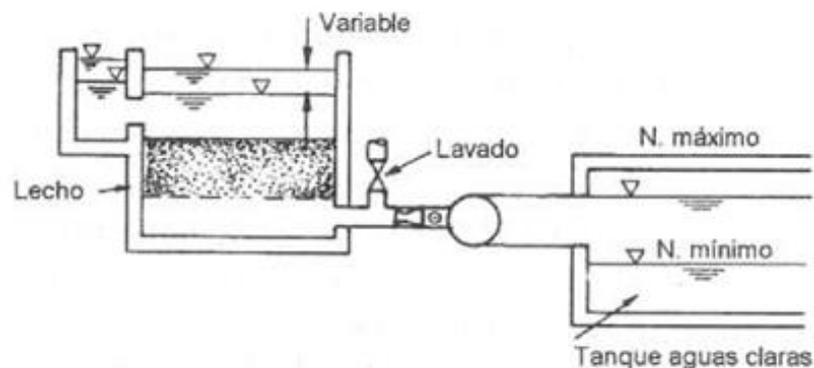


Figura 1.9 Esquema de un filtro de tasa constante (con aforador y controlador)
Fuente: (Romero Rojas, 1999)

1.1.6.2. Pérdida de carga constante, filtración de tasa constante

En este tipo de filtro (ver Figura 1.10) se usa un aparato hidráulico, sifón, o una válvula de mariposa operada por un flotador, para mantener un nivel constante de agua en el filtro. Se requiere un orificio y otra restricción a la salida del filtro para prevenir las velocidades excesivas de filtración al inicio de operación del filtro (Romero Rojas, 1999).

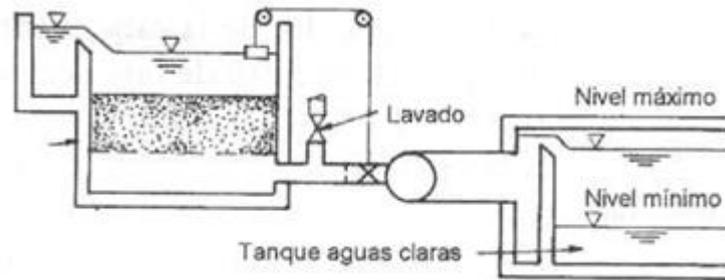


Figura 1.10 Esquema de un filtro de nivel constante (control del afluente, sensor de nivel y controlador)

Fuente: (Romero Rojas, 1999)

1.1.6.3. Filtración con afluente igualmente distribuido

Un sistema muy simple de controlar el flujo en los filtros es regularlo a la entrada colocando un orificio o vertedero que deje pasar un gasto constante (ver Figura 1.11).

Las ventajas de este sistema son:

- Tasa de filtración constante sin controladores de caudal.
- La pérdida de energía en cada filtro es evidente por simple observación del nivel de agua en la caja de filtración. Cuando el agua alcanza un nivel máximo deseado el filtro debe lavarse.
- El vertedero de control debe quedar a un nivel superior al lecho filtrante para prevenir el desague accidental del filtro (Romero Rojas, 1999).

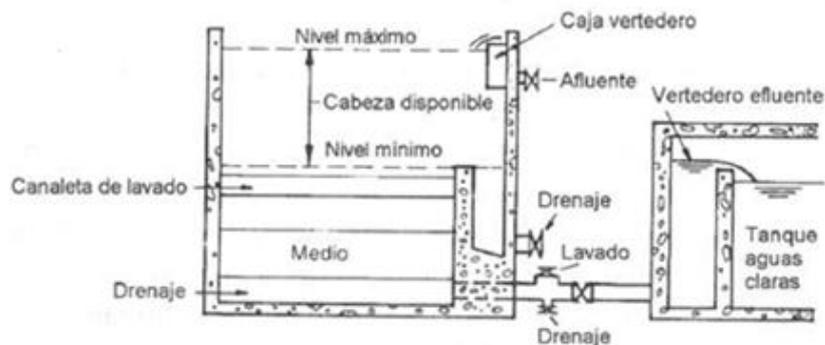


Figura 1.11 Esquema de filtración con afluente igualmente distribuido

Fuente: (Romero Rojas, 1999)

1.2. Sistemas de filtración

1.2.1. Filtración con arena

La arena es un material que está constituido por pequeños granos de minerales desprendidos de las rocas silíceas, éstas se forman de manera natural o artificial (ver Figura 1.12). Tienen muchos usos, pero nos centraremos en la filtración de agua, y es que actúa como medio filtrante al permitir el paso del agua, y por su grado de absorción, permite que los contaminantes queden atrapados en el interior. Generalmente el espesor de la capa de arena puede oscilar entre 40 y 70 cm. Debido a que es un material fino, es conveniente trabajar con sustratos más gruesos en los que se pueda quedar retenidos los contaminantes de mayor tamaño y con esto evitar la saturación de la arena. Una de las combinaciones más usuales es la filtración a través de arena, gravillas y carbón activado (Guillen Manrique, 2017, pág. 40).



Figura 1.12 Arena para filtros de agua

Fuente: <https://www.carbotecnia.info/producto/medio-arena-silica-para-filtros-de-agua/>

Cumple con las especificaciones de tamaño, dureza y forma requeridas para el óptimo funcionamiento de los equipos de filtración.

Características:

Color: amarillenta a blanca

Forma: sub - angular, fracturada

Tamaño: 0.2 - 3.0 mm

Dureza: 6 – 8 de la escala MO

Solubilidad al ácido: Inferior al 1.0%

Densidad aparente: 1500-1600 kg/m³

Coefficiente de uniformidad (CU): 1.30 – <1.65

Gravedad específica: 2.67 > 2.60 (Rueda Usme & Romero González, 2017, págs. 31, 32).

1.2.2. Filtración con antracita

Los lechos filtrantes de antracita en combinación con los lechos filtrantes de arena proporcionan todas las ventajas de un solo medio de filtración, permitiendo corridas con duraciones 30% a 40% mayores a la de los filtros multicapa de arena. La antracita es escogida, clasificada y tamizada a fin de obtener el material de la mejor calidad con el propósito de filtrar el agua. Sus gránulos se caracterizan por su estructura puntiaguda y fragmentada (ver Figura 1.13). La antracita produce agua de inmejorables características para la remoción de turbidez y sólidos suspendidos debido a la mayor capacidad de retención que puede proporcionar.



Figura 1.13 Antracita para filtros de agua

Fuente: <https://www.carbotecnia.info/producto/antracita/>

Características:

Color: negro

Contenido de carbón: 95%

Tamaño: 0.60 - 10.00 mm

Dureza: 3.0 - 3.5 de la escala MOH.

Densidad aparente: 750-800 kg/m³

Coefficiente de uniformidad (CU): < 1.7

Gravedad específica: 1.65 + .05 (Rueda Usme & Romero González, 2017, pág. 31).

1.2.3. Filtración con carbón activado

Los filtros de carbón activado (ver Figura 1.14) son una opción para tratar el agua, está especialmente diseñado para poder remover la materia orgánica que es la causante del mal olor, color y sabor en el agua. También remueve orgánicos como fenoles, muchos pesticidas y herbicidas del agua. La activación del carbón produce una excelente superficie de filtración y le permite al carbón activado tener una gran capacidad de absorción de impurezas del agua.



Figura 1.14 Carbón activado para filtros de agua

Fuente: <https://www.carbotecnia.info/producto/carbon-activado-para-filtros-de-agua-bacteriostatico/>

Características:

Color: Granulo negro e irregular.

PH: 9 – 11

Tamaño: 2.5 mm, tipo polvo fino granulado

Dureza: 98% (Min.)

Densidad aparente: 0.45 - 0.52 (gm/cc) (Díaz Restrepo & Niño Lozada, 2018, pág. 18).

1.3. Características físicas del agua

Existen ciertas características del agua que se consideran físicas porque son perceptibles por los sentidos (vista, olfato o gusto), y tienen incidencia directa sobre las condiciones estéticas de aceptabilidad del agua (Pradillo, 2016).

Se describirá únicamente la turbiedad debido a que el principal alcance que tiene el modelo físico es la remoción de ésta.

1.3.1. Turbiedad

La turbidez es la dificultad del agua para transmitir la luz, se produce debido a la presencia de diversas materias en suspensión como: arcillas, limos, materia orgánica e inorgánica, dispersiones coloidales y otros organismos microscópicos. Estas partículas suelen tener desde dimensiones coloidales de alrededor de 10nm hasta diámetros de 0.1mm.

La medición de la turbidez se realiza mediante un turbidímetro o nefelómetro y se expresa en UTN (Unidades Nefelométricas de Turbidez).

La turbiedad indica el grado de opacidad producido en el agua por la materia particulada en suspensión. Debido a que los materiales que provocan la turbiedad son los responsables del color, la concentración de las sustancias determina la transparencia del agua, puesto que, limita el paso de la luz a través de ella (Vega Serrano, 2013).

1.3.2. Requisitos físicos

Al momento de realizar controles en los diferentes procesos de tratamiento del agua, se debe tener en cuenta las propiedades de la misma, entre éstas las características físicas. La calidad del agua se mide de acuerdo a ciertos estándares fijados por normas nacionales e internacionales que permiten vigilar los procesos de tratamiento y corregirlos en caso de ser necesarios (Orellana, 2005).

De acuerdo con la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108:2014, los requisitos físicos, es decir, el límite de concentración, en este caso de turbiedad, que debe cumplir el agua para consumo humano se presenta en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1 Límites permisibles de las características físicas

Parámetro	Unidad	Límite Máximo Permitido
Turbiedad	NTU	5

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2014)

2. CAPÍTULO II: DISEÑO DEL ENSAYO DE LABORATORIO

A continuación, se presentarán los puntos establecidos para el desarrollo del prototipo y por consecuencia lógica llegar al objetivo principal de esta investigación.

2.1. Determinación de variables dependientes e independientes

Antes de realizar el prediseño del prototipo, se deben identificar las variables dependientes e independientes que intervienen en el procedimiento.

Las variables dependientes de este procedimiento son velocidades o tasas de filtración y tiempo de retención.

Las variables independientes que intervienen en el procedimiento de diseño son:

- Caudal de circulación: el cual está definido por la llave de regulación y por la potencia y capacidad de la bomba que se llegue a escoger.
- Dimensiones de columnas de filtración: mismas que serán escogidas en función de la facilidad constructiva y del volumen que se desea tratar.
- Dimensiones de tanques de almacenamiento de agua filtrada.

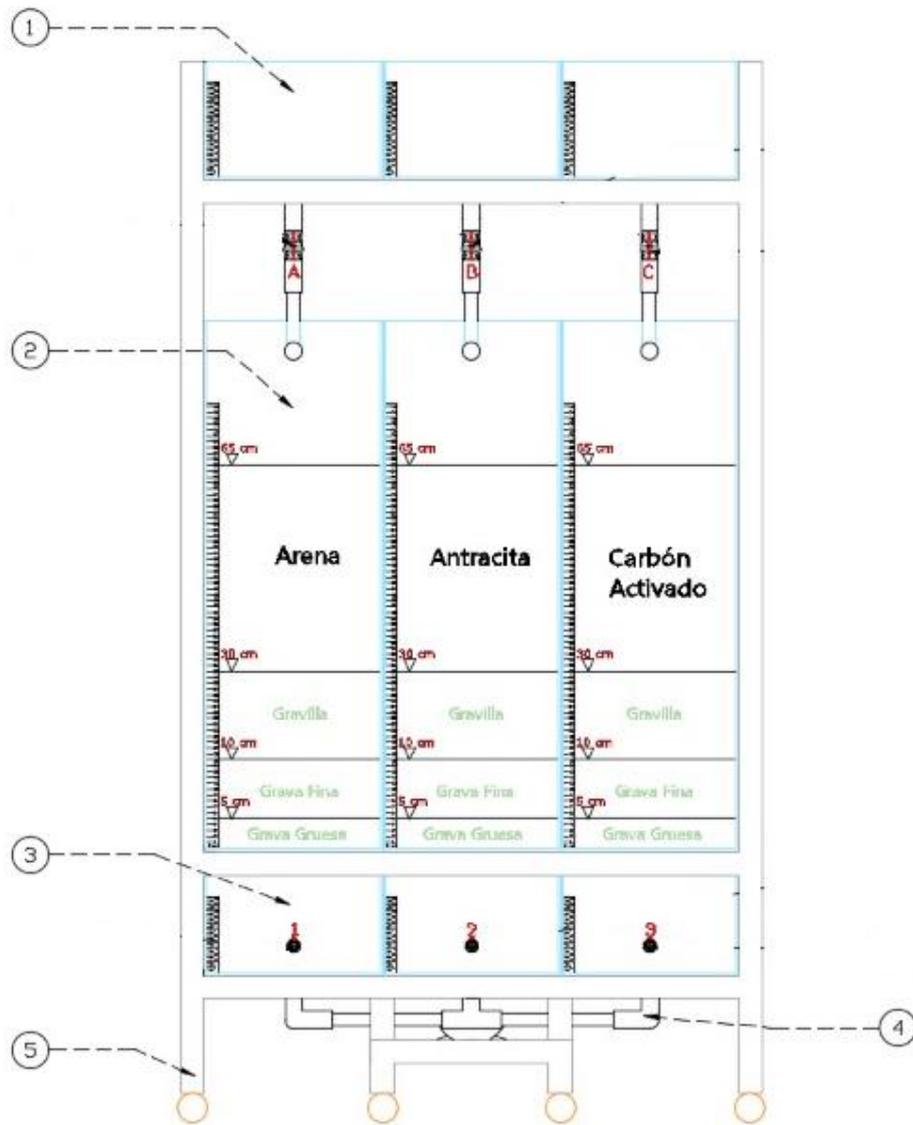
2.2. Diseño geométrico del modelo

En este punto se realiza un bosquejo de la idea general del prototipo, donde se determinarán espesores de capa de lecho filtrante y los diferentes ensamblajes con los que contarán las tres columnas de filtración, es importante también mencionar que las secciones de las columnas de filtración pueden adquirir diversas formas, entre ellas secciones circulares y cuadradas. Para nuestro sistema se ha considerado diseñar columnas de filtración cuadradas debido a su facilidad de construcción.

2.2.1. Dimensionamiento

Para definir una mejor alternativa en la realización del diseño se debe tomar en cuenta todas las variables que intervienen en el dimensionamiento del modelo físico (ver Figura 2.1), como es el caso del caudal que ingresará a las columnas de filtración y sus facilidades constructivas.

Se realizó el dimensionamiento siguiendo los criterios de diseño para el caso de filtros lentos.



- ① Tanques de almacenamiento de agua turbia
- ② Columnas de filtración
- ③ Tanques de falso fondo
- ④ Sistema de circulación
- ⑤ Estructura metálica

Figura 2.1 Esquema de las principales partes del modelo físico (vista frontal)

Fuente: Elaboración propia

2.2.1.1. Criterios de diseño

Los criterios de diseño para filtros lentos se encuentran en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Criterios de diseño

Criterios de diseño	Valores recomendados
Período de operación	24 h/d
Velocidad de filtración	0.1 – 0.3 m/h
Especificaciones del lecho filtrante	
Altura del lecho filtrante	
Arena	60 - 100 cm
Capa de soporte	
Grava	5 - 10 cm
Especificaciones de drenaje	
Diámetro de los orificios	6 mm – 19 mm
Espaciamiento entre orificios	7.5 cm – 25 cm
Velocidad en el orificio	0.3 m/s – 0.5 m/s

Fuente: (Arboleda Valencia, 2000)

2.2.1.2. Área y volumen del tanque de almacenamiento de agua turbia

El tanque de almacenamiento de agua turbia será diseñado para tratar un volumen de 10 Lt, es por ello que se imponen las siguientes medidas:

$$a = 0.3 \text{ m}$$

$$b = 0.3 \text{ m}$$

$$h = 0.2 \text{ m}$$

El área del tanque de almacenamiento de agua turbia se calcula mediante la Ecuación 1:

$$A = a \times b \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

A = Área del tanque de almacenamiento de agua turbia en m²,

a = Ancho del tanque de almacenamiento de agua turbia en m y,

b = Largo del tanque de almacenamiento de agua turbia en m.

Ecuación 1. Área del tanque de almacenamiento de agua turbia

$$A = 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$$

$$A = 0.09 \text{ m}^2$$

El volumen del tanque de almacenamiento de agua turbia se calcula mediante la Ecuación 2:

$$V = A \times h \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

V = Volumen del tanque de almacenamiento de agua turbia en m^3 y,

h = Altura del tanque de almacenamiento de agua turbia en m.

Ecuación 2. Volumen del tanque de almacenamiento de agua turbia

$$V = 0.09 \text{ m}^2 \times 0.2 \text{ m}$$

$$V = 0.018 \text{ m}^3$$

El volumen del tanque será de 0.018 m^3 , pero es importante mencionar que la capacidad máxima que puede tratar el sistema de filtración es de 15 litros (ver Figura 2.2).

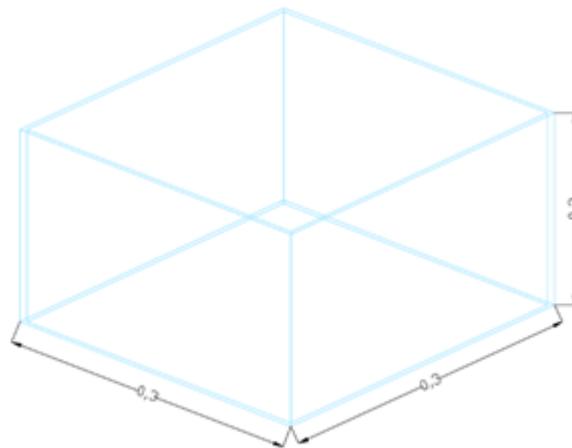


Figura 2.2 Dimensiones del tanque de almacenamiento de agua turbia

Fuente: Elaboración propia

2.2.1.3. Área de la columna de filtración

Para empezar con los cálculos del dimensionamiento del modelo físico se ha decidido imponer un área de 0.09 m^2 .

