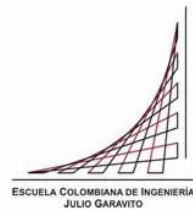


**Maestría en Ingeniería Civil**

**MODELO PARA COMPARAR DISEÑOS DE FILTRO  
PERCOLADOR.**

**Camilo Andrés Carvajal Fuentes**

**Bogotá, D.C., 12 de diciembre 2020**



# **MODELO PARA COMPARAR DISEÑOS DE FILTRO PERCOLADOR.**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con  
énfasis en ingeniería ambiental**

**Jairo Alberto Romero Rojas**

**Director**

**Bogotá, D.C., 12 de diciembre 2020**



La tesis de maestría titulada “MODELO PARA COMPARAR DISEÑOS DE FILTRO PERCOLADOR”, presentada por Camilo Andrés Carvajal Fuentes, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en ingeniería ambiental.

Director de la tesis

JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

Jurado

HECTOR MATAMOROS RODRIGUEZ

Jurado

MARIA CAROLINA ROMERO

Bogotá, D.C., 12 de diciembre de 2020

## Dedicatoria

A mis padres, hermanos, esposa y mis hijos, quienes con amor siempre me han apoyado en cada una de mis metas.

## Agradecimientos

A mis padres, con quienes siempre he contado y contaré en cada uno de mis sueños; a mi esposa quien con amor me ayuda a superar los obstáculos de la vida, a mis hermanos quienes con su apoyo incondicional siempre me alentaron, a mis profesores, colegas y amigos que me aportaron conocimiento para la elaboración de esta tesis.

## Resumen

El filtro percolador es un proceso para el tratamiento de aguas residuales, cuya función es poner en contacto el agua residual con microorganismos, los cuales se encuentran adheridos en un medio de soporte (lecho filtrante), que puede ser piedra, plástico, escoria o madera. El lecho filtrante más común es en piedra o plástico y la forma más común de diseño son filtros circulares, aunque en ocasiones se diseñan cuadrados o rectangulares.

El presente trabajo consiste en crear un modelo en Excel para comparar diferentes metodologías de diseño de filtros percoladores para el tratamiento de aguas residuales (NRC, ECKENFELDER, GERMAIN, TEN STATE STANDARDS, VELZ, SCHULZE, GALLER-GOTAAS, BRUCE Y MERKENS).

Basados en la información bibliográfica, se desarrolló el modelo para realizar la comparación de 5 de los 8 modelos propuestos: NRC, ECKENFELDER, GERMAIN, SCHULZE y BRUCE Y MERKENS.

Para realizar el diseño comparativo de los filtros por los diferentes modelos se tiene como datos de entrada el caudal a tratar, la carga orgánica del efluente y del afluente, tipo de material filtrante, recirculación, área superficial específica del medio, temperatura del agua y profundidad del filtro.

El modelo presenta como resultados el área del filtro, volumen del filtro, carga hidráulica superficial, carga hidráulica volumétrica, carga orgánica superficial y carga orgánica volumétrica, para cada uno de los cinco (5) modelos.

## Índice general

Dedicatoria	4
Agradecimientos	5
Resumen	6
Índice general	7
Índice de tablas	9
Índice de figuras	10
Índice de ilustraciones	11
Índice de anexos	12
Introducción	13
1. OBJETIVOS:	15
1.1 Objetivo general:	15
1.2 Objetivos específicos:	15
2. METODOLOGÍA:	16
3. MARCO TEÓRICO FILTROS PERCOLADORES	17
2.1 Descripción del proceso	17
2.2 Características de Filtros Percoladores	19
2.2.1 Filtro percolador de tasa baja	19
2.2.2 Filtro percolador de tasa media	20
2.2.3 Filtro percolador de tasa alta	21
2.2.4 Torres biológicas	21
2.2.5 Filtro de desbaste	21
2.2.6 Medio filtrante	22
2.2.7 Recirculación	24
4. PARÁMETROS DE DISEÑO	25
4.1 Modelo general	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
4.2 Marco Normativo	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
5. MODELOS DE DISEÑO	31
5.1 Modelo de Eckenfelder.	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
5.2 Modelo de Velz	33
5.3 Modelo de Schulze	34
5.4 Modelo de Germain	35

5.5	El modelo de National Research Council (NRC).	37
5.5.1	Para filtros primarios o de una etapa.	37
5.5.2	Para filtros de segunda etapa.	38
5.6	El modelo de Bruce y Merkens.	39
5.7	Ten State Standards	40
5.8	Modelo de Galler-Gotaas	41
6.	EJEMPLO #1 DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR DE TASA BAJA EN ROCA	45
6.1	Solución por NRC (National Research Council):	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.2	Solución por GERMAIN:	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.3	Solución por BRUCE Y MERKENS:	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.4	Solución por SCHULZE:	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.5	Solución por ECKENFELDER:	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
7.	EJEMPLO #2 DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR DE TASA ALTA EN ROCA	56
7.1	Solución por NRC (National Research Council):	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
7.2	Solución por GERMAIN:	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
7.3	Solución por BRUCE Y MERKENS:	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
7.4	Solución por SCHULZE:	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
7.5	Solución por ECKENFELDER:	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
8.	EJEMPLO #3 DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR DE TASA ALTA EN PLÁSTICO	67
8.1	Solución por NRC (National Research Council):	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
8.2	Solución por GERMAIN:	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
8.3	Solución por BRUCE Y MERKENS:	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
8.4	Solución por SCHULZE:	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
8.5	Solución por ECKENFELDER:	76
9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
10.	CÓDIGO FUENTE EN PROGRAMA VISUAL BASIC (EXCEL)	81
11.	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN	82
12.	CONCLUSIONES	87
13.	REFERENCIAS	88



## Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades físicas de medios para filtros percoladores (ROMERO, 2013).....	23
Tabla 2. Se muestra lo especificado en la Tabla 28. Distancias mínimas para la localización de sistemas de tratamiento de aguas residuales con relación a otra infraestructura. Tomada de (Ministerio de Vivienda, 2017) .....	29
Tabla 3. Presenta los rangos de eficiencia que se deben lograr en los procesos de tratamiento. Tomada de (Ministerio de Vivienda, 2017). .....	29
Tabla 4. se muestra lo especificado en la Tabla 38. Parámetros de Diseño para filtros percoladores, tomada de (Ministerio de Vivienda, 2017).....	30
Tabla 5. Resultado del ejemplo #1 .....	78
Tabla 6. Resultados del ejemplo #2 .....	79
Tabla 7. Resultados del ejemplo #3 .....	79

## Índice de figuras

Figura 1. Esquema de las partes que componen a un filtro percolador tomada de (Naturales, Comisión Nacional del Agua).....	18
Figura 2 Diagrama de flujo de funcionamiento de filtro percolador + decantación secundaria tomado de (GEDAR, s.f.).....	19
Figura 3. Modelo filtro percolador sin recirculación .....	25
Figura 4. Modelo filtro percolador sin recirculación .....	26

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Datos de entrada Ejemplo 1 Diseño de un filtro percolador de Tasa Baja en roca.....	82
Ilustración 2. Resultados del Ejemplo 1 Diseño de un filtro percolador de Tasa Baja en Roca .....	83
Ilustración 3. Datos de entrada Ejemplo 2 Diseño de un filtro percolador de Tasa Alta en Roca .....	84
Ilustración 4. Resultados del Ejemplo 2 Diseño de un filtro percolador de Tasa Alta en Roca .....	84
Ilustración 5. Datos de entrada Ejemplo 3 Diseño de un filtro percolador de Tasa Alta en Plástico.....	85
Ilustración 6. Resultados del Ejemplo 3 Diseño de un filtro percolador de Tasa Alta en Plástico.....	86

## **Índice de anexos**

Anexo 1. Código fuente en programa Visual Basic

Anexo 2. Simulación diseño filtros percoladores.

## Introducción

El agua ha sido considerada hasta hace pocos años como un recurso prácticamente ilimitado. Sin embargo, el continuo aumento de la demanda de agua, en algunos casos por encima de la cantidad disponible, ha empezado a preocupar. Actualmente, la regeneración y reutilización de las aguas residuales cobran un papel de gran importancia, pues además de solucionar el problema de contaminación, permiten aumentar la disponibilidad del recurso sin necesidad de seguir explotando las fuentes convencionales para el suministro del agua y ayudando a que se genere un desarrollo sostenible<sup>1</sup>.

El agua residual tratada debe tener unas características sanitarias que permitan prevenir la degradación ambiental y a la vez proteger la salud pública, ya que el agua es un vehículo de transmisión de una gran variedad de microorganismos patógenos, parásitos y virus; el principal peligro de la contaminación biológica está en el vertido de las aguas residuales en general. A este hecho debe añadirse la posible presencia de compuestos tóxicos que, conjuntamente con los contaminantes biológicos, pueden poner en peligro la salud de las personas cuando éstas se exponen a las aguas residuales no tratadas, ya sea por contacto, inhalación o ingestión. Para preservar la salud pública es necesario aplicar tratamientos encaminados a eliminar o disminuir estos riesgos.<sup>2</sup>

Los tratamientos de aguas residuales pueden reconocerse con base a su ubicación en el proceso de limpieza, como primarios, secundarios y terciarios. El tratamiento primario (asentamiento de sólidos) tiene como propósito reducir elemento que puedan ocasionar problemas en los demás procesos, tales como aceites, grasas arenas y sólidos gruesos; y se realiza con procesos físicos. El tratamiento secundario consiste en el tratamiento biológico de la materia orgánica disuelta presente en el agua residual transformándola en sólidos suspendidos que se eliminan sustancialmente; y el tratamiento terciario consiste en pasos adicionales de tratamiento, tales como lagunas, microfiltración o desinfección.<sup>3</sup>

---

1 Seguí Amórtégui, Luis A. Sistemas de regeneración y reutilización de aguas residuales. metodología para el análisis técnico-económico y casos. Universidad politécnica de Cataluña. Barceloa- España. Marzo 2014. Visto el 29/11/2015, de <http://hdl.handle.vet/10803/7053>

2 Reutilización de aguas residuales para riego. (2009). visto el 30/12/2015, de <http://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/jaume-baeza.pdf>

3 Pérez Alarcón, Fausto E; Camacho Alcalá, Kathya. "Tecnologías para el tratamiento de aguas servidas" (2011). visto el 30/11/2015. de <http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/29490>

En el tratamiento secundario de aguas residuales cabe resaltar la utilización de filtros percoladores, ya que han sido utilizados para el tratamiento biológico del agua residual durante casi 100 años. Un filtro percolador o filtro biológico es una variante de la depuración aerobia en donde los microorganismos crecen sobre un material de relleno y el agua a tratar se distribuye en la parte superior mediante un brazo rotativo<sup>5</sup>se clasifican por las cargas orgánicas o hidráulicas aplicadas y se dividen en carga baja o normal, de carga media, de alta o muy alta carga, de desbaste y filtros de dos etapas<sup>6</sup>.

No existe una ecuación universal para el diseño de filtros percoladores, por eso se ve la necesidad de crear una herramienta o modelo que ayude a predecir la eficiencia y la confiabilidad de estos diseños, donde la eficiencia sea medida sobre la base de la cantidad de contaminantes removidos del sistema; la confiabilidad se determine de acuerdo con la probabilidad de que la concentración a la salida sea menor que el máximo establecido; y que a la vez nos ayude a comparar los diferentes diseños, teniendo como datos el área superficial, caudal a tratar, carga orgánica ,etc.

---

5 Rigola Lapeña Miguel, Tratamiento de aguas residuales. Marcombo S.A, 1990

6 Oropeza Burelo, Victor M. Tratamiento de Aguas residuales, Capitulo IV. (2004). Visto el 23/11/2015, de file:///C:/Users/cuapstabarbara12/Downloads/capitulo4.pdf

## **1. OBJETIVOS:**

### **1.1 Objetivo general:**

Crear un modelo en Excel para comparar ocho (8) de las diferentes metodologías de diseño de filtros percoladores para el tratamiento de aguas residuales (NRC, ECKENFELDER, GERMAIN, TEN STATE STANDARDS, VELZ, SCHULZE, GALLER-GOTAAS, BRUCE Y MERKENS).

### **1.2 Objetivos específicos:**

- Crear un modelo que permita diseñar el filtro percolador más adecuado según las características del agua.
- Crear un modelo que cree una gráfica con los resultados de área y volumen de los filtros diseñados por cada uno de los métodos.
- Crear un modelo que diseñe un filtro percolador, calculando carga hidráulica y orgánica, ingresando diferentes datos de entrada, tales como:
  - Caudal para tratar.
  - DBO del efluente y del afluente
  - Tipo de filtro a diseñar
  - Medio filtrante

## **2. METODOLOGÍA:**

- Investigar bibliográficamente los diferentes métodos de diseño para filtros percoladores.
- Mediante la herramienta de programación Visual Basic de Excel, programar un modelo para comparar las ocho diferentes metodologías de diseño de filtros percoladores.
- Evaluar con el modelo desarrollado el diseño de un filtro percolador de baja tasa, de tasa alta en roca y de tasa alta en plástico por las 8 ecuaciones.
- Comparar los resultados de la evaluación realizada.
- Formular las conclusiones pertinentes.

