



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

Diseño de un sistema de agua para consumo humano para una comunidad rural



AUTOR

Matías Paredes Ponce

AÑO

2017



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

Diseño de un sistema de agua para consumo humano para una comunidad  
rural

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos  
establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y  
Remediación

Profesor guía

MSc. Santiago Daniel Piedra Burgos

Autor

Matías Paredes Ponce

2017

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante Matías Paredes, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

---

Santiago Daniel Piedra Burgos

Master of Science in Hydro Science and Engineering

C.I: 1715384150

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante Matías Paredes, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

---

Indira Fernandina Black Solís

Master en Conservación y Gestión del Medio Natural

C.I: 1711273563

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

---

Matías Paredes Ponce

C.I: 1715969570

## AGRADECIMIENTOS

Mi esfuerzo, mi constancia, mi empeño, solo es el reflejo de las personas que me apoyaron a lo largo de todos estos años. Gracias, por siempre creer en que siempre se puede ser mejor. Nada de esto sería posible sin ustedes.

Gracias familia, amigos y profesores por todo su esfuerzo, por toda la paciencia y enseñanza que transmitieron a mi persona y me han hecho la persona que soy el día de hoy.

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre, por todo el esfuerzo que ha hecho para sacar a sus hijos adelante, por siempre ser ese modelo a seguir, por siempre ser esa luz al final del camino con la recompensa de un gran abrazo. Para usted.

Matías Paredes

## RESUMEN

La falta de abastecimiento de agua potable para las zonas rurales es una problemática frecuente en el país. El presente trabajo está basado en un estudio realizado en el recinto Bellavista de la parroquia rural General Farfán, ubicada en la provincia de Sucumbíos.

En los acercamientos hechos con la comunidad, se identificó que la fuente hídrica comúnmente usada por la población es agua de pozo sin ningún tipo de tratamiento, lo que no asegura un suministro de calidad. Estudios previos realizados en la zona, señalan de manera recurrente la presencia de contaminación de las fuentes hídricas, como resultado principalmente de actividades agropecuarias, así como por residuos domésticos. En este sentido, el presente proyecto tiene como objetivo diseñar un sistema prototipo de carácter doméstico de tratamiento de agua, que a partir del proceso físico de la adsorción permita remover el principal contaminante presente en las aguas de pozo siendo estos patógenos, para proveer agua apta para el consumo a la población del sector.

En el recinto Bellavista de la parroquia General Farfán, se procedió a obtener muestras de agua de pozo de tres puntos específicos. Dichas muestras se analizaron de acuerdo con los parámetros que exige el T ULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria para el Medio Ambiente) para aguas de desinfección, luego a determinar un mecanismo de tratamiento que permita reducir los niveles de contaminación. Como resultado del análisis, se identificó que los principales parámetros fuera de norma se encontraban en las muestras M2 y M3, donde el DQO y el DBO5 sobrepasaban los límites por valores marginales, siendo en general problemas de baja o nula importancia. Sin embargo, el análisis mostró también la existencia de altos niveles de patógenos en ambas muestras, por lo que se optó por diseñar un sistema de filtración de arena y antracita que tiene una eficiencia de remoción de patógenos de hasta 99%.

Dicho sistema fue elaborado con los criterios de diseño del CEPIS, dando como resultado un filtro de 1.7m de alto, con un diámetro de 15.3 cm, con una



capa de arena de 25 cm y una capa de antracita de 50 cm como los medios filtrantes.

**Palabras clave:** Agua, General Farfán, sistema de tratamiento de agua, filtración, adsorción

## **ABSTRACT**

The lack of potable water supply for rural areas is a frequent problem in the country. The present work is based on a study carried out in the Bellavista precinct of the rural parish General Farfán, located in the province of Sucumbíos.

In the approaches made with the community, it was identified that the water source commonly used by the population is well water without any treatment, which does not ensure a quality supply. Preliminary studies carried out in the area indicate the presence of contamination of water sources, mainly as a result of agricultural activities, as well as domestic waste. In this sense, the present project aims to design a prototype system of domestic character for water treatment, that from the physical process of adsorption allows to remove the main contaminant present in the well water being these pathogens, to provide suitable water for consumption to the population of the sector.

In the Bellavista precinct of the General Farfán parish, samples of well water from three specific points were obtained. These samples were analyzed according to the parameters required by the TULSMA (Unified Text of Secondary Legislation for the Environment) for disinfection waters, then to determine a treatment mechanism to reduce contamination levels. As a result of the analysis, it was identified that the main non-standard parameters were found in samples M2 and M3, where COD and BOD5 exceeded limits by marginal values, being in general problems of little or no importance. However, the analysis also showed the existence of high levels of pathogens in both samples, so it was decided to design a sand and anthracite filtration system that has a pathogen removal efficiency of up to 99%.

This system was developed with CEPIS design criteria, resulting in a 1.7m high filter with a diameter of 15.3 cm, with a layer of sand of 25 cm and an anthracite layer of 50 cm as the filtering media

**Key words:** Water, General Farfán, Water treatment, filtration, adsorption

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Lugar de aplicación .....	4
1.3 Objetivos .....	4
1.3.1 Objetivo general. ....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Alcance .....	4
2. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y PROBLEMÁTICA.....	5
2.1 La situación actual .....	5
2.2 Planteamiento del problema .....	6
3. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA A REALIZAR .....	7
3.1 Propuesta a realizar.....	7
3.2 Justificación y beneficios esperados.....	7
3.3 Lugar de estudio .....	8
4. MARCO TEÓRICO.....	9
4.1 Conceptos generales.....	9
4.1.1 Aguas contaminadas .....	9
4.1.2 Características de las aguas contaminadas .....	10
4.1.3 Aguas subterráneas .....	10
4.1.4 Muestreo de aguas contaminadas .....	11

4.1.5 Tratamientos de agua.....	12
4.2 La filtración como alternativa de tratamiento de agua .....	14
4.2.1 ¿Qué es la filtración?.....	14
4.2.2 Principales mecanismos de la filtración .....	15
4.3 Cinética e hidráulica de la filtración .....	22
4.3.1 Generalidades .....	22
4.3.2 Aspectos hidráulicos.....	22
4.3.3 Balance de masas y variación de la concentración .....	28
4.3.4 Modelos de adsorción para la filtración.....	30
4.3.5 Factores que influyen en la filtración.....	39
4.4 Filtros lentos.....	43
4.4.1 ¿Qué es un filtro lento? .....	43
4.4.2 Ventajas y limitaciones del uso de filtros lentos.....	44
4.4.3 Medios filtrantes frecuentemente usados .....	45
4.4.4 Ejemplos de filtros lentos.....	46
4.5 Resumen de criterios de diseño para la filtración .....	47
4.5.1 Criterios de diseño generales para la filtración .....	47
4.5.2 Criterios de diseño para filtros lentos .....	49
5. METODOLOGÍA .....	52
5.1 Caracterización de las muestras.....	52
5.1.1 Recolección de muestras .....	52
5.1.2 Análisis de las muestras.....	52
5.2 Determinación de mecanismos de tratamiento.....	55
5.2.1 Descripción de los medios filtrantes a utilizar .....	55
5.3 Diseño del sistema de filtración prototipo .....	57

5.4 Vida útil del sistema de tratamiento de agua .....	65
5.5 Análisis de costos .....	68
<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>68</b>
6.1 Resultados del análisis de las aguas a tratar del recinto seleccionado .....	68
6.2 Medios filtrantes seleccionados en función de contaminantes fuera de los límites de la norma .....	72
6.3 Diseño hidráulico del sistema .....	73
6.3.1 Determinación de los parámetros base y dimensiones del filtro.....	73
6.3.2 Cálculo de la carga hidráulica al final del lecho .....	75
6.3.3 Cálculo de la pérdida de carga del sistema .....	77
6.3.4 Análisis hidráulico con dimensiones disponibles en el mercado .....	80
6.4 Cálculo de masa de los medios adsorbentes y tiempo de ruptura del sistema .....	84
6.4.1 Cálculo de masa del medio adsorbente.....	84
6.4.2 Cálculo del tiempo de ruptura/vida útil .....	86
6.4.3 Resumen de valores de variables utilizadas para el proceso de diseño .....	87
6.5 Dimensiones y planos del sistema.....	89
6.6 Costos del sistema de filtración .....	93
<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>94</b>
7.1 Conclusiones .....	94
7.2 Recomendaciones .....	96
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>98</b>

ANEXOS.....	101
-------------	-----

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Antecedentes**

El tratamiento y la potabilización del agua es un proceso vital para el desarrollo de las sociedades. Si bien en nuestro planeta existen efectivamente fuentes de agua que no presentan indicios de contaminación y pueden ser aptas para el consumo humano, cada vez hay menos recursos hídricos con estas características. Las actividades antropogénicas han afectado las fuentes de agua negativamente, por lo que se vuelve cada vez más imperativo recurrir a sistemas de tratamiento que permitan mejorar la calidad de las mismas, sobre todo, si éstas están destinadas para el consumo humano.

Ahora bien, por la importancia que revisten este tipo de tratamientos, en términos de mejorar las condiciones de vida de los distintos grupos humanos - especialmente de aquellos asentados en áreas en donde no hay una provisión eficiente de servicios básicos. Por ello, el desarrollo del conocimiento sobre la materia y las técnicas de aplicación asociadas al tratamiento del agua, han sido temas recurrentes de investigación de las últimas décadas. Esto se evidencia en el ámbito académico universitario, en donde es posible encontrar una cantidad importante de iniciativas -la mayoría de ellas con un buen nivel de éxito- que buscan alcanzar soluciones y/o herramientas efectivas en la solución del problema de contaminación de los recursos hídricos.

De ahí que, con mayor frecuencia, desde el momento mismo de la extracción este recurso debe ser sometido a una serie de tratamientos que permitan eliminar o reducir la mayor parte de contaminantes que podrían eventualmente afectar la salud de las personas. De acuerdo con (Llórens, 2016, pág. 11), para el efecto existen tres tipos de procesos: primarios, secundarios y terciarios; cada uno de ellos tiene como finalidad remover contaminantes específicos.

Los tratamientos primarios están encaminados a reducir/eliminar los sólidos presentes y conglomerarlos en partículas que puedan ser sedimentables; por su parte los secundarios eliminan la carga orgánica y, en ciertos casos, hasta los metales pesados por medio de la utilización de lodos activados y microorganismos. Por último, los tratamientos terciarios son usados para implementar procesos de potabilización y desinfección, para lo cual se utilizan mecanismos específicos que buscan eliminar patógenos y nutrientes, entre otros elementos, y así obtener agua apta para consumo humano (Llórens, 2016, pág. 11).

Ahora bien, para la potabilización de las fuentes de agua en su última etapa, existen varios mecanismos de tratamiento, siendo algunos de ellos la desinfección, la radiación UV, la ozonización entre otros (Osorio, Torres, & Sánchez, 2010, págs. 17-30). Sin embargo, estos métodos son enfocados a procesos a mayor escala, donde se involucran plantas de tratamiento y varios procesos unitarios con el fin de tratar aguas que presentan altas cargas de contaminantes. Existen otros métodos alternativos que han sido usados desde hace mucho tiempo, constituyendo algunos de ellos los primeros en ser utilizados, como es por ejemplo el método de filtración (Crittenden, Rhodes, Hand, Howe, & Tchobanoglous, 2012, pág. 731).

La filtración como proceso unitario para la desinfección y potabilización de agua puede llegar a ser un tratamiento efectivo, de bajo costo y de fácil operación, siendo una alternativa viable a ser aplicada en lugares rurales. Sin embargo, la mayoría de tratamientos se centran sobre todo en proyectos a gran escala, en los cuales se tratan grandes volúmenes de líquido y cuyo objetivo es la potabilización del agua que se consume en los centros poblados de mayor densidad poblacional, y/o en ciudades que cuentan ya con ciertos servicios básicos, entre ellos, el alcantarillado.



Ahora bien, dadas las condiciones de insalubridad y ausencia de infraestructura de servicios básicos que generalmente imperan en las zonas rurales del país, es fundamental considerar, en primer lugar, un proceso de desinfección del agua, lo que constituye un paso esencial para su potabilización. Este proceso posibilita la eliminación de patógenos, y microorganismos que puedan tener efectos adversos sobre la salud al momento del consumo (Organización Panamericana de la Salud, 2005, pág. 28).

Algo a tener en consideración es que, en lo referente a sistemas domiciliarios de tratamiento de agua, la cantidad de sistemas implementados y la información disponible sobre los mismos, se reduce notoriamente debido a que este tipo de proyectos, por lo general, abarca una población menor y no representa una inversión prioritaria para el gobierno central y/o los gobiernos locales. Esto es debido a que tienen un menor impacto social, lo que lleva a que los planes de desarrollo local o nacional busquen más bien invertir en centros poblados y/o ciudades en donde el impacto social y político sea mayor.

Sin embargo, hay algunas instituciones internacionales, como la Organización Panamericana de la Salud (OPS), que han propuesto alternativas de sistemas de potabilización que pueden ser utilizados en zonas rurales, con población dispersa, los que constituyen métodos viables para tratar el agua y conseguir que ésta sea apta para el consumo humano (2005). Un ejemplo de aplicación de estos sistemas es el uso de filtros lentos de arena, con los cuales se obtiene hasta un 99.9% de remoción de patógenos, uno de los principales problemas para la desinfección y potabilización del agua (Organización Mundial de la Salud, 2006, pág. 117)

De ahí que, lo que se pretende lograr mediante el desarrollo del presente proyecto, es diseñar un sistema de tratamiento de agua que utilice la filtración como técnica alternativa para mejorar la calidad del agua de pozo para consumo humano, el que puede ser fácilmente implementado en zonas rurales.

## **1.2 Lugar de aplicación**

El lugar escogido para la aplicación del sistema de tratamiento de agua que se diseñó fue en el recinto de Bellavista ubicado dentro de la parroquia rural de General Farfán, en la provincia de Sucumbíos, a 20 km aproximadamente de la ciudad de Nueva Loja, en el nororiente del país. Esta circunscripción parroquial tiene una superficie de 44,5 km<sup>2</sup> y una población de alrededor de 6.800 habitantes (Navarrete, 2015, pág. 39).

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general.**

Diseñar un sistema de uso doméstico de tratamiento de agua proveniente de pozos, que pueda ser utilizado por los habitantes del recinto Bellavista de la parroquia General Farfán, en la provincia de Sucumbíos.

### **1.3.2 Objetivos específicos.**

- Caracterizar las muestras de las fuentes de agua de pozo que abastecen a un recinto rural de la parroquia General Farfán, en función de lo que exige el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente<sup>1</sup> libro VI tabla 2 para aguas de consumo humano.
- Determinar los mecanismos de tratamiento a ser utilizados, en base a la caracterización del agua previamente realizada.
- Diseñar un sistema prototipo de uso doméstico de tratamiento de agua de pozo, con miras a suplir la demanda de agua que tienen los hogares de dicho recinto Bellavista del área rural de la parroquia.

## **1.4 Alcance**

El presente proyecto tiene como fin diseñar un sistema prototipo de uso doméstico de tratamiento de agua, a ser utilizado por las unidades familiares de un recinto del área rural de la parroquia General Farfán, cuya fuente de

---

<sup>1</sup> Este es el marco legislativo del Ecuador en lo que, respecto a límites permisibles de contaminantes con respecto al ambiente en las distintas matrices de suelo, aire, suelo, ruido, entre otras.

provisión de agua son los pozos de la zona. Este diseño tiene como fin convertirse en un modelo que pueda ser replicado de manera individual y/o grupal-familiar, especialmente en aquellas comunidades ubicadas en el área rural; con el fin de un consumo de agua de mejor calidad. El proyecto contempla el diseño del prototipo y la justificación técnica.

## **2. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y PROBLEMÁTICA**

### **2.1 La situación actual**

La parroquia General Farfán cuenta con un total de 45 recintos rurales que se encuentran dispersos en los alrededores de la zona urbana (Navarrete, 2015, pág. 217). El recinto de estudio Bellavista es un área cuyo uno de sus accesos principales al agua de consumo proviene de pozos, característica en común de los recintos rurales de la parroquia.

Dada esta situación, para el presente proyecto se optó por realizar el estudio en dichos asentamientos, debido al contraste que presentan en cuanto a la provisión de servicios básicos, con respecto a los centros urbanos y las zonas rurales. El estudio hace énfasis en la mejora de agua apta para consumo humano en estas zonas.

En las zonas alejadas del área urbana, el aprovisionamiento del líquido vital se da mayormente mediante la extracción directa desde los pozos, debido a que es una de las fuentes hídricas más viable para ser usadas. Por lo general, el agua extraída pasa únicamente a través de un mecanismo de decantación, lo cual resulta insuficiente para obtener un producto limpio y apto para el consumo. Es así que el agua que consumen los habitantes de la zona presenta problemas de contaminación producto de las actividades que todavía se realizan o se realizaron en el sector: explotación agropecuaria, actividades domésticas, entre otras (Navarrete, 2015, pág. 84). Hasta el momento en dichas comunidades no se ha implementado ningún proceso de tratamiento que mejore la calidad del agua.

## **2.2 Planteamiento del problema**

Entre los desafíos que tiene el Ecuador como país está el resolver las profundas diferencias regionales que existen entre las zonas urbanas y las rurales, que tienen que ver con las brechas existentes en términos de las condiciones de vida de sus habitantes y de la accesibilidad a la provisión de servicios básicos. Dichas inequidades tienen un impacto directo en la calidad de vida de las personas, condición que se ve agravada por la recurrente falta de atención que en este sentido tienen las poblaciones rurales, tanto del gobierno central como de los propios gobiernos locales, los que tradicionalmente tienden a tender prioritariamente a los conglomerados urbanos.

De ahí la necesidad de focalizar esfuerzos que tiendan a resolver los problemas prioritarios que presentan los sectores poblacionales rurales en esta parte del país como es, en este caso, el abastecimiento de agua para consumo humano.

Como ya se mencionó anteriormente, una de las principales fuentes de agua que tienen los recintos rurales de la parroquia de General Farfán son las subterráneas. Esta modalidad de extracción y consumo de agua es utilizada mayormente en los recintos rurales debido, entre otros factores, a la falta de cobertura del servicio de agua potable, la que llega apenas al 28.07% de la población (Navarrete, 2015, pág. 140) debido, sobre todo, a que la población se encuentra dispersa.

Con estas premisas en consideración, el problema principal de los recintos rurales de General Farfán surge de la ausencia de tratamientos que aseguren que el agua extraída tengan una calidad de agua apta para su consumo, siendo así un limitante para el uso de este recurso.

### **3. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA A REALIZAR**

#### **3.1 Propuesta a realizar**

La propuesta del presente proyecto es diseñar un sistema alternativo de tratamiento de agua apta para consumo humano, que sea de fácil operación y mejore la calidad de este recurso. Mediante la aplicación del proceso de filtración por adsorción, se propone el diseño de un sistema, con el correspondiente análisis hidráulico y de reducción de contaminantes.

#### **3.2 Justificación y beneficios esperados**

Según estudios previos realizados en la zona, algunos de los recintos rurales de la parroquia General Farfán presenta deficiencias en cuanto a la provisión de agua de calidad (Navarrete, 2015). Por lo tanto, desde el punto de vista ambiental la implementación del presente proyecto sería un aporte importante para la población rural seleccionada con estas condiciones, pues se orienta a solucionar uno de sus problemas básicos: el tratamiento del agua para consumo humano.

Dado que la mayoría de los recintos rurales de dicha parroquia obtienen su agua para consumo a través de pozos, el proyecto se focaliza en mejorar la calidad del agua que proviene de este tipo de fuente. En este sentido el diseño tendrá un impacto social positivo, en tanto busca suplir una de las necesidades prioritarias de gran parte de la comunidad, al mismo tiempo que contribuye a mejorar su calidad de vida.

En definitiva, el proyecto pretende brindar una solución directa y efectiva al problema puntual que tiene la población de General Farfán -especialmente aquella asentada en el área rural- en cuanto hace relación con la deficiente provisión de agua para consumo humano que presenta hasta el momento y, por otro lado, de manera indirecta contribuye a reducir -aunque sea parcialmente- las inequidades existentes al interior de la parroquia, en términos del diferente nivel de acceso a los servicios básicos que tienen los distintos sectores poblacionales.