Al considerar que la sección de columna de filtración a utilizar es cuadrada y sabiendo el área, podemos determinar sus dimensiones mediante la Ecuación 3:

$$A_c = a_c \times b_c \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

A_c = Área de la columna de filtración en m^2 ,

a_c = Ancho de la columna de filtración en m y,

b_c = Largo de la columna de filtración en m.

Ecuación 3. Área de la columna de filtración

$$a_c = b_c$$

$$0.09 \text{ m}^2 = b_c^2$$

$$\sqrt{0.09} = b_c$$

$$b_c = 0.3 \text{ m}$$

2.2.1.4. Área y volumen del lecho filtrante

Se determina el área del lecho filtrante mediante la Ecuación 4:

$$\text{Área del lecho filtrante} = \text{Longitud del filtro} \times \text{Ancho del filtro} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Ecuación 4. Área del lecho filtrante

$$\text{Área del lecho filtrante} = 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$$

$$\text{Área del lecho filtrante} = 0.09 \text{ m}^2$$

El volumen se calculó aplicando la Ecuación 5:

$$\text{Volumen del lecho filtrante} = \text{Área del lecho filtrante} \times \text{Altura del lecho filtrante} \quad (\text{Ecuación 5})$$

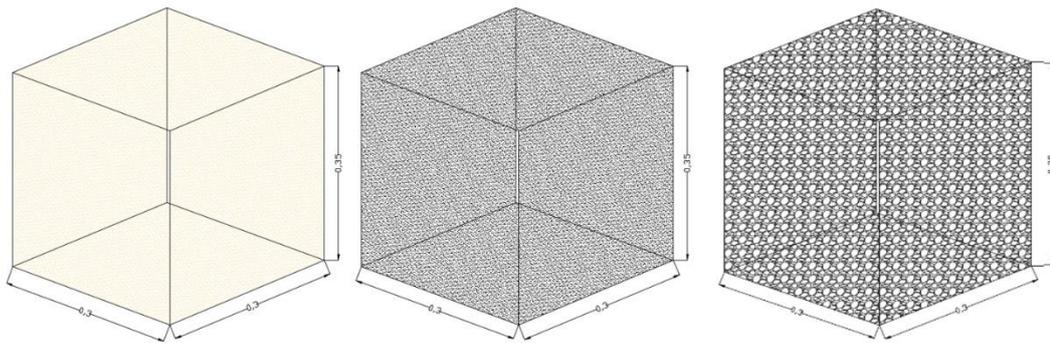
Donde:

Altura del lecho filtrante: Se escogerá una altura del lecho de 0.35 m para los tres materiales filtrantes (ver Figura 2.3).

Ecuación 5. Volumen del lecho filtrante

$$\text{Volumen del lecho filtrante} = 0.09 \text{ m}^2 \times 0.35 \text{ m}$$

$$\text{Volumen del lecho filtrante} = 0.0315 \text{ m}^3$$



a) Arena.

b) Antracita.

c) Carbón activado.

Figura 2.3 Dimensiones de los lechos filtrantes. a) Arena, b) Antracita y, c) Carbón activado

Fuente: Elaboración propia

2.2.1.5 Área y volumen del tanque de falso fondo

Para el dimensionamiento del tanque de falso en el cual se almacenará el agua tratada, se mantiene el área usada en los anteriores tanques, la única diferencia será la altura de dicho tanque (ver Figura 2.4).

$$A_{\text{falso fondo}} = 0.09 \text{ m}^2$$

$$h_{\text{falso fondo}} = 0.17 \text{ m}$$

El volumen del tanque de falso fondo se calcula mediante la Ecuación 6:

$$V_{\text{falso fondo}} = A_{\text{falso fondo}} \times h_{\text{falso fondo}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

$V_{\text{falso fondo}}$ = Volumen del tanque de falso fondo en m^3 ,

$A_{\text{falso fondo}}$ = Área del tanque de falso fondo en m^2 y,

$h_{\text{falso fondo}}$ = Altura del tanque de falso fondo en m.

Ecuación 6. Volumen del tanque de falso fondo

$$V_{\text{falso fondo}} = 0.09 \text{ m}^2 \times 0.17 \text{ m}$$

$$V_{\text{falso fondo}} = 0.0153 \text{ m}^3$$

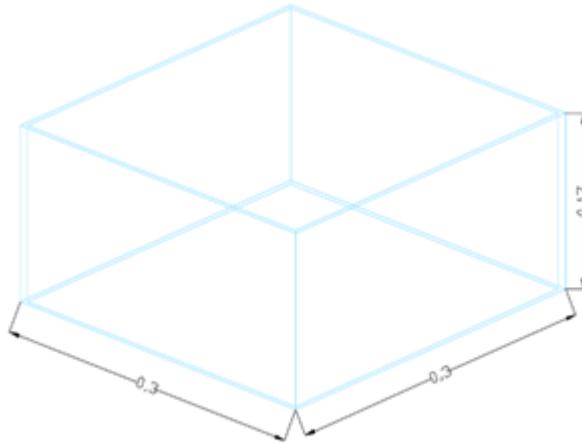


Figura 2.4 Dimensiones del tanque de falso fondo

Fuente: Elaboración propia

2.2.2. Cálculo

Con las dimensiones ya adoptadas procedemos a realizar los cálculos requeridos para determinar si se cumplen ciertos parámetros de diseño.

2.2.2.1. Caudal que ingresa al filtro

Para determinar el caudal que ingresa al filtro se emplea la Ecuación 7:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

Q = Caudal que ingresa al filtro en Lt/h,

V = Volumen colocado en el tanque de almacenamiento de agua turbia en Lt y,

t = Tiempo que se demora en vaciar el tanque de almacenamiento de agua turbia en h.

Ecuación 7. Caudal que ingresa al filtro

2.2.2.2. Velocidad de filtración

Para determinar la velocidad de filtración con la que opera un filtro lento se emplea la Ecuación 8:

$$V_f = \frac{v_f}{A_f \times T_f} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

V_f = Velocidad de filtración en m^3/m^2 d,

v_f = Volumen de filtrado en m^3 ,

A_f = Área del lecho filtrante en m^2 y,

T_f = Tiempo de filtrado en s.

Ecuación 8. Velocidad de filtración

Fuente: (Carangui Fernández, 2016)

Tiempo de filtrado: Tiempo necesario para que el nivel de agua baje una distancia denominada como altura H .

El volumen de filtrado se calcula mediante la Ecuación 9:

$$v_f = A_f \times H \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

H = Altura de agua sobrenadante en m.

Ecuación 9. Volumen de filtrado

Fuente: (Carangui Fernández, 2016)

2.2.2.3. Caudal filtrado

Para determinar el caudal filtrado con la que opera el filtro lento se emplea la Ecuación 10:

$$Q_f = \frac{V_F}{T_F} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

Q_f = Caudal filtrado en Lt/h,

V_F = Volumen de agua filtrada recolectada en Lt y,

T_F = Tiempo que tomó recolectar el agua filtrada en h.

Ecuación 10. Caudal filtrado

2.3. Construcción

2.3.1. Modelo físico de prueba

Primero se realizó un modelo físico de prueba de plástico para verificar que se cumplan los criterios de diseño usados para filtros lentos.

2.3.1.1. Materiales

Los materiales empleados en la construcción del modelo físico para realizar las respectivas pruebas fueron:

- Tanques plásticos
- Tubo PVC (½’')
- Adaptador de tanque PVC (½’')
- Codos PVC (½’')
- Tee PVC (½’')

- Válvula de esfera PVC (½’')
- Tapón hembra PVC (½’')
- Adaptador macho PVC (½’')
- Teflón
- Arena
- Grava
- Pegatanke
- Llave para tubería
- Tijera para cortar tubería
- Flexómetro
- Broca (½’')
- Broca (4 mm)
- Taladro

2.3.1.2. Proceso constructivo

Para la construcción de la columna de filtración se utilizó dos tanques plásticos de diámetro ($D = 27$ cm) y altura ($H = 40$ cm) cada uno.

La base de uno de los tanques fue cortada debido a que era necesario unir ambos baldes para obtener la altura que se requería. La unión entre ambos tanques se la realizó con pegatanke, dejando reposar durante una noche para que el pegamento se adhiriera. En la parte inferior, se realizaron perforaciones de 4 mm necesarias para drenar el agua filtrada al falso fondo.

La tubería tipo flauta que capta y distribuye el agua turbia a filtrar está colocada a 5cm desde la parte superior de la columna filtrante hasta el centro de la tubería PVC de ½’”.

Como tanque de almacenamiento de agua turbia se ocupó un tercer tanque plástico de altura ($H = 17.5$ cm) y diámetro ($D = 17$ cm), al cual se le conectó un adaptador de tanque PVC de ½’” y del que se conecta una válvula de esfera PVC para poder controlar o regular el caudal de ingreso al filtro. Se realizaron las respectivas conexiones con tuberías y accesorios PVC de ½’”.

Una vez construido el modelo físico de prueba (ver Figura 2.5), se procedió a colocar la capa de soporte y el material filtrante dentro del filtro con sus respectivas alturas. Se debe mencionar que se realizaron pruebas con arena y grava, primero se colocó una capa de 10 cm de grava para soporte y drenaje y, por último, la capa de 60 cm de arena (ver Figura 2.6).



Figura 2.5 Modelo físico de prueba

Fuente: Autoras



a) Capa de grava.

b) Capa de arena.

Figura 2.6 Materiales dentro del modelo físico de prueba. a) Capa de grava y, b) Capa de arena

Fuente: Autoras

Una vez colocados los materiales filtrantes se probó el sistema.

2.3.2. Modelo físico definitivo

Con las pruebas realizadas se comprobó que se cumplen los parámetros de diseño propuestos; por lo tanto, el dimensionamiento propuesto es el correcto y el siguiente paso es la construcción del modelo físico definitivo de vidrio.

La construcción del modelo físico se realizó en diferentes partes, las cuales posteriormente, se colocaron juntas para obtener el modelo físico final (ver Figura 2.7).

Las partes principales que conforman el modelo son:

- Tanques de almacenamiento de agua turbia
- Columnas de filtración
- Tanques de fondo falso
- Sistema de circulación
- Estructura metálica



Figura 2.7 Modelo físico definitivo con sus principales partes

Fuente: Autoras

2.3.2.1 Tanques de almacenamiento de agua turbia

Estos tanques se encuentran en la parte superior y servirán para almacenar el agua a tratar, para posteriormente, distribuirla al sistema de columnas filtrantes (ver Figura 2.8). Estos tanques se conectarán en dos puntos al sistema de circulación para así tener la función de enviar y recibir agua conforme éste funcione.

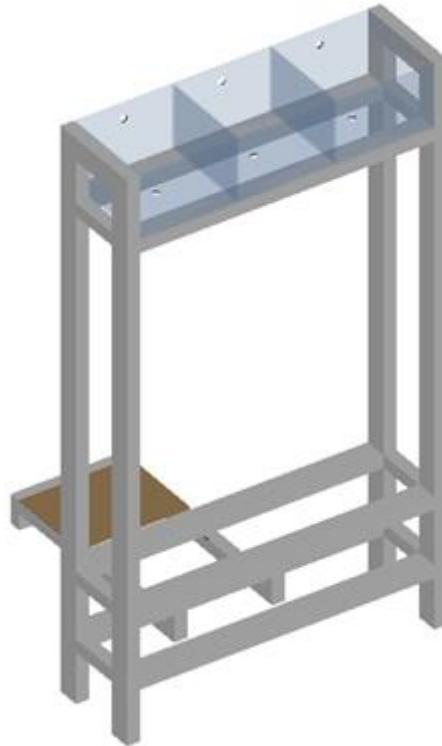


Figura 2.8 Tanques de almacenamiento de agua turbia del modelo físico definitivo

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.1.1. Materiales

Los materiales que se utilizaron para la construcción de los tres tanques de almacenamiento de agua turbia fueron:

- Plancha de vidrio de 4 mm (0.3 m x 0.3 m) para la base (ver Figura 2.9)

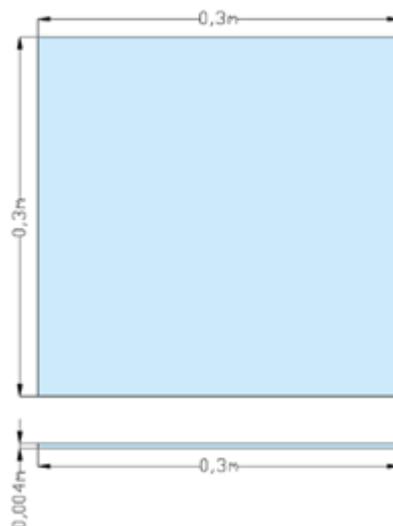


Figura 2.9 Plancha de vidrio de 4 mm (0.3 m x 0.3 m)

Fuente: Elaboración propia

- Plancha de vidrio de 4 mm (0.3 m x 0.2 m) para los laterales (ver Figura 2.10)

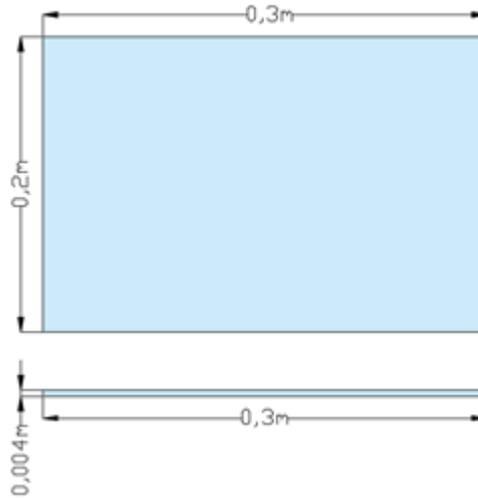


Figura 2.10 Plancha de vidrio de 4 mm (0.3 m x 0.2 m)

Fuente: Elaboración propia

- Silicón para unir las planchas de vidrio (ver Figura 2.11)



Figura 2.11 Silicón para vidrios

Fuente: <https://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/product/392421/silicona-vidrios-300-ml-transparente>

- Sello para facilitar la medición del volumen de agua turbia a tratar
- Broca para vidrio para realizar las diferentes perforaciones (ver Figura 2.12)



Figura 2.12 Broca para vidrio

Fuente: <https://www.hecort.com/producto/broca-para-vidrio-12-x-3-18/>

- Máquina perforadora de vidrio (ver Figura 2.13)



Figura 2.13 Máquina perforadora de vidrio

Fuente: <https://www.hogarmania.com/bricolaje/taller/herramientas/201105/brocas-para-perforar-cristal-8171.html>

2.3.2.1.2. Proceso constructivo

Para su realización se utilizó una plancha de vidrio de 4 mm de espesor dividida en varias piezas; 1 pieza que servirá para la base de 0.3 m x 0.3 m, perforada en el centro para colocar un adaptador de tanque PVC de diámetro de ½” (ver Figura 2.14) y 4 piezas para los laterales de 0.3 m x 0.2 m, una de éstas tendrá una perforación para una tubería PVC de diámetro de ½” a 5 cm desde el borde superior hasta el centro de la tubería (ver Figura 2.15). Una vez ya realizadas las perforaciones se hace la unión de las piezas utilizando silicón para vidrio (ver Figura 2.16).

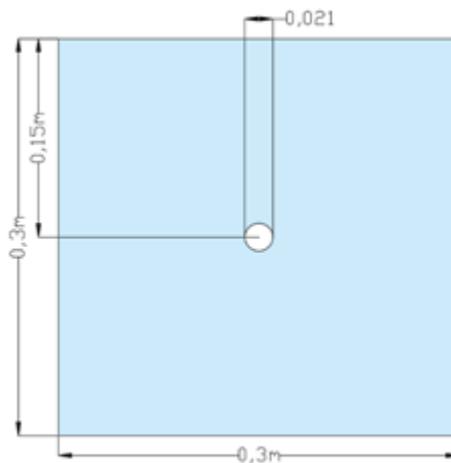


Figura 2.14 Base del tanque de almacenamiento de agua turbia

Fuente: Elaboración propia

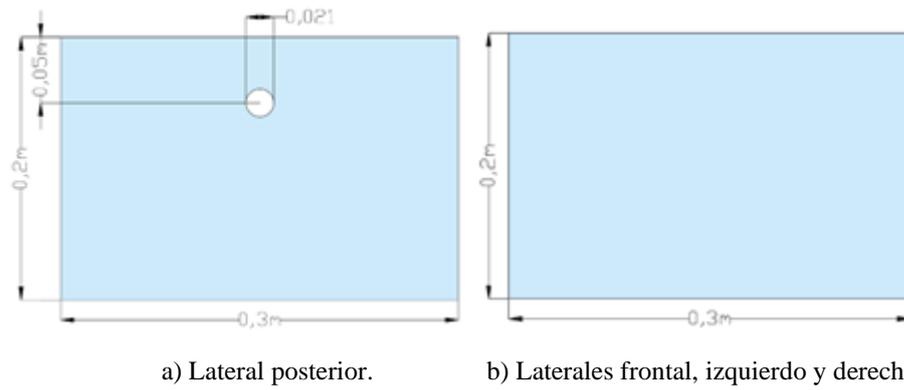


Figura 2.15 Laterales del tanque de almacenamiento de agua turbia. a) Lateral posterior y b) Lateral frontal, izquierdo y derecho

Fuente: Elaboración propia

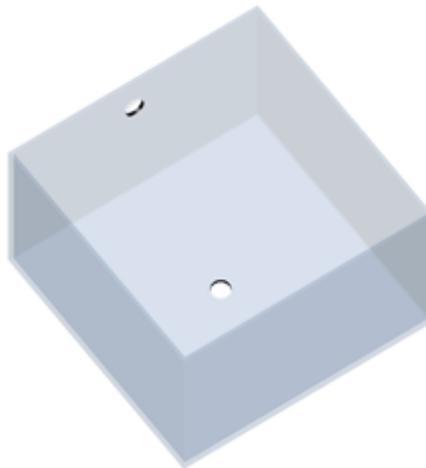


Figura 2.16 Tanque de almacenamiento de agua turbia con sus respectivas perforaciones

Fuente: Elaboración propia

En el lateral frontal del tanque se colocó un sello que indica cada 0.5 Lt para facilitar la medición del volumen de agua turbia a tratar (ver Figura 2.17).



