AAQ4468

TESIS
I C 2004
C3

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO TEÓRICO DE UN PROTOTIPO DE **BIOFILTRO DOMICILIARIO** COMO TRATAMIENTO SECUNDARIO PARA AGUAS NEGRAS

REALIZADO POR Christiansen Freites, María P.
Martínez Arasme, Jelinek

PROFESOR GUIA Ing. Alfredo Gorrochotegui A

FECHA 01 de Junio de 2004

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO TEÓRICO DE UN PROTOTIPO DE **BIOFILTRO DOMICILIARIO** COMO TRATAMIENTO SECUNDARIO PARA AGUAS NEGRAS

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: .....

J U R A D O E X A M I N A D O R

Firma:	Firma:	Firma:
Nombre:	Nombre:	Nombre: .....

REALIZADO POR	Christiansen Freites, María P. Martínez Arasme, Jelinek
PROFESOR GUIA	Ing. Alfredo Gorrochotegui A
FECHA	01 de Junio de 2004

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

CAPÍTULO 1. LAS AGUAS SERVIDAS

1.1 Origen y clasificación 4

1.2 Aguas servidas domésticas 5

1.2.1 Cuantificación de las aguas servidas 5

1.2.2 Composición físico-química 8

1.2.3 Composición biológica 10

1.3 Indices de contaminación de las aguas servidas 14

1.3.1 Índices de contaminación físico-química 14

1.3.2 Índices de contaminación biológica 15

CAPÍTULO 2. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

2.1 Clasificación general de los sistemas de tratamiento 19

2.1.1 Según el medio de eliminación de los contaminantes 19

2.1.2 Según la fase de depuración 20

2.1.3 Según el costo de operación 21

2.2 Procesos unitarios de adecuación físico-química 22

2.2.1 Sedimentación 23

2.2.2 Flotación 23

2.2.3 Filtración 24

2.2.4 Aireación 24

2.3 Procesos de biorreducción 25

2.3.1 Proceso aerobio 27

2.3.2 Proceso anaerobio 27

2.4 Sistemas de tratamiento 28
2.4.1 Planta de lodos activados 28
2.4.2 Lagunas de estabilización 29
2.4.3 Filtros por goteo o Biofiltros 30
2.4.4 Biodiscos 31
2.4.5 Tanque séptico 31
2.4.6 Tanque Imhoff 32

CAPÍTULO 3. FILTRO BIOLÓGICO

3.1 Fundamentos del proceso 34
3.2 Características Constructivas 36
3.2.1 Distribución del agua 36
3.2.2 Dosificación de caudal 37
3.2.3 Medio filtrante 37
3.2.4 Ventilación 40
3.2.5 Sistema de drenaje 41
3.3 Microbiología del proceso 44
3.4 Tipos de filtro 45
3.4.1 Filtros de baja tasa 45
3.4.2 Filtros de alta tasa 45
3.5 Parámetros de Diseño 46
3.5.1 Carga Hidráulica 46
3.5.2 Carga Orgánica 47
3.5.3 Tiempo de retención 47
3.5.4 Recirculación 47

CAPÍTULO 4. DISEÑO DEL BIOFILTRO

4.1. Parámetros de diseño 49
4.1.1 Caudal afluente 49

4.1.2 Carga orgánica del afluente 50
4.1.3 Carga Hidráulica 51
4.1.4 Recirculación 52
4.1.5 Eficiencia 53
4.1.6 Materiales de lecho 53
4.1.7 Temperatura 53
4.2 Ecuaciones de diseño 53
4.2.1 Ecuaciones del National Research Council (NRC) 54
4.2.2 Ecuación de Bruce y Merkens 56
4.3 Cálculos 57
4.3.1 Filtro con lecho de rocas 57
4.3.1 Filtro con lecho plástico 60

ANÁLISIS DE RESULTADOS

I. Sistema de Biofiltración 63
II. Funcionamiento hidráulico 73

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua, al ser utilizada, incorpora sustancias que contaminan y degradan su calidad y pureza. Las aguas contaminadas tienen necesariamente restricciones en cuanto a sus posibles usos y pueden implicar riesgos a la salud y cambios en el equilibrio ecológico de los cuerpos receptores. De ahí la inquietud, cada vez mayor, en desarrollar sistemas de tratamiento que mediante procesos y operaciones unitarias eliminen la carga poluente, reduciendo así el impacto negativo que sobre la salud y el medio ambiente ejercen los líquidos residuales

También es importante destacar que la escasez cada vez mayor de las aguas naturales debido al crecimiento demográfico, a la urbanización y, probablemente, a los cambios climáticos, ha dado lugar a la necesidad de crear sistemas capaces de depurar los líquidos residuales de manera de obtener un efluente final que pueda ser reutilizado. Una correcta administración del agua, incluyendo el tratamiento y el reciclaje de las aguas servidas, puede que no sólo permita ahorros en el costo de la compra del agua de alta calidad y reducción de la dependencia sobre los suministros externos de agua, sino que también contribuya a preservar un vital recurso natural.

En Venezuela, según un informe presentado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)[1], se ha estimado que aproximadamente el 85% de la población goza de alcantarillado, el 60 % con plantas de recolección de aguas residuales, y tan sólo el 3% con sistemas de tratamiento de cloacas. Actualmente, ninguna de las principales ciudades (Caracas, Maracaibo o Valencia) trata las aguas residuales domésticas. Las descargas de ciertas industrias aisladas reciben tratamiento, pero las áreas residenciales están servidas en general por alcantarillas por gravedad que conducen las descargas a ríos o arroyos cercanos. En las viviendas que carecen de

[1] Informe Técnico del PEC N° 40 1998: "Tecnologías Apropiadas Para el Control de la Contaminación de Aguas de Alcantarillado en la Región Del Gran Caribe"
http://www.cep.unep.org/pubs/techreports/tr40es/chapter5.htm

sistemas de recolección de cloacas, es de uso común disponer las aguas negras (servidas domésticas) en tanques sépticos combinados con sumideros o algún otro medio de disposición, que transmite su efluente al subsuelo.