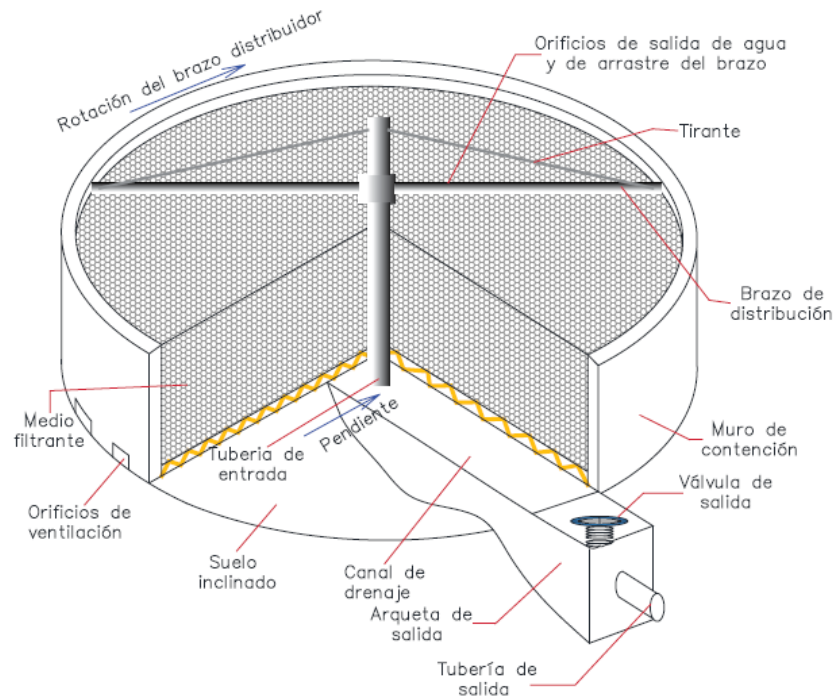


### **3. MARCO TEÓRICO FILTROS PERCOLADORES**

Los filtros percoladores, también llamados biofiltros, son un tipo de tratamiento biológico aerobio por el cual un medio de organismos tiene una estructura de soporte al cual pueden adherirse y por el que percola el agua residual de forma descendente. (España, Quintero, & Reyes, 2017). El primer filtro percolador se puso en funcionamiento en el año de 1893 en Inglaterra, consistía en estanques impermeables rellenos de piedra machacada y respondía al concepto de filtro de contacto. (Mendoza, 2012).

#### **3.1 Descripción del proceso**

Los filtros percoladores consisten en un lecho formado por un medio permeable al que se adhieren los microorganismos y a través del cual se filtra el agua residual. (España, Quintero, & Reyes, 2017). El agua residual para tratar es generalmente sometida previamente a un proceso de sedimentación, para evitar la taponamiento del relleno que soporta la biomasa. A lo largo de la percolación del agua residual a través del lecho, la materia orgánica es eliminada. El sustrato y el oxígeno se difunden a través de la biopelícula, en donde se produce la metabolización, como consecuencia del crecimiento bacteriano, el espesor de la biopelícula va aumentando hasta un cierto límite, pasado el cual se separa y los fragmentos se arrastran con el agua.



**Figura 1. Esquema de las partes que componen a un filtro percolador tomada de (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales)**

En la Figura 2 se presenta un diagrama de flujo con los procesos que debe realizar un filtro percolador, donde el agua residual debe estar libre de sólidos grandes que podrían obstruir los poros del lecho. Por tanto, se requiere que el agua residual bruta se someta a pretratamiento y tratamiento primario. El agua bruta pretratada es rociada sobre el lecho. En el seno de éste, el agua residual entra en contacto con la biopelícula y con el aire, permitiendo la disolución del oxígeno del aire en el líquido y su transferencia por difusión a la biopelícula junto con los nutrientes presentes en el agua residual. Además, el aire entra en contacto directo con la biopelícula, ya que el lecho no debe ser inundado. Así, las bacterias de la biopelícula incorporan la materia orgánica que lleva el agua a su metabolismo para generar nuevo tejido celular y mantener su actividad vital.

En algunos casos, el agua que sale del lecho arrastra parte de esa biopelícula en forma de fango. Para obtener un efluente clarificado, ese fango es separado por decantación. El filtro percolador es un proceso biológico aerobio y por tanto es imprescindible un suministro de aire para su correcto funcionamiento. En instalaciones pequeñas el suministro de aire puede realizarse mediante tiro o

ventilación natural. Cuando el tiro natural es insuficiente se puede recurrir a un sistema de ventilación forzada. La recirculación del efluente tratado es habitual como herramienta operacional para garantizar la humectación del lecho, y mantener una capacidad de tratamiento óptima. (GEDAR, s.f.).

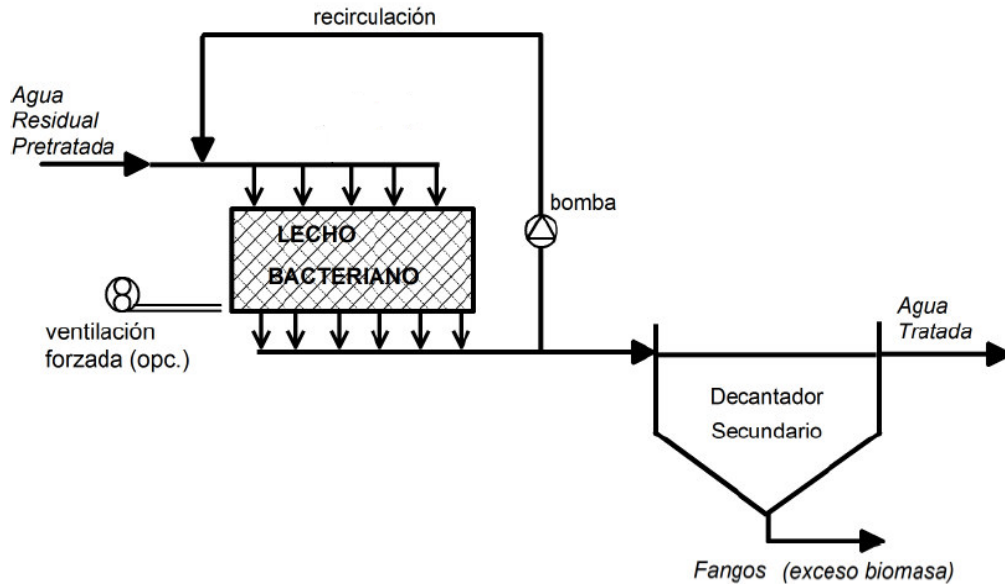


Figura 2 Diagrama de flujo de funcionamiento de filtro percolador + decantación secundaria tomado de (GEDAR, s.f.)

### 3.2 Características de Filtros Percoladores

Existen diferentes tipos de filtros percoladores, de acuerdo con su forma de uso; originalmente eran diseñados con un enfoque en cargas hidráulicas y orgánicas con efecto de remoción alrededor de 80% - 90% de la DBO del afluente. A medida que las tecnologías fueron avanzando y con la imposición de mayor carga hidráulica y orgánica, en la actualidad se clasifican en función de parámetros de diseño y, la carga orgánica es expresada en kilogramos de DBO a tratar durante un día por metro cúbico del volumen del relleno. En función de la carga orgánica que se trate, filtros pueden clasificarse en: de baja, media o alta carga. A menudo, se emplean sistemas de filtros de dos etapas en los que se conectan en serie dos filtros percoladores. (Cabrera & Cabrera, 2019).

#### 3.2.1 Filtro percolador de tasa baja

Se trata de un dispositivo relativamente sencillo y de gran fiabilidad, que produce una calidad estable del afluente con independencia de la naturaleza cambiante del

afluente. Estos filtros pueden presentar diferentes formas como circular o rectangular, y generalmente se mantienen en una carga hidráulica constante, no por recirculación, sino por medio de bombas con control de nivel de succión o con sifones dosificadores. En este mismo sentido se tienen tanques dosificadores de pequeño tamaño, que generalmente cuentan con un tiempo de detención de tan solo 2 - 5 minutos para el doble del caudal del proyecto, de tal modo que se minimice la intermitencia de la dosificación. (Cabrera & Cabrera, 2019)

Tienen la capacidad de tratar cargas orgánicas de 0.08 hasta 0.4 kg DBO/m<sup>3</sup>día y se diseñan para carga hidráulica de 1.1 hasta 4.3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> \* día, y suelen tener un lecho de piedra. En la mayoría de los filtros de baja carga, solo los niveles superiores del mismo (0.6 m – 1.2 m) presentan un desarrollo elevado de película biológica. Como resultado, en las zonas inferiores se pueden proliferar bacterias nitrificantes autótrofas que oxidan el nitrógeno amoniacal para transformarlo en nitritos y nitratos. No precisan de recirculación en condiciones normales de funcionamiento, es decir, sin puntas de cargas y con objetivos de rendimiento por debajo del 90%. Con unas condiciones ideales de temperatura y características específicas del agua residual **se lograrían resultados en el afluente con elevados niveles de eliminación de carga contaminante de DBO y altamente nitrificado**. Otro factor que entraría como ventaja en el desempeño del filtro, es que si se cuenta con una línea piezométrica favorable el flujo se puede mantener por gravedad. En condiciones donde el terreno sea llano se requiere bombeo del agua. Los problemas habituales que se tienen en los filtros percoladores están directamente relacionados con el desprendimiento de olores, especialmente si el agua residual es séptica o si las condiciones climáticas son calurosas. (España, Quintero, & Reyes, 2017)

### **3.2.2 Filtro percolador de tasa media**

En este tipo de filtros la recirculación del afluente del filtro o del afluente final permite la utilización de cargas orgánicas más elevadas, entre 0.24 – 0.48 kg DBO/m<sup>3</sup>día y se diseñan para carga hidráulica de 4 hasta 10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> \* día, con cargas hidráulicas a caudal medio superiores a las que se precisarían si se trabaja a baja carga. Con alimentación en continuo, dentro de las recomendaciones para asegurar una buena distribución del afluente sobre el filtro, se suele recircular parte del agua clasificada

en el sedimentador secundario, entre 0 – 1 veces el caudal medio de entrada. Haciendo énfasis al rendimiento que logra alcanzar este tipo de sedimentador en términos de remoción DBO, se dice que es alrededor 60 % - 70%, estando los afluentes parcialmente nitrificados. (Menéndez & Dueñas, 2018).

### **3.2.3 Filtro percolador de tasa alta**

Los lechos de este tipo se diseñan para cargas orgánicas de 0.4 hasta 4.8 kg DBO/m<sup>3</sup>día, y cargas hidráulicas de 10 hasta 36 kg DBO/m<sup>3</sup>, incluyendo la recirculación. Este tipo de filtros consiguen rendimientos menores que los anteriores en eliminación de materia orgánica y suelen operar como pretratamiento de otro proceso, o requerir de una segunda etapa para llegar al 80% de eliminación de DBO, si el afluente esta poco nitrificado. Trabajan normalmente en continuo, con cargas hidráulicas elevadas, por lo que precisan de una recirculación de entre 1 – 2 veces el caudal medio de entrada, para mantener estas condiciones. Este tipo de filtros suelen utilizar plástico como relleno, ya que este suele colmatarse menos que el relleno de piedra. Los rendimientos en DBO no superar el 60%. (Menéndez & Dueñas, 2018)

### **3.2.4 Torres biológicas**

Para estos tipos de filtros las principales diferencias entre los lechos de alta y muy alta carga son mayores cargas hidráulicas y una mayor altura de lecho. Algunos lechos de muy alta carga están diseñados para manejar cargas de más de 162 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> \* día. La mayoría de estos lechos se configuran como torres empacadas (biotorres) con alturas de 12 metros. (GEDAR, s.f.)

### **3.2.5 Filtro de desbaste**

Los filtros de desbaste se describen como filtros de alta carga que se proyectan para trabajar con cargas orgánicas superiores a 1.6 kg DBO/m<sup>3</sup>día, y cargas hidráulicas superiores a 187 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> \* día. En la mayoría de los casos, estos filtros se utilizan como pretratamiento del agua residual antes del tratamiento secundario. El proyecto

de la mayoría de los filtros de contacto contempla el uso de medios de plástico. (Cabrera & Cabrera, 2019).

### **3.2.6 Medio filtrante**

La selección del material del medio filtrante está directamente relacionada con el rendimiento y la eficiencia en un filtro percolador. Según (Ali, Khan, Sultan, & Mahmood, 2016) adicionalmente juega un papel importante en el desarrollo de la capa microbiológica, por lo que se han probado diferentes materiales, como variedades de rocas o plásticos buscando aumentar el rendimiento de esta unidad. (Kishimoto, Ohara, Hinobayashi, & Hashimoto, 2014) Señala que del material a usar es necesario tomar en cuenta diferentes parámetros a la hora de diseñar un filtro percolador, lo que significa que la selección correcta de materiales puede aumentar considerablemente la efectividad del mismo. Se debe tener en cuenta también que es importante contar con una disponibilidad de materiales por cuenta de los fabricantes, esto permite una reducción de costos y evita retrasos en procesos constructivos y de mantenimiento.