Figura 2.17 Sello para medir el volumen en el tanque de almacenamiento de agua turbia
Fuente: Autoras

El mismo procedimiento se realizó para los dos tanques restantes.

2.3.2.2. Columnas de filtración

La columna de filtración es parte del modelo físico en donde propiamente se produce el proceso de filtrado. Consta de un fondo con agujeros que servirá para drenar el agua y una puerta impermeabilizada para facilitar la colocación de los materiales y el mantenimiento del prototipo (ver Figura 2.18).

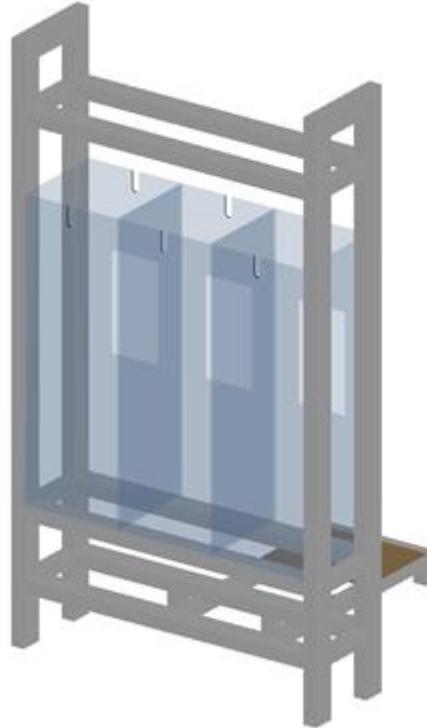


Figura 2.18 Columnas de filtración del modelo físico definitivo

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.2.1. Materiales

Los materiales que se utilizaron para la construcción de las tres columnas filtrantes fueron:

- Plancha de vidrio de 6 mm (0.3 m x 0.3 m) para la base (ver Figura 2.19).

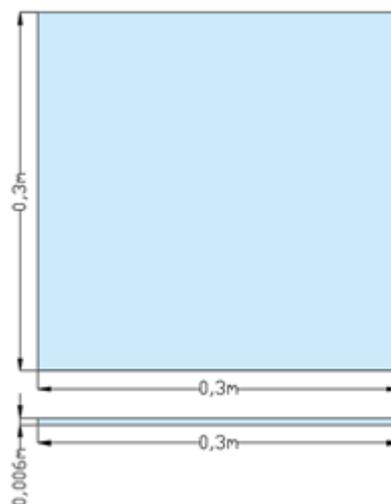


Figura 2.19 Plancha de vidrio de 6 mm (0.3 m x 0.3 m)

Fuente: Elaboración propia

- Plancha de vidrio de 4 mm (0.3 m x 0.9 m) para los laterales (ver Figura 2.20).

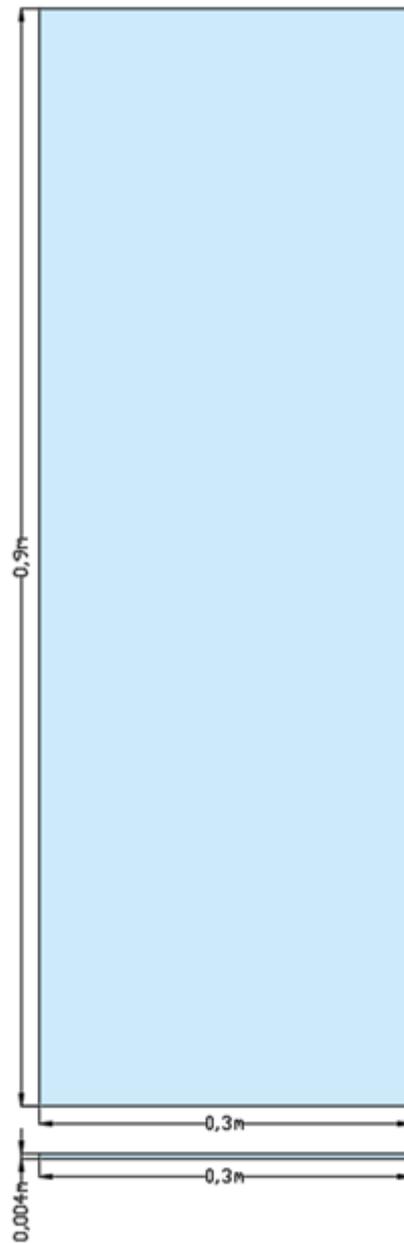


Figura 2.20 Plancha de vidrio de 4 mm (0.3 m x 0.9 m)

Fuente: Elaboración propia

- Plancha de vidrio de 4 mm (0.15 m x 0.3 m) para la puerta (ver Figura 2.21).

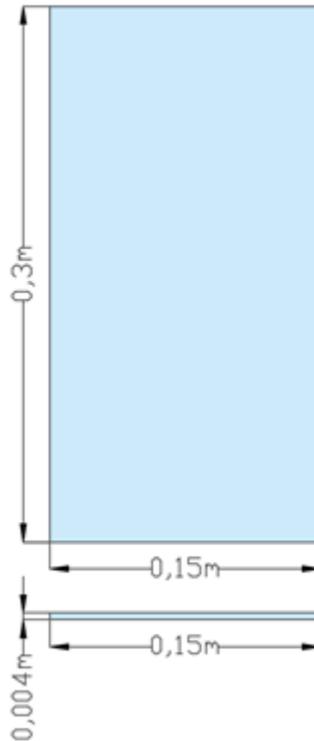


Figura 2.21 Plancha de vidrio de 4 mm (0.15 m x 0.3 m)

Fuente: Elaboración propia

- Silicón para unir las planchas de vidrio (ver Figura 2.11).
- Sello para facilitar la medición de las alturas de los materiales.
- Broca de vidrio para realizar las diferentes perforaciones (ver Figura 2.12).
- Máquina perforadora de vidrio (ver Figura 2.13).

2.3.2.2.2. Proceso constructivo

Para su realización se utilizó una plancha de 4 mm de espesor que servirá para los laterales; se perforaron dos de estas planchas a 5 cm desde el borde superior hasta el centro del agujero donde se colocará la tubería PVC de ½” tipo flauta. Además, se realizó una abertura de 15 cm x 30 cm la cual sirvió para colocar una puerta y facilitar la colocación de los materiales y el mantenimiento de la columna de filtración (ver Figura 2.22); por último, se utilizó una plancha de 6 mm de espesor como base para soportar el material filtrante en la cual se realizaron nueve perforaciones de 6 mm de diámetro separados cada 7.5 cm que servirán como drenaje al falso fondo (ver Figura 2.23).

Una vez realizadas tales perforaciones se hace la unión de las piezas utilizando silicón para vidrio (ver Figura 2.24).

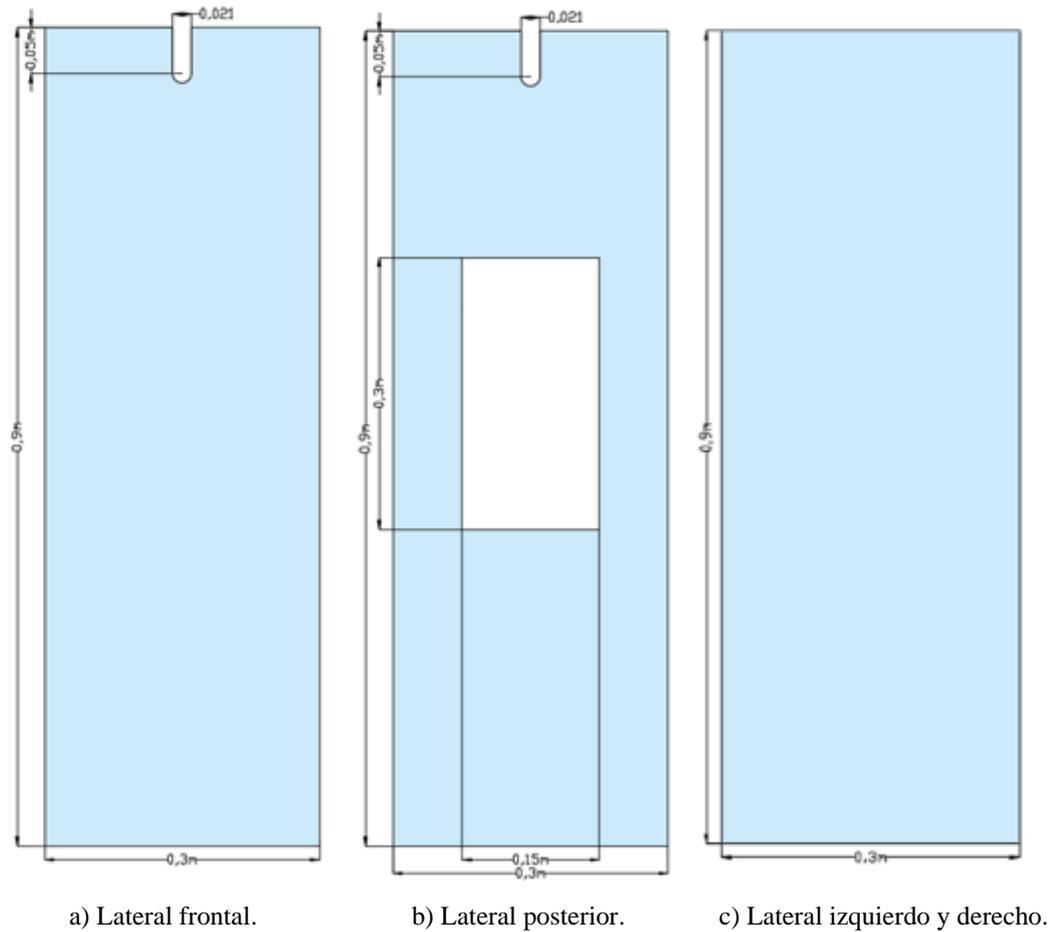


Figura 2.22 Laterales de la columna de filtración. a) Lateral frontal, b) Lateral posterior y, c) Lateral izquierdo y derecho

Fuente: Elaboración propia

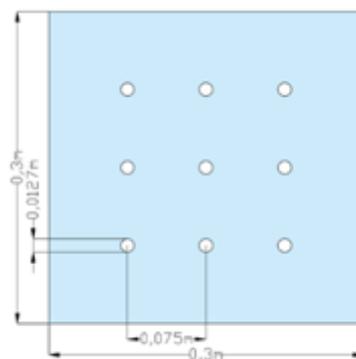


Figura 2.23 Base de la columna de filtración

Fuente: Elaboración propia

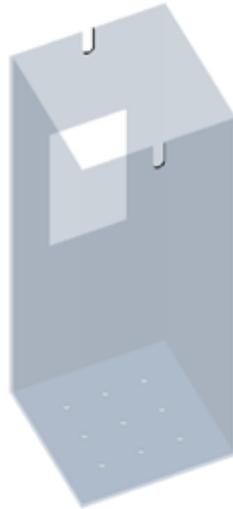


Figura 2.24 Columna de filtración con sus respectivas perforaciones

Fuente: Elaboración propia

En el lateral frontal se colocó un sello para medir las diferentes alturas y facilitar la colocación de los materiales filtrantes (ver Figura 2.25).



Figura 2.25 Sello para medir las diferentes alturas en la columna de filtración

Fuente: Autoras

El mismo procedimiento se realizó para las dos columnas restantes.

2.3.2.3. Tanques de falso fondo

Su objetivo principal es almacenar el agua filtrada, además tiene dos funciones que son redistribuir el agua tratada a los demás tanques de almacenamiento de agua turbia o analizar el agua al final de cada columna de filtración.

Este tanque será colocado en la parte inferior del prototipo (ver Figura 2.26) cuya función es determinar el caudal que fluye por el sistema en ese momento. Para ello se tomará el tiempo en que el tanque se llena de agua tratada utilizando un cronómetro.



Figura 2.26 Tanques de falso fondo del modelo físico definitivo

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.3.1. Materiales

Los materiales que se utilizaron para la construcción de los tres tanques de falso fondo fueron:

- Plancha de vidrio de 4 mm (0.3 m x 0.3 m) para la base (ver Figura 2.9).
- Plancha de vidrio de 4 mm (0.3 m x 0.17 m) para los laterales (ver Figura 2.27).

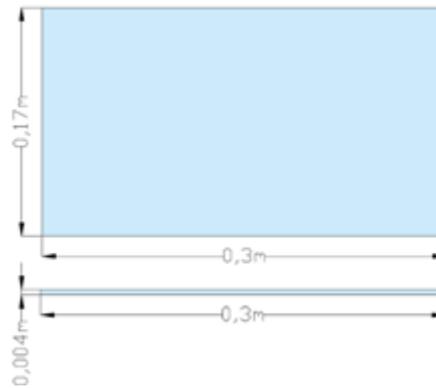


Figura 2.27 Plancha de vidrio de 4 mm (0.3 m x 0.17 m)

Fuente: Elaboración propia

- Silicón para unir las planchas de vidrio (ver Figura 2.11).
- Sello para medir el volumen de agua filtrada.
- Broca de vidrio para realizar las diferentes perforaciones (ver Figura 2.12).
- Máquina perforadora de vidrio (ver Figura 2.13).

2.3.2.3.2. Proceso constructivo

Para la realización se utilizó una plancha de vidrio de 4 mm de espesor dividida en varias piezas; 1 pieza que servirá para la base de 0.3 m x 0.3 m, perforada en el centro para colocar un adaptador de tanque PVC de ½’’ (ver Figura 2.28) y 4 piezas para los laterales de 0.3 m x 0.17 m, una de éstas tendrá una perforación de ½’’ a 5cm desde el borde inferior hasta el centro del orificio para colocar un adaptador de tanque PVC de ½’’ (ver Figura 2.29). Una vez realizadas las perforaciones se hace la unión de las piezas utilizando silicón para vidrio (ver Figura 2.30).

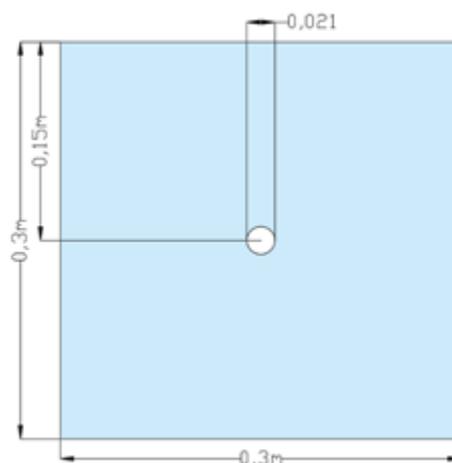


Figura 2.28 Base del tanque de falso fondo

Fuente: Elaboración propia

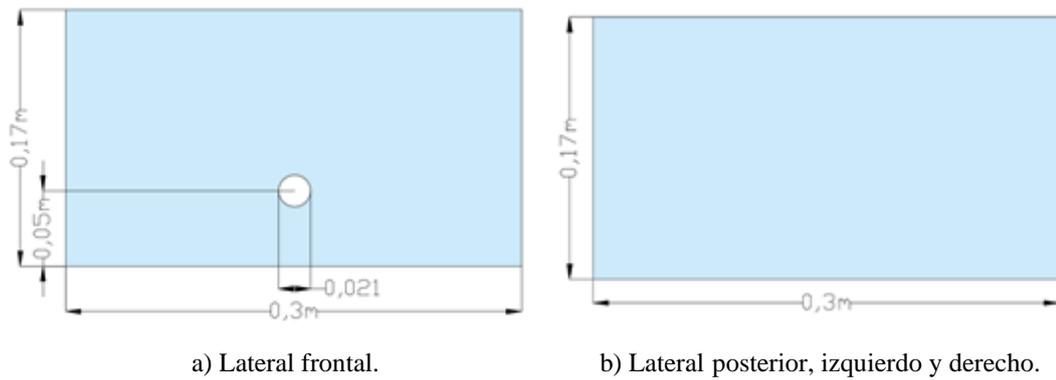


Figura 2.29 Laterales del tanque de falso fondo. a) Lateral frontal y b) Lateral posterior, izquierdo y derecho.