La disposición del efluente del tanque séptico en el suelo, si bien es la práctica más utilizada, no implica que sea la más segura. En muchos casos la falta de un estudio previo que determine para el tipo de suelo y las características del líquido residual la modalidad de vertido adecuado, puede acarrear problemas como la contaminación indiscriminada de los suelos y su disgregación, la destrucción de taludes, la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos, la pérdida de espacios para recreación y daños ecológicos.

Hay que tener en cuenta que las naciones están creando legislaciones cada vez más estrictas para controlar la calidad de las aguas. Los niveles aceptables de sustancias contaminantes presentes en los vertidos domésticos e industriales que degradan el medio ambiente son cada vez más exigentes. En Venezuela, el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, según el Decreto 883 del 11/10/95: "Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos" establece rangos y límites máximos de calidad de vertidos líquidos que son imposibles de cumplir con el uso del sistema combinado tanque séptico- sumidero.

Basados en lo expuesto hasta ahora, es evidente que existe la necesidad de procesos de tratamiento que garanticen la reducción de carga contaminante a niveles aceptables para su disposición y/o reutilización segura. Para ello se deben idear sistemas que sustituyan a los ya existentes o mejorar el rendimiento de los que están actualmente en operación, combinándolos con algún otro método de tratamiento; teniendo en cuenta que la mejor opción será aquella que "*con el máximo de economía y el mínimo de*

OBJETIVOS

Objetivo General

Elaborar el diseño teórico de un dispositivo compacto de biofiltración que combinado con una Tanque Séptico logre reducir la carga contaminante del efluente final a niveles tales que permitan su disposición y/o reutilización segura.

Objetivos Específicos

1. Estudiar el diseño, operación y rendimientos de los Biofiltros utilizados actualmente en grandes plantas de tratamiento y examinar la eficiencia de reducción de los diferentes parámetros que caracterizan a las aguas servidas.

2. Establecer los parámetros de diseño: gasto de entrada, carga orgánica (DBO), niveles de presencia bacteriana (IC), turbiedad, pH, STD, filtrabilidad, etc, de acuerdo a las características que presentan las aguas servidas domésticas en Venezuela de manera de ofrecer una alternativa viable, tanto técnica como económicamente, para su tratamiento.

3. Determinar los factores que definen el diseño del Biofiltro: tamaño, forma y características de los medios de lechos filtrantes, superficie de contacto para el desarrollo bacterial, capacidad de filtración, formas y volúmenes de los biofiltros, sistemas de alimentación y recolección, etc.

4. Aplicar el diseño teórico clásico a la solución propuesta de un Biofiltro Domiciliario de escala menor.

5. Hacer un análisis comparativo entre los Tratamientos Domiciliarios actualmente en uso masivo y el Biofiltro Domiciliario diseñado.

complejidad, alcance la calidad del agua requerida, ya sea para su descarga al medio natural o para su reuso"[2]

Para el caso específico de las aguas servidas domésticas provenientes de viviendas que no están conectadas a la red de alcantarillado, la combinación del tanque séptico (ya existente) con un sistema de filtración biológica o biofiltro ~~puede~~ podría representar una alternativa viable, ya que estos métodos se caracterizan por una alta eficiencia de remoción de carga orgánica en unidades sencillas y de fácil operación y mantenimiento. Los biofiltros utilizan un medio filtrante aleatorio de plásticos, bloques porosos, o simplemene piedras, que ofrece una extensa superficie de adhesón para el desarrollo de un agar bacterófilo que en presencia de aire genera una reducción importante de la demanda bioquímica de oxígeno.

[2] Noyola, A. "Tendencias en el tratamiento de aguas residuales domésticas en Latinoamérica". http://www.cepis.ops-oms.org/

CAPÍTULO 1
LAS AGUAS SERVIDAS

1.1 ORIGEN Y CLASIFICACIÓN

Se entiende por aguas servidas a las "*aguas utilizadas o residuales provenientes de una comunidad, industria, granja u otro establecimiento, con contenido de materiales disueltos y suspendidos*"[1] que generalmente son vertidos a cursos o a masas de agua continentales o marinas.

Las aguas residuales pueden clasificarse de acuerdo a su origen y composición en[2]:

- Aguas residuales domesticas que provienen de viviendas, edificios públicos y otras instalaciones, incluyendo el agua utilizada para la limpieza de calles y control de incendios, así como las provenientes de pequeñas industrias locales conectadas al mismo sistema de alcantarillado.
- Aguas residuales comerciales que provienen de locales comerciales, pequeñas industrias y otras instalaciones públicas y que suelen estar conectadas a un sistema de alcantarillado común.
- Aguas residuales industriales de todo tipo, producidas por grandes plantas industriales.
- Aguas residuales agrícolas, provenientes de la cría de ganado y del procesamiento de productos animales y vegetales.
- Agua de infiltración proveniente de sistemas de drenaje, tuberías de desagüe y del descenso artificial del nivel de las aguas freáticas, así como de la infiltración de éstas hacia el sistema de alcantarillado a través de tuberías y otras instalaciones defectuosas.

---

[1] Artículo 2°, Capítulo 1 del Decreto 883: "Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos". República Bolivariana de Venezuela

[2] Manual de disposición se aguas residuales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS)/ Organización Panamericana de la Salus (OPS)/ Organización Mundial de la Salud (OMS). 1991. Tomo I.