Se han utilizado muchos medios filtrantes: grava, piedra quebrada, piedra de campo, tabiques, carbón, escoria, conchas de mariscos, latas de estaño, tiras de madera, tiras de polietileno, varias formas de plástico moldeado y módulos de láminas de plásticos. Tradicionalmente, el medio usado ha sido el de piedra quebrada cuando se cuenta localmente con buen material, cuya principal ventaja es su bajo costo. Cualquier roca usada para este propósito debe ser de tamaño uniforme para asegurar el volumen de vacío adecuado para el paso del agua y circulación del aire. El tamaño efectivo de la roca es de 75 mm a 125 mm. Las piedras de menor diámetro no proporcionan suficiente para el crecimiento biológico. Debido al peso del medio, la profundidad del filtro se limita de 1.5 a 3 m. Otras propiedades importantes de la piedra o de cualquier otro material que se utilice incluyen: gran resistencia, ausencia de finos, tamaño uniforme, insolubilidad y resistencia química al agua aplicada, resistencia a la designación por intemperismo, carencia de toxicidad a microorganismos, inmunidad a ataques bacterianos y degradación por rayos ultravioleta. Los medios sintéticos fabricados en plásticos son ahora de uso común

por sus ventajas sobre los medios de piedra. A continuación, se citan algunas de sus ventajas. (Rodríguez, 2015)

- Mayor área superficial por unidad de volumen para alojar el crecimiento biológico.
- Mayor relación de volumen de vacío, lo que mejora la circulación del aire y la transferencia de oxígeno y reduce la posibilidad de taponamientos.
- Aumenta el tiempo de retención hidráulico.
- Su peso ligero permite construir filtros de mayor altura.
- Su resistencia química a las aguas residuales es mejor.
- Proporciona mejor distribución de las aguas residuales aplicadas.
- No se requiere una estructura de contención de concreto reforzado, ya que los módulos de medio filtrante son auto soportables. (Rodríguez, 2015)

**Tabla 1. Propiedades físicas de medios para filtros percoladores (Romero, 2013)**

Medio	Tamaño nominal cm	Unidades Por metro cubico	Densidad Kg / m <sup>3</sup>	Área superficial especifica m <sup>2</sup> / m <sup>3</sup>	% vacíos
Plástico	61 x 61 x 122	71 – 106	32 – 96	82 – 115	94 – 97
Convencional	60 x 60 x 120	–	30 – 100	80 – 100	94 – 97
Alta área	60 x 60 x 120	–	30 – 100	100 – 200	94 – 97
Pino californiano	120 x 120 x 90	–	165	46	76
	120 x 120 x 50	–	150 – 175	40 – 50	70 – 80
Granito	2,5 – 7,5	–	1.442	62	46
	10	–	–	43	60
Escoria					
Alto horno	5 – 7,5	1.766 – 2.119	1.089	66	49
Pequeña	5 – 8	–	900 – 1.200	55 – 70	40 – 50
Grande	7,5 – 12,5	–	800 – 1.000	45 – 60	50 – 60
Piedra de río					
Pequeña	2,5 – 6,5	–	1.250 – 1.450	55 – 70	40 – 50
Grande	10 – 12	–	800 – 1.000	40 – 50	50 – 60

### 3.2.7 Recirculación

Para los tratamientos biológicos por medio de filtros percoladores, no es obligatorio utilizar recirculación, sin embargo, la recirculación en los sistemas ayuda con su maduración y mejora su eficiencia, por lo general todos los filtros percoladores de tasa alta llevan recirculación. (Romero, 2013)

La recirculación en filtros percoladores de piedra aumenta la eficiencia en remoción de DBO por diferentes razones:

- La materia orgánica del efluente recirculado del filtro tiene contacto más de una vez con la biomasa, aumenta la eficiencia del contacto y permite sembrar el filtro a lo largo de su profundidad, con una mayor variedad de organismos.
- Si el caudal recirculado pasa a través del tanque de sedimentación sirve para amortiguar las variaciones en carga orgánica aplicada al filtro, diluye la concentración del agua residual del afluente y mantiene el filtro en mejores condiciones durante los periodos de variación de la carga. Sin embargo, puede afectar la eficiencia si sobrecarga el sedimentador.
- La recirculación a través del sedimentador primario refresca el agua residual séptica y reduce la formación de espumas; remueve lodo del sedimentador secundario y reduce la demanda de oxígeno del efluente de la planta. Sin embargo, puede sobrecargar el sedimentador primario.
- La recirculación mejora la distribución sobre la superficie del filtro, reduce la tendencia al taponamiento y ayuda a controlar las moscas. Además, incrementa la eficiencia al reducir el cortocircuito gracias a un mejor efecto de remojo del filtro.



## 4. PARÁMETROS DE DISEÑO

### 4.1 Modelo general

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

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

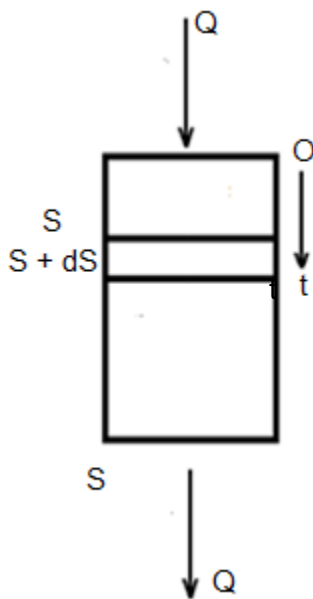


Figura 3. Modelo filtro percolador sin recirculación

$$q_a = \frac{dS}{dt} = -cS$$

Ecuación 1

Donde:  $S$  = concentración del sustrato, generalmente mg/L de DBO soluble

$c$  = constante de remoción de sustrato, base natural,  $d^{-1}$

$t$  = tiempo de contacto,  $d$

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

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

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

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

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

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

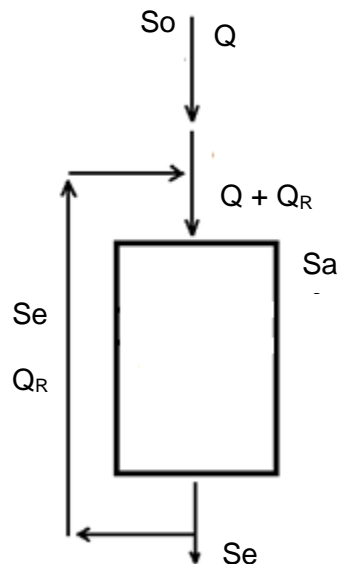


Figura 4. Modelo filtro percolador con recirculación

$$QS_0 + Q_R S_e = (Q + Q_R)S_a$$

Llamando R, la relación de recirculación:

$$R = \frac{Q_R}{Q} \quad \text{Ecuación 4}$$

Entonces,

$$S_0 + RS_e = (1 + R)S_a \quad \text{Ecuación 5}$$

Por tanto,

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

Donde  $S_0$  = DBO soluble del agua residual, sin incluir recirculación, mg/L

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

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

$$R = 0 \rightarrow S_a = S_0$$

Reemplazando La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se obtiene la Ecuación 7.

$$\frac{S_e(1 + R)}{S_0 + RS_e} = e^{-ct} \quad \text{Ecuación 7}$$

Teniendo en cuenta que el presente documento pretende realizar la comparación de 8 diferentes modelos para el diseño de filtros percoladores para el tratamiento de aguas residuales domésticas, es necesario definir los parámetros de diseño. Por lo tanto, para realizar el diseño por cada uno de los métodos propuestos, debemos tener como mínimo los siguientes datos:

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

Teniendo los datos antes mencionados se podrá calcular:

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

## **4.2 Marco Normativo**

La Resolución 0330 de 2017 expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – Ras y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009”, reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo. (MINVIVIENDA, 2017)

Esta normatividad contiene las siguientes especificaciones de interés para este trabajo:

**ARTÍCULO 183. Distancias mínimas para localización de sistemas de tratamiento de aguas residuales centralizados.** La localización de la PTAR deberá tener en cuenta el cumplimiento de las siguientes distancias mínimas. (MINVIVIENDA, 2017)

**Tabla 2. Se muestra lo especificado en la Tabla 28. Distancias mínimas para la localización de sistemas de tratamiento de aguas residuales con relación a otra infraestructura. Tomada de (MINVIVIENDA, 2017)**

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

**ARTÍCULO 184. Eficiencias de los procesos de tratamiento.** De acuerdo con la eficiencia necesaria del tratamiento existen diferentes alternativas para lograr el objetivo.

**Tabla 3. Presenta los rangos de eficiencia que se deben lograr en los procesos de tratamiento. Tomada de (MINVIVIENDA, 2017).**

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

**ARTÍCULO 194. Requisitos mínimos de diseño para filtros percoladores.** El reactor o filtro puede constar de un recipiente cilíndrico o rectangular con diámetros variables, hasta de 60 m y con profundidades entre 1.50 m y 12 m. el medio filtrante puede ser piedra triturada o un medio plástico o de madera, manufacturados especialmente para tal fin el medio debe ser durable, resistente al resquebrajamiento, insoluble, y no debe aportar sustancias indeseables al agua tratada. En la tabla siguiente se incluye los parámetros de diseño para filtros percoladores. (MINVIVIENDA, 2017)

**Tabla 4. se muestra los especificado en la Tabla 38. Parámetros de Diseño para filtros percoladores, tomada de (MINVIVIENDA, 2017)**

Características de diseño	Baja tasa	Tasa intermedia	Alta tasa Roca	Alta tasa Plástico	Tratamiento grueso
Tipo de lecho	Roca	Roca	Roca	Plástico	Roca/Plástico
Carga hidráulica m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	1--4	4—10	10-40	10-75	40-200
Carga orgánica kgDBO/m <sup>2</sup> d	0,07-0,22	0,24-0,48	0,4-2,4	0,6-3,2	> 1,5
Relación de recirculación	0	0-1	1--2	1--2	0-2
Moscas de filtro	Muchas	Varias	Pocas	Pocas	Pocas
Desprendimientos	Intermitentes	Intermitentes	Continuos	Continuos	Continuos
Profundidad, m	1,8-2,4	1,8-2,4	1,8-2,4	3-12,2	0,9-6
Remoción DBO (%)	80-90	50-80	65-90	75-95	40-70
Calidad del afluente	Bien nitrificado	Someramente nitrificado	Sin nitrificación	Sin nitrificación	Sin nitrificación
Consumo energético KW/10 <sup>2</sup> m <sup>3</sup>	2--4	2—8	6--10	6--10	10--20

## 5. MODELOS DE DISEÑO

Para el diseño de filtros percoladores existen diferentes ecuaciones; en la presente investigación se creará un modelo en el software Excel para comparar ocho (8) de las diferentes metodologías de diseño de filtros percoladores para el tratamiento de aguas residuales (NRC, ECKENFELDER, GERMAIN, TEN STATE STANDARDS, VELZ, SCHULZE, GALLER-GOTAAS, BRUCE Y MERKENS).

### 5.1 Modelo de Eckenfelder.

(Eckenfelder, 1980) modifica la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** así:

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-cSt} \quad \text{Ecuación 8}$$

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

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

$C$  = constante de remoción, m/d

$S$  = área superficial específica del medio,  $m^2/m^3$

$t$  = tiempo de contacto, d

(Eckenfelder, 1980) toma el tiempo de contacto, o tiempo de retención en el filtro percolador, como lo hace Velz, Schulze, Howland, Sinkoff y otros así:

$$t = \frac{CD}{q^n} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:  $D$  = profundidad del filtro, m

$q$  = carga hidráulica superficial, m/d

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

Remplazando la Ecuación 9 en la Ecuación 8, se tiene:

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-KSD/q^n} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:  $K = cC =$  constante modificada de remoción de sustrato, base natural  $(m/d)^n$ .

En la Ecuación 10, K tiene unidades de  $m/d$  para  $n=1$  y C es adimensional. Sin embargo, los valores de K son función de las unidades usadas para expresar las diferentes variables y del valor de n. La ecuación anterior es la recomendada por Eckenfelder para predecir la remoción de la materia orgánica en el filtro percolador. La Ecuación 10 también suele expresarse así:

$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-kSD/q^n} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:  $k =$  constante modificada de remoción de sustrato, base decimal  $(m/d)^n$ .

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

$$q = \left[ \frac{KSD}{\ln \left( \frac{1 + R(S_e/S_0)}{(1 + R) * (S_e/S_0)} \right)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ecuación 12}$$

Para filtros percoladores, sin recirculación, de la Ecuación 12 se obtiene la Ecuación 13.

$$q = \left[ \frac{KSD}{\ln \left( \frac{S_0}{S_e} \right)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ecuación 13}$$



Para tener en cuenta el efecto de la temperatura sobre el valor de K, se puede usar la ecuación clásica de Arrhenius, Ecuación 14.

$$K_T = K_{20}\theta^{T-20} \quad \text{Ecuación 14}$$

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

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

T = temperatura del agua, °C.

$\theta$  = coeficiente de temperatura

$\theta = 1,035$  para filtros percoladores. Otros autores consideran  $\theta = 1,0$  para temperaturas mayores a 10°C, o sea que no sería necesario hacer la corrección por temperatura.

Cuando con la Ecuación 10 no se encuentran correlaciones experimentales apropiadas, Eckenfelder recomienda usar el modelo expresado por la Ecuación 15 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, con el cambio correspondiente en las unidades de expresión de K y k: (m/d)<sup>n</sup> (mg/L).

$$\frac{Se}{Sa} = e^{-KSD/q^n Sa} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\frac{Se}{Sa} = e^{-kSD/q^n Sa} \quad \text{Ecuación 16}$$

## 5.2 Modelo de Velz

De acuerdo con (España, Quintero, & Reyes, 2017), a diferencia de las demás fórmulas que son netamente empíricas y se basan en datos específicos, Velz propuso en 1948 la primera fórmula significativa que delineó una ley fundamental, basada en análisis de datos. Esta relación es aplicable a todos los procesos biológicos concernientes a biorreactores de bajo y alto rendimiento. Su ecuación parte de consideraciones teóricas sobre la remoción de la materia orgánica por los microorganismos. La cantidad de microorganismos la hace proporcional a la profundidad del lecho. Por consiguiente, la fórmula de Velz indica el DBO remanente a una profundidad D como se muestra a continuación:

$$\frac{S_D}{S_0} = 10^{-KD}$$

Ecuación 17

Donde:

$S_0$  = Concentración de DBO removible, mg/L

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

D = Profundidad del filtro.

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

La concentración de DBO removible significa para Velz la fracción máxima de la DBO aplicada que es posible remover para una carga hidráulica dada. Esta ecuación tiene utilidad cuando se consideran sistemas sin recirculación. En esta fórmula se toma K, como una constante para todos los rangos hidráulicos. Sin embargo, se demostró que esta constante varía de acuerdo con los rangos dependiendo del sistema, así que, para los filtros de alto rango K es igual a  $0.1505d^{-1}$  d-l. y para las biorreactores de bajo rango K es igual a 0.175. (España, Quintero, & Reyes, 2017)

### 5.3 Modelo de Schulze

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

$$T = \frac{CD}{q^n}$$

Ecuación 18

Donde:

- T = Tiempo de contacto del líquido.
- C = Constante.
- D = Profundidad.

- $q$  = Rango de carga hidráulica.
- $n$  = Constante, característico del medio de soporte.