Fuente: Elaboración propia

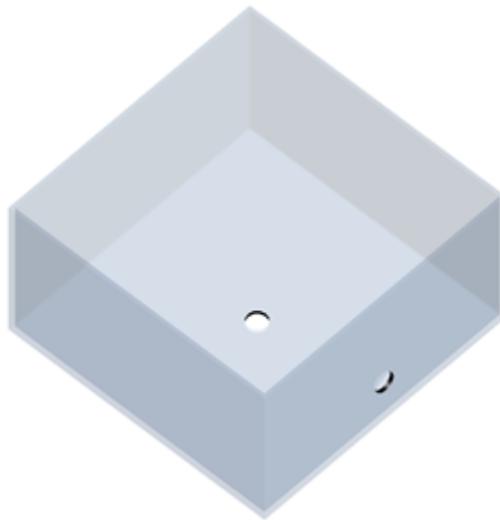


Figura 2.30 Tanque de falso fondo con sus respectivas perforaciones

Fuente: Elaboración propia

En el lateral frontal se colocó un sello con medidas que indican cada 0.5 Lt para facilitar la medición del volumen tratado (ver Figura 2.31).



Figura 2.31 Sello para medir el volumen de agua tratada en el tanque de falso fondo

Fuente: Autoras

El mismo procedimiento se realizó para los dos tanques restantes.

2.3.2.4. Sistema de circulación

El sistema de circulación tiene como función principal distribuir el agua desde el tanque de almacenamiento de agua turbia ubicado en la parte superior del prototipo y de igual manera redistribuirla a dichos tanques (ver Figura 2.32). Esta recirculación se realiza mediante la utilización de una bomba centrífuga que succiona el agua del tanque de falso fondo llevándola por un sistema de elementos que terminan en tres válvulas esféricas regulables las cuales serán abiertas dependiendo de a que tanque se quiere distribuir el agua.



Figura 2.32 Sistema de circulación del modelo físico definitivo
Fuente: Elaboración propia

2.3.2.4.1. Materiales

Los materiales usados para la construcción del sistema de circulación fueron:

- 1 Bomba de agua centrífuga eléctrica de 0.5 HP (ver Figura 2.33)



Figura 2.33 Bomba de agua centrífuga eléctrica de 0.5 HP
Fuente: <https://boyaca.com/fam.php?cat=451&view=list>

- 3 Tee PVC plegables (1/2'') (ver Figura 2.34)



Figura 2.34 Tee de PVC plegable (1/2'')

Fuente: <https://www.ebay.com/itm/LASCO-401005BC-1-2-Socket-PVC-Tee-Sched-40-/331491429485>

- 9 Adaptadores de tanque PVC (½'') (ver Figura 2.35)



Figura 2.35 Adaptador de tanque PVC (½'')

Fuente: <https://www.disensa.com.ec/adaptador-tanque--1-2--pp-plastigama/p>

- 12 Válvulas de esfera PVC (½'') (ver Figura 2.36)



Figura 2.36 Válvula de esfera PVC (½'')

Fuente: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-610863954-valvula-esfera-1-12-bola-pvc-a-cementar-mca-era-_JM?quantity=1

- 9 Codos roscables PVC (½'') (ver Figura 2.37)



Figura 2.37 Codo roscable PVC (½'')

Fuente: <https://www.disensa.com.ec/codo-pp-r-r-1--1-4--x-90-plastigama/p>

- 11 Adaptadores macho PVC (½'') (ver Figura 2.38)



Figura 2.38 Adaptador macho PVC (½'')

Fuente: <https://www.vidri.com.sv/producto/267/Adaptador-rosca-macho-de-pvc-1-2%27%27.html>

- 6 Nudos PVC (½'') (ver Figura 2.39)



Figura 2.39 Nudo PVC (½'')

Fuente: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-680402935-tuerca-union-pvc-c40-de-2-pulg-cementar-_JM?quantity=1

- 7 Metros de tubería PVC (½'') (ver Figura 2.40)



Figura 2.40 Tubería PVC (½'')

Fuente: <https://www.disensa.com.ec/tubo-conduit-pesada-50-mm-x-3-m-plastigama/p>

- 6 Tapones hembra PVC plegables (½'') (ver Figura 2.41)



Figura 2.41 Tapón hembra PVC plegable (½'')

Fuente: <https://www.sodimac.com.mx/sodimac-mx/product/305790/Tapon-hembra-amanco-pvc-cedula-40-de-1-2-,-para-uso-de-agua-a-presion/305790>

- 17 Codos plegables PVC (½'') (ver Figura 2.42)



Figura 2.42 Codo plegable PVC (½'')

Fuente: <http://www.homedepot.com.mx/plomeria/tuberias-y-conexiones/hidraulica/codo-90-liso-pvc-1-2-337970>

- 3 Nепlos roscable PVC (1/2'') (ver Figura 2.43)



Figura 2.43 Nепlo roscable PVC (1/2'')

Fuente: <https://www.mariorubio.com.ec/producto/neplo-rr-polipropileno-1/>

- 3 Sifones rectos PVC (1/2'') (ver Figura 2.44)



Figura 2.44 Sifón recto PVC (1/2'')

Fuente: <https://es.rs-online.com/web/p/accesorios-de-tubo-pvc/2123650/>

- 2 Bushing roscable PVC (1'' a 1/2'') (ver Figura 2.45)



Figura 2.45 Bushing roscable PVC (1'' a 1/2'')

Fuente: <https://guillermogarcesb.wixsite.com/infraestructuraagua/pvc-roscable>

- 2 Cruces plegables PVC (1/2'') (ver Figura 2.46)



Figura 2.46 Cruz plegable PVC (1/2'')

Fuente: <https://www.novex.com.gt/producto/12156/CRUZ-PVC-DE-1-Pulg.html>

- 1 Unión plegable PVC (1/2'') (ver Figura 2.47)



Figura 2.47 Unión plegable PVC (1/2'')

Fuente: <https://www.elcorteingles.es/bricor/A28017247-manguito-union-tubo-pvc/>

- Pega para tubos CPVC Arrow (ver Figura 2.48)



Figura 2.48 Pega para tubos CPVC Arrow

Fuente: <https://mdpumps.com/product/arrow-cpvc-cements/>

- Cinta de teflón (ver Figura 2.49)



Figura 2.49 Cinta de teflón

Fuente: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-604597723-cinta-adhesiva-teflon-12-wf2250-herramient-industrial-wolfox-_JM?quantity=1

- Sellador IPS (ver Figura 2.50)



Figura 2.50 Sellador IPS

Fuente: https://www.google.com/search?q=sellador+ips&tbm=isch&source=univ&sa=X&ved=2ahUK Ewi_2Mju1NLIhAhUu1VkkHZsxAVIQsAR6BAgAEAE&biw=944&bih=400#imgrc=yxqIwkCtju2MmM:

- Silicón ABRO (ver Figura 2.51)



Figura 2.51 Silicón ABRO

Fuente: <http://www.abro.com/ss-1200.html>

2.3.2.4.2. Proceso constructivo

El ensamblaje del sistema se empezó con el alineamiento de los tanques para posteriormente colocar la bomba en una posición fija frente a los tanques que sirven de fondo falso. Después se instalaron todos los accesorios a la bomba y a los tanques del sistema (ver Figura 2.52). Como paso final se instalaron las tuberías difusoras (ver Figura 2.53) por las cuales circulará el agua desde los tanques de almacenamiento de agua turbia a las columnas filtrantes.

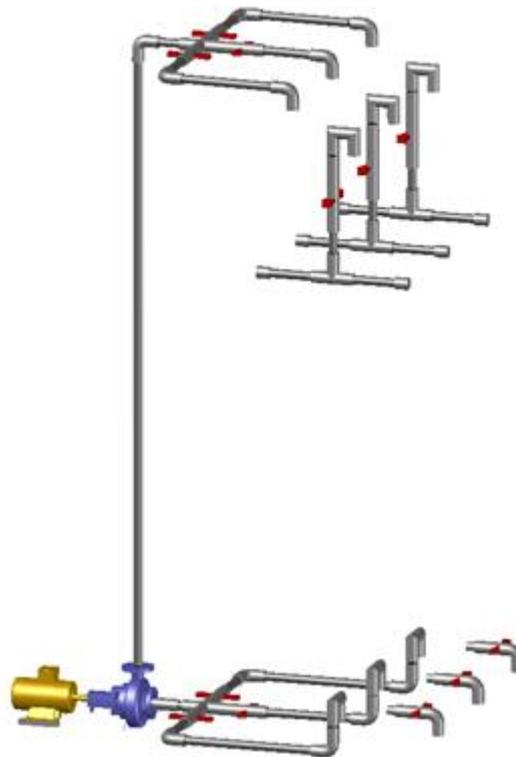


Figura 2.52 Sistema de circulación del modelo físico definitivo

Fuente: Elaboración propia

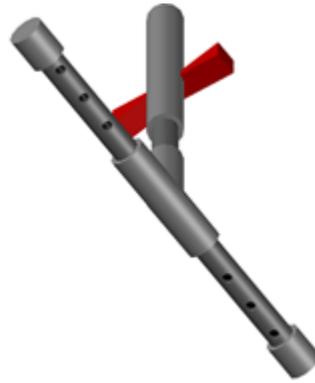


Figura 2.53 Tubería tipo flauta para distribución del agua turbia

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.5. Estructura metálica

La estructura metálica tiene como función ser el soporte de los tanques de almacenamiento de agua turbia, columnas de filtración, fondos falsos y el sistema de circulación (ver Figura 2.54). Esta estructura tiene movilidad mediante ruedas en su base.

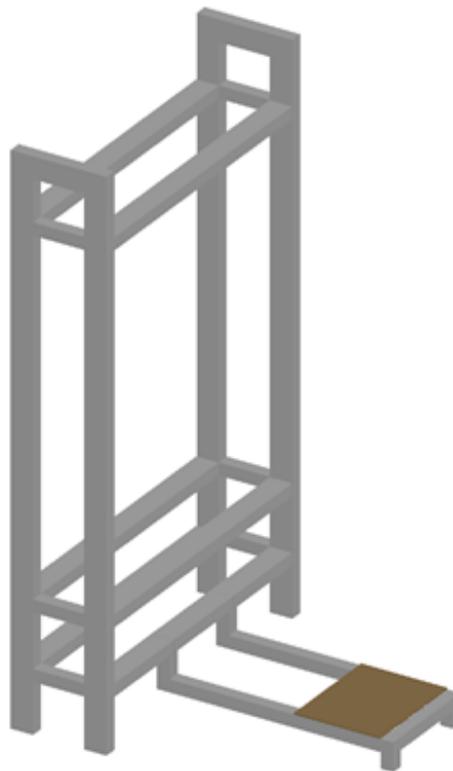


Figura 2.54 Estructura metálica del modelo físico definitivo

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.5.1. Materiales

Los materiales requeridos para la construcción de la estructura metálica fueron:

- Tubo cuadrado de aluminio (4 cm x 4 cm) (ver Figura 2.55)



Figura 2.55 Tubo cuadrado de aluminio (4 cm x 4 cm)

Fuente: <https://uro-camper.com/tiendaonline/tubos-cuadrados/2143-tubo-cuadrado-aluminio-25x25x1-mm.html>

- Tubo de aluminio (7 cm x 4 cm) (ver Figura 2.56)



Figura 2.56 Tubo de aluminio (7 cm x 4 cm)

Fuente: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/13301/tubo-rectangular-80-x-40-x-2mm-cal-14-x-6m>

- Plancha de madera (27cm x 34cm) (ver Figura 2.57)



Figura 2.57 Plancha de madera (27 cm x 34 cm)

Fuente: https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-748295333-planchar-de-madera-balsa-de-8-cm-x-12mm-_JM?quantity=1

- 4 Ruedas con seguro (ver Figura 2.58)



Figura 2.58 Rueda con seguro

Fuente: https://es.made-in-china.com/co_trolley-caster/image_3-5-Inch-Orange-PVC-Industrial-Caster-Wheels-with-Brake_ehrrhehyg_IJDTiyZcEMkQ.html

- 2 Ruedas sin seguro (ver Figura 2.59)



Figura 2.59 Rueda sin seguro

Fuente: http://es.ylcaster.com/orange-pvc-top-plate-heavy-duty-industrial-caster-wheel_p25.html

2.3.2.5.2. Proceso constructivo

Para la construcción de la estructura metálica se tomaron en cuenta las medidas de todos los elementos nombrados anteriormente para crear un solo cuerpo que soporte a todo el conjunto. Dicha estructura metálica constará de 3 niveles y una parte trasera; el tercer nivel servirá para la colocación de los tres tanques de almacenamiento de agua turbia, en el segundo nivel se colocarán las tres columnas de filtración, en el primer nivel se asentarán los fondos falsos que servirán para la recolección del agua tratada y la parte trasera es en donde se instalará el sistema de circulación. Para los tres niveles se ocuparon tubos de 7 cm x 4 cm, estos espesores se deben a que dicha estructura metálica debe soportar altos pesos, y para la parte trasera se hizo uso de tubos cuadrados de 4 cm x 4 cm. Las dimensiones de dicha estructura metálica se muestran en la Figura 2.60 y Figura 2.61.

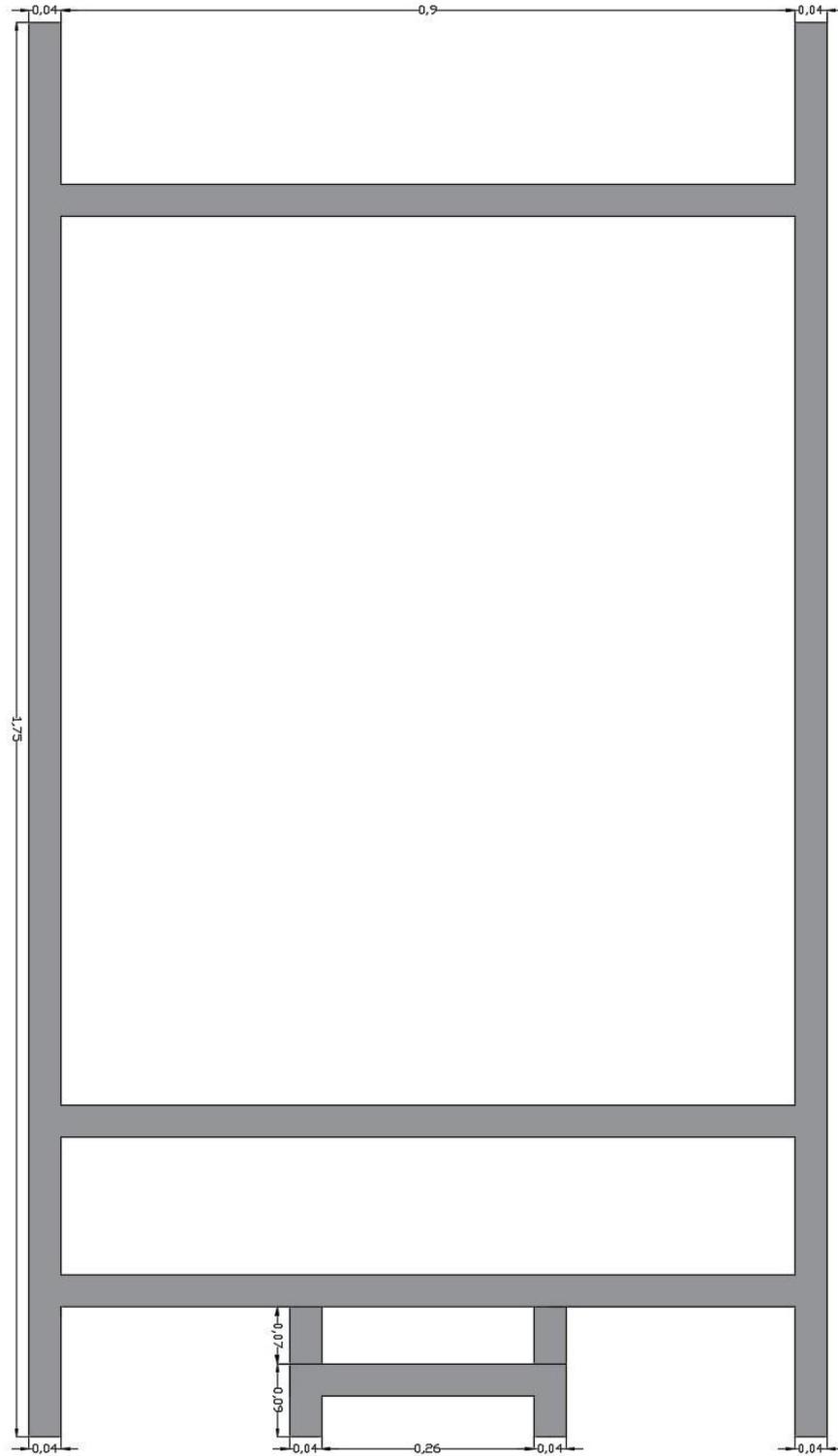


Figura 2.60 Dimensiones de la estructura metálica del modelo físico definitivo (vista frontal)
Fuente: Elaboración propia

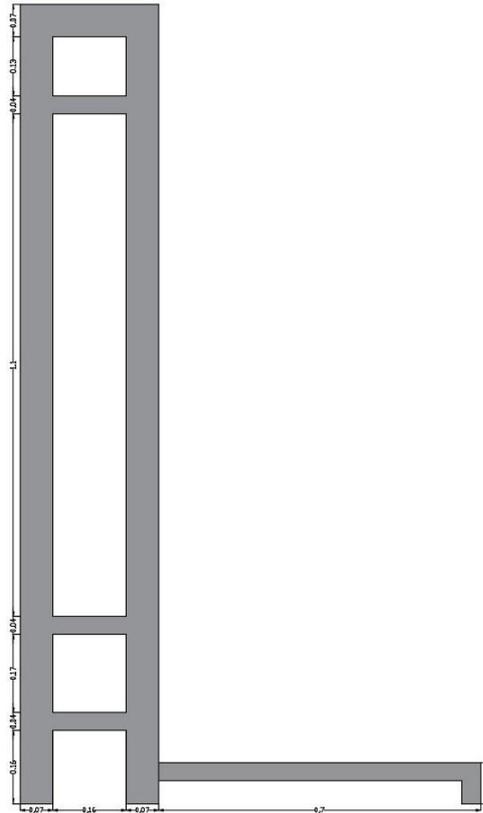


Figura 2.61 Dimensiones de la estructura metálica del modelo físico definitivo (vista lateral)

Fuente: Elaboración propia

Para facilitar el movimiento de la estructura se usaron 4 pares de ruedas con seguros en la estructura principal colocados en la base de cada tubo de aluminio y para la estructura secundaria o parte trasera se usaron dos ruedas sin seguro (ver Figura 2.62).