- Agua de lluvia, que incluye todas las formas de precipitación: lluvia, nieve, granizo y niebla.
- Aguas superficiales, provenientes de aquellos cuerpos de aguas que ingresan directamente en el sistema de alcantarillado.

Para efectos de este trabajo de investigación, nos dedicaremos al estudio de las aguas residuales domésticas.

1.2 AGUAS SERVIDAS DOMÉSTICAS

Las aguas servidas domésticas son aquellas que quedan como residuo de las actividades propias de la vida del ser humano: necesidades fisiológicas (heces y orina), evacuación de los residuos y manipulaciones de cocinas (desperdicios, residuos animales y vegetales, detergentes y partículas), de los lavados domésticos (jabones, detergentes sintéticos, sales, etc.) y de la actividad general de las viviendas (celulosa, almidón, glucógeno, insecticidas, partículas orgánicas, etc.)

Cuando están frescas, estas aguas son de color gris, desprenden muy poco olor y contienen oxígeno disuelto. A medida que se descompone la materia putrescible, el agua se torna rancia y finalmente séptica cuando el oxígeno disuelto se ha agotado; entonces adquieren un color negro y un olor fuerte (debido al ácido sulfhídrico); los sólidos flotantes y suspendidos se desintegran.

A la hora de diseñar sistemas de recolección y tratamiento de aguas servidas es fundamental el conocimiento de la naturaleza del vertido para identificar sus propiedades sobresalientes y saber si se pueden modificar.

1.2.1 Cuantificación de las aguas servidas

A nivel domiciliario la cantidad de agua residual se puede calcular como el agua consumida del sistema de abastecimiento menos el agua utilizada para beber, para cocinar y para el regado de jardines y zonas verdes particulares. Se puede decir que la cantidad de las aguas servidas domésticas es aproximadamente un 80% del consumo de agua. En la Tabla 1.1 se presentan valores típicos de consumo para las actividades propias de una vivienda.

Tabla 1.1 Valores típicos de demandas para actividades domésticas [3]

Actividad	Litros por actividad y/o por vez
Lavado de platos	
-manual	10 - 25
-con lavaplatos automático	20 - 45
Lavado de ropa	
-manual	250 - 300
-con lavadora	100 - 180
Limpieza de la casa	8 - 10
Higiene personal	
-lavado de manos	2 - 5
-baño en ducha	80 -140
-baño en tina pequeña	30 - 50
-baño en tina grande	200 - 250
Inodoro	
-con tanque alto	8 - 12
-con tanque integrado	12 - 15
-con conexión directa al sistema de abastecimiento de agua	6 - 14
Lavado de automóviles	
-con cubo	20 - 40
-con manguera	100 -200
Riego de césped	5 - 10

[3] Manual de disposición se aguas residuales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS)/ Organización Panamericana de la Salus (OPS)/ Organización Mundial de la Salud (OMS). 1991. Tomo I Pag. 14

La determinación de los caudales de aguas residuales es esencial a la hora de proyectar las instalaciones para su recogida, tratamiento y disposición. En los casos en que no es posible medir directamente dichos gastos, se pueden estimar a través de los datos sobre la demanda del acueducto.

Una curva característica de las variaciones de consumo horario en nuestro país es la curva Caricuao (Figura 1.1), a partir de la cual es posible determinar los picos diarios de consumo, que corresponden a los valores máximos de descarga de aguas servidas.

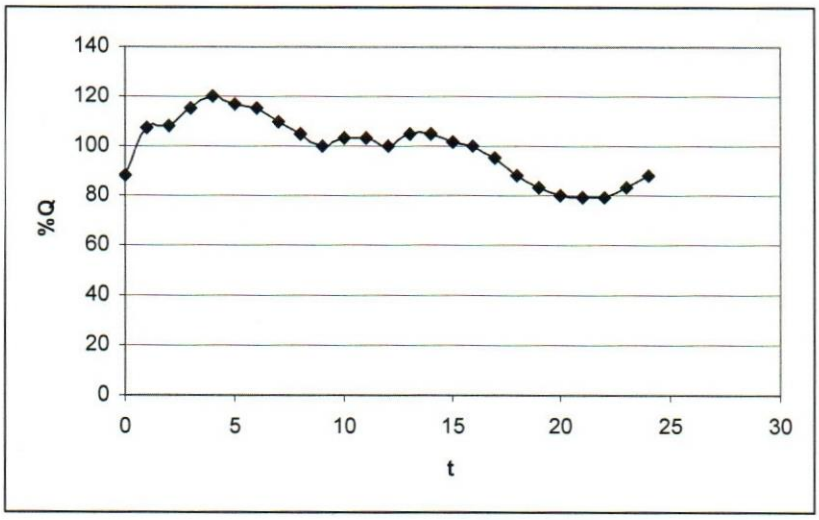


Figura 1.1. Curva Caricuao.

En Venezuela las Normas Sanitarias para Proyecto, Construcción, Reparación, Reforma y Mantenimiento de Edificaciones[4] establecen que "*para edificaciones destinadas a viviendas se estimará el gasto de aguas servidas a razón de 250 litros por persona y por día.*"

El volumen de agua de desecho producida en una vivienda tiene variaciones durante las horas del día, los días de la semana y los distintos meses de año; resulta

[4] Gaceta Oficial de la República de Venezuela No. 4044 Extraordinario. 1988. Art. 515

obvio que la producción de aguas residuales sea mínima durante la noche y se incremente en las horas diurnas; de igual forma ocurren variaciones a lo largo de la semana: el volumen resulta mayor al final de la semana debido a la limpieza de la casa y al lavado de la ropa y se reduce notablemente los Domingos y feriados.

1.2.2 Composición físico-química

Dentro de los componentes físico-químicos del agua residual podemos diferenciar: sólidos (disueltos, en suspensión o coloides), gases disueltos y líquidos.