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

$$\frac{S_e}{S_0} = e^{-\frac{KD}{qn}}$$

Ecuación 19

Donde:

- $S_e$  = DBO del efluente, mg/L
- $S_0$  = DBO del afluente, mg/L
- $K$  = Constante de tratabilidad de rango entre 0.51 y 0.76  $d^{-1}$
- $D$  = profundidad.
- $q$  = Carga hidráulica.
- $n$  = constante, característico del medio de soporte

#### 5.4 Modelo de Germain

La fórmula propuesta por Germain, para diseño de filtros percoladores de medio plástico, es la **Ecuación 20**.

$$\frac{S_e}{S_0} = e^{-\frac{KD}{qn}}$$

Ecuación 20

Donde:

- $S_0$  = DBO soluble del afluente, sin incluir recirculación, mg/L.
- $S_e$  = DBO soluble del efluente, mg/L.
- $D$  = profundidad, m.
- $q$  = carga hidráulica, sin recirculación, m/d
- $n$  = exponente característico del medio de soporte.
- $K$  = constante de tratabilidad,  $m^{-0.5} d^{-0.5}$
- $K = 2,21 (m.d)^{-0.5}$  para aguas residuales domésticas, a 20°C.
- $K = 0,25 - 2,51 (m.d)^{-0.5}$  para aguas residuales industriales, a 20°C.

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

La constante de tratabilidad se corrige por temperatura según la Ecuación 21.

$$K_T = K_{20}(1,035)^{T-20} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde:

- $K_T$  = constante de tratabilidad a la temperatura T.
- $K_{20}$  = constante de tratabilidad a 20°C.
- T = temperatura mínima esperada, °C.

En los estudios de Germain se indicaba que la recirculación no tenía influencia apreciable sobre la tasa de reacción K. No obstante, en la actualidad se reconoce el efecto de la recirculación para diseño de biofiltros de medio plástico o biorres. Para tener en cuenta la recirculación, la ecuación de Germain se modifica como se indica en la Ecuación 23

$$S_a = \frac{S_0 + RS_e}{1 + R} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$S_e = S_a e^{-KD/qn} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

- $S_a$  = DBO del afluente del filtro, incluyendo la recirculación, mg/
- R = relación de recirculación o razón entre el caudal recirculado y el caudal afluente de aguas residuales.
- n = coeficiente dependiente del medio de soporte, igual a 0,5 para medio plástico, según Germain.

En diseño generalmente se requiere determinar la carga hidráulica, para lo cual es útil la expresión Ecuación 24 o Ecuación 25.

$$q = \left[ \frac{KD}{\ln \left( \frac{S_a}{S_e} \right)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ecuación 24}$$

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

Ecuación 25

### 5.5 El modelo de National Research Council (NRC).

Las ecuaciones del NRC para filtros percoladores son expresiones empíricas, desarrolladas a partir del estudio de los registros de operación de 34 plantas de filtros percoladores, para instalaciones militares, con medio de soporte de crecimiento biológico de piedra, en el año 1946. Las fórmulas se aplican con las siguientes limitaciones. (Romero, 2013)

- Son empíricas y satisfacen los datos para filtros percoladores con recirculación o sin ella.
- Las aguas residuales evaluadas, provenientes de instalaciones militares, son generalmente más concentradas que las aguas residuales domésticas típicas.
- Las fórmulas dan gran influencia, sobre eficiencia, a la carga orgánica y, en menor grado, a la carga hidráulica.
- Las fórmulas evaluadas no tienen en cuenta el efecto de la temperatura sobre la eficiencia.
- La fórmula para filtros de segunda etapa supone la existencia de tanques de sedimentación intermedia.

Cuando se tiene una planta de filtros percoladores de dos etapas, sin sedimentador intermedio, la fórmula del NRC no puede usarse para determinar la eficiencia de la primera etapa. En dicho caso, se puede suponer una eficiencia para la primera etapa del 50% y encontrar la eficiencia de la segunda por la fórmula correspondiente, para dicha etapa, del NRC. (Romero, 2013)

#### 5.5.1 Para filtros primarios o de una etapa.

$$E_1 = \frac{1}{1 + 0.433 * \sqrt{\frac{W_1}{V_1 * F_1}}}$$

Ecuación 26

$$V_1 = \frac{W_1}{F_1} * \left( \frac{0.433 * E_1}{1 - E_1} \right)^2 \quad \text{Ecuación 27}$$

$$F_1 = \frac{1 + R_1}{(1 + 0.1 * R_1)^2} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$R_1 = \frac{Q_R}{Q} \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

- $E_1$  = Eficiencia fraccional de remoción de DBO para el proceso, incluyendo recirculación y sedimentación.
- $W_1$  = Carga orgánica aplicada al filtro de primera etapa, sin incluir recirculación, es decir, el agua cruda sedimentada, kg DBO/d.
- $V_1$  = Volumen total del medio filtrante del filtro de primera etapa, m<sup>3</sup>.
- $F_1$  = Factor de recirculación del filtro de primera etapa, o número de pasos del material orgánico.
- $R_1$  = Relación de recirculación para el filtro de la primera etapa, igual a la relación entre el caudal de recirculación y el caudal afluente de aguas residuales crudas al filtro.
- $Q_R$  = Caudal de recirculación, m<sup>3</sup>/d
- $Q$  = Caudal afluente, sin incluir recirculación, m<sup>3</sup>/d

### 5.5.2 Para filtros de segunda etapa.

$$E_2 = \frac{1}{1 + \frac{0.443}{1 - E_1} * \sqrt{\frac{W_2}{V_2 * F_2}}} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$V_2 = \frac{W_1}{F_2 * (1 - E_1)} * \left( \frac{0.433 * E_2}{1 - E_2} \right)^2 \quad \text{Ecuación 31}$$

Donde:

- $E_2$  = eficiencia fraccional de remoción de DBO para la segunda etapa del proceso, incluyendo recirculación y sedimentación.

- $W_2$  = Carga orgánica aplicada a la segunda etapa del proceso, la proveniente de la primera etapa, sin incluir recirculación, kg DBO/d.
- $V_2$  y  $F_1$  = Como se definió anteriormente para la primera etapa, pero con los valores particulares de la segunda. (Rincón, Velancia, Florez, & Camacho, 2019)

## 5.6 El modelo de Bruce y Merkens.

Bruce y Merkens desarrollaron en el año de 1973 la Ecuación 32, para el diseño de filtros percoladores. (Hernández, 2012)

$$S_e = S_a * e^{-K_T * S_a * q^{-b}} \quad \text{Ecuación 32}$$

En filtros percoladores con recirculación, la DBO5 del afluyente al filtro se calcula por la Ecuación 33.

$$S_a = \frac{S_o + R * S_e}{1 + R} \quad \text{Ecuación 33}$$

La relación de recirculación se expresa según la Ecuación 35.

$$R = \frac{Q_R}{Q} \quad \text{Ecuación 34}$$

El valor de  $K_T$  se puede calcular por la Ecuación 33 o por la Ecuación 34, para aguas residuales típicas. En general,  $K_T$  varía entre 0.06 y 0.12 m/d, con un valor representativo de 0.1 m/d a 20 °C. (Hernández, 2012)

$$K_T = 0.1 * (1.08)^{T-20} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$K_T = 0.037 * (1.08)^{T-15} \quad \text{Ecuación 36}$$

La carga hidráulica volumétrica se expresa según Ecuación 37.

$$q = Qb \quad \text{Ecuación 37}$$

De la Ecuación 30, para  $a = b = 1.0$ , se obtiene la Ecuación 38.

$$q = \frac{K_T * S}{\ln \ln \left( \frac{S_a}{S_e} \right)} \quad \text{Ecuación 38}$$

Reemplazando la Ecuación 35 en la Ecuación 36, se obtiene la Ecuación 39.

$$V = \frac{Q * \ln \left( \frac{S_a}{S_e} \right)}{K_T * S} \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde:

- $S_e$  = DBO5 del efluente sedimentado del filtro, mg/L.
- $S_a$  = DBO5 del afluente al filtro, incluyendo recirculación, mg/L.
- $S_o$  = DBO5 del afluente, sin recirculación, o efluente primario, mg/L.
- $R$  = Relación de recirculación.
- $Q_R$  = Caudal de recirculación.
- $Q$  = Caudal afluente, sin incluir recirculación, m<sup>3</sup>/d.
- $K_T$  = Constante de tratabilidad, a la temperatura T, generalmente en m/d.
- $T$  = Temperatura del agua residual, en °C.
- $S$  = Área superficial específica del medio filtrante, m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.
- $q$  = Carga hidráulica volumétrica, sin incluir recirculación, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>d.
- $V$  = Constantes empíricas, generalmente iguales a la unidad.
- $a, b$  = Constantes empíricas, generalmente iguales a la unidad.

## 5.7 Ten State Standards

Con la creciente de zonas urbanas y la necesidad de agua potable se van estableciendo las normas de diseño, en el estado de Nueva York fue promulgada la Ley de Agua Limpia (CWA), lo cual esto permite mantener y restaurar los productos físicos, biológicos y químicos. El enfoque es mantener la integridad de las aguas superficiales de la nación y para lograrlo se estipula la reducción de las descargas directas de los contaminantes en vías fluviales, e inversión en estructuras de tratamiento de aguas residuales, que debían desarrollar la tecnología necesaria para eliminar la descarga de contaminantes y gestionar la esorrentía contaminada. (Department, 2015)



En Nueva York el artículo 17 de la Ley de Conservación Ambiental (ECL), “Control de la contaminación del agua” se expide simultáneamente con la creación del Programa del Sistema de Eliminación de Descargas de Contaminantes del Estado (SPDES) para proteger los recursos hídricos, regulados por el “Desing Standards for Wasterwater Treatment Works in the Lake George Basin” (Department, 2015). donde se especifica el diseño, operación y mantenimiento adecuados de los sistemas esenciales para el tratamiento de aguas. Se presenta como opciones de tratamiento secundario, los filtros biológicos, indicando sus características físicas y la composición química de las aguas residuales necesarias para cumplir con los criterios ambientales y de salud pública y las limitaciones.

La guía de diseño está compuesta por 10 secciones organizadas de (A-J). Las secciones que describen los procesos de filtración son la Sección F (Tratamiento secundario) y Sección G (Tratamiento terciario). Allí, la guía indica cómo se debe realizar el diseño para filtros biológicos rotativos, incluyendo bio-torres para tratamiento biológico integrado. Especifica también cuatro divisiones de la sección G, tales como filtración de medios granulares, tratamiento físico-químico, sistemas de eliminación de nutrientes biológicos y sistemas de humedales construidos, Sin embargo, se limita a la eliminación de unos pocos contaminantes químicos, ya que gran parte de los criterios de diseño son adecuados o tomados de forma literal del “Manual del sistema de tratamiento de Aguas Residuales (OWTS) 2002 de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)”. (Department, 2015)

## **5.8 Modelo de Galler-Gotaas**

Galler-Gottas, presentaron un análisis de variables de filtro biológico que eventualmente condujo a la optimización de estos factores para ser utilizados en las formulaciones de diseño. Archer y Robinson investigaron la filtración biológica de una y dos etapas junto con un volumen medio y una relación de recirculación y descubrieron que las fórmulas de desempeño del consejo nacional de investigación podían expresar adecuadamente las predicciones de eficiencia. Baker y Graves compararon las fórmulas de eficiencia del filtro de goteo propuestas por el consejo nacional de investigación, Eckenfelder, y Galler y Gotaas basadas en un programa de optimización de computadora, determinaron que se producirían volúmenes mínimos de medios cuando los volúmenes en cada etapa de un

proceso de dos etapas fueron iguales cuando se utilizaron la fórmula NRC y una fórmula Eckenfelder modificada. Al utilizar la fórmula de Galler-Gotaas, se produjo una relación volumen de la primera a la segunda etapa de 1: 2. Robertson informó un análisis estadístico de las fórmulas de rendimiento del filtro de goteo. Esto para determinar, entre otras cosas, la precisión de los filtros y la posibilidad de mejorar las predicciones mediante el ajuste de ciertos parámetros mediante análisis de regresión. (Charnes & Lynn, 1973)

Galler-Gotaas utilizaron un análisis de regresión múltiple en datos de plantas existentes y dio la siguiente expresión.

$$S_e = \frac{0.464 * (S_o)^{1.19} * (1 + R)^{0.28} * \left(\frac{Q}{A}\right)^{0.13}}{(1 + D)^{0.67} * 7^{0.15}} \quad \text{Ecuación 40}$$

La variable de recirculación debe sustituirse por la DBO aplicada (So). Para los filtros que utilizan recirculación, las ecuaciones que se usan para obtener volúmenes mediante enfoques de diseño primario son los siguientes:

- Primera etapa:

$$V = 0.0263 * Q * S_i \frac{(1 + 0.1 * R)^2}{1 + R} * \left(\frac{E}{1 - E}\right)^2 \quad \text{Ecuación 41}$$

- Segunda etapa:

$$V = 0.0263 * \frac{Q * S_i}{F} * \left(\frac{E_2}{(1 - E_1) * (1 - E_2)}\right) \quad \text{Ecuación 42}$$

Eckenfelder;

- Primera etapa:

$$V = 7.0 * \frac{Q}{D^{0.33}} * \left(\frac{\frac{E}{1 - E}}{1 + R}\right)^2 \quad \text{Ecuación 43}$$

- Segunda etapa:

$$V = 7.0 * \frac{Q}{D^{0.55}} * \left( \frac{E_2}{(1 - E_2) * (1 - E_2) * (1 + R)} \right) \quad \text{Ecuación 44}$$

Galles-Gotaas:

- Primera etapa:

$$V = 0.1355 * D * \left( \frac{Q^{0.15} * Si^{0.19} * [(1 + R * (1 - E))]^{0.19}}{7^{0.15} * (1 + D)^{0.67} * (1 - E) * (1 + R)^{0.75}} \right) * \frac{1}{(1 - E_1)^{0.5}} \quad \text{Ecuación 45}$$

- Segunda etapa:

$$V = 0.1355 * D * \left( \frac{Q^{0.15} * Si^{0.19} * [(1 + R * (1 - E))]^{0.19}}{7^{0.15} * (1 + D)^{0.67} * (1 - E) * (1 + R)^{0.73} * (1 - E_1)^{0.5}} \right)^8 \quad \text{Ecuación 46}$$

El volumen del filtro de goteo, cuando se compara con las fórmulas NRC y Eckenfelder, varía directamente con la velocidad de flujo y la función de eficiencia  $E/(1 - E)^2$ . El volumen varía con la DBO influyente en la fórmula NRC, y con la función de profundidad  $1/D^{0.33}$ , lo que hace que el volumen disminuya con la profundidad. En el enfoque de Galler-Gotaas, el volumen aumenta con el caudal, la DBO influyente y la eficiencia requerida disminuye con aumentos de temperatura y profundidad. La recirculación y la eficiencia son parámetros independientes. (Mukhopadhyay, 2019)

Se observa una disminución de volumen sólo con mayores eficiencias en relaciones prácticas limitantes de 4 o 5. Las tres fórmulas pueden diseñar filtros de goteo de dos etapas. El volumen óptimo se puede aproximar diseñando etapas de igual volumen con el NRC y la fórmula Eckenfelder y usando una proporción de 1:2 en la fórmula Galler-Gotaas. Una unidad de dos etapas requiere menos volumen que una unidad de una sola etapa. (Mukhopadhyay, 2019)

- Se = DBO5 del efluente sedimentado del filtro, mg/L.
- Sa = DBO5 del afluente al filtro, incluyendo recirculación, mg/L.