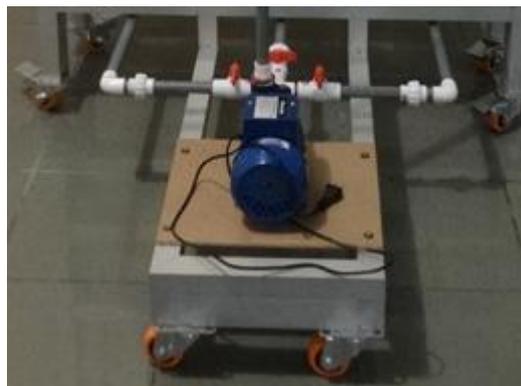


Figura 2.62 Distribución de las ruedas en la base de la estructura metálica

Fuente: Autoras

Debido al peso de las columnas de filtración, debajo de la estructura metálica se colocarán unos soportes de madera.

2.4. Pruebas

El punto primordial del prototipo de prueba es la estabilización del caudal de ingreso, el cual debe ser sumamente bajo, para ello se tuvo que regular la válvula esférica de entrada la cual nos proporcionaría un caudal bajo en la distribución del mismo a las columnas de filtración. El modelo de prueba se realizó con un tanque de plástico, el cual fue llenado con una capa de 60 cm de arena; reemplazando al material filtrante, y una capa de 10 cm de grava para soporte y drenaje.

Una vez empezado el procedimiento, se pudo observar que la válvula esférica debe ser abierta lo mínimo posible debido a que de esta manera se asegura que la distribución se realizará gota por gota a través de la tubería tipo flauta obteniendo caudales de ingreso bajos. Además, se pudo ver que al ingresar el agua a la columna de filtración el material filtrante sufría pequeñas alteraciones y que no se distribuía el agua por todo el filtro, para ello se colocó papel filtro en la superficie, el cual a más de controlar que no existan alteraciones en la superficie del material filtrante, permite que el agua se distribuya por todo el papel ocupando la totalidad del área del filtro y de esta manera se garantizaría que la misma se distribuya de manera constante.

Uno de los puntos para que funcione como filtro lento es que su tasa de filtración debe estar entre 0.1 – 0.3 m/h, esta velocidad se controla de acuerdo a la capa sobrenadante que se forma cuando ingresa el agua al filtro. Dentro de la parte experimental, se visualizó el nivel de la capa sobrenadante, el cual debe ser óptimo para que la biocapa no se sature.

Debido a que dicho sistema no solo trabajará de manera individual sino también en forma conjunta; es decir, que existirá una recirculación, se hizo uso de una bomba la cual permite una elevación de agua máximo hasta 3 metros y tiene una potencia de 0.5 HP. Se debe tomar en cuenta que no se debe encender dicha bomba hasta que se haya acabado el proceso de filtrado de cada columna, por lo tanto, el proceso demoraría más.

También se pudo evidenciar que cuando se colocaron los respectivos adaptadores de tanque se perdía demasiado volumen, para ello se realizó un sistema en forma de u el

cual funciona de acuerdo a la carga hidráulica haciendo que se vacíen los tanques, si bien no es completamente, sólo queda un remanente de 0.25 litros o hasta menos.

Para facilitar la colocación del material y el mantenimiento del prototipo, se debió colocar una puerta en cada columna de filtración, debido a que por su altura resulta complicado limpiarlas.

2.5. Validación de datos

El dimensionamiento definitivo del modelo físico se encuentra en la Tabla 2.2 y Tabla 2.3.

Tabla 2.2 Dimensionamiento del tanque de almacenamiento de agua turbia, de la caja del filtro y del tanque de falso fondo

Diseño	Valores asumidos
Especificaciones del tanque de almacenamiento de agua turbia	
Largo	30 cm
Ancho	30 cm
Alto	20 cm
Especificaciones de la caja del filtro	
Filtro de arena, antracita y carbón activado	
Largo	30 cm
Ancho	30 cm
Alto	90 cm
Especificaciones del tanque de falso fondo	
Largo	30 cm
Ancho	30 cm
Alto	17 cm

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.3 Especificaciones del lecho filtrante y del drenaje

Diseño	Valores asumidos
Especificaciones del lecho filtrante	
Altura del lecho filtrante	
Arena	35 cm
Antracita	35 cm
Carbón activado	35 cm
Capa de soporte	
Gravilla	15 cm
Grava fina	10 cm
Grava gruesa	5 cm
Especificaciones de drenaje	
Diámetro de los orificios	6 mm
Espaciamiento entre orificios	7.5 cm

Fuente: Elaboración propia

3. CAPÍTULO III. ELABORACIÓN DE LA GUÍA METODOLÓGICA

GUÍA METODOLÓGICA PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE LABORATORIO EN EL MODELO FÍSICO DE COLUMNAS DE FILTRACIÓN PARA LA ASIGNATURA DE HIDROSANITARIA DE LA UNIVERSIDAD DEL AZUAY

Introducción

Este capítulo presenta una guía metodológica que ha sido desarrollada para ser utilizada en el laboratorio por los estudiantes de la asignatura de Hidrosanitaria.

Dispone de la información necesaria a efecto de ejemplificar el proceso de filtración al que se someterá una muestra de agua turbia sintética. En este documento se encuentra el proceso experimental donde se detalla los respectivos recursos y tablas necesarias a emplear.

3.1. Ensayo en el modelo físico de columnas de filtración

3.1.1. Equipo y herramientas

- **Modelo físico:** Maqueta conformada por 3 columnas filtrantes, cada una contiene un tanque de almacenamiento de agua turbia con capacidad máxima de 15 Lt, el filtro correspondiente y un tanque de falso fondo con capacidad de 12 Lt donde se deposita el agua tratada. Además, cuenta con una bomba de 0.5 HP utilizada para recirculación.
- **Balanza:** Se utilizará para medir la cantidad en gramos de caolín necesarios para la preparación del agua turbia sintética.
- **Agitador:** Se utilizará en la preparación del agua turbia sintética.
- **Cronómetro:** Se utilizará para tomar el tiempo de vaciado del tanque de almacenamiento de agua turbia y el tiempo de filtrado.
- **Recipientes plásticos:** Para depositar las muestras del agua filtrada.

3.1.2. Metodología

Para ejemplificar en el modelo físico el proceso de filtración, el ensayo se realizó con una muestra de agua turbia sintética.

3.1.2.1. Preparación del agua turbia sintética (ATS)

El agua turbia sintética (ATS) fue preparada empleando la metodología sugerida por Okuda et al. (2001a), Okuda et al. (2001b), Más y Rubí et al. (2012) y Asrafuzzaman et al. (2011). Se adicionaron 5g de caolín por cada litro de agua potable (5000mg/Lt). Dicha suspensión fue agitada de forma continua durante 1 hora para lograr la dispersión uniforme de las partículas de caolín; transcurrido ese tiempo, se dejó reposar durante 24 horas para la completa hidratación del material arcilloso.

Por ser una suspensión estable, es utilizada en prácticas de laboratorio en donde se requiera analizar una muestra con baja turbiedad. A pesar de no representar este modelo el agua real de cualquier ciudad su comportamiento es similar a la turbidez en aguas crudas (Ndabigengesere, et al., 1995; López, et al., 2008)

Una vez transcurrido el período de hidratación de 24 horas se procedió a utilizarla.

3.1.2.2. Procedimiento

- 1) Llenar manualmente con el ATS el tanque de almacenamiento de agua turbia del filtro de arena hasta llegar al nivel correspondiente a 10 Lt.
- 2) Tomar una muestra del ATS para determinar mediante un análisis de laboratorio la turbiedad a la entrada del filtro.
- 3) Regular el caudal que ingresará al filtro colocando la válvula de esfera A en la posición 2.
- 4) Tomar el tiempo que se demora en vaciar el tanque de almacenamiento de agua turbia para calcular el caudal que ingresa al filtro.
- 5) Calcular el caudal de ingreso mediante la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

Q = Caudal de ingreso al filtro en Lt/h,

V = Volumen colocado en el tanque de almacenamiento de agua turbia en Lt y,

t = Tiempo que se demora en vaciar el tanque de almacenamiento de agua turbia en h.

- 6) Medir un tiempo T_f en segundos, necesarios para que el nivel de agua que se forma sobre la capa filtrante baje una distancia denominada como altura H .
- 7) Calcular la tasa de filtración mediante la siguiente fórmula:

$$v_f = \frac{V_f}{A_f \times T_f} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

v_f = Tasa de filtración en $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$,

V_f = Volumen filtrado en m^3 ,

A_f = Área superficial del filtro en m^2 ,

T_f = Tiempo de filtrado en s.

$$V_f = A_f \times H \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

H = Altura de agua sobrenadante en m.

- 8) Tomar el tiempo en que se demora en llenar el tanque de falso fondo desde que cae la primera gota para determinar el caudal filtrado.
- 9) Calcular el caudal filtrado mediante la siguiente fórmula:

$$Q_f = \frac{V_F}{T_F} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

Q_f = Caudal filtrado en Lt/h,

V_F = Volumen de agua filtrada recolectada en Lt y,

T_F = Tiempo que tomó recolectar el agua filtrada en h.

- 10) Una vez lleno el tanque de falso fondo, colocar un recipiente al frente del filtro y abrir la válvula de esfera 1 para recolectar el agua tratada.
- 11) Tomar una muestra del tanque de falso fondo para determinar la turbiedad a la salida del filtro.
- 12) Repetir el mismo proceso en los filtros de antracita y carbón activado.

3.1.2. Cálculos

Caudal de ingreso al filtro

Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1 Caudales de ingreso a los filtros obtenidos

Filtro	Volumen de agua a tratar (Lt)	Tiempo de vaciado del tanque de almacenamiento (h)	Caudal de ingreso (Lt/h)	Caudal de ingreso (m³/d)
Arena	10	1.85	5.41	0.13
Antracita	10	1.60	6.25	0.15
Carbón activado	10	1.45	6.90	0.17

Fuente: Elaboración propia.

Tasa de filtración

Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2 Tasas de filtración obtenidas

Filtro	Área superficial del filtro (m²)	Altura H de agua (m)	Volumen filtrado (m³)	Área del lecho filtrante (m²)	Tiempo de filtrado de la altura H (s)	Tasa de filtración (m/h)
Arena	0.09	0.0020	0.00018	0.09	50	0.14
Antracita	0.09	0.0025	0.00027	0.09	55	0.16
Carbón activado	0.09	0.0030	0.00036	0.09	57	0.19

Fuente: Elaboración propia.

Caudal filtrado

Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3 Caudales filtrados obtenidos

Filtro	Volumen filtrado (Lt)	Tiempo de filtrado (h)	Caudal filtrado (Lt/h)
Arena	9	8	1.13
Antracita	9	8	1.13
Carbón activado	8.5	8	1.06

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Resultados

Tasa de filtración

Como se puede observar en los cálculos realizados presentados en la Tabla 3.2, las tasas de filtración se encuentran dentro del rango establecido en los parámetros de diseño de filtros lentos que son entre 0.1 – 0.3 m/h.

Eficiencia en la remoción de turbiedad de los filtros

El principal alcance que tiene el modelo físico es la remoción de la turbiedad en una muestra de agua turbia sintética.

El agua turbia sintética fue tratada en cada columna de filtración bajo condiciones ambientales normales. Antes de iniciar con el proceso de filtración se tomó una muestra de 250mL del agua turbia sintética que fue tratada en el modelo físico para determinar el valor de turbiedad a la entrada del filtro y luego de 8 horas del proceso de filtrado se tomó de igual manera una muestra de 250mL de cada columna filtrante, respectivamente, para determinar la turbiedad a la salida.

Los valores obtenidos mediante los análisis de laboratorio se encuentran en la Tabla 3.4.

La eficiencia de remoción de la turbiedad está determinada por la turbidez inicial y la turbidez final como se puede observar en la Ecuación 11:

$$\text{Eficiencia de remoción de la turbiedad (\%)} = \frac{\text{Turbiedad a la entrada del filtro (NTU)} - \text{Turbiedad a la salida del filtro (NTU)}}{\text{Turbiedad a la entrada del filtro (NTU)}} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Ecuación 11. Eficiencia de remoción de la turbiedad

Fuente: (Gómez Gutiérrez, 2010)

Tabla 3.4 Resultados de turbiedad

Filtro	Turbiedad a la entrada del filtro (NTU)	Turbiedad a la salida del filtro (NTU)	Eficiencia de remoción de la turbiedad (%)
Arena	16	0.5	97
Antracita	16	3.2	80
Carbón activado	16	0.5	97

Fuente: Elaboración propia

Al comparar los resultados obtenidos en laboratorio, se puede observar que el tratamiento es muy eficaz debido a que se obtuvieron porcentajes altos de remoción de turbiedad.

3.2. Guía metodológica para la realización del ensayo de laboratorio en el modelo físico de columnas de filtración - Sistema individual

3.2.1. Introducción

La filtración es un proceso físico – químico que trata el agua pasándola a través de lechos de materiales granulares que retiran y retienen los contaminantes que ésta contenga.

3.2.2. Objetivos del ensayo de laboratorio

3.2.2.1. Objetivo general

Observar y comprender un sistema de filtración como parte del proceso de tratamiento del agua, mediante el uso de filtros de arena, antracita y carbón activado.

3.2.2.2. Objetivos específicos

1. Determinar las tasas de filtración reales.
2. Caracterizar la muestra de agua turbia sintética antes y después del proceso de filtración para evaluar la eficiencia de remoción de turbidez de cada filtro.

3.2.3. Descripción

Este ensayo de laboratorio se basa en la utilización del modelo físico que consiste en tres columnas de filtración (una de arena, una de antracita y una de carbón activado), con el fin de profundizar los conocimientos referentes al proceso de filtración.

3.2.4. Equipo y herramientas

- Recipientes plásticos
- Balanza
- Agitador
- Cronómetro
- Modelo físico (ver Figura 3.1)



Figura 3.1 Modelo físico

Fuente: Autoras

3.2.5. Fórmulas

Las fórmulas a utilizar en el desarrollo de la práctica son las siguientes:

Ecuación Caudal de ingreso al filtro

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

Q = Caudal de ingreso al filtro en Lt/h,

V = Volumen colocado en el tanque de almacenamiento de agua turbia en Lt y,

t = Tiempo que se demora en vaciar el tanque de almacenamiento de agua turbia en h.

Ecuación Tasa de filtración

$$v_f = \frac{V_f}{A_f \times T_f} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

v_f = Tasa de filtración en $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$,

V_f = Volumen filtrado en m^3 ,

A_f = Área superficial del filtro en m^2 y,

T_f = Tiempo de filtrado en s.

$$V_f = A_f \times H \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

H = Altura de agua sobrenadante en m.

Ecuación Caudal Filtrado

$$Q_f = \frac{V_F}{T_F} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

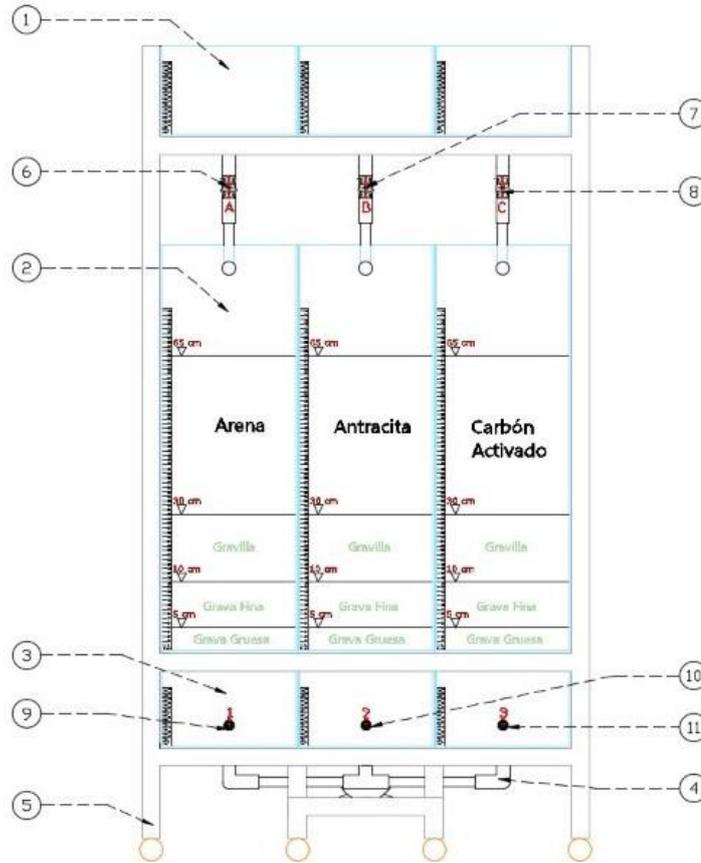
Q_f = Caudal filtrado en Lt/h,

V_F = Volumen de agua filtrada recolectada en Lt y,

T_F = Tiempo que tomó recolectar el agua filtrada en h.