Los **sólidos**, normalmente no pasan de 1000 ppm del total, aunque su tratamiento en estaciones depuradoras necesita de instalaciones especiales. Se define el contenido de sólidos totales como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación entre 103 y 105 °C. Estos sólidos pueden clasificarse en filtrables (sólidos coloidales y disueltos) o no filtrables (sólidos en suspensión). Cada una de estas categorías puede ser a su vez dividida en función de su volatilidad a 550°C. A esta temperatura la fracción orgánica se oxidará y desaparecerá en forma de gas, quedando la fracción inorgánica en forma de cenizas.

Entre los *sólidos orgánicos* encontramos las proteínas, los carbohidratos y las grasas, susceptibles todos de ser degradados por medio de bacterias y de organismos vivos que son combustibles, es decir, son biodegradables y su eliminación por combustión es relativamente sencilla.

Los *sólidos inorgánicos* incluyen todos los sólidos de origen generalmente mineral, como son: sales minerales, arcillas, lodos, arenas y gravas no biodegradables, y ciertos compuestos como sulfatos, carbonatos, etc.

En cuanto a los **gases,** las aguas residuales contienen pequeñas y variadas concentraciones de gases disueltos, entre los que podemos mencionar:

- Oxígeno. Está presente en el agua en su estado original, así como también disuelto en el aire que está en contacto con la superficie del líquido; es el reactivo esencial para los procesos aeróbicos, y cuando los organismos aeróbicos utilizan los nutrientes orgánicos, consumen al mismo tiempo el oxigeno disuelto, es por ello que en líquidos cloacales se encuentra en pequeñas cantidades o totalmente ausente. Cuando se agota sólo pueden continuar los procesos anaeróbicos.
- Ácido sulfhídrico. Se forma como producto de la reducción de los sulfatos a sulfitos por acción de microorganismos anaerobios. Es el principal responsable del desagradable olor de las aguas residuales, ataca las estructuras metálicas y de concreto en forma de H_2SO_4, el gas desprendido es tóxico, pudiendo llegar a ser explosivo.
- Anhídrido carbónico. Resulta de la descomposición de materia orgánica, se presenta libre o como componente de bicarbonatos.
- Metano. Producto de la descomposición anaerobia de la materia orgánica y generalmente constituye el 65% del gas de digestores. En grandes plantas de tratamiento se usa como fuente de energía.
- Nitrógeno. El contaminante nitrogenado que se encuentra con mayor frecuencia en las aguas residuales es el amoniaco, producto de la degradación del nitrógeno orgánico. El amoniaco se puede oxidar microbiológicamente a nitritos y nitratos. Los datos del nitrógeno son necesarios para evaluar la tratabilidad de las aguas residuales a través de procesos biológicos.

El *oxígeno disuelto* (OD) en el agua es un indicador importante de su calidad y de su capacidad para dar soporte a la vida vegetal y animal; debido a los requerimientos de la flora y fauna acuática, los cambios de contenido de oxígeno disuelto producidos por polución son un factor significativo para evaluar cuán contaminada está el agua. Generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad.

El OD proviene de la mezcla del agua con el aire ocasionada por el viento y, en la mayoría de los casos, principalmente del oxígeno que liberan las plantas acuáticas en sus procesos de fotosíntesis. La solubilidad del oxígeno como la de cualquier otro gas en el agua, depende de la presión atmosférica imperante en cada sitio, de la temperatura media del cuerpo de aguas y de su contenido en sales disueltas. En términos generales, la solubilidad del O_2 en el agua es directamente proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura y a la concentración de sales disueltas

En cuanto a los **líquidos**, por lo general las aguas residuales urbanas llevan algunos líquidos volátiles como gasolina, alcoholes, etc.

1.2.3 Composición biológica

Las aguas residuales urbanas contienen gran número de organismos vivos que son los que mantienen la actividad biológica, produciendo fermentaciones, descomposición y degradación de la materia orgánica e inorgánica.

El conocimiento de estos organismos resulta útil a la hora de valorar el estado de lagos y corrientes, al determinar la toxicidad de las aguas residuales evacuadas al medio ambiente y a la hora de determinar la efectividad de la vida biológica en los tratamientos secundarios empleados para destruir los residuos orgánicos. Dentro de los organismos involucrados en el tratamiento de aguas de desecho se encuentran: bacterias, algas, hongos, virus, protozoos y rotíferos.

Bacterias. Son microorganismos unicelulares, sin clorofila ni núcleo, provistos a veces de flagelos o cilios mediante los cuales se mueven en medios líquidos. Si bien existen miles de especies diferentes de bacterias, su forma general se ajusta a alguna de estas categorías: esféricas, cilíndricas (bastoncillos) o helicoidales, y su tamaño varía entre 0.5 y 5 μm. Las bacterias generalmente se reproducen por fisión binaria (división

simple), aunque algunas especies lo hacen sexualmente o por gemación. En la mayoría de las especies asociadas al agua y al tratamiento de aguas residuales, el proceso de reproducción, crecimiento, maduración y fisión ocurre entre 20 y 30 min. si se presentan las condiciones ambientales ideales.

Según su nutrición podemos clasificarlas en *bacterias parásitas y saprofitas*. Las primeras son las que han tenido como huésped al hombre o a los animales, suelen ser patógenas y producir graves enfermedades (tifus, cólera, disentería, etc.) y en el tratamiento de aguas residuales su eliminación es uno de los factores más importantes a tener en cuenta. Las bacterias saprofitas son las que se nutren de sólidos orgánicos residuales y son las responsables de los procesos de descomposición mediante los que la materia orgánica de desperdicio se descompone bioquímicamente y al final se mineraliza o estabiliza. La estabilización de materia orgánica por los microorganismos se efectúa por la combinación de dos procesos metabólicos: oxidación y síntesis.