- $S_o$  = DBO5 del afluente, sin recirculación, o efluente primario, mg/L.
- $R$  = Relación de recirculación.
- $Q$  = Caudal afluente, sin incluir recirculación, m<sup>3</sup>/d.
- $E$  = Eficiencia del filtro.
- $E_1$  = Eficiencia fraccional de remoción de DBO para el proceso, incluyendo recirculación y sedimentación.
- $E_2$  = eficiencia fraccional de remoción de DBO para la segunda etapa del proceso, incluyendo recirculación y sedimentación.
- $D$  = profundidad del filtro, m
- $V$  = Volumen total del medio filtrante del filtro de primera etapa, m<sup>3</sup>.

## 6. EJEMPLO #1 DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR DE TASA BAJA EN ROCA

Diseñar un filtro percolador de tasa baja, determinando dimensiones (área y volumen) y cargas, el medio filtrante del filtro es en roca con área superficial específica del medio de  $50 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , para tratar  $2000 \text{ m}^3/\text{d}$  de agua residual doméstica con DBO de  $150 \text{ mg/L}$ , temperatura del agua de  $25^\circ\text{C}$ , profundidad del filtro de  $1,8\text{m}$  y DBO del afluente de  $20 \text{ mg/L}$ .

### 6.1 Solución por NRC (National Research Council):

- Se calcula la eficiencia

$$E_1 = \frac{S_0 - S_e}{S_0} \quad \text{Ecuación 47}$$

$$E_1 = \frac{150 - 20}{150}$$

$$E_1 = 0.86$$

- Cálculo de la carga orgánica.

$$W_1 = S_0 \times Q \quad \text{Ecuación 48}$$

$$W_1 = 150 \times 10^{-3} \times 2000$$

$$W_1 = 300 \text{ Kg/d}$$

- Cálculo de F1.

$$F_1 = \frac{1+R}{(1+0.1R)^2} \quad (28)$$

$$F_1 = \frac{1+0}{(1+0.1(0))^2}$$

$$F_1 = 1$$

- Cálculo del volumen del filtro.

$$V_1 = \frac{W_1}{F_1} \left[ \frac{0.443E_1}{1-E_1} \right]^2 \quad (27)$$

$$V_1 = \frac{300}{1} \left[ \frac{0.443 \times 0.86}{1-0.86} \right]^2$$

$$V_1 = 2487.3 \approx 2.487 \text{ m}^3$$

- Cálculo del área superficial del filtro.

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

Ecuación 49

Donde,

V = Volumen del filtro

D = Profundidad del filtro

$$A = \frac{2.487}{1.8}$$

$$A = 1.382 \text{ m}^2$$

- Cálculo de las cargas hidráulicas y orgánicas.

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

Ecuación 50

$$CHS = \frac{2.000}{1.382}$$

$$CHS = 1.45 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$$

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad \text{Ecuación 51}$$

$$CHV = \frac{2.000}{2.487}$$

$$CHV = 0.80 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

$$COS = \frac{S_0Q}{A} \quad \text{Ecuación 52}$$

$$COS = \frac{150 \times 2.000}{1.382}$$

$$COS = 217 \text{ gr DBO}/\text{m}^2\text{d}$$

$$COV = \frac{S_0Q}{V} \quad \text{Ecuación 53}$$

$$COV = \frac{150 \times 2.000}{2.487}$$

$$COV = 120.61 \text{ gr DBO}/\text{m}^3\text{d}$$

## 6.2 Solución por GERMAIN:

- Cálculo de la carga orgánica del afluente.

$$S_a = \frac{S_0 + RS_e}{1 + R} \quad (22)$$

$$S_a = S_0$$

$$S_a = 150 \text{ mg/L}$$

- Cálculo de constante de constante de tratabilidad:

$$K_T = K_{20}(1.035)^{T-20} \quad (21)$$

$$K_{25} = 2.21(1.035)^{25-20}$$

$$K_{25} = 2.62 \text{ (md)}^{-0.5}$$

- Cálculo de la carga hidráulica, se tiene en cuenta que por ser filtro de tasa baja no tiene recirculación.

$$q = \left[ \frac{K_T * D}{\ln \left( \frac{S_a}{S_e} \right)} \right]^{0.5} \quad (24)$$

$$q = \left[ \frac{2.62 * 1.8}{\ln \left( \frac{150}{20} \right)} \right]^2$$

$$q = 5.50 \text{ m/d}$$

- Cálculo del área superficial del filtro.

$$A = \frac{Q}{q} \quad \text{Ecuación 54}$$

$$A = \frac{2000}{5.50}$$

$$A = 363,75 \text{ m}^2$$

- Cálculo del volumen del filtro.

$$V_1 = A \times D \quad \text{Ecuación 55}$$



$$V_1 = 363.75 \times 1.8$$

$$V_1 = 654.75 \text{ m}^3$$

- Cálculo de las cargas hidráulicas y orgánicas.

$$CHS = \frac{Q}{A} \quad (50)$$

$$CHS = \frac{2000}{363.75}$$

$$CHS = 5.49 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$$

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (51)$$

$$CHV = \frac{2000}{654.75}$$

$$CHV = 3.05 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

$$COS = \frac{S_0 Q}{A} \quad (52)$$

$$COS = \frac{150 \times 2000}{363.75}$$

$$COS = 824.74 \text{ gr DBO}/\text{m}^2\text{d}$$

$$COV = \frac{S_0 Q}{V} \quad (53)$$

$$COV = \frac{150 \times 2000}{654.75}$$

$$COV = 458.19 \text{ gr DBO}/m^3d$$

### 6.3 Solución por BRUCE Y MERKENS:

- Cálculo de la carga orgánica del afluente.

$$S_a = \frac{S_0 + RS_e}{1 + R} \quad (33)$$

$$S_a = S_0$$

$$S_a = 150 \text{ mg/L}$$

- Cálculo de constante de constante de tratabilidad:

$$K_T = 0.037(1.08)^{T-15} \quad (36)$$

$$K_{25} = 0.037(1.08)^{25-15}$$

$$K_{25} = 0.08 \text{ m/d}$$

- Cálculo del volumen del filtro.

$$V = \frac{Q \ln \left( \frac{S_a}{S_e} \right)}{K_T S} \quad (39)$$

$$V = \frac{2000 \ln \left( \frac{150}{20} \right)}{0.08 \times 50}$$

$$V = 1.010 \text{ m}^3$$

- Cálculo del área superficial del filtro.

$$V = A \times D \quad (55)$$

$$A = \frac{1010}{1.8}$$

$$A = 562 \text{ m}^2$$

- Cálculo de las cargas hidráulicas y orgánicas.

$$CHS = \frac{Q}{A} \quad (50)$$

$$CHS = \frac{2000}{562}$$

$$CHS = 3.56 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$$

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (51)$$

$$CHV = \frac{2000}{1.010}$$

$$CHV = 1.98 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

$$COS = \frac{S_0 Q}{A} \quad (52)$$

$$COS = \frac{150 \times 2000}{562}$$

$$COS = 535 \text{ gr DBO}/\text{m}^2\text{d}$$

$$COV = \frac{S_0 Q}{V} \quad (53)$$

$$COV = \frac{150 \times 2000}{1.010}$$

$$COV = 297 \text{ gr DBO}/m^3d$$

#### 6.4 Solución por SCHULZE:

- Cálculo de la carga orgánica del afluente.

$$S_a = \frac{S_0 + RS_e}{1 + R} \quad (22)$$

$$S_a = S_0$$

$$S_a = 150 \text{ mg/L}$$

- Cálculo de constante de tratabilidad: según SCHULZE la constante de tratabilidad debe estar entre  $[0.51 - 0.76]d^{-1}$

$$K = 0.51 d^{-1}$$

- Cálculo de la carga hidráulica, se tiene en cuenta que por ser filtro de tasa baja no tiene recirculación.

$$q = \left[ \frac{K * D}{\ln \left( \frac{S_0}{S_e} \right)} \right]^{0.5} \quad (24)$$

$$q = \left[ \frac{0.51 * 1.8}{\ln \left( \frac{150}{20} \right)} \right]^2$$

$$q = 0.20 \text{ m/d}$$

- Cálculo del área superficial del filtro.

$$A = \frac{Q}{q} \quad (54)$$

$$A = \frac{2000}{0.20}$$

$$A = 9.635 \text{ m}^2$$

- Cálculo del volumen del filtro.

$$V = A \times D \quad (55)$$

$$V = 9.635 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$$

$$V = 17.343 \text{ m}^3$$

- Cálculo de las cargas hidráulicas y orgánicas.

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (51)$$

$$CHV = \frac{2000}{17.343}$$

$$CHV = 0.12 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

$$COS = \frac{S_0 Q}{A} \quad (52)$$

$$COS = \frac{150 \times 2000}{9.635}$$

$$COS = 31 \text{ gr DBO}/\text{m}^2\text{d}$$

$$COV = \frac{S_0 Q}{V} \quad (53)$$

$$COV = \frac{150 \times 2000}{17.343}$$

$$COV = 17.3 \text{ gr DBO}/m^3 d$$

## 6.5 Solución por ECKENFELDER:

- Cálculo de la carga orgánica del afluente.

$$S_a = \frac{S_0 + RS_e}{1 + R} \quad (22)$$

$$S_a = S_0$$

$$S_a = 150 \text{ mg/L}$$

- Cálculo de constante de constante de tratabilidad:

$$K_T = K_{20}(1.035)^{T-20} \quad (21)$$

$$K_{25} = 2.21(1.035)^{25-20}$$

$$K_{25} = 2.62 \text{ m/d}$$

- Cálculo de la carga hidráulica, se tiene en cuenta que por ser filtro de tasa baja no tiene recirculación.

$$q = \left[ \frac{KSD}{\ln \left( \frac{S_0}{S_e} \right)} \right]^{\frac{1}{i}} \quad (21)$$

$$q = \left[ \frac{2.62 * 50 * 1.8}{\ln \left( \frac{150}{20} \right)} \right]^1$$

$$q = 117 \text{ m/d}$$

- Cálculo del área superficial del filtro.

$$A = \frac{Q}{q} \quad (54)$$

$$A = \frac{2000}{117}$$

$$A = 17 \text{ m}^2$$

- Cálculo del volumen del filtro.

$$V = A \times D \quad (55)$$

$$V = 17 \times 1.8$$

$$V = 31 \text{ m}^3$$

- Cálculo de las cargas hidráulicas y orgánicas.

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (51)$$

$$CHV = \frac{2000}{31}$$

$$CHV = 65 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

$$COS = \frac{S_0 Q}{A} \quad (52)$$

$$COS = \frac{150 \times 2000}{17}$$

$$COS = 17586 \text{ gr DBO}/m^2d$$

$$COV = \frac{S_0 Q}{V} \quad (53)$$

$$COV = \frac{150 \times 2000}{31}$$

$$COV = 9770 \text{ gr DBO}/m^3d$$

## 7. EJEMPLO #2 DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR DE TASA ALTA EN ROCA

Diseñar un filtro percolador de tasa alta, determinando dimensiones (área y volumen) y cargas, el medio filtrante es en roca con área superficial específica del medio de  $50 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , para tratar  $2000 \text{ m}^3/\text{d}$  de agua residual doméstica con DBO de  $150 \text{ mg/L}$ , relación de recirculación de  $200\%$ , temperatura del agua de  $25^\circ\text{C}$ , profundidad del filtro de  $2.00 \text{ m}$  y DBO del afluente de  $50 \text{ mg/L}$ .

### 7.1 Solución por NRC (National Research Council):

- Se calcula la eficiencia

$$E_1 = \frac{S_0 - S_e}{S_0} \quad (47)$$

$$E_1 = \frac{150 - 50}{150}$$

$$E_1 = 0.66$$



- Cálculo de la carga orgánica.

$$W_1 = S_0 \times Q \quad (48)$$

$$W_1 = 150 \times 10^{-3} \times 2000$$

$$W_1 = 300 \text{ Kg/d}$$

- Cálculo de F1.

$$F_1 = \frac{1+R}{(1+0.1R)^2} \quad (28)$$

$$F_1 = \frac{1+2}{(1+0.1(2))^2}$$

$$F_1 = 2.08$$

- Cálculo del volumen del filtro.

$$V_1 = \frac{W_1}{F_1} \left[ \frac{0.443E_1}{1 - E_1} \right]^2 \quad (27)$$

$$V_1 = \frac{300}{2.08} \left[ \frac{0.443 \times 0.66}{1 - 0.66} \right]^2$$

$$V_1 = 113 \text{ m}^3$$

- Cálculo del área superficial del filtro.

$$A = \frac{V}{D} \quad (49)$$

Donde,

V = Volumen del filtro

D = Profundidad del filtro

$$A = \frac{113}{2.00}$$

$$A = 56.5 \text{ m}^2$$

- Cálculo de las cargas hidráulicas y orgánicas.

$$CHS = \frac{Q}{A} \quad (50)$$

$$CHS = \frac{2000 \times 3}{56.5}$$

$$CHS = 106 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$$

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (51)$$

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

$$CHV = \frac{2000 \times 3}{113}$$

$$CHV = 55.08 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

$$COS = \frac{S_0 Q}{A} \quad (52)$$

$$COS = \frac{150 \times 2000}{56.5}$$

$$COS = 5307.9 \text{ gr DBO}/\text{m}^2\text{d}$$

$$COV = \frac{S_0 Q}{V} \quad (53)$$

$$COV = \frac{150 \times 2000}{113}$$

$$COV = 2653.94 \text{ gr DBO}/\text{m}^3\text{d}$$

## 7.2 Solución por GERMAIN

- Cálculo de la carga orgánica del afluente.

$$S_a = \frac{S_0 + RS_e}{1 + R} \quad (22)$$

$$S_a = \frac{150 + 2 * 50}{1 + 2}$$

$$S_a = 83.33 \text{ mg/L}$$

- Cálculo de constante de constante de tratabilidad:

$$K_T = K_{20}(1.035)^{T-20} \quad (21)$$

$$K_{25} = 2.21(1.035)^{25-20}$$

$$K_{25} = 2.62 \text{ (md)}^{-0.5}$$

- Cálculo de la carga hidráulica: se tiene en cuenta que la recirculación es R=2 y que el medio de soporte es piedra.

$$q = \left[ \frac{K_T * D}{\ln \left( \frac{S_0 + RS_e}{(1 + R)S_e} \right)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (25)$$

$$q = \left[ \frac{2.62 * 2.0}{\ln \left( \frac{150 + 2 * 50}{(1 + 2) * 50} \right)} \right]^{\frac{1}{0.5}}$$

$$q = 105.6 \text{ m/d}$$

- Cálculo del área superficial del filtro.