3.2.6. Esquema del modelo físico definitivo

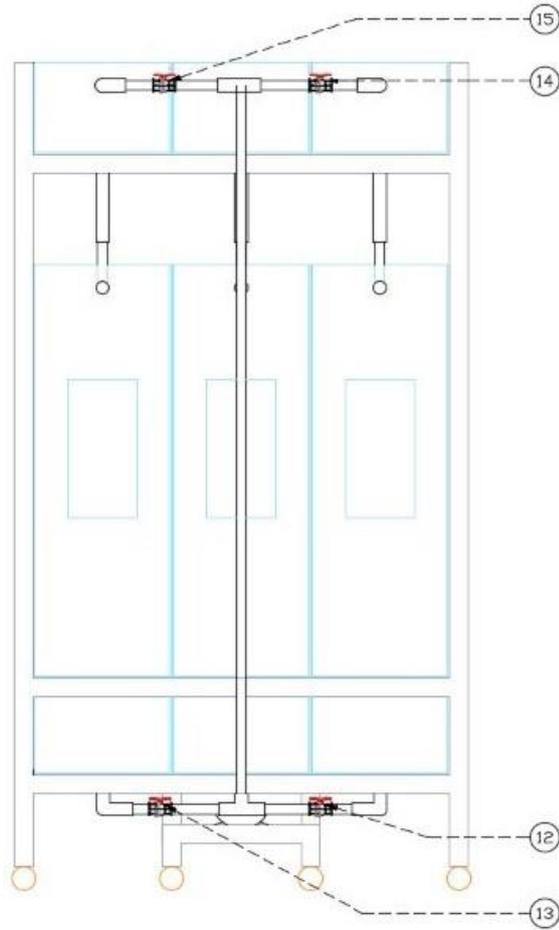
En la Figura 3.2, Figura 3.3 y Figura 3.4 se presentan de forma detallada los elementos que conforman el prototipo que se utilizará para la realización de la práctica de laboratorio.



- ① Tanques de almacenamiento de agua turbia
- ② Columnas de filtración
- ③ Tanques de falso fondo
- ④ Sistema de circulación
- ⑤ Estructura metálica
- ⑥ Llave A
- ⑦ Llave B
- ⑧ Llave C
- ⑨ Llave 1
- ⑩ Llave 2
- ⑪ Llave 3

Figura 3.2 Esquema Modelo físico (vista frontal)

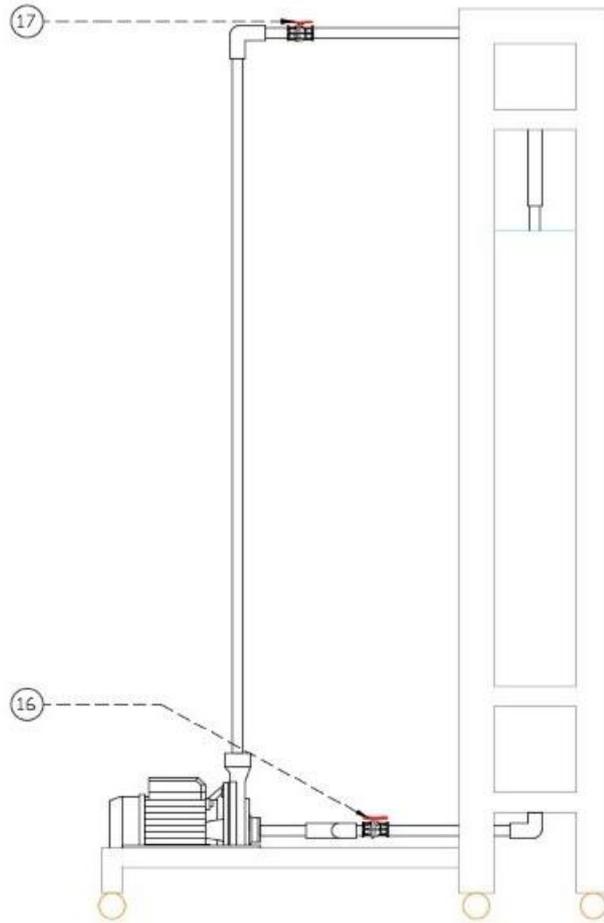
Fuente: Elaboración propia



- ⑫ Llave D
- ⑬ Llave F
- ⑭ Llave G
- ⑮ Llave I

Figura 3.3 Esquema Modelo físico (vista posterior)

Fuente: Elaboración propia



①⑥ Llave E

①⑦ Llave H

Figura 3.4 Esquema Modelo físico (vista lateral)

Fuente: Elaboración propia

3.2.7. Metodología

Previamente se debe preparar el agua turbia sintética (ATS) que será utilizada en la práctica de laboratorio.

- 1) Llenar un recipiente con 30 litros de agua potable.

Nota: Para garantizar la homogeneidad de la muestra sintética, se deben preparar los 30 litros necesarios en un mismo recipiente.

- 2) Adicionar 5g de caolín (ver Figura 3.5) por cada litro de agua utilizado.



Figura 3.5 Caolín

Fuente: Autoras

- 3) Agitar dicha suspensión de forma continua durante 1 hora para lograr la dispersión uniforme de las partículas de caolín.
- 4) Transcurrido ese tiempo, dejar reposar la muestra (ver Figura 3.6) durante 24 horas para la completa hidratación del material arcilloso.



Figura 3.6 Muestra de agua turbia sintética

Fuente: Autoras

- 5) Transcurrido el período de hidratación, tomar 250 mL de la muestra de ATS en un recipiente (ver Figura 3.7) para determinar mediante un análisis de laboratorio la turbiedad a la entrada de los filtros.



Figura 3.7 Muestra de agua turbia sintética a la entrada del filtro

Fuente: Autoras

- 6) Antes de iniciar con la práctica, se debe verificar que todas las válvulas de esfera se encuentren cerradas.

Nota: Una válvula de esfera se encuentra abierta cuando su manija está paralela a la dirección de la tubería y cerrada cuando se encuentra perpendicular a la misma (ver Figura 3.8).



a) Válvula de esfera abierta. b) Válvula de esfera cerrada.

Figura 3.8 Válvulas de esfera. a) Válvula de esfera abierta y b) Válvula de esfera cerrada.

Fuente: Autoras

- 7) Llenar manualmente con la muestra de ATS el tanque de almacenamiento de agua turbia del filtro de arena (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.2) hasta llegar al nivel correspondiente a 10 Lt (ver Figura 3.9).



Figura 3.9 Tanque de almacenamiento de agua turbia lleno hasta el nivel correspondiente a 10 Lt
Fuente: Autoras

- 8) Una vez lleno el tanque de almacenamiento de agua turbia, se debe regular el caudal que ingresará al filtro colocando la válvula de esfera **A** (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.2) en la posición **2** como se indica en la Figura 3.10.



Figura 3.10 Válvula de esfera A en la posición 2
Fuente: Autoras

Nota: Todas las válvulas de esfera son controladas manualmente, y toda apertura o cierre de las mismas debe hacerse lentamente.

9) Con el cronómetro tomar el tiempo que se demora en vaciar el tanque de almacenamiento de agua turbia para posteriormente, calcular el caudal que ingresa al filtro.

10) Calcular el caudal de ingreso al filtro mediante la Ecuación 7.

11) Medir un tiempo T_f en segundos, necesarios para que el nivel de agua que se forma sobre la capa filtrante baje una distancia denominada como altura H (ver Figura 3.11).



Figura 3.11 Nivel de agua que se forma sobre la capa filtrante

Fuente: Autoras

12) Calcular la tasa de filtración mediante la Ecuación 8.

13) Tomar el tiempo en que se demora en llenar el tanque de falso fondo del filtro de arena (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.2) desde que cae la primera gota, para calcular el caudal filtrado.

14) Calcular el caudal filtrado del filtro de arena mediante la Ecuación 10.

15) Una vez lleno el tanque de falso fondo, colocar un recipiente al frente del filtro y abrir la válvula de esfera **1** (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.2) para recolectar el agua tratada.

- 16) Tomar una muestra de 250 mL a la salida del filtro de arena (ver Figura 3.12) para determinar la turbiedad.



Figura 3.12 Muestra de agua turbia sintética a la salida del filtro de arena
Fuente: Autoras

- 17) Repetir el paso 7 en el tanque de almacenamiento de agua turbia del filtro de antracita (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.2).
- 18) Regular el caudal que ingresará al filtro colocando la válvula de esfera **B** (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.2) en la posición **2** como se indica en la Figura 3.13.



Figura 3.13 Válvula de esfera B en la posición 2
Fuente: Autoras

19) Repetir los pasos 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

20) Una vez lleno el tanque de falso fondo, colocar un recipiente al frente del filtro y abrir la válvula de esfera **2** (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.2) para recolectar el agua tratada.

21) Tomar una muestra de 250 mL a la salida del filtro de antracita (ver Figura 3.14) para determinar la turbiedad.



Figura 3.14 Muestra de agua turbia sintética a la salida del filtro de antracita
Fuente: Autoras

22) Repetir el paso 7 en el tanque de almacenamiento de agua turbia del filtro de carbón activado (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.2).

23) Regular el caudal que ingresará al filtro colocando la válvula de esfera **C** (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.2) en la posición **2** como se indica en la Figura 3.15.



Figura 3.15 Válvula de esfera C en la posición 2

Fuente: Autoras

24) Repetir los pasos 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

25) Una vez lleno el tanque de falso fondo, colocar un recipiente al frente del filtro y abrir la válvula de esfera **3** (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.2) para recolectar el agua tratada.

26) Tomar una muestra de 250 mL a la salida del filtro de carbón activado (ver Figura 3.16) para determinar la turbiedad.



Figura 3.16 Muestra de agua turbia sintética a la salida del filtro de carbón activado

Fuente: Autoras

27) Registrar los resultados de caudal de ingreso en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Valores de caudal de ingreso en el filtro

Filtro	Volumen de agua a tratar (Lt)	Tiempo de vaciado del tanque de almacenamiento de agua turbia (h)	Caudal de ingreso (Lt/h)	Caudal de ingreso (m³/d)
Arena				
Antracita				
Carbón activado				

Fuente: Elaboración propia.

28) Registrar los resultados de tasa de filtración en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Valores de tasa de filtración en el filtro

Filtro	Área superficial del filtro (m²)	Altura H de agua (m)	Volumen filtrado (m³)	Área del lecho filtrante (m²)	Tiempo de filtrado de la altura H (s)	Tasa de filtración (m/h)
Arena	0.09			0.09		
Antracita	0.09			0.09		
Carbón activado	0.09			0.09		

Fuente: Elaboración propia.

29) Registrar los resultados de caudal filtrado en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Valores de caudal filtrado

Filtro	Volumen filtrado (Lt)	Tiempo de filtrado (h)	Caudal filtrado (Lt/h)
Arena			
Antracita			
Carbón activado			

Fuente: Elaboración propia.

30) Registrar los valores de turbiedad obtenidos mediante análisis de laboratorio en la Tabla 3.8 y determinar la eficiencia de remoción de turbiedad en cada filtro.

Tabla 3.8 Valores de turbiedad a la entrada y salida del filtro

Filtro	Turbiedad a la entrada del filtro (NTU)	Turbiedad a la salida del filtro (NTU)	Eficiencia remoción de turbiedad (%)
Arena			
Antracita			
Carbón activado			

Fuente: Elaboración propia

Limpieza del modelo físico

Limpieza de los tanques de almacenamiento de agua turbia:

- 31) Cerrar las válvulas de esfera A, B y C.
- 32) Desunir los nudos que unen estos tanques con las tuberías difusoras tipo flauta.
- 33) Retirar los codos que se encuentran en la parte superior de los tanques que los unen al sistema de recirculación.
- 34) Con mucho cuidado, retirar cada tanque de la estructura.
- 35) Remover el material sedimentado que pueda haber quedado en la base del tanque, humedecer las paredes y enjabonarlas para evitar cualquier residuo de sedimento o algún microorganismo, posteriormente, enjuagarlos y dejarlos secar.
- 36) Colocar nuevamente con mucho cuidado los tanques sobre la estructura.
- 37) Colocar los codos en la parte superior para unirlos al sistema de recirculación y unir los nudos entre los tanques y las tuberías difusoras tipo flauta asegurándose de que éstas queden niveladas de lo contrario se vería afectado el caudal de ingreso al filtro.

Limpieza de los tanques de falso fondo:

- 38) Colocar una manguera en la llave de paso de la red de distribución de agua potable más cercana.
- 39) Abrir la válvula de esfera que se encuentra al frente del tanque que se va a limpiar (Válvula de esfera 1: tanque de falso fondo del filtro de arena, válvula de esfera 2:

tanque de falso fondo del filtro de antracita y válvula de esfera **3**: tanque de falso fondo del filtro de carbón activado) asegurándose de que la válvula de esfera que lo une al sistema de recirculación se encuentre cerrada para evitar que el flujo se dirija a la bomba (Válvula de esfera **D**: tanque de falso fondo del filtro de arena, válvula de esfera **E**: tanque de falso fondo del filtro de antracita y válvula de esfera **F**: tanque de falso fondo del filtro de carbón activado).

- 40) Inyectar agua hasta que se llene un nivel superior a 10 Lt, cerrar la válvula de esfera frontal y la llave de paso. Desunir el nudo que une al tanque con el sistema de recirculación para conseguir un desagüe.
- 41) Repetir el paso 40 hasta que cambie el color del agua que sale por el desagüe.
- 42) Una vez completado el paso 40, unir nuevamente los tanques al sistema de recirculación y cerrar todas las válvulas de esfera.

3.3. Guía metodológica para la realización del ensayo de laboratorio en el modelo físico de columnas de filtración - Sistema combinado

3.3.1. Introducción

La filtración es un proceso físico – químico que trata el agua pasándola a través de lechos de materiales granulares que retiran y retienen los contaminantes que ésta contenga.

3.3.2. Objetivos del ensayo de laboratorio

3.3.2.1. Objetivo general

Observar y comprender un sistema de filtración como parte del proceso de tratamiento del agua, mediante el uso de filtros de arena, antracita y carbón activado.

3.3.2.2. Objetivos específicos

1. Determinar las tasas de filtración reales.
2. Caracterizar la muestra de agua turbia sintética antes y después del proceso de filtración para evaluar la eficiencia de remoción de turbidez del sistema combinado.

3.3.3. Descripción

Este ensayo de laboratorio se basa en la utilización del modelo físico que consiste en tres columnas de filtración (una de arena, una de antracita y una de carbón activado), con el fin de profundizar los conocimientos referentes al proceso de filtración.

3.3.4. Equipo y herramientas

- Recipientes plásticos
- Balanza
- Agitador
- Cronómetro
- Modelo físico (ver Figura 3.1)



Figura 3.1 Modelo físico

Fuente: Autoras

3.3.5. Fórmulas

Las fórmulas a utilizar en el desarrollo de la práctica son las siguientes:

Ecuación Caudal de ingreso al filtro

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

Q = Caudal de ingreso al filtro en Lt/h,

V = Volumen colocado en el tanque de almacenamiento de agua turbia en Lt y,

t = Tiempo que se demora en vaciar el tanque de almacenamiento de agua turbia en h.

Ecuación Tasa de filtración

$$v_f = \frac{V_f}{A_f \times T_f} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

v_f = Tasa de filtración en $m^3/m^2/d$,

V_f = Volumen filtrado en m^3 ,

A_f = Área superficial del filtro en m^2 ,

T_f = Tiempo de filtrado en s.

$$V_f = A_f \times H \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

H = Altura de agua sobrenadante en m.

Ecuación Caudal Filtrado

$$Q_f = \frac{V_F}{T_F} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

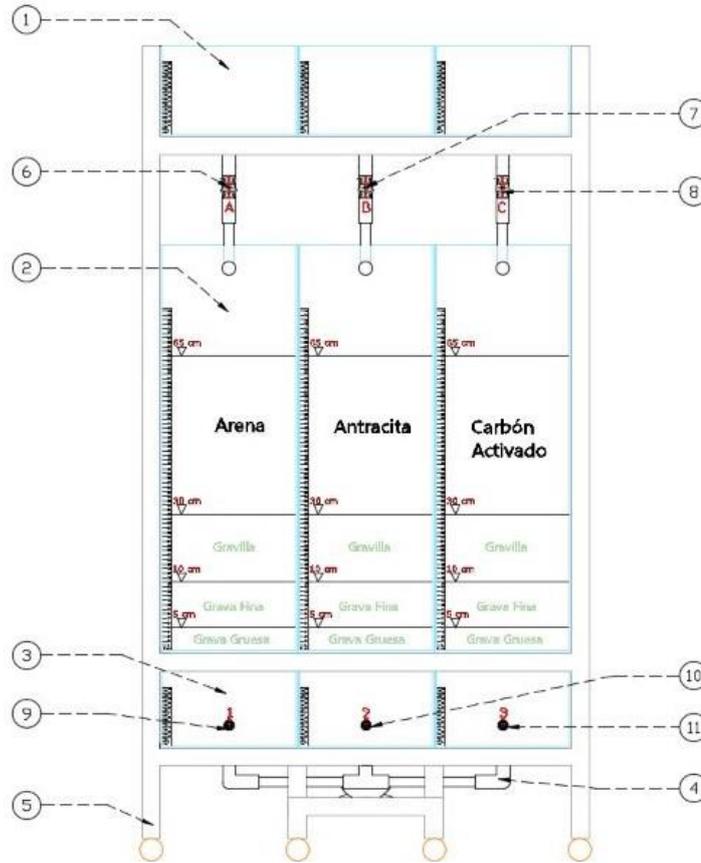
Q_f = Caudal filtrado en Lt/h,

V_F = Volumen de agua filtrada recolectada en Lt y,

T_F = Tiempo que tomó recolectar el agua filtrada en h.