### 3.3 Lugar de estudio

Se seleccionó uno de los recintos rurales de la parroquia de General Farfán, con el fin de focalizar el alcance del proyecto y obtener medidas puntuales de los parámetros del agua, que permitan diseñar un sistema eficaz que efectivamente pueda tratar los contaminantes presentes en el agua y garantizar su calidad. El recinto de Bellavista fue el lugar escogido para el efecto, el que se encuentra señalado en el siguiente plano:



Figura 1. Recintos de la Parroquia de General Farfán. Bellavista.

Tomando de: Instituto Geográfico Militar/MAGAP, 2015

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 Conceptos generales

Hay algunos conceptos que son necesarios tener en cuenta. Se parte de algunas definiciones respecto al recurso hídrico, empezando por aclarar qué se entiende por “aguas contaminadas”; para el efecto, se toma como base lo expresado por algunos autores. Es igualmente importante saber cuáles son las características posibles que presenta el recurso hídrico en dichas condiciones. Así mismo, se debe definir qué es “agua subterránea” -el tipo de agua que se pretende tratar- y qué son los contaminantes. Luego, se tratará sobre los tipos de muestreo que pueden realizarse, así como los posibles tratamientos que existen para el tratamiento del agua.

Dado el alcance del presente proyecto, éste no pretende llegar nuevos desarrollos en términos de una discusión teórica, sino más bien aplicar las líneas ya establecidas sobre la materia, para lograr el objetivo concreto de diseñar un sistema prototipo de tratamiento de agua apta para consumo humano.

#### 4.1.1 Aguas contaminadas

De acuerdo con Valencia (2013, pág. 2), “*aguas contaminadas*” es un término utilizado para definir a un conjunto de agua con remanentes líquidos y sólidos que alteran las propiedades iniciales de la misma, lo cual genera un impacto negativo para dicho recurso y puede tener efectos adversos tanto para los ecosistemas como para la salud humana. Son muy diversas las actividades humanas que producen dichas alteraciones en el recurso hídrico: domésticas, comerciales, industriales, agrícolas, extractivas, pecuarias, entre otras (Metcalf & Eddy, 1995, pág. 29).

#### **4.1.2 Características de las aguas contaminadas**

El agua en su estado natural presenta componentes asimilados que normalmente la acompañan, como son ciertos minerales y, en esa medida, constituye un elemento vital para todo ser viviente.

Por su parte, en las aguas que presentan contaminación existen diferentes componentes que afectan su estado natural, los cuales pueden ser categorizados como: biológicos, químicos o físicos y son en definitiva los que alteran las propiedades del agua (Metcalf & Eddy, 1995, pág. 53). Para determinar en qué condiciones se encuentra una fuente de agua, existen varios parámetros que pueden ser medidos tanto cuantitativa como cualitativamente.

En relación a las variables biológicas del agua, se puede medir principalmente la presencia de microorganismos y de macroinvertebrados. Así mismo, para medir las características químicas existen parámetros de medición como: pH, nitrógeno, fósforo, azufre, metales pesados, demanda biológica de oxígeno y demanda química de oxígeno. Por último, para la medición de las características físicas, es posible realizar pruebas de olor, color, turbiedad, sólidos y materia flotante como los principales parámetros (Valencia, 2013, pág. 56). Todos estos parámetros sirven para caracterizar el agua a tratar y permiten determinar qué posibles mecanismos pudieran ser utilizados para reducir, remover o eliminar los contaminantes encontrados.

#### **4.1.3 Aguas subterráneas**

Aguas subterráneas son aquellas que se forman a partir de aquella porción de agua que se infiltra en el terreno, rellenando fisuras y poros; cuando éstas se saturan forman acuíferos que pueden quedar contenidos bajo la superficie o pueden fluir por acción de la gravedad hacia otros cuerpos de agua como son los ríos, lagos o mares, dando lugar a la escorrentía subterránea, también asociada con el nivel freático (Fuentes, 1993, pág. 2)



#### 4.1.4 Muestreo de aguas contaminadas

En un muestreo de aguas contaminadas es de vital importancia determinar los períodos, el número de muestras y la cantidad de agua que se va recolectar con el fin de que la muestra sea representativa del cuerpo hídrico a ser analizado. Existen dos principales tipos de muestreo: muestreo simple y muestreo complejo (Valencia, 2013, pág. 6).

- Muestreo simple: Este tipo de muestreo se realiza en un solo instante de tiempo y se usa preferentemente para medidas de pH, cloro residual, grasas y aceites, entre otros.
- Muestreo compuesto: Este tipo de muestreo involucra más variables, se recolectan las muestras a intervalos de tiempo previamente designados para obtener una muestra compuesta. Para este tipo de muestreo, es necesario realizar una recolección de muestras simples mediante la siguiente fórmula:

$$V_i = \frac{Q_i * V}{Q_p * N_o}$$

Dónde:

V = Volumen final total de la muestra compuesta [ml]

Q<sub>i</sub> = Caudal instantáneo de cada muestra [m<sup>3</sup>/s]

Q<sub>p</sub> = Caudal promedio durante período de muestreo [m<sup>3</sup>/s]

V<sub>i</sub> = Volumen de cada alícuota de cada muestra [ml]

N<sub>o</sub> = Número de muestras que se van a tomar para construir la muestra compuesta

El volumen a recolectar de la muestra depende del número de parámetros a analizar, por lo que generalmente se sugiere que no sea menor a 200 ml, ni mayor a 2L, para muestras simples. Para muestras compuestas, volúmenes de 3 a 4 L son sugeridos, con alícuotas de 100 a 200 mL (Valencia, 2013, pág. 7).

#### 4.1.5 Tratamientos de agua

Tomando en cuenta el tipo de fuentes que tiene la comunidad General Farfán - en la cual se aplica el sistema prototipo de tratamiento- según los estudios realizados, se evidencia que las aguas para consumo humano que extraen sus habitantes presentan contaminantes que provienen principalmente de residuos agropecuarios y de la asimilación de metales y minerales del propio sustrato del suelo (Navarrete, 2015, pág. 84).

A partir de estas condiciones entonces, es posible identificar algunas metodologías que tienen como objetivo tratar los contaminantes que producen las actividades antes aludidas y que pueden ser aplicadas en distintos ámbitos. Algunas de las principales metodologías han sido desarrolladas por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente –CEPIS- (Maldonado & Vargas, 2004), el que resume los tratamientos de agua para consumo humano en cuatro grandes categorías, con sus respectivas operaciones unitarias:

1. Transferencia de sólidos
  - a. Cribado: Esta operación consiste en pasar el agua a tratar a través de tamices o rejillas, reteniendo aquellos sólidos que son más grandes que los orificios del entrelazado de las rejillas
  - b. Sedimentación: El objetivo principal de este tipo de tratamiento es propiciar una condición de reposo del agua, mediante la cual la fuerza gravitacional permite remover las partículas más densas. Esta operación unitaria normalmente es asistida con la coagulación.
  - c. Flotación: Al igual que la sedimentación, esta operación unitaria busca propiciar condiciones de reposo del agua, con la finalidad de que los sólidos cuya densidad es menor al líquido, asciendan a la superficie, donde son removidos. Para incrementar la eficiencia de esta operación, normalmente se emplean agentes de flotación que se unen con las partículas suspendidas y generan un nuevo sólido de mayor volumen, pero casi con la misma masa, facilitando así la flotación.

- d. Filtración: Consiste en pasar el agua a través de un medio poroso, en el que una serie de mecanismos de remoción actúan sobre el líquido y retienen los contaminantes. Este mecanismo varía en función de las características del agua y del medio poroso en sí. Cabe mencionar que esta operación unitaria es el único tratamiento utilizado cuando las aguas a tratar son muy claras o también como proceso final cuando se trata de aguas turbias.

Medios porosos comunes a ser utilizados son la antracita, el granate, la magnetita, la arena, el carbón activado y otros sustratos como la cáscara de arroz y pelo de coco, entre otros.

## 2. Transferencia de iones

- a. Coagulación química: Se agrega un agente químico al agua para que transfiera los iones al compuesto a remover, éste neutraliza la carga recibida de los coloides, formando así partículas de mayor tamaño y peso.
- b. Precipitación química: Consiste en agregar agua a una sustancia química soluble para generar un intercambio de iones con el compuesto que se requiere remover, formando así un precipitado. Un ejemplo de este tipo es remover hierro con cal.
- c. Intercambio iónico: Este proceso busca remover una sustancia por medio de un medio sólido, por el cual atraviesa el flujo de agua. Generalmente se lo realiza mediante resinas donde se realiza intercambio de iones de calcio y magnesio por iones de sodio.
- d. Absorción: El principio básico es concentrar en un medio absorbente las moléculas del compuesto que se quiere remover.

## 3. Transferencia de gases

- a. Aeración: Este proceso consiste de aplicar mecánicamente mediante diferentes métodos sea por medio de caídas de

cascadas o por incorporación de un medio aspersion o burbujeo.

- b. Desinfección: Algunas técnicas se pueden aplicar a esta operación unitaria, ya sea la adición de cloro, gas cloro y/o ozono al agua a tratar, con el fin de eliminar microorganismos.

#### 4. Transferencia molecular

- a. En términos simples, se utilizan bacterias saprofitas que degradan la materia orgánica con el fin de transformar sustancias complejas o contaminantes en compuestos celulares vivos de naturaleza más simple y estable.

(Vargas, 2004, págs. 105-109)

## **4.2 La filtración como alternativa de tratamiento de agua**

### **4.2.1 ¿Qué es la filtración?**

Los procesos mencionados anteriormente constituyen una gama amplia y completa para el tratamiento de aguas. Entre ellos, un método viable y eficaz para tratar aguas contaminadas es la filtración, la que sirve como mecanismo terciario alternativo. Esta operación unitaria es además una manera económica de conseguir agua apta para consumo humano. Por medio de la filtración se pueden remover las partículas suspendidas y coloidales presentes en un fluido, mientras éste atraviesa un conjunto de medios porosos. Esta operación es generalmente utilizada como etapa final del tratamiento de agua o como una alternativa de potabilización. Mediante su aplicación es posible generar agua de calidad con altos estándares de potabilidad (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 83).

## 4.2.2 Principales mecanismos de la filtración

Existen dos mecanismos principales que actúan durante la filtración para la remoción de las partículas suspendidas en el fluido, estos son: transporte y adherencia. Por principio, las partículas en el medio acuoso son transportadas a la superficie de los granos del medio filtrante, en donde éstos ejercen una fuerza intrínseca que las mantiene adheridas. El primer mecanismo es considerado un fenómeno físico e hidráulico, mientras el segundo está dado tanto por factores físicos como químicos, propios del medio filtrante (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 83).

### 4.2.2.1 Mecanismos de transporte

Los mecanismos de transporte son fenómenos netamente físicos que analizan el movimiento y comportamiento de las partículas suspendidas, en relación a las condiciones en que éstas se encuentran en el fluido a tratar. A continuación, una breve descripción de cada mecanismo:

#### a) Cernido

El cernido actúa en el momento en que la partícula que atraviesa el sistema de filtración tiene un diámetro mayor al del poro del medio filtrante, lo que resulta en que se quede atrapada en los intersticios.

Con esta premisa en consideración, Hall desarrolló una ecuación en la que relaciona la probabilidad de remoción de una partícula, en función del diámetro de dicha partícula y el diámetro de los poros del medio filtrante:

$$(Ecuación 1) \quad Pr = \left[ \frac{d}{Dc} \right]^{\frac{3}{2}}$$

Esto es:

$d$  = diámetro de partícula

$Dc$  = diámetro de poro del medio filtrante

(Maldonado & Vargas, 2004, pág. 85)

#### b) Sedimentación

El proceso de sedimentación se produce cuando el material suspendido en el fluido es más grande y denso que lo rodea, y se encuentra además a una velocidad de flujo -o flujo laminar- baja, lo que provoca que el mecanismo se accione (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 85)

#### c) Intercepción

La clase de flujo que se debe manejar en la filtración debe ser de tipo laminar, así las partículas suspendidas que tengan similar densidad a la del agua, serán retenidas en la superficie de los granos del medio filtrante, cuando éstas entren en contacto (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 86).

#### d) Difusión

La difusión corresponde al movimiento de las partículas suspendidas en el medio acuoso. Dicho movimiento, también denominado "browniano", es producto del aumento de la energía termodinámica y de la disminución de la viscosidad del agua; por lo tanto, la eficiencia de cualquier filtro -debido a este mecanismo- está en relación a la temperatura y el diámetro de la partícula del grano y es directamente proporcional a la primera variable e inversamente proporcional a la segunda variable (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 86).

A continuación, en la Figura 2 se presenta un pequeño resumen de los distintos mecanismos de transporte que son propios de la filtración:

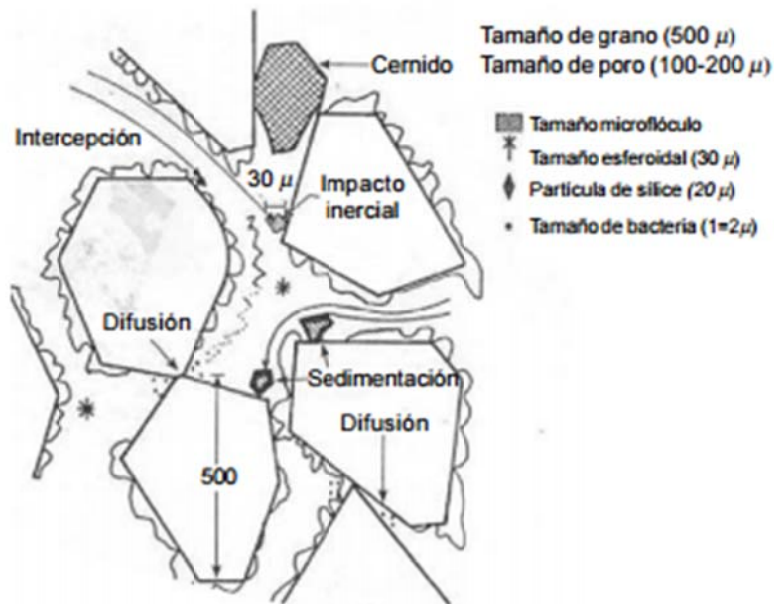
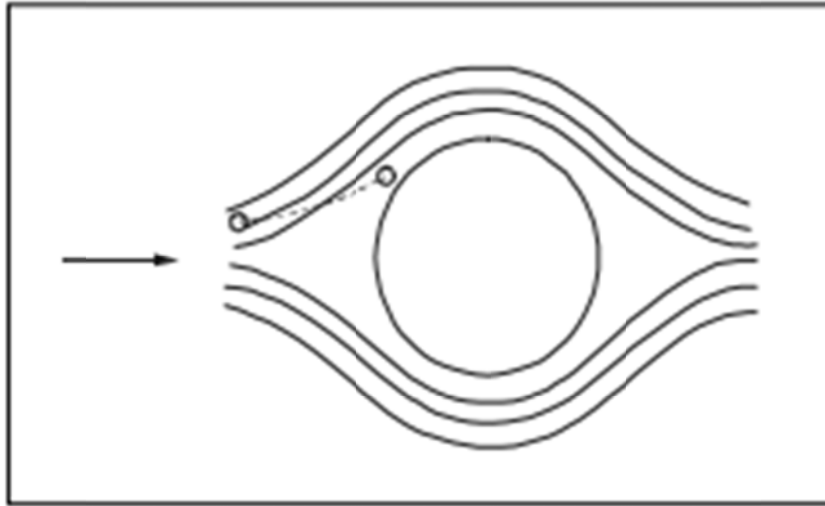


Figura 2. Distintos mecanismos de funcionamiento que sirven para transportar las partículas en suspensión.

Tomado de: Maldonado & Vargas, 2004

#### e) Impacto inercial

El fundamento de este tipo de mecanismo es el impacto que generan las partículas del contaminante en los granos del medio filtrante, el contacto entre los dos elementos produce una divergencia de las líneas de corriente, reteniendo las partículas suspendidas:



*Figura 3.* Impacto inercial de la partícula contra el grano del medio filtrante.

Tomado de: Maldonado & Vargas, 2004, pág. 86

f) Acción hidrodinámica

Este proceso se basa en la variación de las velocidades tangenciales y perpendiculares del escurrimiento del fluido, lo que ocasiona que la partícula suspendida sea propulsada a una región de velocidad inferior, formando parte del proceso de remoción. Este mecanismo es efectivo para la remoción de partículas de  $10\ \mu\text{m}$  (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 87).

g) Mecanismos de transporte combinados

Así como algunos mecanismos pueden actuar de manera independiente o de forma simultánea, existen unos de mayor transcendencia en el proceso de filtración que otros, por lo que la acción física del cernido y el impacto inercial no presenta mayor aporte para el mecanismo en sí, o bien tienen un efecto marginal. Por ello, la eficiencia de operación del sistema de filtración, se la ha focalizado especialmente en la interceptación, sedimentación, difusión y en la acción hidrodinámica (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 87).



En conjunto con sus colaboradores, Yao, realizó un estudio en el que la relación entre difusión, intercepción y sedimentación, generó un modelo de respuesta de la eficiencia de colección de un gramo de partícula, en función del tamaño de la partícula suspendida. Esto se ve reflejado en el siguiente gráfico:

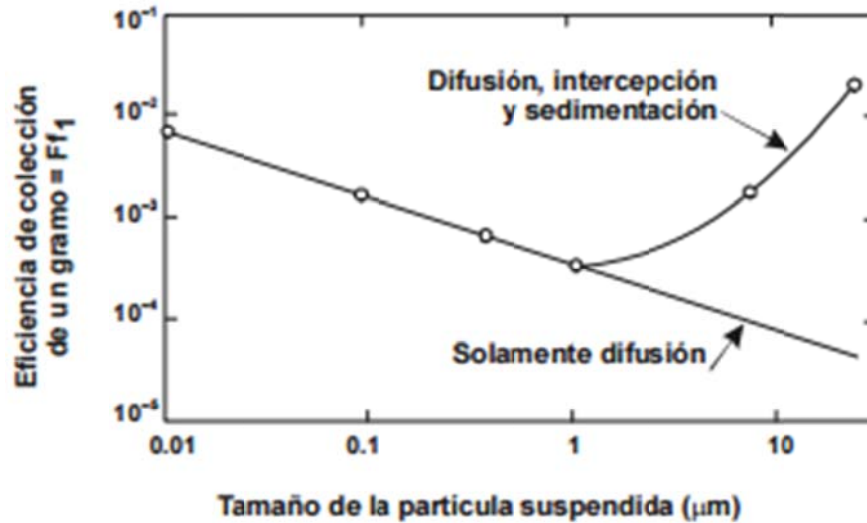


Figura 4. Eficiencia del transporte de partículas en función del tamaño de la partícula.

Tomado de: Maldonado & Vargas, 2004, pág.88

A partir de estas consideraciones, se concluye entonces que parte de la eficacia en la colección de las partículas suspendidas en el medio a filtrar es:

- Inversamente proporcional a la velocidad de aproximación del fluido
- Proporcional al diámetro de los granos del medio filtrante
- Proporcional a la viscosidad del fluido que a su vez es proporcional a la temperatura del fluido.