Nota: El valor del caudal (Q), debe sumarse el caudal recirculado.  $Q=Q(1+R)$

$$A = \frac{Q}{q} \quad (54)$$

$$A = \frac{6000}{105.6}$$

$$A = 56.81 \text{ m}^2$$

- Cálculo del volumen del filtro.

$$V = A \times D \quad (55)$$

$$V = 56.81 \times 2.00$$

$$V = 113.63 \text{ m}^3$$

- Cálculo de las cargas hidráulicas y orgánicas.

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (51)$$

$$CHV = \frac{2000 \times 3}{113.63}$$

$$CHV = 52.8 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

$$COS = \frac{S_0 Q}{A} \quad (52)$$

$$COS = \frac{150 \times 2000}{56.81}$$

$$COS = 5280.5 \text{ gr DBO}/\text{m}^2\text{d}$$

$$COV = \frac{S_0 Q}{V} \quad (53)$$

$$COV = \frac{150 \times 2000}{113.63}$$

$$COV = 2640.2 \text{ gr DBO}/m^3d$$

### 7.3 Solución por BRUCE Y MERKENS:

- Cálculo de la carga orgánica del afluente.

$$S_a = \frac{S_0 + RS_e}{1 + R} \quad (33)$$

$$S_a = \frac{150 + 2 * 50}{1 + 2}$$

$$S_a = 83.33 \text{ mg/L}$$

- Cálculo de constante de constante de tratabilidad:

$$K_T = 0.037(1.08)^{T-15} \quad (36)$$

$$K_{25} = 0.037(1.08)^{25-15}$$

$$K_{25} = 0.08 \text{ m/d}$$

- Cálculo del volumen del filtro.

$$V = \frac{Q \ln \left( \frac{S_a}{S_e} \right)}{K_T S} \quad (39)$$

$$V = \frac{2000 \ln \left( \frac{83.33}{50} \right)}{0.08 \times 50}$$

$$V = 256 \text{ m}^3$$

- Cálculo del área superficial del filtro.

$$V = A \times D \quad (55)$$

$$A = \frac{256}{2.00}$$

$$A = 128 \text{ m}^2$$

- Cálculo de las cargas hidráulicas y orgánicas.

$$CHS = \frac{Q}{A} \quad (50)$$

$$CHS = \frac{6000}{128}$$

$$CHS = 46.9 \text{ m}^2/\text{m}^2\text{d}$$

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (51)$$

$$CHV = \frac{2000 \times 3}{256}$$

$$CHV = 23.5 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

$$COS = \frac{S_0 Q}{A} \quad (52)$$

$$COS = \frac{150 \times 2000}{128}$$

$$COS = 2345 \text{ gr DBO}/\text{m}^2\text{d}$$

$$COV = \frac{S_0 Q}{V} \quad (53)$$

$$COV = \frac{150 \times 2000}{256}$$

$$COV = 1173 \text{ gr DBO}/m^3d$$

#### 7.4 Solución por SCHULZE:

- Cálculo de la carga orgánica del afluente.

$$S_a = \frac{S_0 + RS_e}{1 + R} \quad (33)$$

$$S_a = \frac{150 + 2 * 50}{1 + 2}$$

$$S_a = 83.33 \text{ mg/L}$$

- Cálculo de constante de constante de tratabilidad: según SCHULZE la constante de tratabilidad debe estar entre  $[0.51 - 0.76]d^{-1}$

$$K = 0.51 d^{-1}$$

- Cálculo de la carga hidráulica: se tiene en cuenta que la recirculación es  $R=2$  y que el medio de soporte es piedra,  $n=1$ .

$$q = \left[ \frac{K * D}{\ln \left( \frac{S_a}{S_e} \right)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (24)$$

$$q = \left[ \frac{0.51 * 2.00}{\ln \left( \frac{83.33}{50} \right)} \right]^1$$

$$q = 1.99 \text{ m/d}$$

- Cálculo del área superficial del filtro.

$$A = \frac{Q}{q} \quad (54)$$

$$A = \frac{2000}{1.99}$$

$$A = 1002 \text{ m}^2$$

- Cálculo del volumen del filtro.

$$V = A \times D \quad (55)$$

$$V = 1002 \times 2.00$$

$$V = 2004 \text{ m}^3$$

- Cálculo de las cargas hidráulicas y orgánicas.

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (51)$$

$$CHV = \frac{2000 \times 3}{2004}$$

$$CHV = 2.99 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

$$COS = \frac{S_0 Q}{A} \quad (52)$$

$$COS = \frac{150 \times 2000}{1002}$$

$$COS = 299.5 \text{ gr DBO}/\text{m}^2\text{d}$$

$$COV = \frac{S_0 Q}{V} \quad (53)$$

$$COV = \frac{150 \times 2000}{2004}$$



$$COV = 149.8 \text{ gr DBO/m}^3\text{d}$$

### 7.5 Solución por ECKENFELDER:

- Cálculo de la carga orgánica del afluente.

$$S_a = \frac{S_0 + RS_e}{1 + R} \quad (33)$$

$$S_a = \frac{150 + 2 * 50}{1 + 2}$$

$$S_a = 83.33 \text{ mg/L}$$

- Cálculo de constante de constante de tratabilidad:

$$K_T = K_{20}\theta^{T-20} \quad (21)$$

$$K_{25} = 2.21(1.035)^{25-20}$$

$$K_{25} = 2.62 \text{ m/d}$$

- Cálculo de la carga hidráulica: se tiene en cuenta que la recirculación es R=2 y que el medio de soporte es piedra, S=50 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

$$q = \left[ \frac{KSD}{\ln \left( \frac{1 + R(S_e/S_0)}{(1 + R) * (S_e/S_0)} \right)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (12)$$

$$q = \left[ \frac{2.62 * 50 * 2,00}{\ln \left( \frac{1 + 2(50/150)}{(1 + 2) * (50/150)} \right)} \right]^1$$

$$q = 513.83 \text{ m/d}$$

- Cálculo del área superficial del filtro.

$$A = \frac{Q}{q} \quad (54)$$

$$A = \frac{2000}{513.83}$$

$$A = 3.89 \text{ m}^2$$

- Cálculo del volumen del filtro.

$$V = A \times D \quad (55)$$

$$V = 3.89 \times 2.00$$

$$V = 7.78 \text{ m}^3$$

- Cálculo de las cargas hidráulicas y orgánicas.

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (51)$$

$$CHV = \frac{2000 \times 3}{7.78}$$

$$CHV = 778 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ d}$$

$$COS = \frac{S_0 Q}{A} \quad (52)$$

$$COS = \frac{S_0 Q}{A}$$

$$COS = \frac{150 \times 2000}{3.89}$$

$$COV = \frac{S_0 Q}{V} \quad COS = 77074.8 \text{ gr DBO}/m^2 d \quad (53)$$

$$COV = \frac{150 \times 2000}{7.78}$$

$$COV = 38537.4 \text{ gr DBO}/m^3 d$$

## 8. EJEMPLO #3 DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR DE TASA ALTA EN PLÁSTICO

Diseñar un filtro percolador de tasa alta, determinando dimensiones (área y volumen) y cargas, el medio filtrante es en plástico con área superficial específica del medio de  $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , para tratar  $2000 \text{ m}^3/\text{d}$  de agua residual doméstica con DBO de  $150 \text{ mg/L}$ , relación de recirculación de  $200\%$ , temperatura del agua de  $25^\circ\text{C}$ , profundidad del filtro de  $3.00 \text{ m}$  y DBO del afluente de  $10 \text{ mg/L}$ .

### 8.1 Solución por NRC (National Research Council):

- Se calcula la eficiencia

$$E_1 = \frac{S_0 - S_e}{S_0} \quad (47)$$

$$E_1 = \frac{150 - 10}{150}$$

$$E_1 = 0.933$$

- Cálculo de la carga orgánica.

$$W_1 = S_0 \times Q \quad (48)$$

$$W_1 = 150 \times 10^{-3} \times 2000$$

$$W_1 = 300 \text{ Kg/d}$$

- Cálculo de F1.

$$F_1 = \frac{1+R}{(1+0.1R)^2} \quad (28)$$

$$F_1 = \frac{1+2}{(1+0.1(2))^2}$$

$$F_1 = 2.08$$

- Cálculo del volumen del filtro.

$$V_1 = \frac{W_1}{F_1} \left[ \frac{0.443E_1}{1 - E_1} \right]^2 \quad (27)$$

$$V_1 = \frac{300}{2.083} \left[ \frac{0.443 \times 0.933}{1 - 0.933} \right]^2$$

$$V_1 = 5.539 \text{ m}^3$$

- Cálculo del área superficial del filtro.

$$A = \frac{V}{D} \quad (49)$$

Donde,

V = Volumen del filtro

D = Profundidad del filtro

$$A = \frac{5539}{3.00}$$

$$A = 1846.3 \text{ m}^2$$

- Cálculo de las cargas hidráulicas y orgánicas.

$$CHS = \frac{Q}{A} \quad (50)$$

$$CHS = \frac{2000 \times 3}{1846.3}$$

$$CHS = 3.25 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$$

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (51)$$

$$CHV = \frac{2000 \times 3}{5539}$$

$$CHV = 1.08 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

$$COS = \frac{S_0Q}{A} \quad (52)$$

$$COS = \frac{150 \times 2000}{36.33}$$

$$COS = 162.5 \text{ gr DBO}/\text{m}^2\text{d}$$

$$COV = \frac{S_0Q}{V} \quad (53)$$

$$COV = \frac{150 \times 2000}{5539}$$

$$COV = 54.16 \text{ gr DBO}/\text{m}^3\text{d}$$

## 8.2 Solución por GERMAIN:

- Cálculo de la carga orgánica del afluente.

$$S_a = \frac{S_0 + RS_e}{1 + R} \quad (33)$$

$$S_a = \frac{150 + 2 * 10}{1 + 2}$$

$$S_a = 567 \text{ mg/L}$$

- Cálculo de constante de constante de tratabilidad:

$$K_T = K_{20}(1,035)^{T-20} \quad (21)$$

$$K_{25} = 2.21(1.035)^{25-20}$$

$$K_{25} = 2.62 \text{ (md)}^{-0.5}$$

- Cálculo de la carga hidráulica: se tiene en cuenta que la recirculación es R=2 y que el medio de soporte es plástico, n=0.5.

$$q = \left[ \frac{K_T * D}{\ln \left( \frac{S_0 + RS_e}{(1 + R)S_e} \right)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (25)$$

$$q = \left[ \frac{2.62 * 3.00}{\ln \left( \frac{150 + (2 * 10)}{(1 + 2) * 10} \right)} \right]^{\frac{1}{0,5}}$$

$$q = 20.6 \text{ m/d}$$

- Cálculo del área superficial del filtro.

$$A = \frac{Q}{q} \quad (54)$$

$$A = \frac{6000}{20.6}$$

$$A = 291 \text{ m}^2$$

- Cálculo del volumen del filtro.

$$V = A \times D \quad (55)$$

$$= 291 \times 3.00$$

$$V = 873.5 \text{ m}^3$$

- Cálculo de las cargas hidráulicas y orgánicas.