3.3.6. Esquema del modelo físico

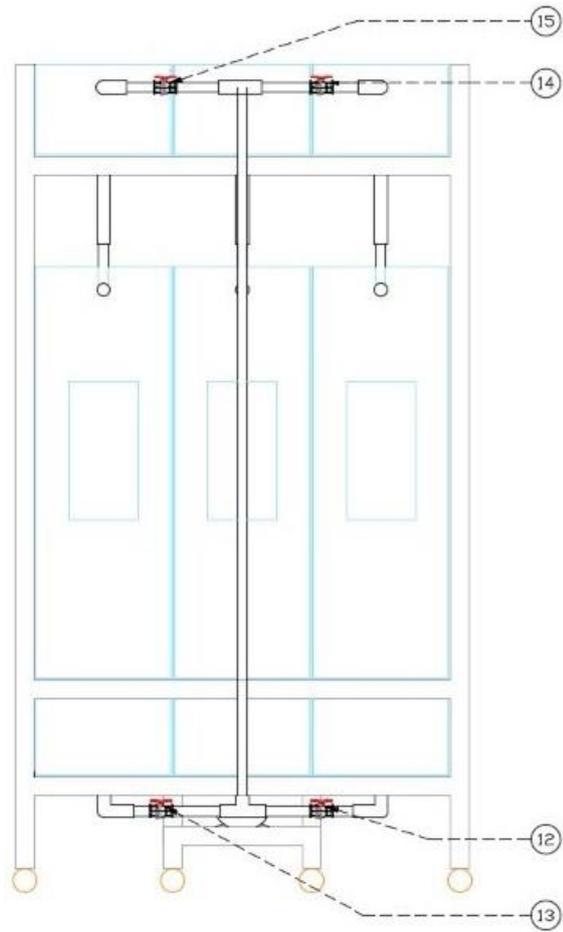
En la Figura 3.2, Figura 3.3 y Figura 3.4 se presentan de forma detallada los elementos que conforman el prototipo que se utilizará para la realización de la práctica de laboratorio.



- ① Tanques de almacenamiento de agua turbia
- ② Columnas de filtración
- ③ Tanques de falso fondo
- ④ Sistema de circulación
- ⑤ Estructura metálica
- ⑥ Llave A
- ⑦ Llave B
- ⑧ Llave C
- ⑨ Llave 1
- ⑩ Llave 2
- ⑪ Llave 3

Figura 3.2 Esquema Modelo físico (vista frontal)

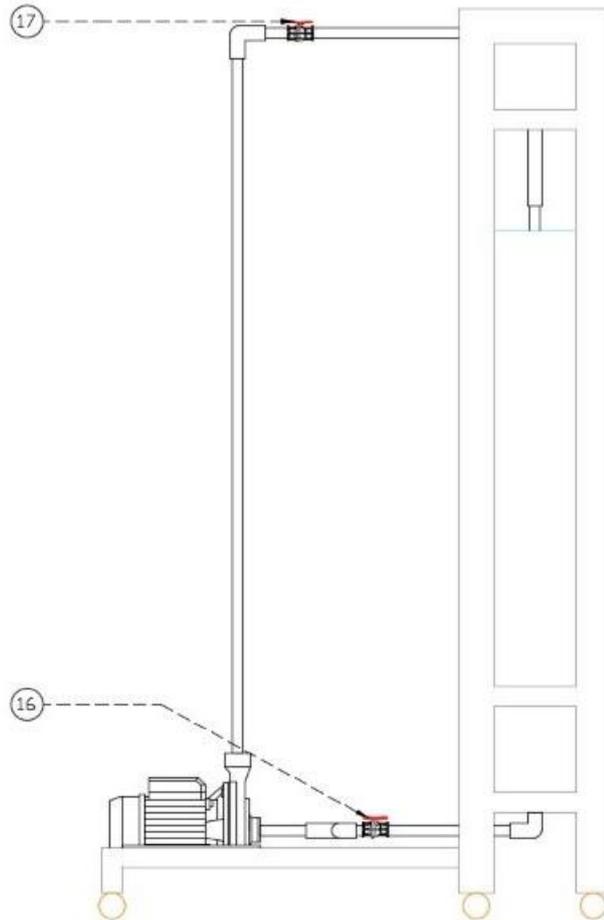
Fuente: Elaboración propia



- ⑫ Llave D
- ⑬ Llave F
- ⑭ Llave G
- ⑮ Llave I

Figura 3.3 Esquema Modelo físico (vista posterior)

Fuente: Elaboración propia



①⑥ Llave E

①⑦ Llave H

Figura 3.4 Esquema Modelo físico (vista lateral)

Fuente: Elaboración propia

3.3.7. Metodología

Previamente se debe preparar el agua turbia sintética (ATS) que será utilizada en la práctica de laboratorio.

- 1) Llenar un recipiente con 12 litros de agua potable.

Nota: Para garantizar la homogeneidad de la muestra sintética, se deben preparar los 12 litros necesarios en un mismo recipiente.

- 2) Adicionar 5g de caolín (ver Figura 3.5) por cada litro de agua utilizado.



Figura 3.5 Caolín

Fuente: Autoras

- 3) Agitar dicha suspensión de forma continua durante 1 hora para lograr la dispersión uniforme de las partículas de caolín.
- 4) Transcurrido ese tiempo, dejar reposar la muestra durante 24 horas para la completa hidratación del material arcilloso.
- 5) Transcurrido el período de hidratación, tomar 250 mL de la muestra de ATS en un recipiente (ver Figura 3.7) para determinar mediante un análisis de laboratorio la turbiedad a la entrada de los filtros.



Figura 3.7 Muestra de agua turbia sintética a la entrada del filtro

Fuente: Autoras

- 6) Antes de iniciar con la práctica, se debe verificar que todas las válvulas de esfera se encuentren cerradas.

Nota: Una válvula de esfera se encuentra abierta cuando su manija está paralela a la dirección de la tubería, y cerrada cuando se encuentra perpendicular a la misma (ver Figura 3.8).



a) Válvula de esfera abierta. b) Válvula de esfera cerrada.

Figura 3.8 Válvulas de esfera. a) Válvula de esfera abierta y b) Válvula de esfera cerrada.

Fuente: Autoras

- 7) Llenar manualmente con la muestra de agua a tratar el tanque de almacenamiento de agua turbia del filtro con el cual se decidió iniciar el proceso (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.2) hasta llegar al nivel correspondiente a 12 Lt.
- 8) Una vez lleno el tanque de almacenamiento de agua turbia, se debe regular el caudal que ingresará al filtro colocando la válvula de esfera **A** (en caso de que se inicie con el filtro de arena) en la posición **2** como se indica en la Figura 3.10.



Figura 3.10 Válvula de esfera A en la posición 2

Fuente: Autoras

Nota: Todas las válvulas de esfera son controladas manualmente, y toda apertura o cierre de las mismas debe hacerse lentamente.

9) Con el cronómetro tomar el tiempo que se demora en vaciar el tanque de almacenamiento de agua turbia para posteriormente, calcular el caudal que ingresa al filtro.

10) Calcular el caudal de ingreso mediante la Ecuación 7.

11) Medir un tiempo T_f en segundos, necesarios para que el nivel de agua que se forma sobre la capa filtrante baje una distancia denominada como altura H (ver Figura 3.11).



Figura 3.11 Nivel de agua que se forma sobre la capa filtrante

Fuente: Autoras

12) Calcular la tasa de filtración mediante la Ecuación 8.

13) Tomar el tiempo en que se demora en llenar el tanque de falso fondo (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.2) desde que cae la primera gota, para calcular el caudal filtrado.

14) Calcular el caudal filtrado en el filtro de arena mediante la Ecuación 10.

15) Una vez que se haya llenado el tanque de falso fondo, se debe abrir la válvula de esfera **D** (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.3), para que el flujo se dirija hacia la bomba.

16) Conectar el cable de la bomba al enchufe más cercano.

Nota: Antes de encender la bomba se debe colocar un poco de agua en ella, para lo cual se debe remover el tornillo que ésta contiene como se indica en la Figura 3.17.



Figura 3.17 Colocación de agua en la bomba

Fuente: Autoras

17) Abrir la válvula de esfera **H** (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.4), en caso de que el siguiente filtro sea el de antracita.

18) Una vez que se haya llenado el tanque de almacenamiento de agua turbia del filtro de antracita, apagar la bomba y cerrar las válvulas de esfera **D** y **H**.

Nota: En la Figura 3.18 se indica el funcionamiento del filtro arena – antracita.

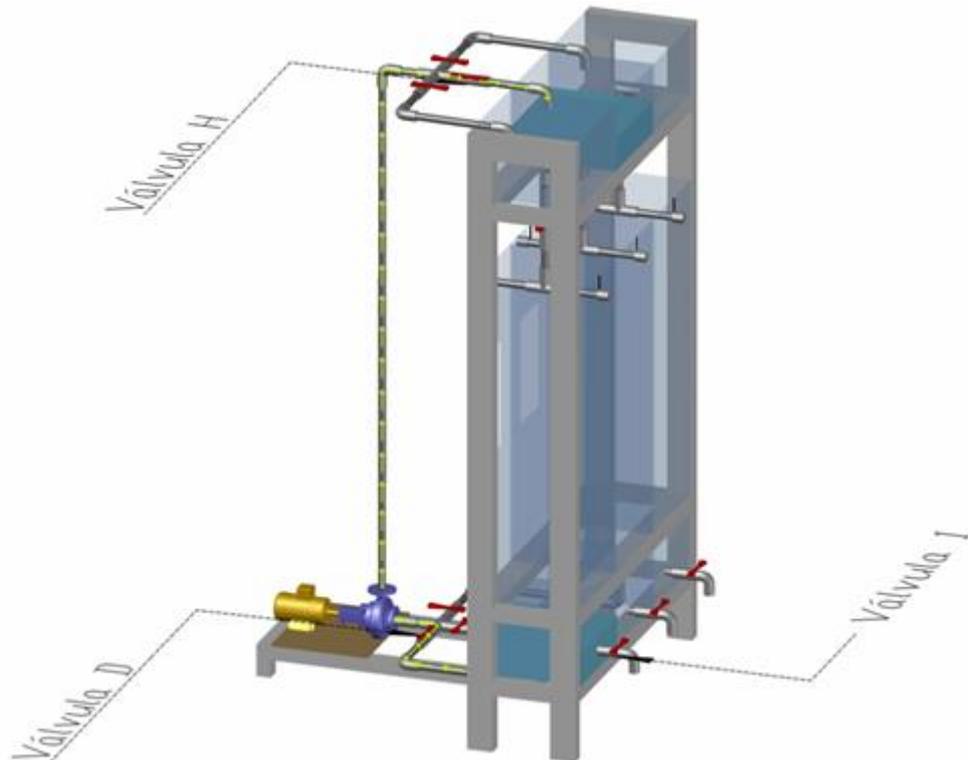


Figura 3.18 Funcionamiento filtro arena – antracita

Fuente: Elaboración propia

19) Abrir la válvula de esfera **B** en la posición **2**, como se indica en la Figura 3.13.



Figura 3.13 Válvula de esfera B en la posición 2

Fuente: Autoras

20) Repetir los pasos 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

21) Una vez que se haya llenado el tanque de falso fondo, se debe abrir la válvula de esfera **E** (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.4), para que el flujo se dirija hacia la bomba.

22) Abrir la válvula de esfera **I** (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.3), en caso de que el último filtro sea el de carbón activado y encender nuevamente la bomba.

23) Una vez lleno el tanque de almacenamiento de agua turbia del filtro de carbón activado, apagar la bomba y cerrar la válvula de esfera **E** y la válvula de esfera **I**.

Nota: En la Figura 3.19 se indica el funcionamiento del filtro antracita – carbón activado.

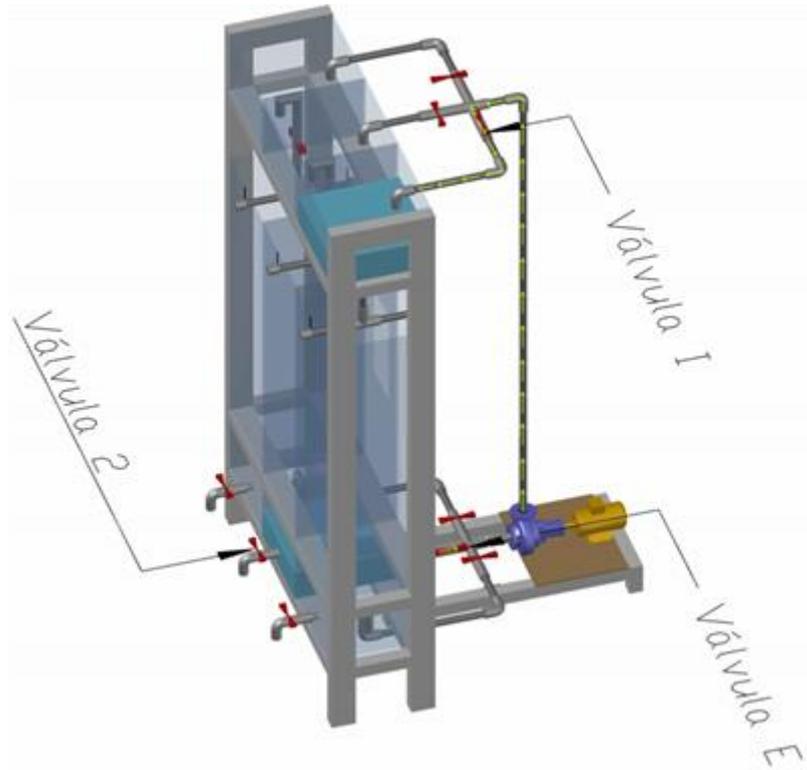


Figura 3.19 Funcionamiento filtro antracita – carbón activado

Fuente: Elaboración propia

24) Abrir la válvula de esfera C en la posición 2, como se indica en la Figura 3.15.



Figura 3.15 Válvula de esfera C en la posición 2

Fuente: Autoras

25) Repetir los pasos 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

26) Para finalizar el proceso, colocar un recipiente al frente del último filtro y abrir la válvula de esfera **3** (ver su ubicación en el esquema de la Figura 3.2) para recolectar el agua tratada.

27) Tomar una muestra de 250 mL a la salida del último filtro para determinar la turbiedad.

28) Registrar los resultados de caudal de ingreso en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Valores de caudal de ingreso en el filtro

Filtro	Volumen de agua a tratar (Lt)	Tiempo de vaciado del tanque de almacenamiento de agua turbia (h)	Caudal de ingreso (Lt/h)	Caudal de ingreso (m³/d)
Arena				
Antracita				
Carbón activado				

Fuente: Elaboración propia.

29) Registrar los resultados de tasa de filtración en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Valores de tasa de filtración en el filtro

Filtro	Área superficial del filtro (m²)	Altura H de agua (m)	Volumen filtrado (m³)	Área del lecho filtrante (m²)	Tiempo de filtrado de la altura H (s)	Tasa de filtración (m/h)
Arena	0.09			0.09		
Antracita	0.09			0.09		
Carbón activado	0.09			0.09		

Fuente: Elaboración propia.

30) Registrar los resultados de caudal filtrado en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Valores de caudal filtrado

Filtro	Volumen filtrado (Lt)	Tiempo de filtrado (h)	Caudal filtrado (Lt/h)
Arena			
Antracita			
Carbón activado			

Fuente: Elaboración propia.

31) Registrar los valores de turbiedad obtenidos mediante análisis de laboratorio en la Tabla 3.9 y determinar la eficiencia de remoción de turbiedad del sistema.

Tabla 3.9 Valores de turbiedad a la entrada y salida del filtro (sistema combinado)

Filtro	Turbiedad a la entrada del filtro (NTU)	Turbiedad a la salida del filtro (NTU)	Eficiencia remoción de turbiedad (%)
Arena – Antracita - Carbón activado			

Fuente: Elaboración propia

Limpieza del modelo físico

Limpieza de los tanques de almacenamiento de agua turbia:

32) Cerrar las válvulas de esfera A, B y C.

33) Desunir los nudos que unen estos tanques con las tuberías difusoras tipo flauta.

34) Retirar los codos que se encuentran en la parte superior de los tanques que los unen al sistema de recirculación.

35) Con mucho cuidado, retirar cada tanque de la estructura.

36) Remover el material sedimentado que pueda haber quedado en la base del tanque, humedecer las paredes y enjabonarlas para evitar cualquier residuo de sedimento o algún microorganismo posteriormente, enjuagarlos y dejarlos secar.

37) Colocar nuevamente con mucho cuidado los tanques sobre la estructura.

- 38) Colocar los codos en la parte superior para unirlos al sistema de recirculación y unir los nudos entre los tanques y las tuberías difusoras tipo flauta asegurándose de que éstas queden niveladas de lo contrario se vería afectado el caudal de ingreso al filtro.