Es posible también clasificar las bacterias según su fuente de energía, diferenciando así dos grandes grupos: heterótrofas y autótrofas.

Las *bacterias heterótrofas* necesitan materia orgánica como fuente de energía. Se clasifican según su necesidad de oxígeno en: aerobias, anaerobias y facultativas.

- Bacterias aerobias. Necesitan oxígeno procedente del agua para su alimento y respiración. Los procesos de descomposición que provocan sobre la materia orgánica se caracterizan por no desprender malos olores.
- Bacterias anaerobias. Consumen oxígeno procedente de sólidos orgánicos e inorgánicos y la presencia de oxígeno disuelto no les permite subsistir. Los procesos que provocan son anaerobios y se caracterizan por la presencia de malos olores.
- Bacterias facultativas. Algunas bacterias aerobias y anaerobias pueden llegar a adaptarse al medio opuesto, es decir, las aerobias al medio sin oxígeno

disuelto y las anaerobias a aguas con oxígeno disuelto. La *Escherichia coli*, un coliforme de origen fecal, es facultativo.

Las *bacterias autótrofas* pueden obtener su alimento a partir de sustancias minerales como anhídrido carbónico, sulfatos, fosfatos, carbonatos, etc., tomando la energía necesaria a partir de la luz (fotosintéticas) o a partir de ciertas reacciones químicas (quimiosintéticas).

Como ya se ha indicado las bacterias generalmente se reproducen por fisión binaria, la célula original se transforma en dos nuevos organismos. El tiempo necesario para cada fisión o tiempo de generación, puede variar entre días y menos de 20min. El modelo de crecimiento se puede abordar estudiando la variación con el tiempo del número de células, diferenciándose cuatro fases:[5]

1. Fase de retardo: tras la adición de un inóculo a un medio de cultivo, la fase de retardo representa el tiempo necesario para que los organismos se aclimaten a las nuevas condiciones ambientales y comiencen a dividirse.
2. Fase de crecimiento exponencial: durante esta fase, la célula se divide a una velocidad determinada por su tiempo de generación y su capacidad de procesar alimento (tasa constante de crecimiento porcentual).
3. Fase estacionaria: en esta fase la población permanece constante. Las razones que se apuntan para la explicación de este fenómeno son las siguientes: (a) las células han agotado el substrato o los nutrientes necesarios para el crecimiento, y (b) la generación de células nuevas se compensa con la muerte de células viejas.
4. Fase de muerte exponencial: durante esta fase, la tasa de mortalidad de bacterias excede la generación de células nuevas. La tasa de mortalidad suele ser función de la población viable y de características ambientales. En algunos casos, la fase de muerte exponencial se corresponde con la inversa de la fase de crecimiento exponencial.

[5] Metcalf y Eddy,

Algas. Son organismos autótrofos fotosintéticos, es decir, se autoalimentan obteniendo energía de substancias inorgánicas simples con ayuda de la luz solar, de la que se valen para convertir el dióxido de carbono en compuestos orgánicos. Su importancia en los procesos de tratamiento biológico radica en dos hechos: la generación de oxigeno para la estabilización de materia orgánica y su actividad simbiótica con las bacterias.

Hongos. Son protistas heterótrofos, multicelulares, no fotosintéticos y generalmente aerobios estrictos. Junto con las bacterias son responsables principales de la descomposición de materia orgánica, pero difieren de ellas en que pueden tolerar ambientes de baja humedad, pH ácidos y su demanda de nitrógeno es menor, de ahí su importancia en el tratamiento de aguas de origen industrial y en la formación de compuestos a partir de residuos sólidos orgánicos.

Virus. El interés por conocer la variedad de virus que pueden aparecer en las aguas residuales, es por su acción nociva como agentes productores de enfermedades infecciosas; su tamaño es tan reducido que pasan a través de un filtro ultra-microscópico. Los virus carecen de los sistemas bioquímicos necesarios para las funciones metabólicas normales, por lo que son completamente dependientes de las células vivientes que los hospedan para realizar sus funciones tanto de crecimiento como reproductivas.

Protozoos. Son protistas unicelulares, microscópicos, generalmente heterótrofos aerobios aunque algunos pocos son anaerobios. Los protozoos se alimentan de bacterias y de otros microorganismos así como de materia orgánica particulada. Son esenciales en la operación de plantas biológicas de tratamiento de aguas residuales pues actúan como purificadores de los efluentes, favoreciendo a la destrucción de bacterias tanto patógenas como normales y de otros organismos vivientes.

Rotíferos. Son animales microscópicos multicelulares, heterótrofos aerobios, muy efectivos en la eliminación de bacterias dispersas y floculadas, así como de pequeñas partículas de materia orgánica. Derivan su nombre del hecho de poseer dos series de cilios rotantes sobre sus cabezas, que emplean para la captura de alimentos y para moverse. Su presencia en un efluente indica un proceso de tratamiento biológico aerobio eficiente.

1.3 INDICES DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SERVIDAS

1.3.1 Índices de contaminación físico-química

Sólidos Disueltos Totales (TDS). Material remanente después de evaporar y secar a masa constante a 104+1°C, una muestra de agua previamente filtrada con un filtro de una porosidad no mayor de 5 micrones. Se expresa en miligramos por litro (mg/l).

Sólidos Suspendidos Totales (SST). Los sólidos suspendidos totales o el residuo no filtrable de una muestra de agua natural o residual industrial o doméstica, se definen como la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103-105°C hasta peso constante. Se expresan en mg/l.

pH. Es la medida de la concentración del ion hidrógeno en el agua. Se define como el logaritmo del inverso de la concentración de iones H^+. y sirve para medir el grado de acidez o alcalinidad del agua. El intervalo de las concentraciones apropiado para la adecuada proliferación y desarrollo de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico.