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (51)$$

$$CHV = \frac{2000 \times 3}{873.5}$$

$$CHV = 6.9 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

$$COS = \frac{S_0 Q}{A} \quad (52)$$

$$COS = \frac{150 \times 2000}{291}$$

$$COS = 1030.4 \text{ gr DBO}/\text{m}^2\text{d}$$

$$COV = \frac{S_0 Q}{V} \quad (53)$$

$$COV = \frac{150 \times 2000}{873.5}$$

$$COV = 343.5 \text{ gr DBO}/\text{m}^3\text{d}$$

### 8.3 Solución por BRUCE Y MERKENS:

- Cálculo de la carga orgánica del afluente.

$$S_a = \frac{S_0 + RS_e}{1 + R} \quad (33)$$

$$S_a = \frac{150 + 2 * 10}{1 + 2}$$

$$S_a = 56.70 \text{ mg/L}$$

- Cálculo de constante de constante de tratabilidad:

$$K_T = 0.037(1.08)^{T-15} \quad (36)$$

$$K_{25} = 0.037(1.08)^{25-15}$$

$$K_{25} = 0.08 \text{ m/d}$$

- Cálculo del volumen del filtro.

$$V = \frac{Q \ln \left( \frac{S_a}{S_e} \right)}{K_T S} \quad (39)$$

$$V = \frac{2000 \ln \left( \frac{56.70}{10} \right)}{0.08 \times 100}$$

$$V = 434.3 \text{ m}^3$$

- Cálculo del área superficial del filtro.

$$V = A \times D \quad (55)$$



$$A = \frac{434.3}{3.00}$$

$$A = 145 \text{ m}^2$$

- Cálculo de las cargas hidráulicas y orgánicas.

$$CHS = \frac{Q}{A} \quad (50)$$

$$CHS = \frac{2000 \times 3}{145}$$

$$CHS = 41.4 \text{ m}^2/\text{m}^2\text{d}$$

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (51)$$

$$CHV = \frac{2000 \times 3}{434.3}$$

$$CHV = 13.82 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

$$COS = \frac{S_0 Q}{A} \quad (52)$$

$$COS = \frac{150 \times 2000}{145}$$

$$COS = 2072.3 \text{ gr DBO}/\text{m}^2\text{d}$$

$$COV = \frac{S_0 Q}{V} \quad (53)$$

$$COV = \frac{150 \times 2000}{434.3}$$

$$COV = 690.8 \text{ gr DBO}/\text{m}^3\text{d}$$

#### 8.4 Solución por SCHULZE:

- Cálculo de la carga orgánica del afluente.

$$S_a = \frac{S_0 + RS_e}{1 + R} \quad (33)$$

$$S_a = \frac{150 + 2 * 10}{1 + 2}$$

$$S_a = 56.7 \text{ mg/L}$$

- Cálculo de constante de constante de tratabilidad: según SCHULZE la constante de tratabilidad debe estar entre  $[0.51 - 0.76]d^{-1}$

$$K = 0.51 d^{-1}$$

- Cálculo de la carga hidráulica: se tiene en cuenta que la recirculación es  $R=2$  y que el medio de soporte es plástico,  $n=0.5$

$$q = \left[ \frac{K * D}{\ln \left( \frac{S_a}{S_e} \right)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (24)$$

$$q = \left[ \frac{0.51 * 3.00}{\ln \left( \frac{56.7}{10} \right)} \right]^{\frac{1}{0.5}}$$

$$q = 0.88 \text{ m/d}$$

- Cálculo del área superficial del filtro.

$$A = \frac{Q}{q} \quad (54)$$

$$A = \frac{2000}{0.88}$$

$$A = 2267 \text{ m}^2$$

- Cálculo del volumen del filtro.

$$V = A \times D \quad (55)$$

$$V = 2267 \times 3.00$$

$$V = 6802 \text{ m}^3$$

- Cálculo de las cargas hidráulicas y orgánicas.

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (51)$$

$$CHV = \frac{2000 \times 3}{6802}$$

$$CHV = 0.882 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

$$COS = \frac{S_0 Q}{A} \quad (52)$$

$$COS = \frac{150 \times 2000}{2267}$$

$$COS = 132.3 \text{ gr DBO}/\text{m}^2\text{d}$$

$$COV = \frac{S_0 Q}{V} \quad (53)$$

$$COV = \frac{150 \times 2000}{6802}$$

$$COV = 44.10 \text{ gr DBO}/\text{m}^3\text{d}$$

## 8.5 Solución por ECKENFELDER:

- Cálculo de la carga orgánica del afluente.

$$S_a = \frac{S_0 + RS_e}{1 + R} \quad (33)$$

$$S_a = \frac{150 + 2 * 10}{1 + 2}$$

$$S_a = 56.7 \text{ mg/L}$$

- Cálculo de constante de constante de tratabilidad:

$$K_T = K_{20} \theta^{T-20} \quad (21)$$

$$K_{25} = 2.21(1.035)^{25-20}$$

$$K_{25} = 2.62 \text{ m/d}$$

- Cálculo de la carga hidráulica, se tiene en cuenta que la recirculación es R=2 y que el medio de soporte es plástico, S=100 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

$$q = \left[ \frac{KSD}{\ln \left( \frac{1 + R(S_e/S_0)}{(1 + R) * (S_e/S_0)} \right)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (12)$$

$$q = \left[ \frac{2.62 * 100 * 3.00}{\ln \left( \frac{1 + 2(10/150)}{(1 + 2) * (10/150)} \right)} \right]^{\frac{1}{0.5}}$$

$$q = 453.9 \text{ m/d}$$

- Cálculo del área superficial del filtro.

$$A = \frac{Q}{q} \quad (54)$$

$$A = \frac{2000}{453.9}$$

$$A = 4.41 \text{ m}^2$$

- Cálculo del volumen del filtro.

$$V = A \times D \quad (55)$$

$$V = 4.41 \times 3.00$$

$$V = 13.22 \text{ m}^3$$

- Cálculo de las cargas hidráulicas y orgánicas.

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (51)$$

$$CHV = \frac{2000 \times 3}{13.22}$$

$$CHV = 453.9 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{d}$$

$$COS = \frac{S_0 Q}{A} \quad (52)$$

$$COS = \frac{150 \times 2000}{4.41}$$

$$COS = 68093.7 \text{ gr DBO}/\text{m}^2\text{d}$$

$$COV = \frac{S_0 Q}{V} \quad (53)$$

$$COV = \frac{150 \times 2000}{13.22}$$

$$COV = 22697.9 \text{ gr DBO}/\text{m}^3\text{d}$$

## 9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizó el diseño de tres filtros percoladores, uno de tasa baja, otro de tasa alta con material del lecho filtrante en roca y por último un filtro de tasa alta con material de lecho filtrante en plástico. Para cada uno de los ejemplos se consideraron como datos de entrada el caudal a tratar, la DBO del efluente y afluente, la relación de recirculación, la profundidad del filtro, el área superficial específica del medio y la temperatura del agua.

Para cada uno de los ejemplos se realizó el diseño mencionado según los modelos de la NRC, GERMAIN, BRUCE Y MERKENS, SCHULZE Y ECKENFELDER obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 5. Resultado del ejemplo #1

TASA BAJA ROCA											
Características de diseño	Resolución 0330 del 2017	NRC		GERMAIN		BRUCE Y MERKENS		SCHULZE		ECKENFELDER	
Carga hidráulica m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	1--4	1,45	Cumple	5,50	No Cumple	3,57	Cumple	0,20	No Cumple	117	No cumple
Carga orgánica kgDBO/m <sup>2</sup> d	0,07-0,22	0,22	Cumple	0,82	Cumple	0,54	No cumple	0,03	No Cumple	17,56	No cumple

De la tabla anterior podemos observar que el modelo de Eckenfelder y Schulze no cumple con los valores normativos, por lo cual no se tendría en cuenta para el diseño del filtro. El modelo GERMAIN cumple con la carga orgánica, pero el valor de la carga hidráulica no cumple. BRUCE Y MERKENS cumple con la carga hidráulica pero no con la carga orgánica. Por último, el método NRC es el único que cumple con ambos parámetros, por lo tanto, se puede utilizar las dimensiones obtenidas por este modelo para el filtro percolador de tasa baja.

**Tabla 6. Resultados del ejemplo #2.**

TASA ALTA ROCA											
Características de diseño	Resolución 0330 del 2017	NRC		GERMAIN		BRUCE Y MERKENS		SCHULZE		ECKENFELDER	
Carga hidráulica m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	10,0 - 40	106,16	No cumple	105,61	No Cumple	46,9	No cumple	2,0	No cumple	513,83	No cumple
Carga orgánica kgDBO/m <sup>2</sup> d	0,4-2,4	5,31	No cumple	5,28	No cumple	2,35	Cumple	0,30	No cumple	77,10	No cumple

Para el ejemplo del filtro de tasa alta con material filtrante roca, ninguno de los modelos cumple, el modelo de BRUCE Y MERKENS no cumple con la carga hidráulica, mientras que la carga orgánica sí cumple. Los demás los modelos no cumplen con ninguno de los dos parámetros, lo cual se puede deber a la eficiencia de los modelos.

**Tabla 7. Resultados del ejemplo #3.**

TASA ALTA PLÁSTICO											
Características de diseño	Resolución 0330 del 2017	NRC		GERMAIN		BRUCE Y MERKENS		SCHULZE		ECKENFELDER	
Carga hidráulica m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	10,0 - 75,0	3,25	No Cumple	20,6	Cumple	41,4	Cumple	0,8	No cumple	454	No cumple
Carga orgánica kgDBO/m <sup>2</sup> d	0,6-3,2	0,16	No cumple	1,0	Cumple	2,07	Cumple	0,12	No cumple	68,1	No cumple

Para el ejemplo #3, correspondiente a un filtro percolador de tasa alta con material filtrante de plástico, los modelos de BRUCE Y MERKENS y GERMAIN cumplen con los parámetros normativos, los modelos de SCHULZE Y ECKENFELDER y el modelo NRC no cumplen con ninguno de los parámetros. Para el último caso, esto puede deberse a que el modelo

de NRC no tiene en cuenta la corrección por temperatura y adicionalmente ni el material del lecho filtrante; este modelo, solo se tiene en cuenta para material filtrante en roca.



## 10. CÓDIGO FUENTE EN PROGRAMA VISUAL BASIC (EXCEL)

Después de terminado el análisis de los ejemplos de diseño de filtro por procedimiento matemático, se procede a la construcción e implementación de la aplicación desarrollada en Visual Basic (Excel), el cual da cumplimiento a los objetivos planteados al comienzo de este documento.

El programa realizará los cálculos correspondientes a cada uno de los autores propuestos y entregará como dato resultante: la carga hidráulica, la carga orgánica, el área superficial y el volumen. El programa también permitirá comparar los resultados con las especificaciones de la Resolución 0330 de 2017 y, si estos valores cumplen o requieren modificación de algún dato de entrada. En el **ANEXO 1** se presenta el código fuente en programa Visual Basic y en el **ANEXO 2** se presenta una simulación diseño filtros percoladores.

## 11.RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

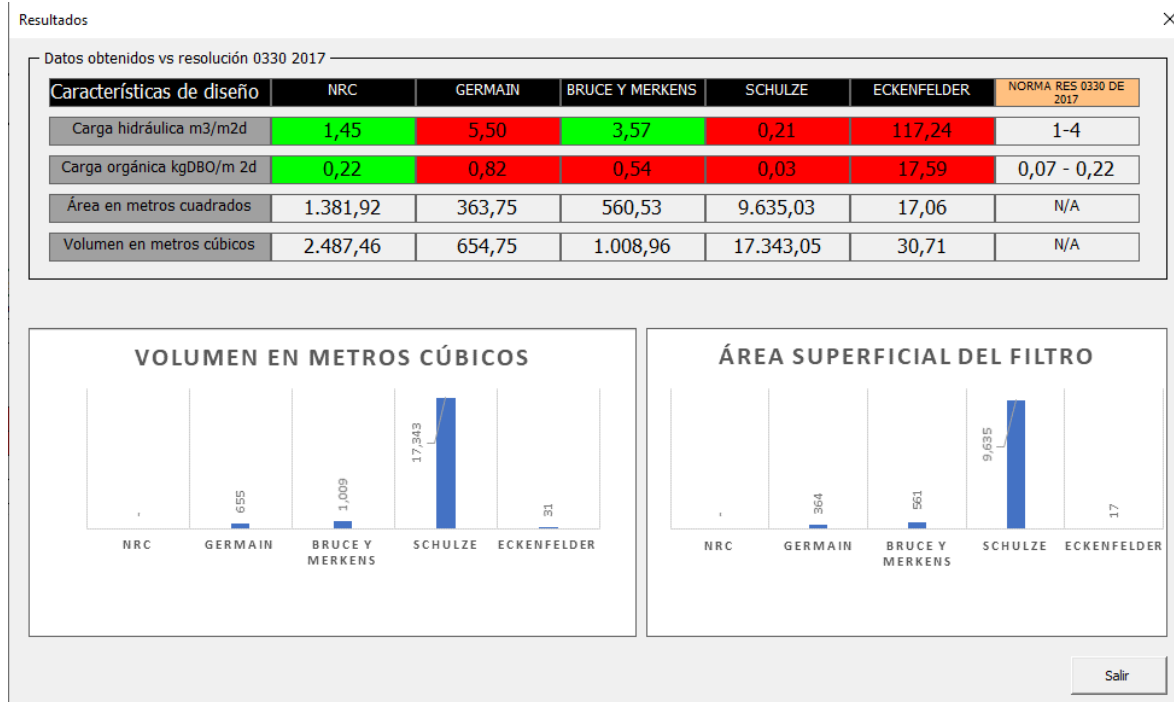
En el capítulo 6, 7 y 8, se desarrollaron tres ejemplos con los métodos propuestos: NRC, Germain, Bruce Y Merkens, Schulze y Eckenfelder, los cuales se ingresaron como datos de entrada el caudal a tratar, la DBO del efluente y afluente, la relación de recirculación, la profundidad del filtro, el área superficial específica del medio y la temperatura del agua, en el programa “Simulación Diseño Filtros Percoladores”.

En la Ilustración 1 se presenta una imagen de ingreso de los datos de entrada en el modelo para el desarrollo del ejemplo número uno, en el que se tiene un filtro percolador de tasa baja con medio filtrante en roca, dependiendo del tipo de filtro seleccionado y del medio filtrante. En la parte inferior, existe un cuadro de notas que sirven de ayuda para el usuario del programa, en donde muestran los posibles valores que debe llevar el filtro según las condiciones ya mencionadas. Para el ejemplo de filtro de tasa baja, muestra que la recirculación debe ser cero “0”, que el área superficial del medio debe tener un valor entre 40 – 50  $m^2/m^3$ , que la profundidad del filtro debe estar entre 1.8 – 2.4 metros y también indica para cuál de los modelos propuestos no aplica.