Limpieza de los tanques de falso fondo:

- 39) Colocar una manguera en la llave de paso de la red de distribución de agua potable más cercana.
- 40) Abrir la válvula de esfera que se encuentra al frente del tanque que se va a limpiar (Válvula de esfera **1**: tanque de falso fondo del filtro de arena, válvula de esfera **2**: tanque de falso fondo del filtro de antracita y válvula de esfera **3**: tanque de falso fondo del filtro de carbón activado) asegurándose de que la válvula de esfera que lo une al sistema de recirculación se encuentre cerrada para evitar que el flujo se dirija a la bomba (Válvula de esfera **D**: tanque de falso fondo del filtro de arena, válvula de esfera **E**: tanque de falso fondo del filtro de antracita y válvula de esfera **F**: tanque de falso fondo del filtro de carbón activado).
- 41) Inyectar agua hasta que se llene un nivel superior a 10 Lt, cerrar la válvula de esfera frontal y la llave de paso. Desunir el nudo que une al tanque con el sistema de recirculación para conseguir un desagüe.
- 42) Repetir el paso 41 hasta que cambie el color del agua que sale por el desagüe.
- 43) Una vez completado el paso 42, unir nuevamente los tanques al sistema de recirculación y cerrar todas las válvulas de esfera.

3.4. Mantenimiento del modelo físico

3.4.1. Mantenimiento rutinario

Las actividades de mantenimiento rutinario incluyen la limpieza de los tanques de almacenamiento de agua turbia y de falso fondo, el raspado y la manipulación de los materiales filtrantes.

Para la limpieza de los tanques de almacenamiento de agua turbia:

1. Cerrar las válvulas de esfera A, B y C.
2. Desunir los nudos que unen estos tanques con las tuberías difusoras tipo flauta.
3. Retirar los codos que se encuentran en la parte superior de los tanques que los unen al sistema de recirculación.
4. Con mucho cuidado, retirar cada tanque de la estructura.
5. Remover el material sedimentado que pueda haber quedado en la base del tanque, humedecer las paredes y enjabonarlas para evitar cualquier residuo de sedimento o algún microorganismo, posteriormente, enjuagarlos y dejarlos secar.
6. Colocar nuevamente con mucho cuidado los tanques sobre la estructura.
7. Colocar los codos en la parte superior para unirlos al sistema de recirculación y unir los nudos entre los tanques y las tuberías difusoras tipo flauta asegurándose de que éstas queden niveladas de lo contrario se vería afectado el caudal de ingreso al filtro.

Para la limpieza de los filtros:

1. Retirar el papel filtro superior.
2. Remover la capa biológica para lo cual, con la ayuda de un rastrillo pequeño se debe raspar la capa superior de 1 a 2 cm.
3. Retirar el material raspado del filtro y colocarlo a un lado.

Nota: Raspar con mucha suavidad para no levantar mucho el material filtrante.

4. Nivelar las superficies de los materiales filtrantes y comprobar la profundidad de los lechos filtrantes. Para esto se debe verificar que las alturas de las capas filtrantes estén en el nivel establecido.
5. Colocar nuevamente papel filtro en la parte superior del lecho filtrante.

Para la limpieza de los tanques de falso fondo:

Debido a que éstos se encuentran en la parte inferior del prototipo, su limpieza se dificulta al no poder retirarlos de la estructura hasta su mantenimiento periódico, por lo cual para su limpieza rutinaria se ha optado por un retrolavado.

1. Colocar una manguera en la llave de paso de la red de distribución de agua potable más cercana.
2. Abrir la válvula de esfera que se encuentra al frente del tanque que se va a limpiar (Válvula de esfera **1**: tanque de falso fondo del filtro de arena, válvula de esfera **2**: tanque de falso fondo del filtro de antracita y válvula de esfera **3**: tanque de falso fondo del filtro de carbón activado) asegurándose de que la válvula de esfera que lo une al sistema de recirculación se encuentre cerrada para evitar que el flujo se dirija a la bomba (Válvula de esfera **D**: tanque de falso fondo del filtro de arena, válvula de esfera **E**: tanque de falso fondo del filtro de antracita y válvula de esfera **F**: tanque de falso fondo del filtro de carbón activado).
3. Inyectar agua hasta que se llene un nivel superior a 10 Lt, cerrar la válvula de esfera frontal y la llave de paso. Desunir el nudo que une al tanque con el sistema de recirculación para conseguir un desagüe.
4. Repetir el paso 3 hasta que cambie el color del agua que sale por el desagüe.
5. Una vez completado el paso 4, unir nuevamente los tanques al sistema de recirculación y cerrar todas las válvulas de esfera.

3.4.2. Mantenimiento periódico

Es importante el mantenimiento total del sistema de tratamiento para asegurar la calidad del agua filtrada, por lo que se debe efectuar periódicamente una revisión de las uniones para evitar posteriores fugas, una limpieza total de los tanques de almacenamiento de agua turbia y de falso fondo, al igual que de los filtros en donde se deben retirar los materiales filtrantes.

Se recomienda que, en un periodo prolongado generalmente no inferior a tres años, se realice una limpieza total de todos los elementos que conforman el prototipo, es decir, tanques de almacenamiento de agua turbia, caja del filtro: lavado del lecho del material filtrante y capas de soporte, tanques de falso fondo y sistema de circulación.

1. Cerrar todas las válvulas de esfera.
2. Retirar los codos que unen los tanques de almacenamiento de agua turbia con el sistema de recirculación.
3. Desunir los nudos, tantos los que unen los tanques de almacenamiento de agua turbia con las tuberías difusoras tipo flauta como los que unen los tanques de falso fondo con el sistema de recirculación.
4. Con mucho cuidado, retirar cada tanque de almacenamiento de agua turbia de la estructura.
5. Remover el material sedimentado que pueda haber quedado en la base del tanque, humedecer las paredes y enjabonarlas para evitar cualquier residuo de sedimento o algún microorganismo, posteriormente, enjuagarlos y dejarlos secar.
6. Retirar con mucho cuidado el material filtrante y las capas de soporte (gravilla, grava fina y grava gruesa) procurando que éstas no se mezclen entre sí y evitando la pérdida de material.

Nota: Cada filtro contiene una puerta para facilitar la colocación y el retiro de los materiales, ésta debe ser manipulada con cuidado. Para retirar los materiales, ésta debe ser abierta lentamente con el fin de que no se riegue el material que se encuentra sobre el nivel de la misma.

7. Lavar los diferentes materiales en forma separada y dejarlos secar.
8. Con sumo cuidado, retirar los filtros de la estructura para su limpieza.
9. Humedecer, enjabonar y cepillar las paredes de la caja del filtro para eliminar cualquier microorganismo, enjuagarlos y dejarlos secar.
10. Proceder a la limpieza de los tanques de falso fondo. Con ayuda de una toallita humedecer, enjabonar y enjuagar las paredes del tanque para retirar cualquier material adherido al fondo y paredes del tanque.
11. Desunir los nudos que unen estos tanques con el sistema de recirculación para eliminar el agua de las tuberías.
12. Colocar con mucho cuidado los tanques de almacenamiento de agua turbia y los filtros sobre la estructura.
13. Colocar nuevamente las capas de soporte en el mismo orden y con igual espesor al especificado en el diseño de cada filtro respectivamente.
14. Colocar papel filtro para evitar que se mezcle con el material filtrante.

15. Colocar la puerta de cada filtro y desde la parte superior llenar con el material filtrante lentamente. Si existen pérdidas del material filtrante o de las capas de soporte será necesario reponerlas.
16. Nivelar la superficie del material filtrante y comprobar la profundidad del lecho filtrante. Para esto se debe verificar que la altura de las capas filtrantes y de soporte estén en el nivel establecido.
17. Colocar nuevamente papel filtro en la parte superior del lecho filtrante.
18. Colocar los codos en la parte superior de los tanques de almacenamiento de agua turbia para unirlos al sistema de recirculación y unir los nudos entre estos tanques y las tuberías difusoras tipo flauta asegurándose de que éstas queden niveladas de lo contrario se vería afectado el caudal de ingreso al filtro.
19. Unir los nudos entre los tanques de falso fondo y el sistema de recirculación.
20. Revisar cuidadosamente que todas las válvulas de esfera y demás accesorios se encuentren en buenas condiciones, caso contrario, deberán ser reemplazados.
21. Poner en funcionamiento el modelo físico nuevamente.

3.4.3 Recomendaciones para el lavado de los materiales

Materiales filtrantes: Debido a que son costosos y difíciles de obtener se recomienda la reutilización de los mismos.

Los materiales deben lavarse tan pronto como son extraídos del filtro porque tienen materia orgánica adherida y ésta al descomponerse produce sustancias con olores muy difíciles de remover.

- 1) Colocar el material en un recipiente plástico y lavar con agua. Ir botando el agua que contenga sedimentos. Repetir este proceso hasta que el agua salga limpia.
- 2) Dejar secar al sol el tiempo necesario para disminuir su contenido de humedad.

Material de soporte y drenaje: La gravilla, grava fina y gruesa utilizadas para soporte y drenaje deben ser lavadas con el fin de que no afecte el funcionamiento del filtro.

- 1) Limpiar estos materiales mediante un lavado con agua a presión, para prevenir que contengan suciedad o algunas partículas de limo o polvo; lavar hasta que el agua salga limpia.
- 2) Secar los materiales a temperatura ambiente durante un día o el tiempo necesario para disminuir su contenido de humedad; dejarlos al sol permite desinfectarlos.

CONCLUSIONES

Con la construcción del modelo físico y la elaboración de la guía metodológica, se pudo ejemplificar claramente como es un proceso de filtración, dejando claro cuál es la utilidad y los resultados que genera este tratamiento.

Inicialmente, se dio a conocer cada uno de los conceptos referente a los sistemas de filtración y las condiciones físicas requeridas para los filtros lentos como son espesor de la capa filtrante y velocidad de filtración.

En el segundo capítulo, se realizó el dimensionamiento y la construcción del modelo físico definitivo, detallando previamente, cada uno de los requisitos para filtros lentos y las falencias que se originaron en el modelo de prueba. En el modelo de prueba, las dimensiones de los tanques fueron más pequeñas, pero nos ayudó a diseñar el sistema de distribución del agua a la entrada del filtro, el sistema de drenaje y sistema de recirculación del agua, dejando claro como es el proceso para el prototipo final. Como resultado se generaron tres columnas filtrantes de 30 x 30 x 90 centímetros las cuales estuvieron conformadas por la misma capa de soporte; 5 centímetros de grava gruesa, 10 centímetros de grava fina y 15 centímetros de gravilla, pero cada una con diferente espesor de lecho filtrante: una capa de arena de 35 centímetros para el primer filtro, una capa de antracita de 35 centímetros para el segundo filtro y por último, una capa de carbón activado de 35 centímetros, tres tanques de almacenamiento para el agua turbia de 30 x 30 x 20 centímetros, tres tanques de falso fondo donde se almacena el agua tratada de 30 x 30 x 17 centímetros, con una red de distribución y recirculación de PVC con diámetro de media pulgada y una bomba de altura máxima 3 metros y 0.5 HP de potencia.

En el capítulo final, se explica la aplicación del modelo físico en una práctica de laboratorio y se desarrolló una guía metodológica que contiene información detallada de los pasos a seguir para el correcto uso y mantenimiento del prototipo.

RECOMENDACIONES

Para partir con el proceso se debe tener un conocimiento previo de la teoría referente a filtros lentos, cuál es su mecanismo y sus especificaciones, para poder identificar de manera concisa los resultados que se van a obtener en la aplicación de la práctica de laboratorio.

Antes de utilizar el prototipo, se debe tener sumo cuidado al manipular los elementos debido a que son de vidrio por ello hay que asegurarse que los frenos de pie se encuentren puestos para evitar movimientos no deseados o en la peor situación se rompa algún elemento del modelo físico, también se debe asegurar que éste se encuentre en óptimas condiciones iniciales, es decir, limpio, sin taponamiento, con energía y agua en la bomba y que la abertura de las llaves de ingreso sea la correcta.

Se debe seguir cada uno de los puntos especificados en la guía metodológica durante la realización de la práctica, sin omitir ninguno de ellos, porque en caso de hacerlo no se obtendrían los resultados esperados del ensayo.

En caso de que el proceso de filtración se encuentre estancado, se deben cerrar todas las válvulas de esfera, proceder a desunir las redes de distribución y circulación conectadas a los tanques por medio de los nudos y realizar un destaponamiento en la tubería para el posterior tratamiento.

El punto clave de este proceso es regular el caudal de ingreso, por lo tanto, es indispensable abrir cada válvula de esfera conectada a una tubería difusora de manera lenta para no ocasionar alteraciones en la distribución del agua a las columnas filtrantes.

Una vez concluido el proceso de filtración, se debe realizar una minuciosa limpieza del modelo físico dejándolo en condiciones iniciales para una futura utilización del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahumada Theoduloz, G. (2011). *Tratamiento de Agua Potable*. Chile: Universidad de Chile.
- Arana Correa, J. E. (2016). *Evaluación de la aplicación de carbón activado granular en la filtración del agua clarificada del río Cauca*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Arboleda Valencia, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Santa Fé de Bogotá: McGraw-Hill.
- Asrafuzzaman, M., Fakhruddin, A., & Hossain, M. (2011). *Reduction of turbidity of water using locally available natural coagulants*.
- Canepa, L., & Pérez, J. (1992). *Manual I, II y III: Teoría y Evaluación, Diseño, Operación, Mantenimiento y Control*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Carangui Fernández, D. P. (2016). Desarrollo de un plan para evaluación del sistema de filtración rápida de la Planta Potabilizadora de la Junta de Agua Potable de Bayas. *Universidad de Cuenca, Facultad de Ciencias Químicas*.
- Di Bernardo, L. (1993). *Métodos y Técnicas de tratamiento de Agua*. Sao Paulo: Rima.
- Díaz Restrepo, K. Y., & Niño Lozada, Y. E. (2018). *Evaluación del comportamiento de materiales alternativos para lechos filtrantes en procesos de potabilización de agua*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Gómez Gutiérrez, K. R. (2010). Eficiencia del coagulante de la semilla de Moringa oleifera en el tratamiento de agua. *Ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano*.
- Guillen Manrique, A. G. (2017). *Sistema de Filtración con sustratos naturales para la reutilización de aguas grises domésticas*. Ciudad de México: UNAM.
- Huisman, L. (1974). *Slow sand filtration*. Geneva, Switzerland: WHO.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2014). *Agua Potable. Requisitos*. Obtenido de Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 1108: <http://www.pudeleco.com/files/a16057d.pdf>

- Jarrín Pérez, F., Ramos Marcial, P., & Matamoros, D. (Agosto de 2009). *ResearchGate*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/28797009_Proyecto_Semilla_Evaluacion_De_Sistemas_De_Filtracion_Agua_De_Bajo_De_Costo_Para_Consumo_Humano
- Jiménez Cisneros, B. (2001). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México: LIMUSA, S.A. DE C.V.
- López, Y., Díaz, A., Vargas, L., Más y Rubí, M., Colina, G., Sulbarán, B., & Peña, J. (2008). *Eficiencia de las semillas *Leucaena leucocephala* y *Albizia lebbek* en el proceso de coagulación del agua.* .
- Más y Rubí, M., Martínez, D., Carrasquero, S., Rincón, A., & Vargas, L. (2012). *Eficiencia de las semillas de *Hymenea courbaril* como coagulante natural en el proceso de clarificación del agua.* .
- Ndabigengesere, A., Subba, N., & Talbot, B. (1995). *Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*.* .
- Okuda, T., Baes, A., Nishijima, W., & Okada, M. (2001a). *Coagulation mechanism of salt solution-extracted active component in *Moringa oleifera* seeds.*
- Okuda, T., Baes, A., Nishijima, W., & Okada, M. (2001b). *Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution.*
- Orellana, J. (2005). Características del Agua Potable. En *Ingeniería Sanitaria*.
- Pradillo, B. (12 de Septiembre de 2016). *Parámetros de control del agua potable*. Obtenido de iagua: <https://www.iagua.es/blogs/beatriz-pradillo/parametros-control-agua-potable>
- Rocha Castro, E. (2010). *Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas*. Chihuahua: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Romero Rojas, J. (1999). *Potabilización del Agua*. México, D.F.: Alfaomega y Escuela Colombiana de Ingeniería.

- Rueda Usme , L., & Romero González, D. (2017). *Desarrollo de modelo didáctico de columnas filtrantes a partir de los requerimientos técnicos de los laboratorios del área de geotecnia e hidráulica*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Universidad del Valle. (1987). *Filtración Lenta en Arena y Pretratamiento, Tecnología para potabilización de agua*. Cali, Colombia: Library, International Reference Centre for Community Water Supply and Sanitation.
- Van Dijk, J., & Oomen, J. (1978). *Filtración Lenta en Arena para Abastecimiento Público de Agua en Países en Desarrollo, Manual de Diseño y Construcción*. La Haya, Países Bajos: Centro Internacional de Referencia de la OMS para Abastecimiento Público de Agua.
- Vega Serrano, H. A. (2013). Evaluación del sistema de filtración en múltiples etapas FiME en tanques plásticos con pre-sedimentación y retro-lavado en la Hacienda Majavita (Socorro, Santander). *Universidad de Manizales, Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas*.
- Visscher, J., Paramasivam, R., Raman, A., & Heijnen, H. (1992). *Filtración Lenta en Arena. Tratamiento de agua para Comunidades. Planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento*. La Haya, Países Bajos: IRC International Water and Sanitation Centre.