(Maldonado & Vargas, 2004, pág. 88)

#### 4.2.2.2 Mecanismo de adherencia

Este mecanismo consiste en analizar dos fenómenos físico químicos: el primero, la interacción de las fuerzas electroestáticas y de Van der Waals; y, el segundo, el enlace químico que existe o se genera entre la superficie de los granos y las partículas (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 89). Con esto en consideración, a continuación se analizará cada fenómeno de manera independiente:

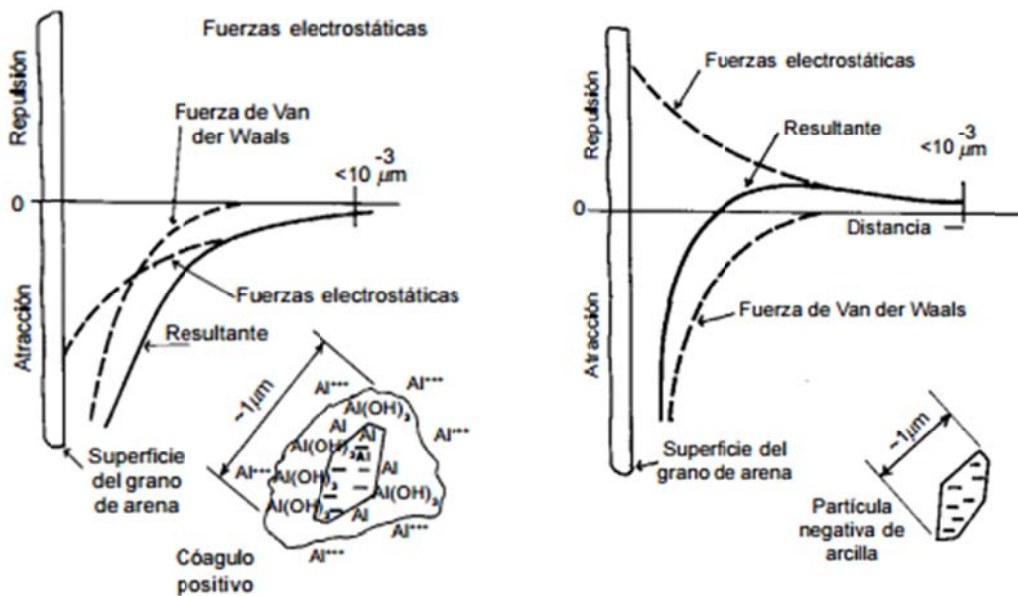
- a) Interacción combinada de las fuerzas electrostáticas y de Van der Waals.

Hay que tener en cuenta que las partículas sólidas pueden presentar diferentes cargas en sus respectivas superficies, cuando éstas se encuentran sumergidas en el agua. Esto puede deberse a varias razones: 1) existen reacciones químicas entre los iones presentes tanto en el fluido como en los sólidos en suspensión, 2) la existencia de cristales imperfectos en la suspensión puede generar cargas no balanceadas, 3) la posible disociación de los iones encontrados en la superficie de las partículas y 4) cuando existe una sustitución isomórfica en la estructura del cristal (sólido en suspensión) (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 90).

Esto significa que existen dos fuerzas principales que se encuentran en función de los iones de carga que varían dado a el tipo de partícula, ocasionando que se genere una interacción entre las partículas suspendidas y las de la superficie del medio filtrante, siempre y cuando se encuentren dentro de una interfaz de sólido-líquido; estas fuerzas son las de atracción y las de repulsión (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 90).

Las fuerzas de Van der Waals se refieren a las fuerzas de atracción que se producen entre los átomos y las partículas, las que son generadas por la presencia de iones con carga positiva y negativa; mientras que las fuerzas de repulsión -también denominadas de repulsión eléctrica- se producen debido a la presencia de iones de la misma carga. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los efectos que se generan entre partículas, se manifiestan a una

distancia específica entre los átomos de las partículas involucradas, la que debe ser inferior a  $500 + \text{angstroms (A}^\circ)$  (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 90). Este balance depende de las partículas que se manejan y del tipo de carga que tienen. A continuación, se presenta un ejemplo de reacción, generando una curva de estas fuerzas en función de la distancia y del tipo de carga que tienen las partículas:



ano grano  
rga arcilla  
ias, rgas,

La curva resultante es la aproximación de reacción que tendrá dicha partícula frente a las fuerzas presentes en la interfaz, por lo que se puede evidenciar que hay una respuesta distinta en función de la carga de la partícula.

b) Enlace químico entre las partículas y la superficie de los granos.

Cuando las partículas coloidales se encuentran en el agua, la reacción de la hidrólisis genera productos que a determinados pH se polimerizan. Es decir,

existen segmentos extendidos en el agua de estas cadenas poliméricas, que pueden ser adsorbidos por la superficie de las partículas en suspensión o del grano. Las partículas en suspensión con los segmentos adheridos, atraviesan el medio filtrante y se pueden enlazar con los segmentos sueltos adsorbidos por los granos, lo que ocasiona que éstas queden retenidas en el lecho (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 92)

### **4.3 Cinética e hidráulica de la filtración**

#### **4.3.1 Generalidades**

La filtración tiene varios mecanismos para la remoción de las partículas como ya se mencionó anteriormente. Algunos son más eficientes que otros, sin embargo, para diseñar un sistema de filtración es necesario tener claro primeramente los aspectos hidráulicos y cinéticos, en función del mecanismo que se va a implementar. A continuación, se presentan el análisis hidráulico y cinético de esta operación unitaria

#### **4.3.2 Aspectos hidráulicos**

Para el modelamiento hidráulico del sistema de tratamiento de agua, se tomarán en cuenta modelos matemáticos fundamentales como la ley de Darcy, que expresa la conductividad hidráulica de un fluido a través de un medio poroso. Así mismo, se deben considerar otros aspectos hidráulicos importantes con miras a lograr un análisis holístico del sistema a crear, siendo estos el tipo de régimen del flujo mediante el cálculo del número de Reynolds, y la pérdida de carga que ocurre a medida que el fluido atraviesa el medio poroso, la que se puede realizar mediante la ecuación de Kozeny. A partir de estos aspectos básicos, es posible calcular los parámetros de diseño del sistema de filtración, es decir, las dimensiones del filtro y el espesor de cada lecho.

La ley de Darcy se refiere a la conductividad hidráulica de un fluido (en este caso el agua) a través del medio filtrante (Sánchez, 2014, pág. 2). Dicho

enunciado incluye en la ecuación a las variables de carga hidráulica, la velocidad del fluido -lo que corresponde a la velocidad de filtración-, el coeficiente hidráulico del medio y el área por la cual atraviesa el fluido. A continuación, se presenta la ley de Darcy expresada en ecuación:

$$(Ecuación 2) \quad Q = -A * K_h * \frac{\Delta h}{L}$$

Donde:

$Q$  = caudal del fluido

$A$  = área por donde atraviesa el fluido

$K_h$  = coeficiente hidráulico del medio poroso

$\frac{\Delta h}{L}$  = relación entre la variación de la carga hidráulica y el espesor del lecho

(Sánchez, 2014, pág. 2)

Se puede hacer una segunda relación para determinar el caudal, la que es equivalente a la multiplicación entre el área de la sección transversal del filtro y la velocidad de filtración, obteniendo así la siguiente expresión:

$$(Ecuación 2.1) \quad Q = A * V$$

Donde:

$Q$  = caudal del fluido

$A$  = área de sección transversal

$V$  = velocidad de filtración

(Suárez, Jácome, & Ures, 2015, pág. 25)

Ahora bien, si el sistema de filtración cuenta con varias capas de medios filtrantes, el coeficiente hidráulico varía en función de las propiedades de cada

medio, por lo que se debe calcular un valor de permeabilidad equivalente que considere este factor. Con esto surgen dos posibles direcciones de flujo, paralelo y perpendicular al medio poroso filtrante (Sánchez, 2014, pág. 2). Sin embargo, dado el principio de funcionamiento que tienen los filtros que es la fuerza de la gravedad, el tipo de flujo será perpendicular. Por ello, se presenta la siguiente ecuación para determinar la conductividad equivalente del conjunto de medios:

$$(Ecuación 3) \quad K_v = \frac{B}{\sum \frac{b_i}{k_i}}$$

Donde:

$K_v$  = conductividad hidráulica vertical

$k_i$  = conductividad hidráulica de cada una de las capas

$b_i$  = espesor de cada una de las capas

$B$  = espesor total, suma de todos los espesores

(Sánchez, 2014, pág. 4)

Dentro del coeficiente hidráulico se toman en cuenta propiedades y variables, tanto del fluido como del medio filtrante, con el fin de definir un valor que sea representativo para el sistema. Este valor se encuentra en función de parámetros tales como la densidad del medio, la viscosidad del fluido, la temperatura en la que éste se encuentra, entre otros factores. Con esto en consideración, se presentan las siguientes ecuaciones que representan el coeficiente:

$$(Ecuación 4) \quad K_h = k * \frac{\rho - g}{n}$$

Donde:

$k =$  permeabilidad intrínseca del medio  $\frac{M}{L^3}$

$\rho =$  densidad del fluido  $\frac{M}{L^3}$

$g =$  gravedad  $\frac{M}{L^2}$

$n =$  viscosidad dinámica

(Sánchez, 2014, pág. 5)

Dado que la viscosidad dinámica se produce en función de la densidad del fluido y de la viscosidad cinemática, estas variables se encuentran influenciadas por la temperatura. La siguiente tabla indica los valores sugeridos de la viscosidad dinámica, de la viscosidad cinemática y de la densidad del agua a distintas temperaturas:

Tabla 1.

*Valores de densidad, viscosidad dinámica y viscosidad cinemática a temperatura variable.*

temp (°C)	Densidad (10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad dinámica (10 <sup>-3</sup> Kg/(m.s))	Viscosidad cinemática (centistokes =10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)	temp (°C)	Densidad (10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad dinámica (10 <sup>-3</sup> Kg/(m.s))	Viscosidad cinemática (centistokes =10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)
0	0,99982	1,792	1,792	20	0,99829	1,003	1,005
1	0,99989	1,731	1,731	21	0,99808	0,979	0,981
2	0,99994	1,674	1,674	22	0,99786	0,955	0,957
3	0,99998	1,620	1,620	23	0,99762	0,933	0,935
4	1,00000	1,569	1,569	24	0,99738	0,911	0,913
5	1,00000	1,520	1,520	25	0,99713	0,891	0,894
6	0,99999	1,473	1,473	26	0,99686	0,871	0,874
7	0,99996	1,429	1,429	27	0,99659	0,852	0,855
8	0,99991	1,386	1,386	28	0,99631	0,833	0,836
9	0,99985	1,346	1,346	29	0,99602	0,815	0,818
10	0,99977	1,308	1,308	30	0,99571	0,798	0,801
11	0,99968	1,271	1,271	31	0,99541	0,781	0,785
12	0,99958	1,236	1,237	32	0,99509	0,765	0,769
13	0,99946	1,202	1,203	33	0,99476	0,749	0,753
14	0,99933	1,170	1,171	34	0,99443	0,734	0,738
15	0,99919	1,139	1,140	35	0,99408	0,720	0,724
16	0,99903	1,109	1,110	36	0,99373	0,705	0,709
17	0,99886	1,081	1,082	37	0,99337	0,692	0,697
18	0,99868	1,054	1,055	38	0,99300	0,678	0,683
19	0,99849	1,028	1,030	39	0,99263	0,666	0,671

Tomado de: Sánchez, 2014, pág. 7

Un aspecto hidráulico importante a considerar es el número de Reynolds, el que sirve para determinar el régimen de flujo. El filtro a operar, siendo de carácter lento, debe manejarse en un régimen laminar con el fin de mantener la eficiencia del sistema además de evitar la mezcla entre capas (Crittenden, Rhodes, Hand, Howe, & Tchnobanoglous, 2012, pág. 743). Por otro lado, solo mediante el flujo laminar se puede aplicar el modelo de pérdida hidráulica de Koenzi presentado en la ecuación (7). A continuación, se presenta la ecuación del número de Reynolds:

$$(Ecuación 5) \quad Re = \frac{D_e * V * \rho}{\mu}$$

Donde:

$D_e$  = diámetro equivalente

$V$  = velocidad de flujo del agua

$\rho$  = densidad del agua

$\mu$  = viscosidad dinámica

(Maldonado & Vargas, 2004, pág. 108)

Otro aspecto importante que considerar en el diseño propuesto es la pérdida de carga hidráulica. Para calcular dicha pérdida, se parte del principio de colmatación en función de una unidad de tiempo.

$$(Ecuación 6) \quad h_f = h_o + h\varphi(t)$$

Donde:

$h_f$  = carga final

$h_o$  = carga inicial

$h\varphi(t)$  = pérdida de carga en función del tiempo

(Maldonado & Vargas, 2004, pág. 103)



A partir de esta premisa, la pérdida de carga inicial se la puede calcular a través la ecuación de Koenzi, la que solo es aplicable para regímenes de flujo laminar y se la puede aplicar con valores de  $Re < 10$ :

$$(Ecuación 7) \quad h_0 = f * \frac{v}{g} * L * \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} * V * \left(\frac{A}{V}\right)^2$$

Donde:

$f$  = constante experimental y adimensional igual a 5

$v$  = viscosidad cinemática

$g$  = aceleración de la gravedad

$L$  = profundidad del lecho

$\varepsilon_0$  = porosidad inicial

$V$  = velocidad de filtración

$\frac{A}{V}$  = relación área de la partícula / volumen de la partícula

Siendo  $\frac{A}{V} = \frac{6}{D}$ , para partículas esféricas, donde  $D$  es el diámetro de la partícula, se considera que los granos no son esféricos, por lo que se debe incluir un coeficiente de esfericidad  $C_e$  y así obtener la ecuación final:

$$(Ecuación 8) \quad h_0 = f * \frac{v}{g} * L * \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} * V * \left(\frac{6}{C_e * D}\right)^2$$

(Maldonado & Vargas, 2004, pág. 104)

Cabe recalcar que para el dimensionamiento de filtros lentos es necesario realizar una prueba con los materiales a utilizar, con el fin de determinar la dispersión del diámetro de las partículas. Sin embargo, para efectos del

presente diseño, se asumirá un coeficiente de esfericidad del material que se va a utilizar, el que se ha tomado a partir de información bibliográfica.

Algunas fuentes consultadas sugieren el uso de varios filtros en el sistema, con el fin de facilitar el mantenimiento, la limpieza y la maduración de los mismos, de modo que uno puede operar mientras el otro está siendo sometido a estos procesos. La ecuación que determina el número de filtros necesarios se expresa a continuación:

$$(Ecuación 9) \quad n \approx \frac{1}{4} * \sqrt{Q}$$

Donde:

$Q$  = caudal en m<sup>3</sup>/hora

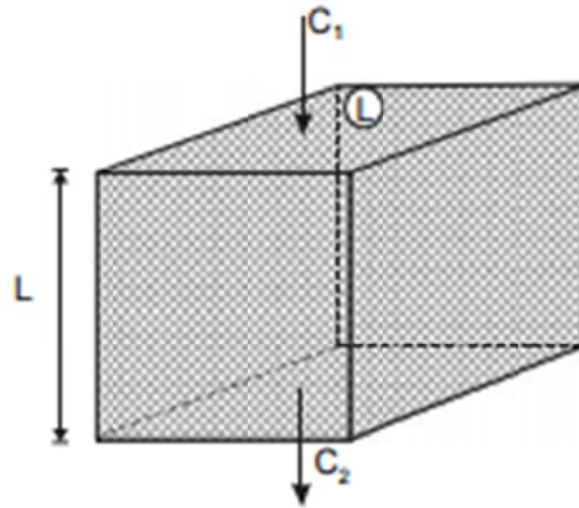
$n$  = número de filtros. Debe ser siempre mayor o igual a 2.

(Sánchez, 2014, pág. 26)

#### 4.3.3 Balance de masas y variación de la concentración

Para entender realmente el funcionamiento de un filtro, existen todavía muchas limitaciones que impiden comprender con precisión el comportamiento del mismo. Por ello, es necesario estudiar a profundidad los parámetros que lo conforman. Sin embargo, no existe un modelo ni un conjunto de fórmulas que representen con exactitud la eficiencia de este tipo de sistemas en cuanto se refiere a la remoción de contaminantes, pero se pueden realizar cálculos de los parámetros que tienen efecto en el funcionamiento del filtro.

En definitiva, la filtración tiene como fin remover el exceso de contaminantes por medio de los mecanismos descritos anteriormente. Es así que para determinar qué cantidad de contaminantes puede remover, se ha optado por generar ecuaciones que permitan entender el comportamiento de estos sistemas. Sin embargo, hay que entender también la condición de borde a la cual es sometido el fluido ante el lecho filtrante, lo que se puede evidenciar en el siguiente gráfico:



*Figura 7.* Funcionamiento del lecho filtro ante la presencia de un contaminante.

Tomado de: Maldonado & Vargas, 2004, pág. 93

En la figura anterior, se evidencia que dependiendo del medio filtrante la concentración del contaminante que atraviesa el filtro en un inicio, al hacerlo por un espesor específico “L”, genera una concentración distinta a su salida (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 93). Es bajo esta premisa que se desarrollaron todos los modelos matemáticos para intentar predecir la variación de los contaminantes.

Es necesario considerar que esta variación depende de algunas variables, siendo éstos: el caudal; el intervalo del tiempo a analizar; la variación del depósito específico absoluto, que es la relación entre el volumen de los sólidos filtrados y el volumen del medio filtrante; el área de la superficie del filtro y el espesor de éste; y la porosidad del medio.

Al respecto, el CEPIS plantea algunas expresiones y modelos matemáticos desarrollados por distintos autores a lo largo de los años, con miras a definir el comportamiento de los contaminantes a partir de los parámetros del filtro. El CEPIS presenta una ecuación que expresa que las variaciones de la concentración de los sólidos suspendidos, se producen en función del espesor del medio filtrante, pero éste disminuye a medida que la porosidad del medio

decrece con la operación del filtro (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 96). A continuación, se presenta dicha expresión:

$$(Ecuación 10) \quad -\frac{\partial C}{\partial L} = \frac{1}{\beta * V} * \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$$

Donde:

$\partial C$  = variación de la concentración de los contaminantes

$\partial L$  = variación del espesor del medio filtrante

$\beta$  = relación entre el volumen de los depósitos y el volumen de sólidos removidos.

$V$  = velocidad de filtración o también denominada velocidad de Darcy

$\partial \varepsilon$  = variación de la porosidad del medio filtrante

$\partial t$  = variación del tiempo

A partir de esta ecuación, se han derivado varias expresiones con el fin de determinar la variación de la concentración del contaminante cuando atraviesa el medio poroso filtrante.

#### 4.3.4 Modelos de adsorción para la filtración

Uno de los mecanismos de mayor eficiencia en la remoción de los contaminantes presentes en el fluido, es la adsorción la que es básicamente un mecanismo de adherencia.

##### a) Fundamentos de la adsorción

La adsorción es la transferencia de contaminantes o sólidos, de una fase fluida a la superficie de un material adsorbente. Este proceso por lo general sucede a través de un lecho fijo, donde el fluido pasa de manera continua hasta que los

poros del medio filtrante se colmatan. Posterior a esta etapa de colmatación, no se logra la remoción de los sólidos de forma eficaz (McCabe, Smith, & Harriot, 1991, pág. 797).

Este proceso de filtración requiere de materiales altamente porosos, con áreas superficiales muy elevadas, con valores superiores a 2000 m<sup>2</sup>/g, lo que permite retener a las partículas en su superficie. La retención es el resultado de las fuerzas de atracción entre las partículas suspendidas en el fluido (adsorbato) y las partículas de la superficie del sólido donde quedan retenidas (adsorbente). En algunos casos, la adsorción generada es tan fuerte que se separa completamente al adsorbato del fluido; luego el medio adsorbente se puede regenerar con el fin de obtener el adsorbato de manera concentrada y pura en los espacios entre los poros (McCabe, Smith, & Harriot, 1991, pág. 797).

El fundamento del proceso de adsorción radica en dos factores principales: el tiempo y la posición en el lecho. Cuando el fluido atraviesa el lecho limpio, la mayor transferencia de masa (adsorbato del fluido al medio adsorbente) ocurre en la entrada del lecho, reduciéndose la concentración de éste a medida que se acerca al final del lecho. Sin embargo, a medida que aumenta el tiempo de operación, los poros del medio adsorbente se colmatan, lo que provoca que el fluido tenga que atravesar por mayor profundidad del lecho para poder remover los contaminantes. Se llega entonces a un punto en el cual el medio filtrante se satura y la eficacia de remoción de las partículas disminuye, hasta llegar a tener una efectividad nula. Esta etapa se la denomina como zona de ruptura y es frecuentemente usada como la medida de tiempo en que es necesario realizar un retrolavado y/o regeneración del medio filtrante (McCabe, Smith, & Harriot, 1991, pág. 804) Este fenómeno se representa en la figura 8.