Aguas residuales en concentración adversa del ion hidrógeno son difíciles de tratar biológicamente, alteran la biota de las fuentes receptoras y eventualmente son fatales para los microorganismos.

1.3.2 Índices de contaminación biológica

Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Es la cantidad de oxígeno requerido para la respiración de los microorganismos responsables de la estabilización (oxidación) de la materia orgánica a través de su actividad metabólica en condiciones aerobias. Representa indirectamente una medida de la concentración de materia orgánica biodegradable contenida en el agua (Rivas, 1978); cualquier reducción de DBO supone la eliminación parcial (o transformación) de la materia orgánica presente en las aguas negras y, en consecuencia, una reducción de su poder contaminante.

La DBO_5 se mide como miligramos por litro (mg/l) o partes por millón (ppm) de O_2 consumidas durante un período de 5 días a 20°C. y es la medida mas utilizada por las agencias reguladoras en todo el mundo para evaluar el impacto de la contaminación causada por las aguas residuales

Demanda Química de Oxígeno (DQO). Representa el oxígeno requerido para la oxidación química de la materia tanto orgánica como mineral, se mide en partes por millón (ppm). Como agente oxidante se utiliza el bicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) o el permanganato de potasio ($KMnO_4$).

El valor de DQO da una idea del contenido orgánico total de un residuo, sea o no biodegradable, de manera que la relación DBO/DQO constituye una guía para la proporción de las materias orgánicas presentes y que son biodegradables (Winkler-2000)

Carbono Orgánico Total (COT). Cantidad de carbono que forma parte de los compuestos orgánicos presentes en el agua. Normalmente, el carbono orgánico es oxidado a dióxido de carbono por combustión, por radiación ultravioleta o por la adición de agentes oxidantes. La cantidad de dióxido de carbono generada en el proceso de descomposición es medida y a partir de los valores obtenidos en esta medición se calcula la cantidad de carbono orgánico presente en el agua.

Contenido de Nitrógeno. El nitrógeno está presente en las aguas residuales en forma de nitrógeno orgánico, amoniacal y de nitritos y nitratos. Por lo general las aguas servidas crudas contienen altos niveles de nitrógeno orgánico, que con el tiempo se va degradando a nitrógeno amoniacal por acción de los microorganismos; gran parte del nitrógeno orgánico se descompone en amoníaco mucho antes de llegar al punto de disposición o a la planta de tratamiento.

Índice de Coliformes. Los coliformes son bacilos Gram-negativos, en forma de bastón, aerobios o anaerobios facultativos, que fermentan a la lactosa con producción de gas a 35°C en 48 horas. Cuando se examinan organismos coliformes en las aguas negras, se encuentra que aproximadamente la mitad de los organismos que fermentan la lactosa pertenecen a especies que se originan en la materia fecal, es por ello que se consideran los coliformes como excelentes indicadores biológicos de contaminación por bacterias entéricas patógenas.

El método estándar para el recuento de coliformes es el Número Mas Probable (NMP), que es un indicador de la cantidad de organismos coliformes que puedan estar presentes en $100cm^3$ de muestra.

Los valores de concentración en aguas residuales domésticas de los parámetros descritos anteriormente se muestran en la Tabla 1.2; la información corresponde a un análisis realizado por la American Public Health Association.

Tabla 1.2. Análisis de aguas residuales domésticas

Parámetro	Concentración en mg/l		
	Alta	Media	Baja
Sólidos Totales	1000	500	200
Sólidos Disueltos	500	200	100
Sólidos Disueltos Fijos	200	100	50
Sólidos Disueltos Volátiles	300	100	50
Sólidos Suspendidos Totales	500	300	100
Sólidos Suspendidos Fijos	200	100	50
Sólidos Suspendidos Volátiles	400	250	70
Grasas y aceites	40	20	0
DBO_5	300	200	100
Nitrógeno Total	85	50	25
Nitrógeno Orgánico	35	20	10
Nitrógeno Amoniacal	30	30	10
Nitrito	0.1	0.05	0
Nitrato	0.4	0.20	0.1

Algunos valores límites establecidos por las normas venezolanas para estos parámetros de acuerdo al modo de disposición final de las aguas residuales aparecen reflejados en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Límites de contaminación para la disposición final de las aguas servidas

Parámetro	**Límites máximos (mg/l) o rangos**	
	Descarga a redes cloacales	**Descargas a cuerpos de agua**
Grasas y aceites	150	20
$DBO_{5,20}$	350	60
PH	6-9	6-9
Sólidos flotantes	Ausentes	Ausentes
Sólidos suspendidos	400	80
Sólidos totales	1600	---
Sólidos sedimentables	---	1

CAPÍTULO 2
TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS DOMÉSTICAS

Los líquidos residuales, por su carácter ofensivo, deben ser dispuestos de manera tal que no constituyan un problema de saneamiento ambiental. Es por ello que han de someterse a diferentes procesos de tratamiento, previo a su disposición final.

Para analizar el proceso de la depuración de las aguas servidas, conocidas las necesidades y los objetivos a cubrir, es necesario conocer los diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales que existen, con el fin de poder elegir en cada caso la alternativa que mejor se adapte a esas necesidades.

2.1 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO

2.1.1 Según el medio de eliminación de los contaminantes

Los contaminantes del agua residual se pueden eliminar por medios físicos, químicos y biológicos. Normalmente un sistema de tratamiento (o fase del proceso) es una combinación de los mismos. A la hora de clasificarlos se considera el efecto predominante.

Procesos físicos. Los métodos de tratamiento en los que predominan los fenómenos físicos (aplicación de fuerzas gravitatorias, centrifugas, retención física, etc.) se conocen como procesos físicos. En este grupo se pueden incluir: desbaste de sólidos, desengrasado, desarenado, sedimentación, flotación, evaporación y adsorción.