SELECCIONE TIPO DE FILTRO		MEDIO FILTRANTE	
Tasa Baja		Roca Grande	
<b>Datos de Entrada</b>			
Profundidad del Filtro, m (D)	1,8	Temperatura del Agua, °C (Tº)	25
Recirculación (R)	0	Área Superficial Específica del medio Filtrante, $m^2/m^3$ (S)	50
Caudal, $m^3/d$ (Q)	2000	Constante de Tratabilidad Schulze ( $0,51 - 0,76$ ), $d^{-1}$ (K)	0,51
DBO Afluente, mg/L (So)	150	Coeficiente Dependiente del Medio (n)	0,5
DBO Efluente, mg/L (Se)	20	Eficiencia (E)	
<b>Notas</b>			
*****Según Norma - Resolución 0330 de 2017 *****			
Área superficial específica del medio filtrante, $m^2/m^3$ (S): Entre 40-50			
Relación de recirculación : Igual a 0			
Profundidad, m : Entre 1,8-2,4			
Modelo NRC : Aplica			
EJECUTAR		CANCELAR	

Ilustración 1. Datos de entrada Ejemplo 1 Diseño de un filtro percolador de Tasa Baja en roca

En la Ilustración 2 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los métodos, con los valores de la carga hidráulica, carga orgánica, área del filtro y volumen del filtro. Adicionalmente, se presentan gráficos de barras que el modelo arroja, con los resultados de cada uno de los métodos para el área y el volumen del filtro, con el fin de facilitar su comparación.



**Ilustración 2. Resultados del Ejemplo 1 Diseño de un filtro percolador de Tasa Baja en Roca**

En la ilustración 2 se observa que para el ejemplo #1 el método de NRC, Bruce y Merkens y Schulze se cumple con los parámetros normativos de la Resolución 0330 de 2017, y que para el método de Germain se cumple con la carga orgánica, pero no con la carga hidráulica. En el método de Eckenfelder no se cumple con ningún parámetro, por lo que no se deben tener en cuenta estos dos métodos para el dimensionamiento del filtro.

En la Ilustración 3 se muestran los datos de entrada para el desarrollo del ejemplo número dos; un filtro percolador de tasa alta con medio filtrante en roca. En la parte inferior se muestra nuevamente el cuadro de notas de ayuda; si en alguna de las casillas se ingresa un valor que no corresponde al tipo de filtro o al tipo filtrante, el programa arroja un mensaje de alerta para que el usuario corrija el valor.

Simulacion\_Diseno\_FiltrosPercoladores\_V1.1.0.xlsm

### Simulador Filtros Percoladores / Ing. Camilo Carvajal

SELECCIONE TIPO DE FILTRO: Tasa Alta

MEDIO FILTRANTE: Roca Grande

**Datos de Entrada**

Profundidad del Filtro, m (D)	<input type="text" value="2"/>	Temperatura del Agua, °C (T <sup>o</sup> )	<input type="text" value="25"/>
Recirculación (R)	<input type="text" value="2"/>	Área Superficial Especifica del medio Filtrante, m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> (S)	<input type="text" value="50"/>
Caudal, m <sup>3</sup> /d (Q)	<input type="text" value="2000"/>	Constante de Tratabilidad Schulze (0,51 - 0,76), d <sup>-1</sup> (K)	<input type="text" value="0,51"/>
DBO Afluente, mg/L (So)	<input type="text" value="150"/>	Coefficiente Dependiente del Medio (n)	<input type="text" value="1"/>
DBO Efluente, mg/L (Se)	<input type="text" value="50"/>	Eficiencia (E)	

**Notas**

\*\*\*\*\*Según Norma - Resolución 0330 de 2017 \*\*\*\*\* .

Área superficial específica del medio filtrante, m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> (S): Entre 40-50

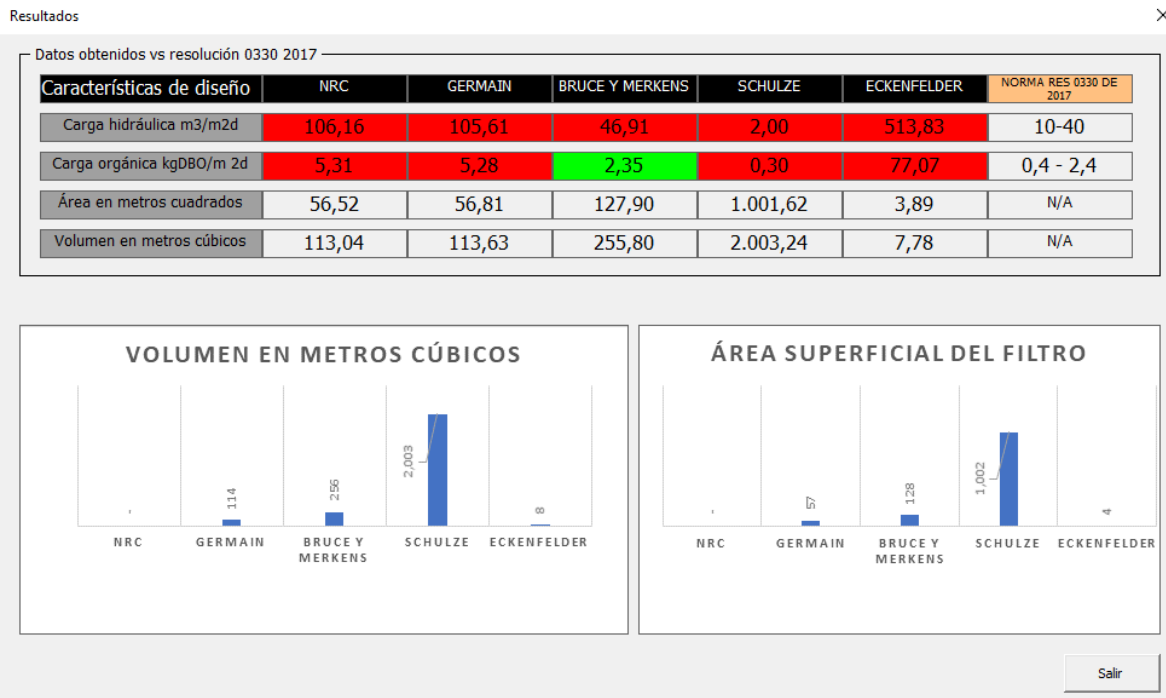
Relación de recirculación : Entre 1-2

Profundidad, m : Entre 1,8-2,4

Modelo NRC : Aplica

EJECUTAR    CANCELAR

**Ilustración 3. Datos de entrada Ejemplo 2 Diseño de un filtro percolador de Tasa Alta en Roca**



**Ilustración 4. Resultados del Ejemplo 2 Diseño de un filtro percolador de Tasa Alta en Roca**

En la Ilustración 4 se observa que, en el ejemplo número dos ninguno de los parámetros cumple con lo requerido en la norma.

En la Ilustración 5, se muestran los datos de ingreso para el ejemplo número tres; un filtro percolador de tasa alta con medio filtrante en plástico. Una vez más, se muestra el cuadro de notas de ayuda, lo que permite que se ingresen los valores de forma correcta y así, proceder a dar clic en el botón ejecutar, con lo que, el programa deriva los cálculos pertinentes.

**Ilustración 5. Datos de entrada Ejemplo 3 Diseño de un filtro percolador de Tasa Alta en Plástico**

En la Ilustración 6 se observa que los resultados obtenidos de la modelación del filtro percolador de tasa alta con medio filtrante en plástico, cumple por el método de Germain y Bruce y Merkens; el método de Schulze y Eckenfelder no cumple y no se muestra resultados para el método NRC, debido a que este método sólo se utiliza para roca y en este caso el medio filtrante seleccionado fue plástico.

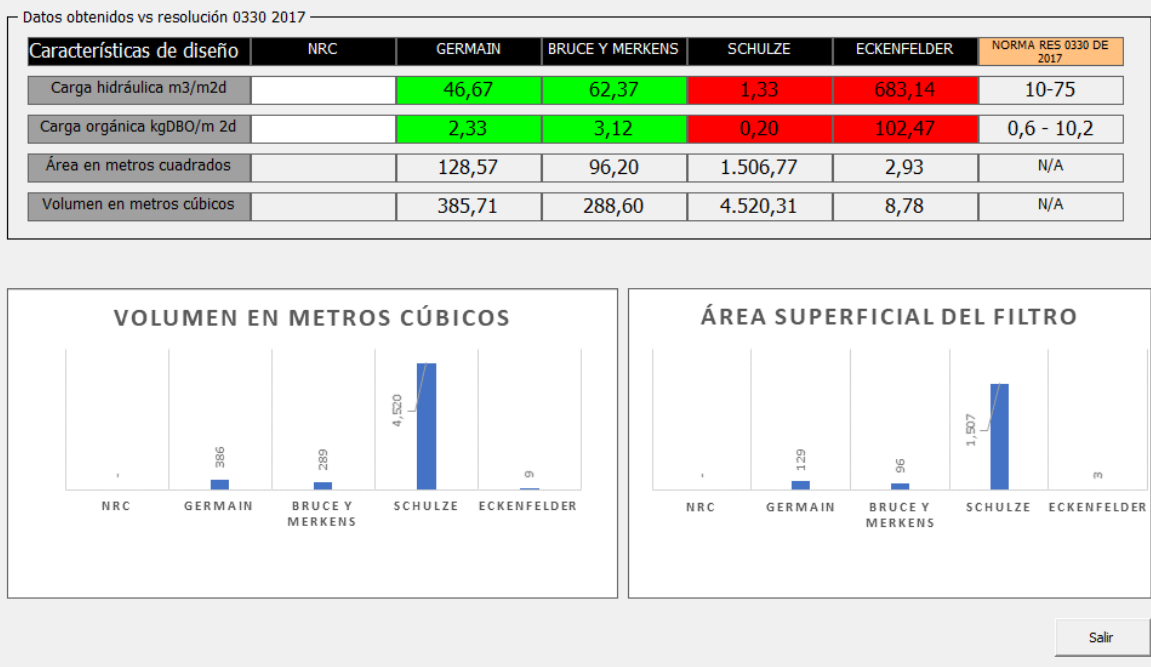


Ilustración 6. Resultados del Ejemplo 3 Diseño de un filtro percolador de Tasa Alta en Plástico

## 12. CONCLUSIONES

- El modelo desarrollado en Excel compara 5 de las 8 metodologías de diseño de filtros percoladores propuestos para el tratamiento de aguas residuales (NRC, GERMAIN, BRUCE Y MERKENS, SCHULZE Y ECKENFELDER).
- El modelo permite realizar el diseño de un filtro percolador por 5 diferentes modelos, permitiendo observar y comparar cuál cumple con los parámetros exigidos por la norma y así determinar cuál es el más adecuado según cada caso.
- El modelo del NRC no tiene en cuenta el efecto del tipo de material filtrante en el funcionamiento del filtro, por lo tanto, no se puede diferenciar la eficiencia entre el material de roca o de plástico en el diseño de un filtro percolador mediante este modelo.
- EL modelo de Germain no es recomendable para filtros de roca, ya que no existe una referencia bibliográfica para el valor de “n” para medio filtrante en roca.
- Se puede apreciar que el modelo de Eckenfelder tiende a sub - dimensionar los filtros.
- El modelo permite presentar los resultados en tablas y gráficas, para que el usuario tenga facilidad para comparar los resultados obtenidos.
- Los resultados obtenidos al realizar el diseño con el modelo son comparados contra la norma vigente la Resolución 0330 de 2017

### 13.REFERENCIAS

- Ali, I., Khan, Z. M., Sultan, M., & Mahmood, M. H. (2016). Experimental Study on Maize Cob Trickling Filter-Based Wastewater Treatment System: Design, Development, and Performance Evaluation. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2265-2273.
- Cabrera, A. C., & Cabrera, J. M. (2019). *FILTROS BIOLÓGICOS PERCOLADORES (FBP)*. ARMENIA: UNIVERSIDAD DEL QUINDIO.
- Charnes, D. A., & Lynn, D. W. (1973). *Mathematical Analysis of Decision Problems in Ecology*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer - Verlag.
- Department, o. E. (2015). *DESIGN STANDARDS FOR WASTEWATER TREATMENT WORKS IN THE LAKE GEORGE BASIN. NEW YORK: NEW YORK STATE OF OPPORTUNITY*. New York: NEW YORK STATE OF OPPORTUNITY.
- Eckenfelder, W. (1980). *Principles of Water Quality Management*. Boston: CBI Publishing Co.
- España, L. M., Quintero, D. F., & Reyes, S. A. (2017). *SISTEMAS AEROBIOS ADHERIDOS: FILTROS PERCOLADORES*. SANTIAGO DE CALI: UNIVERSIDAD DEL VALLE.
- GEDAR. (s.f.). *GEDAR TRATAMIENTO DE AGUAS*. Obtenido de Filtro Percolador: <https://www.gedar.com/residuales/tratamiento-biologico-aerobio/filtros-percoladores.htm>
- Hernández, J. C. (2012). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN MODELO EXPERIMENTAL DE FILTRO PERCOLADOR UTILIZANDO ESTOPA DE COCO COMO MEDIO FILTRANTE, PARA LA REDUCCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO TOTAL DE LAS AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO AURORA II*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Kishimoto, N., Ohara, T., Hinobayashi, J., & Hashimoto, T. (2014). Roughness and temperature effects on the filter media of a trickling filter for nitrification. *Environmental Technology*, 1549-1555.
- Mendoza, Y. C. (18 de 03 de 2012). *Slideshare*. Obtenido de Slideshare: <https://es.slideshare.net/yazminmendozacastillo/filtros-percoladores>
- Menéndez, C. G., & Dueñas, J. M. (2018). Los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales desde una visión no convencional. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 97-107.



- MINVIVIENDA. (08 de 06 de 2017). Resolución 0330/2017. *Resolución 0330 de 08 de junio de 2017*. Bogotá D.C, Colombia: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Mukhopadhyay, S. N. (2019). *Fundamentals of Waste and Environmental Engineering*. . New Delhi, India: Teri.
- Rincón, A. C., Velancia, G. F., Florez, M. M., & Camacho, C. O. (2019). *FILTRO PERCOLADOR*. Norte de Santander: Universidad de Pamplona.
- Rodríguez, J. L. (2015). *Evaluación y diagnóstico de alternativas de tratamiento de aguas residuales usando sistemas convencionales y sus impactos ambientales: Caso de estudio Tenango, Ocosingo, Chiapas*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Universidad Autónoma de Chiapas.
- Romero, J. A. (2013). *TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, teoría y principios de diseño*. bogota: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, C. N. (s.f.). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Coyoacán, México, D.F.: Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.