En la figura a, se evidencia que a medida que atraviesa el fluido la longitud del lecho, la concentración del contaminante se reduce a valores nulos o cercanos a nulos. Sin embargo, a medida que aumentan los tiempos, pasando de t<sub>1</sub> y t<sub>2</sub> a t<sub>3</sub> y t<sub>4</sub>, el comportamiento del sistema permite que la concentración se reduzca a mayor profundidad del lecho, llegando al punto donde la

concentración ya no alcanza el valor nulo esperado, como es el caso de la curva de  $t_4$ .

En la figura b, se evidencia la curva posterior al punto de ruptura, en la cual la concentración vuelve a aumentar a medida que aumenta el tiempo, hasta alcanzar nuevamente el valor de concentración inicial:

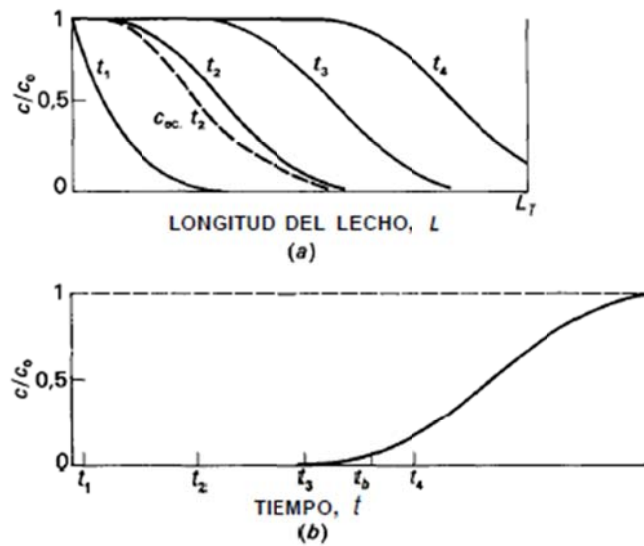


Figura 8. Variación de la concentración de la profundidad del lecho a  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  y  $t_4$  (a), curva de ruptura de un lecho fijo (b)

Tomado de: McCabe, Smith & Harriot, 1991, pág. 805

La relación de concentración  $C/C_0$  es utilizada para determinar la relación de efectividad de remoción de las partículas. Normalmente, se toma en cuenta la concentración relativa de 0.05 a 0.10 pasado el punto de ruptura para sugerir el cambio de filtro o retrolavado/regeneración del mismo (McCabe, Smith, & Harriot, 1991, pág. 805)

#### b) Isotermas de adsorción

Ahora bien, existe una variable en común que afecta a todo el proceso y es la temperatura. Por eso, los modelos que se desarrollaron consideran que, si existe esta variable, los resultados de la adsorción varían, por lo que sugirieron la implementación de isotermas, lo que permite analizar la respuesta del

adsorbato y del adsorbente, considerando el resto de parámetros como variables, pero a temperaturas específicas. Surge entonces la necesidad de crear una función que permita representar la variación de la concentración de adsorbato: las isotermas de adsorción.

Vale aclarar que isoterma de adsorción es la relación de equilibrio que existe entre la concentración del contaminante o adsorbato de la fase fluida y la concentración de las partículas del medio adsorbente a una temperatura específica (McCabe, Smith, & Harriot, 1991, pág. 801). Complementariamente, se han desarrollado varias curvas y modelos para representar el comportamiento de esta relación entre adsorbato y adsorbente.

Uno de los parámetros que se determina mediante estos modelos, es la cantidad de adsorbato que puede adsorber un medio filtrante de un volumen específico de fluido. Este fenómeno se evidencia en la siguiente ecuación:

$$(Ecuación 11) \quad q_e = \frac{(C_0 - C_e) * V}{m}$$

Donde:

$q_e$  = mg adsorbato / g de adsorbente – fase de concentración luego de equilibrio.

$C_0$  = concentración inicial de adsorbato, mg/L

$C_e$  = concentración de adsorbato luego de que ocurrió la adsorción, mg/L

$V$  = volumen de líquido en el sistema, L

$m$  = masa de adsorbente, g

(Metcalf & Eddy, 2003, pág. 1141)

Se puede hacer una derivación de la ecuación (11) con el caudal a tratar, logrando así una equiparación entre los valores de concentración inicial y final con este parámetro dado, lo que da como resultado la siguiente ecuación:

$$(Ecuación 12) \quad \frac{m_{adsorbente}}{Q} = \frac{C_o - C_e}{q_e}$$

Donde:

- $m_{adsorbente}$  = masa del material adsorbente, g
- $Q$  = caudal del fluido a tratar, L / s
- $C_o$  = concentración inicial de adsorbato, mg/L
- $C_e$  = concentración de adsorbato luego de que ocurrió la adsorción, mg/L
- $q_e$  = mg adsorbato / g de adsorbente – fase de concentración luego de equilibrio.

(Metcalf & Eddy, 2003, pág. 1154)

Alrededor de esta relación entre adsorbente y adsorbato, algunos autores propusieron modelos que se ajustaban al comportamiento de los contaminantes a atravesar el medio poroso. El modelo de Freundlich es uno de lo más usados, debido a la cercanía que tiene con el principio de funcionamiento del mecanismo de adsorción y porque además se asemeja al comportamiento real de los componentes del sistema (Metcalf & Eddy, 2003, pág. 1142). Freundlich desarrolló una serie de estudios que permitieron determinar constantes que posibilitan desarrollar la curva de comportamiento de la concentración de los contaminantes de diversos componentes. La isoterma de adsorción propuesta por Freundlich se describe a continuación:

$$(Ecuación 13) \quad \frac{x}{m} = Kf * C_e^{1/n}$$

Donde:

- $\frac{x}{m}$  = masa del adsorbato adsorbida por unidad de masa de adsorbente, mg adsorbente / g medio adsorbente



$K_f$  = factor de capacidad de Freundlich (mg adsorbato / g medio adsorbente) \* (L agua / mg adsorbato)  $^{(1/n)}$

$C_e$  = concentración de equilibrio de adsorbato en fluido luego de adsorción mg/L

$1/n$  = parámetro de intensidad de Freundlich

(Metcalf & Eddy, 2003, pág. 1142)

Los parámetros de intensidad de Freundlich se pueden encontrar despejando matemáticamente mediante el uso de logaritmos como se muestra a continuación:

$$(Ecuación 14) \quad \log \frac{x}{m} = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e$$

(Metcalf & Eddy, 2003, pág. 1142)

### c) Tiempo de ruptura

Ahora bien, se puede determinar el tiempo en el que el lecho entra en la zona de ruptura. Sin embargo, es necesario considerar algunas condiciones. En pruebas, la relación  $\frac{x}{m}$  que es la cantidad de partículas adsorbidas por gramo de material adsorbente, es aproximadamente entre el 25 y el 50% de la capacidad teórica de adsorción del material. Con este valor obtenido, el tiempo para que suceda la ruptura se puede aproximar mediante la siguiente ecuación:

$$(Ecuación 15) \quad \left(\frac{x}{m}\right) = \frac{x_b}{m_{adsorbente}} = Q \left(C_o - \frac{C_b}{2}\right) * \frac{t_b}{m_{adsorbente}}$$

Donde:

$\frac{x}{m}$  = Capacidad de rotura en campo (no teórica), g / g

$x_b$  = cantidad de masa adsorbida en el material adsorbente en el lecho en el punto de ruptura

$m_{adsorbente}$  = masa del material adsorbente, g

$Q$  = caudal, m<sup>3</sup> / d

$C_o$  = concentración orgánica de efluente, g / m<sup>3</sup>

$C_b$  = concentración orgánica en el punto de ruptura, g / m<sup>3</sup>

$t_b$  = tiempo para ruptura

(Metcalf & Eddy, 2003, pág. 1149)

#### d) Tiempo de vida del lecho

El tiempo de vida del lecho es una variable que guarda relación con los conceptos descritos anteriormente de tiempo de ruptura y de las isothermas de adsorción, lo que permite evaluar el rendimiento operacional de un sistema de filtración por adsorción. Un método para determinar el tiempo de vida del lecho se encuentra a continuación:

Se parte de la relación expresada en la ecuación (12), la que toma en cuenta los mg de adsorbato / y g de adsorbente en la fase de concentración, luego del equilibrio, en función del caudal a tratar.

(Ecuación 16) *tasa de uso de medio en función de isoterma de adsorción =*

$$\frac{m_{adsorbente}}{Q} = \frac{C_o - C_e}{q_e} = \frac{C_o - C_e}{Kf * C_e^{1/n}}$$

Donde:

$m_{adsorbente}$  = masa del material adsorbente, kg

$Q$  = caudal del fluido a tratar, L / h

$C_o$  = concentración inicial de adsorbato, mg/L

$C_e$  = concentración de adsorbato luego de que ocurrió la adsorción, mg/L

$q_e$  = mg adsorbato / g de adsorbente – fase de concentración luego de equilibrio.

$K_f$  = factor de capacidad de Freundlich (mg adsorbato / g medio adsorbente) \* (L agua / mg adsorbato) <sup>(1/n)</sup>

$1/n$  = parámetro de intensidad de Freundlich

Luego, se determina el tiempo de contacto con el lecho vacío (EBCT por sus siglas en inglés). Este valor toma en cuenta las dimensiones del lecho y la velocidad de filtración que éste tiene. Dicho valor indica el tiempo en el que el fluido atraviesa toda la profundidad del lecho:

$$(Ecuación 17) \quad EBCT = \frac{V_b}{Q} = \frac{L}{V_f}$$

Donde:

$EBCT$  = tiempo de contacto con el lecho vacío, h

$V_b$  = volumen del medio adsorbente, L

$Q$  = caudal del fluido, L / h

$L$  = espesor del medio adsorbente, m

$V_f$  = velocidad de filtración en el sistema, m / h

Posteriormente, se determina la masa necesaria del medio adsorbente para el tiempo de EBCT:

$$(Ecuación 18) \quad \text{masa de medio adsorbente para EBCT} \\ = EBCT * Q * \rho_{\text{adsorbente}}$$

Donde:

$EBCT =$  tiempo de contacto con el lecho vacío, h

$Q =$  caudal del agua a tratar, L / h

$\rho_{adsorbente} =$  densidad del medio adsorbente, g / L

Se procede entonces a determinar el volumen de agua a tratar para el ECBT del medio:

$$(Ecuación 19) \quad \text{volumen de agua tratada} \\ = \frac{\text{masa de medio adsorbente para ECBT}}{\text{tasa de uso de medio filtrante}}$$

Donde:

$\text{masa de medio adsorbente para ECBT} =$  en g de medio adsorbente

$\text{tasa de uso de medio filtrante} =$  e n g de medio adsorbente / L de agua

$\text{volumen de agua tratada} =$  en L de agua tratada

Y por último, se logra calcular el tiempo de vida del lecho mediante la siguiente ecuación:

$$(Ecuación 20) \quad \text{tiempo de vida del lecho} = \frac{\text{volumen de agua tratada}}{Q}$$

Donde:

$\text{tiempo de vida del lecho} =$  en h,

$\text{volumen de agua tratada} =$  en L de agua tratada

$Q =$  caudal del agua a tratar, L / h

(Metcalf & Eddy, 2003, págs. 1155-1156)

#### 4.3.5 Factores que influyen en la filtración

Ahora bien, es necesario considerar algunos factores que influyen en la eficiencia de la filtración, que se encuentran en función tanto del medio filtrante, como de las propiedades y condiciones de las partículas en suspensión y de las condiciones en las cuales se encuentra el efluente (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 112). A continuación, se presenta un breve resumen de cada uno de estos aspectos:

##### a) Propiedades y condiciones de las partículas en suspensión

Entre las propiedades que afectan al proceso de filtración está el tipo de partículas, dado que éstas influyen en la formación de flóculos y en la sedimentación de las partículas formadas, por lo que existe una alteración en la pérdida de carga del sistema (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 113).

Otra variable a considerar es el tamaño de estas partículas. Aquellas que tienen un diámetro menor a  $1 \mu\text{m}$  tienen una menor probabilidad de entrar en contacto con la superficie adsorbente, razón por la cual se considera esta dimensión como un tamaño crítico. Todas las partículas que superen este tamaño serán removidas con mayor eficiencia del efluente (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 113).

Asimismo, la densidad de las partículas está ligada directamente a la variable anterior debido a que mientras mayor sea la densidad de la partícula, la eficiencia de su remoción del efluente será mejor; por supuesto, esto ocurre si supera el tamaño crítico mencionado en el párrafo anterior (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 113).

Como ya se dijo anteriormente, en los modelos de adsorción la temperatura del agua tiene una influencia directa en la eficiencia de la filtración. Un aumento en la temperatura del agua, a su vez produce un incremento en la energía

termodinámica en las partículas del agua. La temperatura afecta la viscosidad del agua y por ende algunos de los mecanismos de filtración que dependen de este parámetro (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 114).

Las concentraciones de las partículas suspendidas también representan una influencia directa en la eficiencia de la remoción. Considerando el tiempo de filtración, la eficiencia de la operación aumenta a medida que aumenta el tiempo y la concentración de las partículas, por el simple principio de que mientras mayor es la cantidad de partículas retenidas en el medio filtrante, éstas sirven como obstáculo secundario para retener otras partículas suspendidas (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 114).

El pH del fluido a tratar también es otro factor de importancia debido a su influencia en el intercambio de cationes y de aniones en las superficies de los medios filtrantes. Para ello es vital considerar la carga predominante de las partículas suspendidas y la carga predominante del medio filtrante, para así poder crear métodos de atracción. Con valores de pH mayores a 7, el intercambio de cationes disminuye y aumenta el intercambio de aniones en superficies positivas. Por el contrario, con valores de pH menores a 7, existe un incremento en el intercambio de cationes y una disminución en el de aniones sobre superficies negativas (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 115)

#### b) Características del medio filtrante

También es necesario considerar las propiedades del medio filtrante, dado que de acuerdo a éstas se pueden retener partículas contaminantes específicas. Por eso, se debe elegir el medio filtrante tomando en cuenta la calidad que se desea obtener para el agua ya filtrada. Una variable crucial que incide en el medio filtrante es el tiempo de retención del fluido en el medio, también denominado carrera de filtración (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 117). Entre los medios comúnmente usados para la filtración se encuentran: la arena, la antracita, el granate, la magnetita y el carbón activado, siendo éstos los principales; estos elementos son utilizados debido a su variación en

granulometría y a sus propiedades intrínsecas, lo que les permite retener los contaminantes por medio de diversos mecanismos, como son la adsorción o los mecanismos de transporte (Crittenden, Rhodes, Hand, Howe, & Tchobanoglous, 2012, pág. 737). Como se describe en la siguiente tabla, existen combinaciones de dos o más capas de estos medios, que permiten mejorar la eficiencia de la filtración y se aplican considerando la naturaleza del medio:

Tabla 2.

*Clasificación de filtro según capas de medio filtrante*

<b>Clasificación del filtro</b>	<b>Descripción</b>
Monomedia	Consiste de una sola capa de medio filtrante, por lo general es arena. Típicamente, este medio tiene un grosor de 0.6 a 0.76m.
Monomedia de lecho profundo	Consiste en una sola capa de medio filtrante normalmente de antracita o carbón activado. El grosor de este lecho es de 1.5 a 1.8 m. Son utilizados generalmente para incrementar la capacidad de filtración debido al mayor tiempo de residencia del agua en el sistema.
Dualmedia	Consiste en un medio filtrante de dos capas, normalmente de 0.45 a 0.6 m de antracita sobre 0.23 a 0.3 m de arena. También se puede optar por utilizar capas de 1.5 a 1.8m de antracita en la capa superior como medios de lecho profundo. Este tipo de filtros son más duraderos frente a los de Monomedia.
Trimedia	Constan de tres capas de medios porosos, distribuidos típicamente con la antracita en

	la capa superior, la arena en la capa media y el granate en la inferior, con grosores respectivos de 0.45 a 0.6m, 0.23 a 0.3m y 0.1 a 0.15m.
--	--

Adaptado de: Crittenden, Rhodes, hand, Howe & Tchnobanoglous, 2012, pág. 737

A manera de ejemplo vale decir que estudios y sistemas piloto han demostrado que los filtros dobles (Dualmedia), constituidos por antracita y arena, presentan índices de eficiencia superiores a los están constituido únicamente por arena (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 117).

Las características granulométricas del medio o de los medios filtrantes también tienen una influencia sobre el proceso de filtración, debido a factores como tamaño, forma y esfericidad, por cuanto éstas inciden en el nivel de la carrera de filtración del sistema (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 118).

El espesor de la capa filtrante también es una variable que afecta al rendimiento del sistema, debido a que éste determina el tiempo de retención que tiene el fluido atravesando los medios filtrantes. Estudios y prácticas han demostrado que existe una relación adecuada entre los distintos materiales, siendo los más utilizados la arena y la antracita. Por lo general, la capa de antracita suele representar entre el 60 y el 80% del espesor total de medio filtrante mientras que la arena oscila entre el 20 y el 40% (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 118).

#### c) Características hidráulicas

Existen además algunos factores hidráulicos que inciden en el nivel de filtración del sistema, siendo estos la tasa de filtración, la carga hidráulica disponible para la filtración, y la calidad del efluente al ingresar al sistema. A continuación, un breve resumen de cada factor:



La tasa de filtración hace referencia a la cantidad de agua que puede procesar el medio filtrante. Tasas de filtración bajas -normalmente aplicadas para filtros lentos- indican valores menores de 0.1 m<sup>3</sup>/h y 0.3 m<sup>3</sup>/h, (Vargas, 2004, pág. 114). Tasas de filtración altas oscilan entre 80 y 100 veces más. Por lo tanto, es necesario tener claro las tasas de filtración y el hecho que sus variaciones pueden afectar sustancialmente la calidad de efluente (Maldonado & Vargas, 2004, págs. 120-122).

También es indispensable tener en cuenta que la calidad del efluente de entrada sí influye en la eficiencia de la filtración. Si existen un pretratamiento y una calidad de agua deficientes a la entrada del sistema, es conveniente tener una tasa de filtración más baja para asegurar un mayor tiempo de retención en los medios filtrantes y que así éstos puedan retener más sólidos.

La carga hidráulica también es un factor de incidencia dado que influye directamente en la duración de la carrera de filtración. Se suelen sugerir valores entre 1 y 1,5 m por encima de la superficie del lecho para asegurar una conductividad hidráulica positiva. Sin embargo, éste es un parámetro empírico y por lo general es determinado por el proyectista para aplicar al sistema en diseño (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 124).

#### **4.4 Filtros lentos**

##### **4.4.1 ¿Qué es un filtro lento?**

Este tipo de filtros es uno de los más antiguos a ser utilizado, y constituye una de las medidas de tratamiento del agua municipal; se usa generalmente con medios filtrantes de fácil aplicación y de alta eficiencia como es, por ejemplo, la arena. Este sistema es una simulación de los procesos de tratamiento que suceden en la naturaleza, siendo la manera en la que lluvia se percola en el suelo y llega a redes hídricas subterráneas, atravesando los estratos de la corteza terrestre, esto es: grava, arena y arcilla, entre otros (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 115)

En este mecanismo, la filtración aprovecha la fuerza de gravedad y la carga hidráulica para que el fluido atraviese los medios filtrantes, con el fin de que los sólidos en suspensión queden retenidos o se adhieran a las superficies de los medios (Barrientos, Tello, Titi, & Palomino, n/e, pág. 6).

#### 4.4.2 Ventajas y limitaciones del uso de filtros lentos

Las ventajas y limitaciones que existen en la utilización de los filtros lentos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3.