Procesos químicos. Los métodos de tratamiento en los que la eliminación de contaminantes es provocada por la adición de productos químicos o por otras reacciones químicas se conocen con el nombre de procesos químicos. Entre estos podemos incluir:

floculación y coagulación, neutralización, oxidación, reducción, intercambio iónico, absorción y desinfección (cloro, ozono).

Procesos biológicos. Son aquellos en los cuales se consigue la eliminación de contaminantes por una actividad biológica. Se usa esencialmente para eliminar las sustancias orgánicas biodegradables (coloidales o disueltas) presentes en el agua residual. Básicamente, estas sustancias se transforman en gases que pueden escapar a la atmósfera y en tejido celular biológico que puede posteriormente eliminarse por sedimentación. Entre ellos citamos: lodos activos, lechos bacterianos, lagunas, biodiscos y sistemas de aplicación al suelo.

2.1.2 Según la fase de depuración

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales podemos clasificarlos en función de los rendimientos alcanzados en el proceso de depuración o según la fase de depuración en la que se sitúan. Esta clasificación es quizás la más utilizada, aunque como en el caso anterior, no siempre es posible encuadrar un tratamiento dentro de una fase concreta, o la fase de depuración se adopta por extensión para denominar el proceso completo.

Pretratamiento y tratamiento primario. El pretratamiento es común a todos los sistemas de depuración, sólo varía en los niveles de automatización que incorpora. No se considera un tratamiento propiamente dicho, pero su utilidad en los sistemas de tratamiento está demostrada al eliminar elementos presentes en las aguas de desecho, que de entrar en el proceso, podrían comprometer gravemente su funcionamiento (sólidos flotantes, arenas, grasas, aceites, etc.). Puede incluir: desbaste de sólidos (rejas, rejillas, cedazos y microfiltros), desarenadores, trampas de grasa y sedimentación primaria.

Tratamiento secundario. Suele ser de naturaleza biológica, incorporándose, normalmente, a la línea de tratamiento de una planta depuradora, después del tratamiento primario. Pueden citarse los siguientes: lodos activos, lagunas facultativas, lagunas aireadas, filtros biológicos y biodiscos. Todos ellos constituyen ejemplos de tratamiento secundario del agua residual, aunque, por extensión, dan nombre a sistemas de tratamiento completos.

Tratamiento terciario. De naturaleza biológica o físico-química, reúne un conjunto de instalaciones de tratamiento, que normalmente, se sitúan detrás del tratamiento secundario. Se incluyen: procesos de nitrificación-desnitrificación, procesos de eliminación de fósforo, biodiscos y lechos bacterianos, sistemas de aplicación al suelo en general, filtros y ultrafiltración, cloración, ozonización, y radiación ultravioleta.

2.1.3 Según el costo de operación

En esta clasificación no se tienen en cuenta ni el tipo de proceso unitario ni las fases que integran un proceso de depuración, por el contrario, se realiza una ordenación de los diferentes sistemas en dos grupos según las necesidades de operación y mantenimiento que requieren.

Tecnologías de bajo costo, métodos blandos o extensivos. La base de estos sistemas es la reproducción de los fenómenos de depuración naturales con vistas a una mayor facilidad de manejo y, por lo tanto, a lograr unos menores costos de mantenimiento. Sus características básicas son: facilidad de operación y mantenimiento, no necesitan de personal especializado, requieren grandes tiempos de respuesta, son procesos de gran inercia, tienen grandes requerimientos de superficie, el equipamiento es sencillo, tienen bajos costos energéticos, buena integración en el medio rural, rendimientos en descontaminación buenos-aceptables y son muy adecuados en

reutilización agrícola. Dentro de estos sistemas podemos destacar; lagunas de oxidación, aplicación al suelo, lechos bacterianos y reactores biológicos rotativos (biodiscos y biocilindros).

Métodos convencionales. Se incluyen aquí los métodos tradicionales de depuración cuya base de funcionamiento son también los procesos naturales de depuración pero bajo una concepción distinta; son sistemas intensivos, tienen bajos requerimientos de espacio pero precisan aporte de energía para el proceso y necesitan de control preciso. Son procesos de poca inercia, por lo que cualquier problema se manifiesta de forma inmediata en los resultados. Se caracterizan por: requerir mano de obra especializada, tener altos costos de operación y ser de baja integración en el medio rural. Con estos métodos se obtienen buenos resultados en depuración y un efluente con adaptación media-baja a reutilización. En éste grupo pueden citarse: procesos físico-químicos y lodos activados.

2.2 PROCESOS UNITARIOS DE ADECUACIÓN FÍSICO-QUÍMICA

Estos procesos de tratamiento se requieren para separar del agua residual una serie de partículas en suspensión como arenas, sólidos orgánicos suspendidos y coloidales, sedimentables por sí mismos o no; y materia flotante sólida o líquida (aceites y grasas), las cuales son retiradas para disminuir el carácter ofensivo del agua en tratamiento.

Entre los beneficios de estos procesos de adecuación se incluyen:

- Reducción de los sólidos en suspensión
- Reducción del DBO_5
- Separación del material flotante
- Homogeneización parcial de los caudales y carga orgánica
- Clarificación de las aguas (turbidez y color)

Entre los procesos físico-químicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales podemos mencionar:

2.2.1 Sedimentación

Una vez eliminada la fracción mineral sólida, el agua pasa a un depósito de sedimentación donde se precipitan los materiales orgánicos, que son retirados para su eliminación. El proceso de sedimentación puede reducir de un 20 a un 40% la DBO5 y de un 40 a un 60% los sólidos en suspensión.