##### *Ventajas y limitaciones del uso de filtros lentos*

<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
Mejora la calidad del efluente a tratar, con bajos costos de fabricación y operación, constituye una alternativa viable para zonas rurales o de difícil acceso.	Sólo se pueden tratar efluentes de turbidez menores a un 5 NTUs para mayor eficiencia, limitando la amplitud de tratamiento posibles. Valores de 50 NTUs son admisibles por períodos cortos de tiempo
La eficacia en la eliminación de bacterias y p atógenos es similar o igual a la de los filtros rápidos	La tasa de filtración es baja, limitando la cantidad de agua que puede tratar el sistema.
No se requieren compuestos químicos para su operación	El sistema es propenso a saturarse si es que el efluente está muy cargado de partículas y contaminantes
No se requiere de ninguna fuerza externa dado que estos filtros funcionan por gravedad	
La cantidad de lodos que se forman es pequeña	
En cuanto a la materia orgánica, la filtración lenta produce un efluente	

claro con bajas concentraciones de materia orgánica	
Se pueden llegar a eliminar hasta el 99.9% de los patógenos presentes en el agua, entre ellos, quistes, huevos, E. Coli	
El color se reduce de forma significativa	
En cuanto a la turbidez, los filtros pueden operar a valores superiores a 50 NTUs por algunas semanas, sin embargo, pueden llegar a saturarse con rapidez. Por ello, se recomienda utilizar estos filtros para tratar aguas con turbidez menor a 5 NTUs.	

Adaptado de: Barrientos, Tello, Titi & Palomino, n/e, pág. 7

#### **4.4.3 Medios filtrantes frecuentemente usados**

Entre los medios filtrantes frecuentemente usados para los filtros lentos están: grava, arena, antracita, magnetita, granate, entre otros materiales (Crittenden, Rhodes, Hand, Howe, & Tchobanoglous, 2012, pág. 740).

Cada uno de estos medios tiene características intrínsecas específicas, propias del material y aportan al sistema de manera individual para crear una condición determinada y/o permiten remover contaminantes específicos. Las combinaciones de éstos permiten tratar aguas con diversos contaminantes, siendo una alternativa viable que puede ser complementada con otra operación unitaria. A continuación, se presentan algunos ejemplos de aplicación, frecuentemente usados, de algunos de los medios o de un conjunto de medios:

- a) Filtros multimedia (antracita, arena, garnet, grava): este tipo de medios es utilizado para la remoción de sólidos suspendidos en el efluente, con tamaño de hasta 20 micrones (Agua Azul, Tecnología Internacional, 2017)
- b) Filtros de zeolita: estos filtros son empleados para la industria y para los sistemas de tratamiento de agua potable o residuales, debido a las propiedades únicas de estabilidad y microporosidad que tiene la zeolita (Agua Azul, Tecnología Internacional, 2017)
- c) Filtros de carbón activado: dada la naturaleza del carbón activado y sus propiedades únicas, filtros que requieren de este material son utilizados para la remoción de contaminantes, tales como compuestos inorgánicos de cloro, cloraminas, taninos y algunos metales pesados, entre otros (Agua Azul, Tecnología Internacional, 2017).
- d) Filtros de antracita: Este tipo de filtros permite una mayor retención de partículas y elimina fácilmente depósitos de hierro y manganeso, entre otros beneficios (Martinez, n/e)

#### **4.4.4 Ejemplos de filtros lentos**

Existen ejemplos de filtros lentos que pueden ser utilizados a nivel doméstico y que han sido implementados en zonas rurales de escasos recursos, por algunos organismos internacionales, entre ellos, la OPS (Organización Panamericana de la Salud). Uno de ellos es el uso de filtros lentos de arena, los que por medio de este mecanismo han logrado eliminar eficazmente las impurezas existentes en el agua que consumen dichas comunidades, reduciendo drásticamente el número de personas con enfermedades relacionadas con la calidad del agua (Organización Panamericana de la Salud, n/e).

Entre las características que sobresalen en el uso de este tipo de filtros, está el hecho que pueden ser producidos en base a recipientes plásticos, o de concreto y solamente se necesitan entre 2 a 3 semanas para que el filtro funcione correctamente y se pueda formar la biopelícula que permite eliminar

bacterias y virus. Se puede complementar el filtro mediante el uso de cloro para que tenga un nivel de desinfección superior (Organización Panamericana de la Salud, n/e). A continuación, se presenta un bosquejo del diseño de este tipo de filtro:

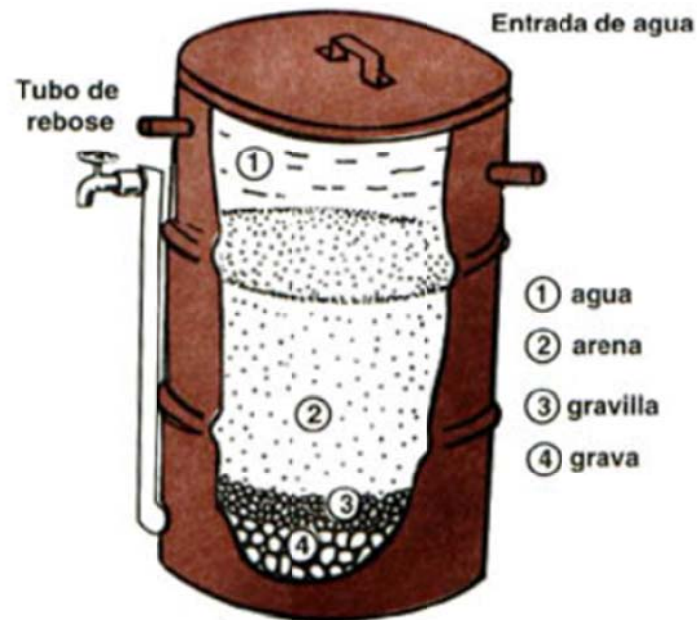


Figura 9. Bosquejo de filtro lento de arena dispuesto por la OPS

#### 4.5 Resumen de criterios de diseño para la filtración

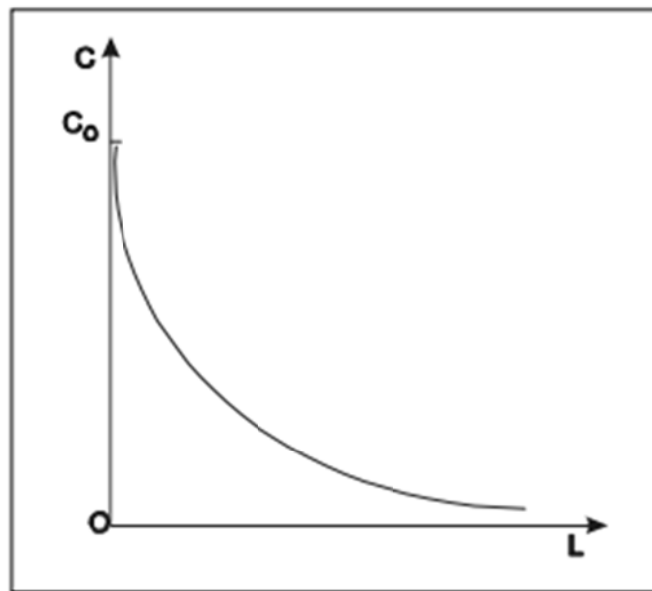
A continuación, se presentan los criterios de diseño encontrados en el CEPIS y los ya descritos en el marco teórico, que constan en el libro “Water Treatment Principles and Design” (Crittenden, Rhodes, Hand, Howe, & Tchobanoglous, 2012). Es bajo estas premisas, que se desarrollará el dimensionamiento del sistema de filtración:

##### 4.5.1 Criterios de diseño generales para la filtración

Los criterios de diseño son los pilares fundamentales a partir de los cuales se puede elaborar un diseño reproducible que sea efectivo. Mediante la implementación de estos principios, los parámetros y variables a utilizar deben

comprender valores en determinados rangos con el fin de garantizar un modelo viable. A continuación, se presentan los criterios de diseño para la filtración en sus aspectos más generales:

Durante el proceso de filtración se genera una saturación progresiva de los poros del medio filtrante, lo que conlleva la variación de la eficiencia de la remoción de las partículas del filtro (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 98). Esto se puede evidenciar en el siguiente gráfico, basados en la variable tiempo igual a cero:



*Figura 10.* Variación de la concentración en función del espesor del lecho filtrante para  $t=0$

Tomado de: Maldonado & Vargas, 2004, pág. 98

Existen ciertas dimensiones sugeridas para el grosor de la capa de cada medio poroso, en función del tipo de material que se va a utilizar, las que se resumen en la tabla 2

El proceso de filtración debe realizarse mediante un flujo laminar, debido a que un régimen de flujo mayor puede desestabilizar las capas de los medios porosos y éstos pueden mezclarse, causando una pérdida de eficiencia en el

proceso (Crittenden, Rhodes, Hand, Howe, & Tchobanoglous, 2012, pág. 743).

La pérdida de carga es otro fenómeno vital a considerar durante el diseño del sistema de filtración. Al pasar un fluido a través de un lecho filtrante, en el momento de atravesar los poros, la fricción generada por esto causa que el fluido tenga una pérdida de carga. Este, en todo caso, es un valor empírico que asume el proyectista. (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 103).

Ahora bien, al comenzar el proceso de filtración, los granos de los medios filtrantes están limpios y la pérdida de carga se deberá solamente al tamaño, forma y porosidad del lecho filtrante y, a su vez, a la viscosidad y velocidad del agua. Pero, como es natural, el fluido a tratar contiene sólidos en suspensión, los que irán saturando los medios de filtración e irá disminuyendo la porosidad inicial; esto genera una pérdida de carga debido a la reducción del área de paso del flujo (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 103).

En el texto “Sistemas de tratamiento de Agua”, Manual I: Teoría Tomo I, del CEPIS, se afirma -a partir de experiencias previas- que en el espesor de las capas de sistemas de tratamiento de agua de dos medios filtrantes, por lo general conformados por antracita y arena, existe una relación óptima para proporcionar condiciones ideales de filtración. Normalmente, el espesor de la antracita fluctúa entre 60 y 80%, mientras que el de la arena está alrededor de 20 y 40% del espesor total del medio filtrante.

#### **4.5.2 Criterios de diseño para filtros lentos**

Con respecto a las pautas base que se deben considerar para el uso de filtros lentos, se destacan las siguientes:

En primer lugar, vale decir que filtro lento es aquel que trabaja entre 0,1 m<sup>3</sup>/h y 0.3 m<sup>3</sup>/h (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 114).

“Una planta de filtración lenta puede estar constituida solo por filtros lentos pero, dependiendo de la calidad del agua, puede incorporar los procesos de desarenado, presedimentación, sedimentación, filtración

gruesa o filtración en grava y filtración lenta” (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 115).

Estos autores señalan además que los procesos de filtración lenta pueden remover aguas con turbidez de hasta 500 NTUs, considerando que el material coloidal no debe ser mayor a 50 NTUs (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 115).

Por otro lado, de acuerdo con la tabla 3-4 del CEPIS, para tratamiento de agua por filtros lentos los componentes que se deben incorporar dependerán de la calidad encontrada en el fluido a tratar:

Tabla 4.

*Procesos que se recomienda utilizar en función de los parámetros presentados en el agua.*

PROCESOS	PARÁMETROS	90% DEL TIEMPO	80% DEL TIEMPO	ESPORÁDICAMENTE
Filtro lento	Turbiedad (NTUs)	<20	<10	<50
	Color verdadero (UC)	<15	<5	
	Concentración de algas (UPA/mL)	250		
	DBO5 (mg(L))	5		
	NMP de coliformes totales/100 mL	1000		
	NMP de coliformes fecales/100 mL	500		
Filtro lento + prefiltro de grava	Turbiedad (NTUs)	25		
	Color (UC)	15	<5	<5
	NMP de coliformes totales /100 mL	5000		
	NMP de coliformes fecales /100 mL	1000		
	Concentración de	1000		



	algas (UPA/mL)			
Filtro lento + Prefiltro de grava + sedimentador	Turbiedad (NTUs)	100	<50	<1000
	Color (UC)	<15	<5	<5
	NMP de coliformes totales/100 mL	10000		
	NMP de coliformes fecales/100 mL	3000		
	Concentración de algas (UPA/mL)	1000		
Filtro lento + Pre filtro de grava + Sedimentador + Presedimentador	Turbiedad (NTUs)	100	<50	<1000
	Color (UC)	<15	<5	<25
	NMP de coliformes totales/100 mL	10000		
	NMP de coliformes fecales/100 mL	3000		
	Concentración de algas (UPA/mL)	1000		

Tomado de: Maldonado & Vargas, 2004, pág. 115

Por su parte, el material filtrante del sistema debe tener un diámetro de partícula que se recomienda esté entre 0.15 a 0.35 mm (Suárez, Jácome, & Ures, 2015, pág. 25)

Así mismo, la velocidad de filtración debe fluctuar entre 0.1 y 0.4 m/h;

La calidad del agua a tratar debería presentar valores de turbidez bajos y ser constante, con el fin de optimizar el proceso de tratamiento (Suárez, Jácome, & Ures, 2015, pág. 25).

La altura máxima de la cota de agua del sistema debe estar entre 1 y 1.5 mts (Suárez, Jácome, & Ures, 2015, pág. 25)

Cabe recalcar que a medida que el filtro opera, el lecho comienza a ensuciarse debido a la saturación de partículas suspendidas y, en consecuencia, se incrementa la pérdida de carga del medio hidráulico. (Suárez, Jácome, & Ures, 2015, pág. 26).

## **5. METODOLOGÍA**

### **5.1 Caracterización de las muestras**

#### **5.1.1 Recolección de muestras**

La toma de muestras se realizó en el recinto Bellavista de la parroquia General Farfán, en tres pozos representativos de la zona. Este sector fue escogido considerando, por un lado, las premisas dadas por el gobierno parroquial el que identifica a esta zona como un lugar que presenta contaminación de sus fuentes de agua. Por otro lado, de parte de la comunidad desde un principio existió una buena predisposición para permitir el muestreo de sus fuentes de agua y aún más, la realización del análisis fue explícitamente un requerimiento que plantearon los pobladores del sector durante las reuniones mantenidas con ellos.

Para la caracterización de las muestras se realizó primeramente una salida de campo a la zona de estudio, durante la cual se tomaron muestras de aguas de pozo en tres distintas localidades del recinto de Bellavista de la parroquia. Las muestras obtenidas fueron transportadas utilizando refrigerantes para su conservación y se entregaron al laboratorio en menos de 24 horas.

#### **5.1.2 Análisis de las muestras**

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de análisis ChávezSolutions Ambientales Cía. Ltda, el cual está acreditado por las normas INEN ISO/IEC 17025-2006, lo que garantizaba la fiabilidad de los resultados. Se escogieron

ciertos parámetros debido a que estos son los que reflejan si el estado del agua es apta para el consumo. Estos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.

*Parámetros analizados*

<b>Parámetro analizado</b>
1. Amonio
2. Arsénico
3. Coliformes totales
4. Cromo hexavalente
5. Demanda bioquímica de oxígeno
6. Demanda química de oxígeno
7. Hierro total
8. Mercurio
9. Nitratos
10. Nitritos
11. Potencial de hidrógeno
12. Sulfatos
13. Turbiedad

Se realizó un análisis físico químico semicompleto en razón de dos factores principales:

- a) El primero, es que mediante un sucinto análisis visual se pudo descartar la presencia de algunos contaminantes, tales como: hidrocarburos, aceites y grasas, y por lo tanto su análisis resultaba innecesario.
- b) El segundo factor fue la necesidad de reducir, en la medida de lo posible y sin que esto afecte los resultados, los costos que representaba el análisis de las muestras, puesto que el valor unitario por cada parámetro

es bastante elevado, más aún si consideramos que se trataba de tres muestras.

### 5.1.3 Comparación con la normativa legal vigente

Se compararon los resultados del laboratorio con los límites permisibles de los contaminantes establecidos en la tabla 2 para fuentes de agua que solo necesitan desinfección, del libro VI del TULSMA. La siguiente tabla indica los parámetros y límites permisibles que se aplicaron:

Tabla 6.

*Parámetros de calidad y límites para agua potable del TULSMA, que se aplican para fuentes de agua que solo necesitan desinfección\*:*

<b>Parámetros a Analizar</b>	<b>Expresado Como</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite</b>
<i>Amonio</i>	NH4+	mg/L	0.5
<i>Arsénico</i>	As		0.01
<i>Coliformes Totales</i>	NMP	NMP/100ml	200
<i>Cromo hexavalente</i>	Cr+6	mg/L	0.05
<i>Demanda Química de Oxígeno</i>	DQO	mg/L	<4
<i>Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 Días)</i>	DBO5	mg/L	<2
<i>Hierro total</i>	Fe	mg/L	0.3
<i>Mercurio</i>	Hg	mg/L	0.006
<i>Nitratos</i>	NO3	mg/L	50
<i>Nitritos</i>	NO2	mg/L	0.2
<i>Potencial Hidrógeno</i>	pH	Unidades de pH	6-9
<i>Sulfatos</i>	SO4	mg/L	250
<i>Turbidez</i>	Turbiedad	NTU	5

Adaptada de: Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015, pág. 11

## **5.2 Determinación de mecanismos de tratamiento**

En función de los contaminantes presentes en las aguas a tratar, se propuso el uso de uno de los mecanismos de tratamiento estipulados tanto por la Organización Mundial de la Salud (OMS), como por la Organización Panamericana para la Salud (OPS). Uno de los tratamientos más frecuentes es en este caso, el de filtración, puesto que resulta ser el más viable en términos de su eficiencia y del tipo de contaminantes analizados.

### **5.2.1 Descripción de los medios filtrantes a utilizar**

Se realizó una descripción de los posibles medios filtrantes -o conjunto de ellos- que se podrían utilizar para tratar el agua en cuestión, tomando en cuenta los parámetros que estaban fuera de los límites permisibles de la normativa. Para esto, se aplicó el siguiente diagrama, el que presenta de manera amplia todos los tratamientos posibles, tomando en cuenta los contaminantes presentes en el agua:

Posibles medios  
filtrantes a utilizar

En función de los contaminantes encontrados, se proponen los siguientes  
medios de tratamiento:

Arena

Para la remoción  
de patógenos y  
coliformes

Para la retención  
de partículas en  
suspensión de  
hasta 20  
micrones

Antracita

Para retención de  
partículas en  
suspensión

Presenta  
mayores índices  
de eficiencia en  
la filtración, que  
la arena

Carbón activado

Para la remoción  
de ciertos  
metales pesados

Para la remoción  
de componentes  
inorgánicos

Zeolita

Sus  
características  
se prestan para  
carga de  
contaminantes  
alta

Otros medios

En el caso de  
presentarse  
contaminantes  
específicos se  
puede optar por  
el uso de otros  
medios para su  
remoción con  
mayor eficiencia

### 5.3 Diseño del sistema de filtración prototipo

Para la elaboración del diseño se consideraron varios factores:

- Lugar de aplicación
- Consumo de agua por persona
- Contaminantes a tratar que superan la norma
- Medios filtrantes a utilizar para el tratamiento
- Bases y criterios de diseño

En este punto es necesario remitirse a los criterios de diseño presentados en el CEPIS y que constan en el libro “Water Treatment Principles and Design” los que permiten definir las pautas generales que se deben seguir para el desarrollo hidráulico del sistema y saber si el diseño propuesto se apega a esas condiciones.

Así mismo, vale anotar que, si bien no son específicas para filtros domésticos, las bases de diseño que se utilizaron en el presente proyecto están de acuerdo con la norma INEN (1997) para sistemas de tratamientos de agua para poblaciones rurales y normativas internacionales como la DIN (2015). En este caso, se tomaron en cuenta solo aquellas bases que se podían aplicar para el diseño del sistema piloto doméstico propuesto.

Una vez elaborado el diseño, se compararon las dimensiones calculadas con las que tienen los filtros que existen actualmente en el mercado y, se recalcularon los parámetros utilizados para la fabricación del filtro. Para esto, se reemplazaron los valores encontrados en el mercado el proceso de dimensionamiento para obtener el diseño final del sistema de tratamiento de agua.

- Proceso de diseño

Para el proceso de diseño se consideraron algunos conceptos. En primer lugar, están los aspectos hidráulicos entre ellos, la ley de Darcy, el coeficiente hidráulico equivalente y la hidráulica carga del sistema los que permiten calcular los valores de dimensión esenciales, es decir: espesor del filtro, diámetro del filtro, y la pérdida de carga.

Para el diseño del sistema hidráulico se debe partir de parámetros y valores base que son elegidos mediante referencias y criterios de diseño. A partir de estos se derivan el resto de variables y los parámetros que permiten continuar con el proceso de diseño. A continuación, se presenta el proceso utilizado para el dimensionamiento del sistema:

Para la determinación de los parámetros base y las dimensiones del filtro, se partió primeramente del cálculo del caudal que se intenta tratar con el sistema, para posteriormente pasar a determinar las dimensiones de área transversal y los espesores. Una vez obtenidos esos valores, se procedió a determinar la carga hidráulica que tendrá el sistema al final, calculando las pérdidas de carga que eventualmente ocurrirán en cada uno de los medios filtrantes. Esto se lo realizó con el fin de evidenciar si el sistema es viable hidráulicamente.

#### Determinación del caudal

Para la determinación del caudal, es necesario considerar cuanto volumen de agua debe procesar el sistema de filtración para suplir las necesidades de agua de consumo que tiene una persona. Según la iniciativa “Hydration for Health”, existen distintas necesidades hídricas en función del género y de la edad (2010). Si se toma el valor referencial para adultos, se necesitan entre 2 000 ml y 2 500 ml de agua diaria por persona.

Con esto en consideración, la determinación del caudal a tratar se define a partir de la siguiente ecuación:

$$Q \text{ a tratar} = \text{número de personas promedio por hogar} \\ * \text{demanda hídrica por persona diaria}$$

Es necesario considerar también que el sistema será utilizado aproximadamente 12 h horas por día que son normalmente las horas de actividad que tienen una persona en una jornada, por lo que el volumen de agua propuesto va a ser tratado dentro de este margen de tiempo. Por lo tanto, el caudal real a tratar diariamente se define mediante la siguiente expresión:

$$\frac{Q \text{ a tratar}}{12 \text{ h}} = \text{Caudal real a tratar diariamente}$$



Se aplicó además un factor de conversión del 20% para asegurar que no exista una deficiencia en la provisión del volumen de agua necesaria:

$$\text{Caudal real a tratar con factor de conversión} = Q * 1,2$$

a) Cálculo del coeficiente hidráulico equivalente

Una vez obtenido el caudal a tratar, se procedió a calcular el coeficiente hidráulico equivalente, considerando que se van a utilizar dos medios filtrantes, para el tratamiento del agua: arena y antracita.

Para determinar este coeficiente se utilizó la ecuación (3) que se presenta a continuación:

$$Kv = \frac{B}{\sum \frac{b_i}{k_i}}$$

Donde:

$Kv$  = conductividad hidráulica vertical

$ki$  = conductividad hidráulica de cada una de las capas

$bi$  = espesor de cada una de las capas

$B$  = espesor total, suma de todos los espesores

Vale decir que este tipo de filtros tiene recomendaciones de uso y criterios de diseño específicos, cuando se trata de los medios filtrantes seleccionados. A continuación, se presenta la tabla de dimensiones de espesor del lecho a utilizar, sugerida por el “Water Treatment Principles & Design” para obtener el espesor de cada capa:

Tabla 7.

*Espesor de capas sugerido para diseño de filtros Dualmedia de arena y antracita*

<b>Filtro</b>	<b>Descripción del filtro</b>
Dualmedia	Consiste en un medio filtrante de dos capas, normalmente de 0.45 a 0.6 m de antracita sobre 0.23 a 0.3 m de arena. También se puede optar por utilizar capas de 1.5 a 1.8m de antracita en la capa superior como medios de lecho profundo. Estos tipos de filtros son más duraderos frente a los de Monomedia.

Tomado de: Crittenden, Rhodes, Hand, Howe, & Tchnobanoglous, 2012, pág. 737

En esta etapa es necesario también tener en cuenta las relaciones en porcentaje que sugiere el CEPIS, en las que la antracita abarca entre un 60 a 80% del lecho, mientras que la arena representa únicamente un 20 a 40% del mismo (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 118).

Así también, los coeficientes hidráulicos fueron tomados en cuenta en función de los valores de permeabilidad que tiene este tipo de materiales, siendo para la arena, entre  $10e-1$  a  $10e-4$  cm/seg, y, para la antracita, entre 10 a  $10e-1$  cm/seg (Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006, pág. 16).

#### b) Cálculo de la sección transversal

Para el cálculo de la sección transversal, se partió de la ecuación (2.1), la que utiliza el valor de caudal previamente calculado y el valor de velocidad de la filtración, sugerido por el CEPIS para realizar una filtración lenta:

$$Q = A * V$$

Donde:

$Q$  = caudal del fluido

$A$  = área de la sección transversal

$V$  = velocidad de filtración de Darcy

Con esta ecuación base se despeja el área y se obtiene la sección transversal, como se muestra a continuación:

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

c) Cálculo de la carga hidráulica final del lecho

Así también, es necesario determinar la variación de carga para poder determinar a su vez la pérdida de carga que ocurre en el sistema. Por ello, se utilizó la ecuación (2) para obtener la variación de carga que tendrá el sistema:

$$Q = -A * K_h * \frac{\Delta h}{L}$$

Donde:

$Q$  = caudal del fluido

$A$  = área por donde atraviesa el fluido

$K_h$  = coeficiente hidráulico del medio poroso

$\frac{\Delta h}{L}$  = relación entre la variación de la carga hidráulica y el espesor del lecho

Para el efecto, se debió despejar la variación de la carga hidráulica  $\Delta h$  con respecto al coeficiente hidráulico equivalente y el espesor del lecho que es de 75 cm. Además, fue necesario considerar un valor inicial de carga hidráulica. El CEPIS sugiere que este valor se encuentre dentro 1 y 1,5 m por encima de la

superficie del lecho. Sin embargo, se asumirá un valor de 75 cm en tanto se trata de un filtro de carácter doméstico.

Se despejó la variación de carga hidráulica mediante la siguiente expresión:

$$\Delta h = \frac{-Q * L}{A * K_h}$$

Luego, se procedió a terminar la carga final despejando los valores de variación de carga y de carga inicial.

$$\Delta h = h_o - h_f$$

Donde:

$\Delta h$  = variación de carga hidráulica

$h_f$  = carga hidráulica final

$h_o$  = carga hidráulica inicial

Se despejó la carga hidráulica final:

$$h_f = h_o - \Delta h$$

#### d) Cálculo de la pérdida de carga del sistema

Para el cálculo de la pérdida de carga del sistema, se utilizó la ecuación (8) con el fin de restar a la carga final del sistema y encontrar la carga hidráulica real. Se realizó el cálculo de pérdida de carga por cada medio filtrante, es decir, la pérdida generada por la arena y la que genera la antracita. Estos valores se restaron luego de la carga hidráulica final del sistema. Vale decir que, si este valor genera una carga hidráulica final negativa, significa que el sistema no es viable, y es necesario recalcular las dimensiones del filtro. A continuación, se presenta la ecuación que se utilizó:

$$(8) \quad h_0 = f * \frac{v}{g} * L * \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} * V * \left( \frac{6}{C_e * D} \right)^2$$

Donde:

$f$  = constante experimental y adimensional igual a 5

$v$  = viscosidad cinemática a 10°C (se asume este valor debido a la cercanía con respecto a la temperatura de las aguas muestreadas)

$g$  = aceleración de la gravedad

$L$  = profundidad del lecho

$\varepsilon_0$  = porosidad inicial

$V$  = velocidad de filtración

$D$  = diámetro de partícula

$C_e$  = coeficiente de esfericidad de la partícula

e) Análisis hidráulico con dimensiones disponibles en el mercado

Ahora bien, una vez obtenidas las dimensiones a utilizar para el diseño del sistema, se debieron comparar dichos valores con aquellos disponibles en el mercado. Cabe anotar que el diseño del sistema de filtración se lo realizará tomando como material base el PVC, puesto que se trata de un material resistente, capaz de soportar cargas hidráulicas para tuberías internas de casas y edificios.

f) Cálculo de nueva sección transversal

Se procede a calcular la nueva sección transversal con el valor de diámetro obtenido de 15.3 cm

$$\text{Sección transversal} = \pi * r^2$$

Donde:

$\pi$  = número empírico Pi 3.1415

$r$  = radio de la tubería de PVC – Mitad del diámetro

Posterior a esto, se calculó el nuevo caudal manteniendo la misma velocidad de filtración según lo definido por el criterio de diseño. Esto se lo realizó mediante la aplicación de la ecuación 2.1 de la ley de Darcy:

$$Q = A * V$$

g) Cálculo de la nueva carga hidráulica

Nuevamente, se despejó la variación de la carga hidráulica  $\Delta h$  con respecto al coeficiente hidráulico equivalente y el espesor del lecho determinados previamente. En este caso tampoco se puede omitir el criterio con el cual se asume la carga inicial del sistema. Como ya se dijo, el CEPIS sugiere que este valor se encuentre dentro 1 y 1,5 m por encima de la superficie del lecho, es decir, que esté una fase de agua de 1 a 1,5 m por encima del lecho. Sin embargo, se asumió nuevamente el mismo valor de 75 cm por comodidad en el uso doméstico del filtro.

h) Cálculo de la nueva carga final del sistema

Luego, se procedió a terminar la carga final despejando los valores de variación de carga y de carga inicial. Se despejó nuevamente, la carga hidráulica final:

$$h_f = h_o - \Delta h$$

i) Cálculo de la pérdida de carga del sistema y carga final real

El cálculo de la pérdida de carga no varía según la sección transversal, por lo que tienen los mismos valores calculados en el apartado. Estos valores se usaron para determinar la nueva carga final del sistema.

j) Cálculo de la masa del medio adsorbente

Para el efecto, se consideró la suma de la masa de ambos medios adsorbentes presentes en el sistema, puesto que el diseño del filtro cuenta con arena y antracita.

$$m_{medio} = d_{medio} * V_{medio}$$

Donde:

$d_{medio}$  = densidad del medio

$V_{medio}$  = volumen del medio

Se realizó este cálculo con la arena y luego con la antracita para determinar la masa necesaria por cada medio. Luego se sumó las masas resultantes y se obtuvo la masa total a utilizar en el sistema.

#### **5.4 Vida útil del sistema de tratamiento de agua**

Una vez diseñado el filtro y comprobada la viabilidad hidráulica del sistema, se procedió a realizar el análisis de vida útil del lecho, con el fin de determinar cuánta agua puede tratar el sistema antes de que se colmaten los medios porosos. Esto se realizó aplicando las pautas consideradas en los modelos de adsorción por filtración, en específico, considerando la isoterma de Freundlich. Se obtuvo una ecuación que determina la vida útil del sistema una vez realizados algunas pruebas del sistema.

Ahora bien, para el cálculo del tiempo de ruptura/vida útil del lecho, previo a la regeneración, se usaron como base los conceptos de tiempo de ruptura e

isotermas de adsorción. Se desarrolló una expresión que permite determinar de manera aproximada, el tiempo de vida útil del sistema en función de parámetros tales como: volumen y densidad del medio adsorbente, concentración inicial del contaminante, el caudal y el factor de capacidad de Freundlich.

Para desarrollar esta expresión, se realizó el siguiente proceso:

- a) Se partió de la ecuación (19), para el cálculo del tiempo de vida del lecho

$$(19) \quad \text{tiempo de vida del lecho} = \frac{\text{volumen de agua tratada}}{Q}$$

Donde:

*tiempo de vida del lecho* = en h,

*volumen de agua tratada* = en L de agua tratada

*Q* = caudal del agua a tratar, L / h

Se reemplazó lo que equivale al volumen de agua tratada de la ecuación (18), obteniendo así la siguiente expresión:

$$\text{tiempo de vida del lecho} = \frac{\frac{\text{masa del medio filtrante para EBCT}}{\text{tasa de uso del medio}}}{Q}$$

- b) Posteriormente, se reemplazó en la expresión lo que representaba a cada parámetro; se reajustaron los parámetros y se obtuvo el siguiente resultado:

$$\text{tiempo de vida del lecho} = \frac{(EBCT * Q * \rho_{\text{medio adsorbente}}) * (k_f * C_e^{\frac{1}{n}})}{(C_o - C_e) * Q}$$



Donde:

$EBCT$  = tiempo de contacto con el lecho vacío, h

$Q$  = caudal del agua a tratar, L / h

$\rho_{adsorbente}$  = densidad del medio adsorbente, g / L

$Kf$  = factor de capacidad de Freundlich (mg adsorbato / g medio adsorbente) \* (L agua / mg adsorbato) ^ (ln/n)

$C_o$  = concentración inicial de adsorbato, mg/L

$C_e$  = concentración de adsorbato luego de que ocurrió la adsorción, mg/L

$l/n$  = parámetro de intensidad de Freundlich

- c) Luego, se reemplazó el EBCT a sus equivalencias iniciales, obteniendo de esta manera la siguiente expresión

$$\text{tiempo de vida del lecho} = \frac{\left(\frac{V_b}{Q} * Q * \rho_{\text{medio adsorbente}}\right) * (kf * C_e^{\frac{l}{n}})}{(C_o - C_e) * Q}$$

Donde:

$Q$  = caudal del agua a tratar, L / h

$V_b$  = volumen del medio adsorbente, L

$\rho_{adsorbente}$  = densidad del medio adsorbente, g / L

$Kf$  = factor de capacidad de Freundlich (mg adsorbato / g medio adsorbente) \* (L agua / mg adsorbato) ^ (ln/n)

$C_o$  = concentración inicial de adsorbato, mg/L

$C_e$  = concentración de adsorbato luego de que ocurrió la adsorción, mg/L

$l/n$  = parámetro de intensidad de Freundlich

d) Se eliminó el caudal en el numerador.

$$\text{tiempo de vida del lecho} = \frac{(Vb * \rho_{\text{medio adsorbente}}) * (kf * Ce^{\frac{l}{n}})}{(Co - Ce) * Q}$$

### 5.5 Análisis de costos

Se realizó un análisis de costos que incorporó los materiales necesarios para elaborar el filtro y los medios filtrantes a utilizar, para de esta manera determinar el costo final del sistema. Cabe anotar que se trata de un análisis de costos unitario, es decir, corresponde a cada sistema de tratamiento que se implemente.

## 6. RESULTADOS

Los resultados alcanzados se ajustan a los objetivos específicos del proyecto y a sus respectivas etapas:

### 6.1 Resultados del análisis de las aguas a tratar del recinto seleccionado

En cuanto a la ubicación de los puntos de muestreo, cabe aclarar que los puntos M1 y M2 fueron escogidos por estar ubicados específicamente en hogares cuya provisión del líquido vital proviene exclusivamente de agua subterránea, para consumo humano.

En cambio, el punto de muestreo M3 fue escogido por estar ubicado en el colegio de la zona; esta agua es usada y consumida directamente por los funcionarios del colegio y por los niños que estudian en dicho establecimiento.

Los resultados de concentración de los contaminantes obtenidos de las muestras de agua se muestran en la tabla 7, 8 y 9

Tabla 8.

*Análisis físico químico del agua de pozo del punto de muestro M1, del recinto Bellavista de la parroquia General Farfán/provincia de Sucumbíos*

<b>Tipo de muestras</b>	Agua de pozo
<b>Código de Muestreo</b>	M1

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Max Permisible</b>	<b>Métodos</b>	<b>Concentración</b>	<b>Cumple</b>
Amonio	mg/L	0,01	APHA 3120 B	<0,010	C
Arsénico	mg/L	0,5	HACH 8038	<0,32	C
Coliformes Totales	mg/L	200	PEE49/SM-Ed-22 9222 B	<1	C
Cromo Hexavalente	mg/L	0,05	PEE29/ HACH 8023	<0,025	C
DBO	mg/L	<2	PEE11/SM-Ed-22 5210 D	<10	C
DQO	mg/L	<4	PEE03/SM-Ed 22 5220 D	<20	C
Hierro total	mg/L	0,3	PEE19/SM-Ed-22 3111 B	<0,1	C
Mercurio	mg/L	0,006	APHA 3120 B	<0,005	C
Nitratos	un Ph	50	PEE56/ HACH 8171	0,3	C
Nitritos	mg/L	0,2	PEE56/ HACH 8507	0,01	C
Potencial de hidrógeno	ml/L	6 a 9	PEE02/SM-Ed-22, 4500 H+B	6,6	C
Sulfatos	mg/L	250	PEE02/SM-Ed-22, 4500 SO4	4	C
Turbiedad	NTU	5	HACH 8237	<1	C

Lo que indican las caracterizaciones del agua presentadas en los cuadros anteriores, es que la muestra de agua M1 no presenta ningún parámetro fuera de los límites de la norma aplicable, del libro VI de I TULSMA, tabla 2 para fuentes de agua que solo necesitan desinfección.

Tabla 9.

*Análisis físico químico del agua de pozo del punto de muestro M2, del recinto Bellavista de la parroquia General Farfán/provincia de Sucumbíos.*

<b>Tipo de muestras</b>	Agua de pozo
<b>Código de Muestreo</b>	M2

Parámetro	Unidad	Valor Max Permissible	Métodos	Concentración	Cumple
Amonio	mg/L	0,01	APHA 3120 B	<0,010	C
Arsénico	mg/L	0,5	HACH 8038	<0,32	C
Coliformes Totales	mg/L	200	PEE49/SM-Ed-22 9222 B	1000	NC
Cromo Hexavalente	mg/L	0,05	PEE29/ HACH 8023	<0,025	C
DBO	mg/L	<2	PEE11/SM-Ed-22 5210 D	15	NC
DQO	mg/L	<4	PEE03/SM-Ed 22 5220 D	23	NC
Hierro total	mg/L	0,3	PEE19/SM-Ed-22 3111 B	<0,1	C
Mercurio	mg/L	0,006	APHA 3120 B	<0,005	C
Nitratos	un Ph	50	PEE56/ HACH 8171	2,2	C
Nitritos	mg/L	0,2	PEE56/ HACH 8507	0,018	C
Potencial de hidrógeno	ml/L	6 a 9	PEE02/SM-Ed-22, 4500 H+B	7	C
Sulfatos	mg/L	250	PEE02/SM-Ed-22, 4500 SO4	4	C
Turbiedad	NTU	5	HACH 8237	<1	C

Con respecto a la muestra M2, se presentan fuera de los límites de la norma del libro VI del TULSMA, tabla 2 para fuentes de agua que solo necesitan desinfección, los siguientes contaminantes: Coliformes Totales, superándola por 800 mg/L, DBO superando la norma por un valor marginal de 13 mg/l y en cuanto al DQO, se superando la norma por un valor de 19 mg/L.

Tabla 10.

*Análisis físico químico del agua de pozo del punto de muestro M3, del recinto Bellavista de la parroquia General Farfán / provincia de Sucumbíos.*

<b>Tipo de muestras</b>	Agua de pozo
<b>Código de Muestreo</b>	M3

Parámetro	Unidad	Valor Max Permissible	Métodos	Concentración	Cumple
Amonio	mg/L	0,01	APHA 3120 B	<0,010	C
Arsénico	mg/L	0,5	HACH 8038	<0,32	C
Coliformes Totales	mg/L	200	PEE49/SM-Ed-22 9222 B	6000	NC
Cromo Hexavalente	mg/L	0,05	PEE29/ HACH 8023	<0,025	C
DBO	mg/L	<2	PEE11/SM-Ed-22 5210 D	10	NC
DQO	mg/L	<4	PEE03/SM-Ed 22 5220 D	<20	NC
Hierro total	mg/L	0,3	PEE19/SM-Ed-22 3111 B	<0,1	C
Mercurio	mg/L	0,006	APHA 3120 B	<0,005	C
Nitratos	un Ph	50	PEE56/ HACH 8171	0,1	C
Nitritos	mg/L	0,2	PEE56/ HACH 8507	0,207	C
Potencial de hidrógeno	ml/L	6 a 9	PEE02/SM-Ed-22, 4500 H+B	6,18	C
Sulfatos	mg/L	250	PEE02/SM-Ed-22, 4500 SO4	<1	C
Turbiedad	NTU	5	HACH 8237	1	C

Con respecto a la muestra M3, esta presenta de manera similar contaminantes fuera del límite permisible de la norma del libro VI del TULSMA, tabla 2 para fuentes de agua que solo necesitan desinfección., en cuanto se refiere a Coliformes Totales, DQO y DBO, superándola por 5800 mg/L, por más de 8 mg/L y por menos de 20 mg/L respectivamente

Ahora bien, debido a que los parámetros que se encuentran fuera de los límites de la norma son limitados y presentan niveles bajos, se tomó en cuenta la muestra de agua más contaminada siendo esta la M3 como la muestra base para la aplicación del proceso recomendado por el CEPIS para estos

parámetros, que es el de filtración lenta, pero que incluye otros parámetros fuera norma.

Los parámetros y las concentraciones presentadas en la tabla 10., son los recomendados para el tratamiento mediante filtración lenta propuesto por el CEPIS (2004, pág. 115):

Tabla 11.

*Parámetros y niveles de concentración para proceso de tratamiento mediante filtro lento*

PROCESOS	PARÁMETROS	90% DEL TIEMPO	80% DEL TIEMPO	ESPORÁDICAMENTE
Filtro lento	Turbiedad (NTUs)	<20	<10	<50
	Color verdadero (UC)	<15	<5	
	Concentración de algas (UPA/mL)	250		
	DBO5 (mg(L))	5		
	NMP de coliformes totales/100 mL	1000		
	NMP de coliformes fecales/100 mL	500		

A partir de estos parámetros se elegirán los medios filtrantes necesarios para realizar el diseño del sistema de tratamiento de agua que es objeto del presente trabajo.

## **6.2 Medios filtrantes seleccionados en función de contaminantes fuera de los límites de la norma**

Para la selección de los medios filtrantes seleccionados para el tratamiento de los contaminantes encontrados, se realizó una selección donde se expone los beneficios de cada medio considerando las condiciones del agua. Tomando en

cuenta lo estipulado por la tabla, se justificó la selección de los medios filtrantes.

Los medios seleccionados fueron arena y antracita, por las razones que se exponen a continuación:

- a) Arena: este material ha sido el medio filtrante más utilizado desde la creación de los primeros filtros de agua, debido a que sus propiedades se prestan eficazmente para este tipo de operaciones. Filtros lentos de arena producen efluentes claros, con porcentajes de remoción del 99 y 99.9% de remoción de bacterias patógenas; además reduce el color de manera significativa, de la misma forma que también reduce la carga orgánica presente en el agua (Barrientos, Tello, Titi, & Palomino, n/e, pág. 7)
- b) Antracita: En combinación con arenas filtrantes, este medio es excelente para la clarificación del agua, pues retiene los sólidos en suspensión en la profundidad del lecho. El usar este tipo de material filtrante tiene la ventaja de tener una menor caída de presión y facilita el flujo del fluido (Carbotecnia S.A., 2017)

El usar estos dos medios permite crear un filtro Dualmedia, arena - antracita.

Con estas premisas en consideración, el siguiente paso es entonces el dimensionamiento hidráulico del sistema de filtración:

### **6.3 Diseño hidráulico del sistema**

#### **6.3.1 Determinación de los parámetros base y dimensiones del filtro**

- a) Cálculo del caudal

Para la determinación del caudal a tratar para el recinto Bellavista, se asumieron los rangos superiores del valor referencial:

$$6 \text{ personas} * 2,5 \text{ L agua/día} = 15 \text{ litros de agua/día}$$

El sistema debe procesar entonces al menos 15 litros de agua al día. Por lo tanto, el caudal a tratar será la demanda hídrica de la familia en función del tiempo de uso del filtro, es decir 15 litros de agua, para 12 horas de uso del filtro.

$$15 \frac{L \text{ de agua}}{12 \text{ h}} = 1.25 \text{ L/h}$$

Se aplicó además un factor de conversión del 20%:

$$\text{Caudal a tratar} = 1.25 \frac{L}{h} * 1,2 = 1.5 \text{ L/h}$$

El caudal a tratar es de **1.5 L/h**.

Este valor al transformarlo a una relación de volumen de agua a tratar anualmente da como resultado 5.5 m<sup>3</sup>, por lo que se encuentra dentro del margen de los 1000 m<sup>3</sup>/año necesarios para ser considerado como un sistema de tratamiento a pequeña escala según la norma DIN (2015).

b) Cálculo del coeficiente hidráulico equivalente

Con esto en consideración se procedió a calcular el valor de conductividad hidráulica equivalente vertical.

Para ello los valores a usar fueron:

Espesor de capa de arena: 25 cm arena

Espesor de capa de antracita: 50 cm antracita

Conductividad hidráulica de arena: 10-e3 cm/seg

Conductividad hidráulica de antracita: 1 cm/seg

$$Kv = \frac{75 \text{ cm}}{\frac{25 \text{ cm}}{0.01 \text{ cm/s}} + \frac{50 \text{ cm}}{1 \text{ cm/s}}}$$



$$Kv = 0.029 \text{ cm/s}$$

El resultado es que la conductividad hidráulica del medio filtrante dualmedia a ser utilizado, es de **0.029 cm/s**.

c) Cálculo de la sección transversal

Se procedió a calcular el área de la sección transversal:

Valores a usar:

$$\text{Caudal: } 1.5 \text{ L/h} - 0.0015 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$\text{Velocidad de filtración: } 0.1 \text{ m/h}$$

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

$$A = \frac{0.0015 \text{ m}^3/\text{h}}{0.1 \text{ m/h}}$$

$$A = 0.015 \text{ m}^2 - 150 \text{ cm}^2$$

El resultado es que el área de la sección transversal del filtro es de **150 cm<sup>2</sup>**

### 6.3.2 Cálculo de la carga hidráulica al final del lecho

Así también, es necesario determinar la variación de carga para poder determinar a su vez la pérdida de carga que ocurre en el sistema. Por ello, se utilizó la ecuación (2) para obtener la variación de carga que tendrá el sistema:

a) Cálculo de la variación de la carga hidráulica

Se procedió entonces a calcular la variación de carga hidráulica del sistema:

Valores a usar:

Caudal: 0.0015 m<sup>3</sup>/h – 4.167 e-7 m<sup>3</sup>/s

Área de la sección transversal: 0.015 m<sup>2</sup>

Coefficiente hidráulico equivalente: 0.029 cm/s – 0.00029 m/s

Espesor del lecho filtrante: 75 cm – 0.75m

$$Q = -A * K_h * \frac{\Delta h}{L}$$

$$\Delta h = \frac{-Q * L}{A * K_h}$$

$$\Delta h = \frac{-4.167^{-7} m^3/s * 0.75 m}{0,015 m^2 * 0,00029 m/s}$$

$$\Delta h = -0,071 m$$

La variación de la carga hidráulica del sistema es de **0.071 m**.

b) Cálculo de la carga hidráulica final

Ahora bien, con este valor se determinó la carga hidráulica final aplicando el valor inicial de 0,75 m, que es el espesor de la capa de agua encima del lecho filtrante:

Valores a usar:

Variación de carga hidráulica: 0.071 m

Carga hidráulica inicial: 0.75 m

$$h_f = h_o - \Delta h$$

$$h_f = 0,75 \text{ m} - (-0.071 \text{ m})$$

$$h_f = 0.821 \text{ m}$$

La carga hidráulica final del sistema es de **0.821 m**.

### 6.3.3 Cálculo de la pérdida de carga del sistema

Se realizaron los cálculos de la pérdida de carga del sistema según el medio filtrante

a) Cálculo de la pérdida de carga de la arena

Para el cálculo de la pérdida de carga de la arena se consideraron los siguientes valores:

Valores a usar:

Viscosidad cinemática:  $1.308 \text{ e-}6 \text{ m}^2/\text{s}$  a  $10^\circ\text{C}$

Aceleración de la gravedad:  $9.81 \text{ m/s}^2$

Profundidad del medio filtrante:  $0.25 \text{ m}$

Porosidad inicial:  $35\%$

Velocidad de filtración:  $0.1 \text{ m/h} - 2.77\text{e-}5 \text{ m/s}$

Diámetro de partícula:  $0.8 \text{ mm} - 0.0008 \text{ m}$

Co eficiente de esfericidad:  $0.8$

$$h_{0-arena} = f * \frac{v}{g} * L * \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} * V * \left( \frac{6}{C_e * D} \right)^2$$

$$h_{o-arena} = 5 * \frac{1.308^{-6}m^2}{9.81 \frac{m}{s^2}} * 0.25m * \frac{(1 - 0.35)^2}{0.35^3} * 2.77^{-5}m/s * \left(\frac{6}{0.8 * 0.0008m}\right)^2$$

$$h_{o-arena} = 5 * \frac{1.308^{-6}m^2}{9.81 \frac{m}{s^2}} * 0.25 * \frac{(1 - 0.35)^2}{0.35^3} * 2.77^{-5} * \left(\frac{6}{0.8 * 0.0008}\right)^2$$

$$h_{o-arena} = 0.0083 m$$

Se obtuvo como resultado que la pérdida de carga generada por el medio filtrante de arena es de **0.0083 m**.

b) Cálculo de pérdida de carga de la antracita

A su vez, para el cálculo de la pérdida de carga de la antracita se consideraron los siguientes valores:

Valores a usar:

Viscosidad cinemática: 1.308 e-6 m<sup>2</sup>/s a 10°C

Aceleración de la gravedad: 9.81 m/s<sup>2</sup>

Profundidad del medio filtrante: 0.50 m

Porosidad inicial: 47%

Velocidad de filtración: 0.1 m/h – 2.77e-5 m/s

Diámetro de partícula: 0.0331 pulg – 0.0008 m

Coefficiente de esfericidad: 0.75

$$h_{o-arena} = f * \frac{v}{g} * L * \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} * V * \left(\frac{6}{C_e * D}\right)^2$$

$$h_{o-antracita} = 5 * \frac{1.308^{-6} m^2}{9.81 \frac{m}{s^2}} * 0.50 m * \frac{(1 - 0.47)^2}{0.47^3} * 2.77^{-5} m/s * \left( \frac{6}{0.75 * 0.0008} \right)^2$$

$$h_{o-antracita} = 0.0069 m$$

El resultado es que la pérdida de carga generada por el medio filtrante de antracita es de **0.0069 m**.

c) Cálculo de carga hidráulica real considerando pérdidas de carga

Para este cálculo, se debieron restar las pérdidas de carga de la arena y de la antracita de la carga final del sistema:

Valores a usar:

Carga hidráulica del sistema final: 0.821 m

Pérdida de carga de arena: 0.0083m

Pérdida de carga de antracita: 0.0069m

$$h_{real} = h_f - (h_{o-arena} + h_{o-antracita})$$

$$h_{real} = 0.821 m - (0.0083 m + 0.0069 m)$$

$$h_{real} = 0.8058 m$$

La carga real del sistema es de **0.8058 m**, siendo éste un valor positivo, lo que quiere decir entonces que el sistema es viable hidráulicamente.

#### **6.3.4 Análisis hidráulico con dimensiones disponibles en el mercado**

En la información revisada en los catálogos de cilindros de PVC, el tamaño del diámetro que existe, más cercano a los 13.8 cm inicialmente propuestos para el filtro, es de 15.3 cm (6 pulgadas)<sup>2</sup>. Por lo tanto, se realizó un recalcu de las dimensiones del sistema, así como de las pérdidas de carga, y se procedió a comparar las diferencias entre dimensiones y pérdidas de carga. A continuación, se presenta el cálculo hidráulico del sistema tomando en cuenta las dimensiones disponibles en el mercado:

##### a) Cálculo de nueva sección transversal

Se procede a calcular la nueva sección transversal con el valor de diámetro obtenido de 15.3 cm

$$\text{Sección transversal} = \pi * r^2$$

Donde:

$\pi$  = número empírico Pi 3.1415

$r$  = radio de la tubería de PVC – Mitad del diámetro

Valores a usar:

Coficiente Pi: 3.1415

Radio: 7.65 cm

$$\text{Sección transversal} = 3.1415 * 7.65^2$$

---

<sup>2</sup> Este dato fue extraído de un análisis de materiales realizados en las distribuidoras más grandes de materiales de plomería siendo Kywi y Mi Ferrisariato.

$$\text{Sección transversal} = \mathbf{183.8 \text{ cm}^2}$$

Ahora bien, usando este valor en conjunto con el criterio de diseño de velocidad de filtración de 0.1m/h, el resultado es que se incrementa el caudal a tratar del filtro, siendo éste capaz de procesar mayor volumen de agua en la misma unidad de tiempo. Reutilizando entonces la ecuación (2.1) se obtuvo el siguiente caudal a tratar:

Valores a usar

Sección transversal: 183.8 cm<sup>2</sup> – 0.01838 m<sup>2</sup>

Velocidad de filtración: 0.1 m/h

$$Q = 0.01838\text{m}^2 * 0.1\text{m}/\text{h}$$

$$Q = 0.001838 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q = 1.838 \text{ L}/\text{h}$$

Esto genera que el sistema pueda procesar **1.838 L/h**, siendo así **0.338 L/h** más, que utilizando el anterior diámetro calculado.

b) Cálculo de la variación de la carga hidráulica

Se procedió nuevamente a calcular la variación de carga hidráulica del sistema:

Valores a usar:

Caudal: 0.00184 m<sup>3</sup>/h – 5.111 e-7 m<sup>3</sup>/s

Área de la sección transversal: 0.01838 m<sup>2</sup>

Coefficiente hidráulico equivalente: 0.029 cm/s – 0.00029 m/s

Espesor del lecho filtrante: 75 cm – 0.75m

$$Q = -A * K_h * \frac{\Delta h}{L}$$

$$\Delta h = \frac{-Q * L}{A * K_h}$$

$$\Delta h = \frac{-5.111^{-7} m^3/s * 0.75 m}{0,01838 m^2 * 0,00029 m/s}$$

$$\Delta h = -0,072 m$$

La variación de la carga hidráulica del sistema en este caso fue de **0.072 m**.

c) Cálculo de la carga final del sistema

Ahora bien, con este valor se debía determinar la carga hidráulica final aplicando el valor inicial de 0,75 m, siendo éste el espesor de la capa de agua encima del lecho filtrante:

$$\Delta h = h_0 - h_f$$

Donde:

$\Delta h$  = variación de carga hidráulica

$h_f$  = carga hidráulica final

$h_0$  = carga hidráulica inicial



Valores a usar:

Variación de carga hidráulica: 0.072 m

Carga hidráulica inicial: 0.75 m

$$h_f = h_o - \Delta h$$

$$h_f = 0,75 \text{ m} - (-0.072 \text{ m})$$

$$h_f = 0.822 \text{ m}$$

La carga hidráulica final del sistema dio como resultado **0.822 m**.

d) Cálculo de la pérdida de carga del sistema y carga final real

Para este cálculo, se restó las pérdidas de carga de la arena y de la antracita de la carga final del sistema. Los valores de pérdida no cambian dado a que no son influenciados por el cambio de la sección transversal:

Valores a usar:

Carga hidráulica del sistema final: 0.822 m

Pérdida de carga de arena: 0.0083m

Pérdida de carga de antracita: 0.0069m

$$h_{real} = h_f - (h_{0-arena} + h_{0-antracita})$$

$$h_{real} = 0.822 \text{ m} - (0.0083 \text{ m} + 0.0069 \text{ m})$$

$$h_{real} = 0.8068 \text{ m}$$

La carga real del sistema que se obtuvo como resultante fue de **0.8068 m**, siendo éste también un valor positivo, lo que hace que el sistema sea viable hidráulicamente. En realidad, solo hay una variación de 0.001m con relación a la carga hidráulica final calculada anteriormente, sin las consideraciones realizadas en este apartado.

#### **6.4 Cálculo de masa de los medios adsorbentes y tiempo de ruptura del sistema**

El cálculo del tiempo de ruptura del lecho permite determinar cuál será el rendimiento del sistema en un periodo de tiempo determinado y cuando es necesario cambiar los medios adsorbentes del filtro.

##### **6.4.1 Cálculo de masa del medio adsorbente**

Para este parámetro, se consideraron las dimensiones calculadas en el dimensionamiento hidráulico del sistema, estos valores se puede determinar el volumen de los medios adsorbentes de arena y antracita:

Valores a usar:

Espesor de lecho de arena: 25 cm

Espesor de lecho de antracita: 50 cm

Densidad arena: 2.65 g / cm<sup>3</sup>

Densidad antracita: 1.6 g / cm<sup>3</sup>

Área de sección transversal: 183.8 cm<sup>2</sup>

Para arena:

$$m_{arena} = d_{arena} * V_{arena}$$

$$m_{arena} = 2.65 \frac{g}{cm^3} * (25 \text{ cm} * 183.8 \text{ cm}^2)$$

$$\mathbf{m_{arena} = 12176.75 \text{ g arena}}$$

Para antracita:

$$m_{antracita} = d_{antracita} * V_{antracita}$$

$$m_{antracita} = 1.6 \frac{g}{cm^3} * (50 \text{ cm} * 183.8 \text{ cm}^2)$$

$$\mathbf{m_{antracita} = 14704 \text{ g antracita}}$$

Masa total de material adsorbente:

$$m_{total} = m_{antracita} + m_{arena}$$

$$m_{total} = 12176.75 \text{ g arena} + 14704 \text{ g antracita}$$

$$m_{total} = 26880.75 \text{ g masa de medio adsorbente}$$

La masa total de los materiales adsorbentes es de **26880.75 g – 26.9 kg**

### 6.4.2 Cálculo del tiempo de ruptura/vida útil

Mediante la siguiente expresión, es posible calcular el tiempo de ruptura/vida útil del sistema. Sin embargo, es necesario realizar pruebas de campo para determinar cuanta masa de adsorbato queda retenida en el medio adsorbente cuando este entra en el punto de ruptura, lo que representa el factor de capacidad de Freundlich y el parámetro de intensidad, con el fin de obtener un resultado más asertivo. También es necesario resaltar que el cálculo toma en cuenta solamente un medio adsorbente, por lo que es necesario hacer una adecuación matemática para considerar las porciones respectivas de cada uno de los medios adsorbentes usados en el sistema.

$$\text{tiempo de vida del lecho} = \frac{(V_b * \rho_{\text{medio adsorbente}}) * (k_f * C_e^{l/n})}{(C_o - C_e) * Q}$$

Donde:

$Q$  = caudal del agua a tratar, L / h

$V_b$  = volumen del medio adsorbente, L

$\rho_{\text{adsorbente}}$  = densidad del medio adsorbente, g / L

$K_f$  = factor de capacidad de Freundlich (mg adsorbato / g medio adsorbente) \* (L agua / mg adsorbato) <sup>(l/n)</sup>

$C_o$  = concentración inicial de adsorbato, mg/L

$C_e$  = concentración de adsorbato luego de que ocurrió la adsorción, mg/L

$l/n$  = parámetro de intensidad de Freundlich

### 6.4.3 Resumen de valores de variables utilizadas para el proceso de diseño

En las siguientes tablas se encuentran enlistadas las variables utilizadas con sus respectivos valores, los que en u nos casos fueron tomados de una referencia bibliográfica y, en otros, fueron calculados directamente por el autor:

Tabla 12.

*Valores de variables a utilizar para el cálculo hidráulico*

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Referencia</b>
Ingesta de agua por persona	2 500 ml	(Hydration for Health, 2010)
Personas por hogar	6 personas	(Navarrete, 2015)
Caudal a tratar	1.838 L/h	Calculada
Conductividad hidráulica de arena	10 e-3 cm/s	(Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006, pág. 16)
Conductividad hidráulica antracita	1 cm/s	(Angelone, Garibay, & Cauhapé, 2006, pág. 16)
Conductividad hidráulica equivalente	0.029 cm/s	Calculada
Espesor de la capa de arena	25 cm	(Crittenden, Rhodes, Hand, Howe, & Tchnobanoglous, 2012, pág. 737).
Espesor de la capa de antracita	50 cm	(Crittenden, Rhodes, Hand, Howe, & Tchnobanoglous, 2012, pág. 737).
Sección transversal	183.8 cm <sup>2</sup>	Calculada
Diámetro de filtro	15.3 cm	De mercado
Velocidad de filtración	0.1 m/h – 2.77e-5 m/s	(Maldonado & Vargas,

		2004, pág. 114)
Carga hidráulica inicial	0.75 m	(Suárez, Jácome, & Ures, 2015, pág. 25) (Maldonado & Vargas, 2004, pág. 103)
Carga hidráulica final	0.822 m	Calculada
Pérdida de carga arena	0.0083 m	Calculada
Pérdida de carga antracita	0.0069 m	Calculada
Carga hidráulica real del sistema	0.8068 m	Calculada
Viscosidad cinemática a 10 °C	1.308 e-6 m <sup>2</sup> /s	(Sánchez, 2014, pág. 7)
Porosidad arena	35%	(Barrientos, Tello, Titi, & Palomino, n/e, pág. 13)
Porosidad antracita	47%	(Higuera, Arroyave, & Florez, 2009)
Diámetro de partícula – arena	0.0008 m	(Suárez, Jácome, & Ures, 2015, pág. 23)
Diámetro de partícula – antracita	0.0008 m	(Higuera, Arroyave, & Florez, 2009)
Coefficiente de esfericidad – arena	0.8	(Maldonado & Vargas, 2004, pág. 119)
Coefficiente de esfericidad - antracita	0.75	(Maldonado & Vargas, 2004, pág. 119)

Tabla 13.

*Resumen de valores de variables para cálculo de masas de medios adsorbentes y tiempo de ruptura*

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Referencia</b>
Densidad arena:	2.65 g / m <sup>3</sup>	(Maldonado & Vargas, 2004, pág. 119)
Densidad antracita	1.6 g / m <sup>3</sup>	(Maldonado & Vargas, 2004, pág. 119)
Espesor de la capa de arena	25 cm	(Crittenden, Rhodes, Hand, Howe, & Tchnobanoglous, 2012, pág. 737).
Espesor de la capa de antracita	50 cm	(Crittenden, Rhodes, Hand, Howe, & Tchnobanoglous, 2012, pág. 737).
Sección transversal	183.8 cm <sup>2</sup>	Calculada
Caudal a tratar	1.838 L/h	Calculada
Concentración inicial (la de mayor contaminación)	6000 mg/L Col. totales	Análisis de aguas
Masa arena	12176.75 g	Calculada
Masa antracita	14704 g	Calculada

### **6.5 Dimensiones y planos del sistema**

A continuación, se presentan las dimensiones del filtro, con los respectivos espesores de los medios filtrantes y la distribución recomendada de los equipos:

Tabla 14.

*Dimensiones del filtro, espesores de los lechos*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Longitud del filtro	25 cm + 50 cm + 75 cm + 20 cm* = 170 cm
Espesor de capa de arena	20 cm
Espesor de capa de antracita	50 cm
Espesor de capa de agua	75 cm**
Cota de seguridad	20 cm*
Área sección transversal	183.8 cm <sup>2</sup>
Radio del filtro	7.65 cm
Diámetro del filtro	15.3 cm

\*La longitud del filtro es la suma del espesor de cada lecho + la capa de agua por encima de la superficie del lecho. Se agrega un valor de seguridad de 20 cm para que la cota de agua no quede al borde del filtro. \*\*El espesor de la capa de agua está dado por el valor asignado de carga hidráulica inicial del sistema de 0.75 m.c.a asumido en el análisis hidráulico.

Además de las dimensiones a continuación, se resumen los componentes que requiere el sistema para su respectiva instalación. Cada sistema de filtración debe contar con los siguientes elementos:

1. Tubo de PVC
2. Tapón en la parte inferior
3. Soporte
4. Llave de grifo para filtro
5. Manguera
6. Abrazaderas con sus respectivos tornillos
7. Contenedor de agua
8. Llave de grifo para contenedor de agua
9. Medios filtrantes de arena y antracita

Estos componentes pueden variar ligeramente de acuerdo con las condiciones de cada unidad familiar y según las disponibilidades económicas que tengan los usuarios. En todo caso, si bien es posible que los componentes del sistema



tengan una cierta variación, éstas no se pueden dar en las dimensiones del filtro, ni en el tipo de medios filtrantes y el orden de los mismos.

A partir de esta información, se procedió a dibujar el sistema en AutoCad y se desglosaron los componentes del mismo:

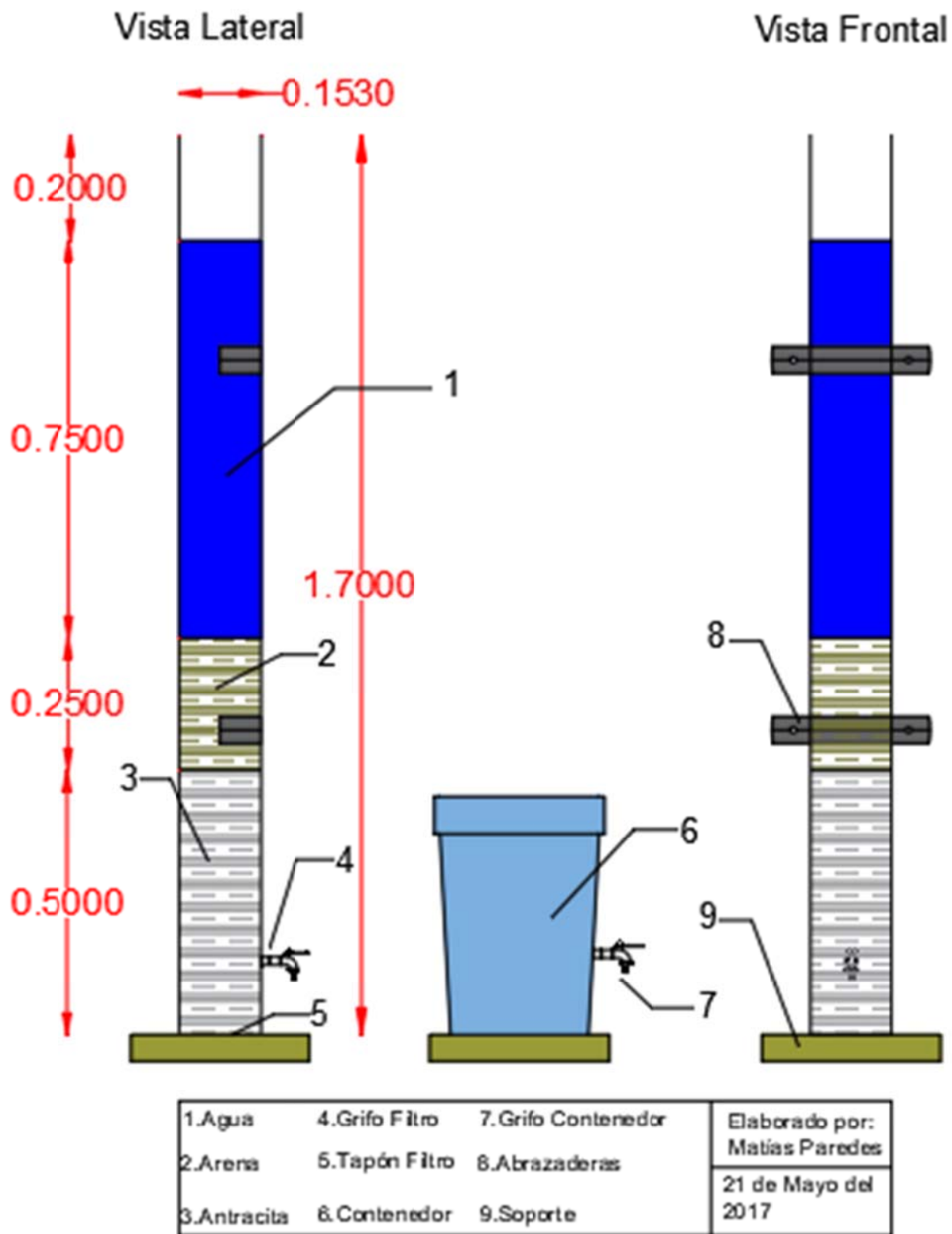


Figura 11. Dimensiones del filtro y medios filtrantes utilizados

A. Las dimensiones están expresadas en metros

## 6.5 Costos del sistema de filtración

Tabla 15.

*Equipos, herramientas y materiales*

DESCRIPCION	CANTIDA D A	TARIFA/HO RA B	RENDIMIENTO. (horas/unidad) C	TOTAL COSTO D = A*B*C
Taladro	1,01	2,00	0,50	1,01
Set de brocas	1,01	0,10	0,50	0,05
Herramientas menores	1,01	1,87	0,50	0,94
<b>PARCIAL M</b>				<b>2,00</b>

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO/U. B	TOTAL COSTO C=A*B
Arena lavada. Diam esp.	Kilogramo	12,50	0,50	6,25
Antracita. Diam esp.	Kilogramo	15,00	0,50	7,50
Grifos 3/4 de pulgada	Unidad	2,00	5,00	10,00
Contenedor	Unidad	1,00	18,73	18,73
Empaques	Unidad	4,00	0,10	0,40
Abrazaderas 3/4 pulgada	Unidad	2,00	2,20	4,40
PVC 6 pulg (15.3cm)	Unidad	1,00	30,43	30,43
Tornillos con tacos	Unidad	4,00	1,02	4,08
Tapón filtro 6 pulgadas	Unidad	1,00	7,42	7,42
<b>PARCIAL N</b>				<b>89,21</b>

<b>COSTO TOTAL DEL RUBRO SIN INDIRECTOS NI UTILIDAD</b>	<b>91,21</b>
---	--------------

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

Los resultados del análisis de aguas realizado en el recinto Bellavista de la parroquia General Farfán, muestran que los parámetros que se encuentran fuera de los límites permisibles solamente son coliformes totales, DBO5 y DQO para el caso de las muestras M2 y M3. El resto de parámetros se encuentran bajo los límites que exige la norma

Los límites permisibles de DQO y DBO5 son  $<4$  y  $<2$  mg/L respectivamente, donde M2 la supera por 19 mg/L y 13 mg/L. Estos valores son marginales y no presentan un problema de contaminación mayor. Sin embargo, en cuanto a los coliformes totales, la muestra M2 supera la normativa en un 500% con una concentración de 10 00 mg/L y la muestra M3 supera la normativa por un 3000%, siendo la más contaminada. Esto indica que las aguas tienen algún punto de contacto y de contaminación con residuos heces fecales.

Debido al tipo de contaminación presente, los contaminantes principales a tratar son netamente patógenos, excluyendo la contaminación mencionada por el PDOT en las fuentes de agua. Por ello, el mecanismo de tratamiento propuesto es únicamente de filtración, dado su alto nivel de eficiencia para la remoción de patógenos. Ahora bien, el sistema de filtración lenta es normalmente utilizado como un tratamiento terciario para la remoción de contaminantes residuales. Por ello, se utiliza este mecanismo como una alternativa de desinfección. En el caso de las aguas de pozo del recinto Bellavista, se lo puede complementar con otro mecanismo de desinfección como sería la cloración, para asegurar que la calidad del agua sea completamente potable.

Las normas de diseño INEN para la elaboración de sistemas de tratamiento de aguas a nivel rural, no pudo ser aplicada en este caso debido a que éstas son utilizadas para diseños de demandas hídricas de un nivel poblacional más alto y requieren además de la presencia de redes de alcantarillado. Puesto que el diseño propuesto es de carácter doméstico y está previsto de ser aplicado en

zonas rurales que no disponen de servicios básicos, las condiciones de diseño impartidas por estas normas no son viables.

El caudal de tratamiento utilizado para el dimensionamiento del sistema se calculó acorde con la demanda óptima de consumo de agua de cada persona - estipulada por la OMS- y la cantidad de integrantes que tiene una familia promedio en la zona de estudio. Fue necesario modificar el caudal diario en relación a las horas de operación que podría tener el filtro a lo largo de un día, asumiendo un total de 12 horas. Ahora bien, fue necesario realizar un redimensionamiento del caudal de tratamiento de agua del sistema, en base a las dimensiones de los materiales que se encuentran disponibles en el mercado; esto incrementó el caudal de tratamiento de 1.5 L/h, lo que sumado al factor de seguridad que se estipuló en un 20%, dio como resultado un caudal de tratamiento de 1.838 L/h.

El diseño hidráulico del sistema de filtración es viable puesto que éste presenta una carga hidráulica final de 0.8068 m, contando las pérdidas de carga. Esto indica que el agua puede atravesar los medios filtrantes sin causar obstáculos en el flujo del agua a través del lecho.

En relación con los sistemas de mantenimiento, no se optó por diseñar un proceso de retrolavado del filtro debido a varias razones. La primera es que los niveles de contaminación de las muestras de agua no presentan una carga elevada, y esto puede incidir en la vida útil del sistema, prologándola. La segunda, es que este tipo de intervenciones requieren cuidar de manera especial el régimen de flujo, para evitar la mezcla de los medios filtrantes, lo que puede inhabilitar el sistema.

Frente a la ausencia de los parámetros necesarios para calcular la vida útil del sistema, como el factor de capacidad de Freundlich y el parámetro de intensidad de Freundlich, se optó por determinar una expresión que permita calcular esta variable en estudios piloto futuros. Estos parámetros permiten determinar la cantidad de adsorbente necesario para filtrar un adsorbato específico, cuya relación varía dependiendo de sus respectivas propiedades fisicoquímicas. Con pruebas piloto se pueden calcular estos parámetros, y se

puede determinar cuál es el punto de colmatación de los medios filtrantes, y el tiempo de vida útil del sistema.

Con respecto a los costos, se realizó un análisis de precio unitario sin contar con costos indirectos ni utilidad. La inversión inicial del sistema es de \$91,21, dentro de los cuales se incluyen los costos de los materiales y la instalación del sistema en el domicilio. Dicho sistema abastece a una familia de 5 a 6 personas dándole uso 12 horas diarias.

Existe la posibilidad de abaratar este valor quitando del análisis los rubros que corresponden al contenedor y a la llave de grifo de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, lo que daría como resultado un costo total del sistema de \$67,48, es decir, un 26% más barato.

## **7.2 Recomendaciones**

Por lo tanto, se recomienda que se realice una verificación de los problemas de contaminación que estipula el PDOT mediante nuevos análisis, y de carácter más específicos. Con respecto a los contaminantes presentes en el agua, cabe mencionar que, como parte del análisis previo al desarrollo del proyecto, en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial, se menciona reiteradamente que en la zona existe contaminación tanto en las fuentes de agua superficiales como subterráneas. Adicionalmente, una de las principales preocupaciones de la comunidad es asegurar un suministro de agua de calidad, que sea apta para el consumo humano.

Para optimizar el tratamiento del agua se sugiere utilizar un mecanismo adicional de desinfección como la cloración, para garantizar que la calidad de agua que utilizan los habitantes del recinto Bellavista, sea potable. Además, se puede complementar este proceso con otros mecanismos para eventualmente tratar aguas con grados de contaminación mayores.

Para la construcción del filtro, se recomienda utilizar diámetros de tubería lo más cercanos posible a los calculados en el diseño hidráulico del presente proyecto, pues esto aseguraría de alguna manera que la conductividad

hidráulica del sistema sea apropiada y no existan pérdidas de carga altas, ni velocidades de filtración fuera de los rangos del criterio de diseño.

Se sugiere realizar estudios piloto de aplicación del sistema con el fin de determinar los parámetros esenciales para la determinación del tiempo de ruptura y vida útil del filtro, antes de realizar el cambio de medio adsorbente.

Además, como una extensión del presente proyecto, se debe capacitar a la población en el manejo adecuado de las fuentes hídricas, con el fin de prevenir que éstas entren en contacto con residuos higiénicos que puedan contaminar el recurso.

## REFERENCIAS

- Agua Azul, Tecnología Internacional. (2017). *Sistemas de filtración*. Recuperado el 15 de Mayo de 2017, de [http://www.aguaazulinternacional.com.mx/sistemas\\_de\\_filtracion\\_.html](http://www.aguaazulinternacional.com.mx/sistemas_de_filtracion_.html)
- Angelone, S., Garibay, M., & Cauhapé, M. (2006). *Permeabilidad de Suelos*. Cuidado de Rosario: Universidad Nacional de Rosario.
- Barrientos, H., Tello, J., Titi, C., & Palomino, M. (s.f). *Purificación de agua por medio de filtros lentos de arena en la comunidad de Kuychiro*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Carbotecnia S.A. (2017). *Antracita*. Recuperado de <https://www.carbotecnia.info/producto/antracita/>
- Crittenden, J., Rhodes, R., Hand, D., Howe, K., & Tchobanoglous, G. (2012). *Water Treatment Principles and Design*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- DIN. (2015). *Water Supply 1*. Alemania: DIN.
- Fuentes, J. (1993). *Aguas Subterráneas*. Madrid: Rivadeneyra, S.A.
- GAD Parroquial Rural General Farfán. (2014). *Informe Preliminar*. Lago Agrio: GAD Parroquial Rural General Farfán.
- Higuera, O., Arroyave, J., & Florez, L. (2009). Diseño de un biofiltro para reducir el índice de contaminación por cromo generado en las industrias del curtido de cueros. *DYNA*, 76.
- Hydration for Health. (2010). *Necesidades diarias de agua*. Recuperado de <http://www.h4hinitiative.com/es/hidratacion-diaria/necesidades-diarias-de-agua>
- INEN. (1997). *Código de Práctica para el Diseño de Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable, Disposición de Excretas y Residos Líquidos en el Área Rural*. Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización.



- Llórens, M. (2016). *Alternativas para el tratamiento de efluentes industriales*. Murcia: Universidad de Murcia.
- Maldonado, V., & Vargas, L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano: Capítulo 9. Filtración*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Martinez, J. (•É). *Antracita*. México D.F.: Filtrantes y Refracciones Industriales, S.A. de C.V.
- McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (1991). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Madrid: McGraw-Hill/Interamericana.
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales*. Madrid: McGraw Hill.
- Metcalf, & Eddy. (2003). *Wasterwater Engineering. Treament and Reuse*. McGraw-Hill, Inc.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015). *Acuerdo Ministerial No. 028: TABLA 2: CRITERIOS DE CALIDAD DE FUENTES DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO Y DOMÉSTICO Y QUE PARA SU*. Quito: Ministerio del Ambiente.
- Navarrete, K. (2015). *Actualización de Plan de Desarrollo & Ordenamiento Territorial*. Lago Agrio: GAD Parroquial Rural General Farfán.
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guía para la calidad del agua potable*. Organización Mundial de la Salud.
- Organización Panamericana de la Salud. (2005). *Guía para Diseño de Sistemas de Tratamiento de Filtración en Múltiples Etapas*. Lima: Organización Mundial de la Salud.
- Organización Panamericana de la Salud. (s.f). *Filtros*. Recuperado el 15 de Mayo de 2017, de <http://www.col.ops-oms.org/saludambiente/guia-filtros.htm#Filtros%20lentos%20de%20arena>

- Osorio, F., Torres, J., & Sánchez, M. (2010). *Tratamiento de Aguas para la Eliminación de Microorganismos y Agentes Contaminantes*. Madrid: Díaz de Santos.
- Sánchez, J. (2014). *Ley de Darcy. Conductividad hidráulica*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Suárez, J., Jácome, A., & Ures, P. (2015). *Filtración en medio granular: Tratamientos terciarios*. Brasil: Inditex.
- Valencia, E. (2013 ). *Diseño de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de la Cabecera Parroquial de San Luis - Provincia de Chimborazos*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazos.
- Vargas, L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Vargas, L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano: Capítulo 3. Procesos Unitarios y Plantas de Tratamiento*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

## **ANEXOS**

**A. Tabla de costos de análisis de laboratorio**

<b>Parámetro analizado</b>	<b>Costo Unitario (\$)</b>	<b>Costo Total (\$)</b>
1. Amonio	30,00	90,00
2. Arsénico	15,00	45,00
3. Coliformes totales	14,50	43,50
4. Cromo hexavalente	12,00	36,00
5. Demanda bioquímica de oxígeno	18,00	54,00
6. Demanda química de oxígeno	15,00	45,00
7. Hierro total	12,00	36,00
8. Mercurio	22,00	66,00
9. Nitratos	6,50	19,50
10. Nitritos	6,50	19,50
11. Potencial de hidrógeno	4,00	12,00
12. Sulfatos	5,50	16,50
13. Turbiedad	3,50	10,50
	<b>Suma</b>	493,50
	<b>14% IVA</b>	69,09
	<b>Total</b>	562,59