La tasa de sedimentación se incrementa en algunos casos incorporando procesos llamados **coagulación y floculación** químicas. La coagulación consiste en añadir productos químicos (coagulantes) que alteren las características superficiales de los sólidos coloidales en suspensión de modo que se adhieren los unos a los otros y precipitan. La floculación provoca la aglutinación de los sólidos en suspensión generando que se sedimenten. Ambos procesos eliminan más del 80% de los sólidos en suspensión.

2.2.2 Flotación

Es un proceso de separación sólido-líquido o líquido-líquido, el cual es aplicado para partículas cuya densidad es más pequeña que la densidad del líquido que las contiene. Hay tres tipos: flotación natural, ayudada e inducida.

Flotación natural. Es válido si la diferencia entre la densidad natural de las partículas y la del líquido es suficiente para la separación.

Flotación ayudada. Ocurre cuando se utilizan los medios externos para promover la separación de las partículas que están flotando de forma natural.

Flotación inducida. La densidad de las partículas es artificialmente disminuida para permitir que las partículas floten. Esto se basa en la capacidad de ciertas partículas

sólidas y líquidas para unirse con las burbujas de gas (usualmente aire) para formar partículas con una densidad menor que el líquido.

Entre los procesos de adecuación física también es importante mencionar la filtración, dicho proceso se aplica a efluentes procedentes de algún tratamiento biológico o químico ya que las aguas residuales crudas tienen gran cantidad de material sólido que podrían obstruir los filtros.

2.2.3 Filtración

Si bien es una de las principales operaciones unitarias utilizadas en el tratamiento de agua potable, la filtración de efluentes procedentes de procesos de tratamiento de aguas residuales es una práctica relativamente reciente. Hoy en día se emplea de modo generalizado para conseguir una mayor eliminación de sólidos en suspensión de los efluentes de los procesos de tratamiento biológico y químico.

En la aplicación de la filtración para la eliminación de sólidos en suspensión, se ha comprobado que las variables más importantes del proceso de diseño son: la naturaleza de las partículas presentes en el agua a filtrar, el tamaño del material o materiales que componen el filtro, y el caudal de filtración.

El principal responsable de la eliminación de los sólidos en suspensión durante el proceso de filtración es la retención: al pasar el agua residual a través de un medio poroso, las partículas de mayor tamaño que los poros del material filtrante quedan retenidos en la superficie o en el interior del filtro. Existen otros mecanismos que también tienen influencia, aunque sus efectos sean de menor importancia como: la intercepción, el impacto y la adhesión.

2.2.4 Aireación

Es un proceso mediante el cual el agua se pone en contacto con el aire para modificar las concentraciones de sustancia volátiles contenidas en ella. Su función principal, en el tratamiento de aguas residuales, consiste en proporcionar oxígeno y mezcla en los procesos de tratamiento biológico aerobio con el fin de asegurar un suministro apropiado de oxígeno para el consumo de los microorganismos responsables del tratamiento. Sus funciones más importantes son:

- Transferencia de oxígeno disuelto.
- Remoción de sustancias volátiles productoras de olores y sabores.
- Remoción de dióxido de carbono.
- Remoción de H_2S.
- Remoción de hierro y manganeso.
- Remoción de metano, cloro y amoniaco.
- Remoción de compuestos orgánicos volátiles.

Las operaciones unitarias se introducen a las plantas de tratamiento de aguas de desecho, en muchas combinaciones y secuencias diferentes de acuerdo con las condiciones que prevalecen respecto a la concentración y composición del influente; y para cumplir con las condiciones y especificaciones de calidad del efluente.

2.2 PROCESOS DE BIORREDUCCIÓN

Las aguas naturales son ecosistemas vivos con actividad biológica permanente. Cuando se vierten líquidos residuales sobre una corriente limpia, los microorganismos aerobios presentes en el agua se encargan de la descomposición de la materia orgánica; el número de microorganismos aumenta hasta equilibrar el abastecimiento de alimentos; la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se incrementa y las reservas de oxígeno

disuelto en el agua comienzan a agotarse. Cuando el suministro de oxígeno disuelto no puede mantener la proporción con la DBO de la carga de desechos, el agua se convierte en séptica y se activan los mecanismos de descomposición anaeróbica. A media que avanza el proceso de descomposición, disminuye la DBO, y la velocidad de absorción de oxígeno de la atmósfera, que al principio se encontraba retrasada con respecto a la velocidad de utilización de oxígeno, se empareja con ella y finalmente la sobrepasa, el agua se aclara y se reestablece la pureza natural. Este proceso, denominado autopurificación, nunca es rápido, y las corrientes fuertemente contaminadas pueden recorrer grandes distancias antes de que se alcance un grado considerable de recuperación.

Si bien la autopurificación es un proceso que ocurre de forma natural en lagos y ríos, los sistemas de tratamiento de aguas servidas son diseñados con el objetivo de lograr, en tiempo breve y espacio reducido, lo que por lo general la naturaleza realiza sólo a través de largos períodos y en grandes distancias de recorrido o extensas áreas de dispersión. En estos sistemas, los líquidos residuales son sometidos a la acción de organismos vivientes que estabilizan la materia orgánica en condiciones aerobias o anaerobias. Esta oxidación biológica consiste en la conversión bacterial de los elementos de su forma orgánica a su forma inorgánica.

La estabilización de materia orgánica por los microorganismos en los medios acuáticos naturales, así como en los sistemas de tratamiento biológico se efectúa por una combinación de dos procesos metabólicos, oxidación y síntesis. En los procesos aeróbicos, el oxígeno disuelto es el aceptor final de hidrógeno. En los procesos anaeróbicos, los aceptores finales de hidrógeno son la materia orgánica oxidada, los nitratos, los nitritos, los sulfatos y el CO_2.

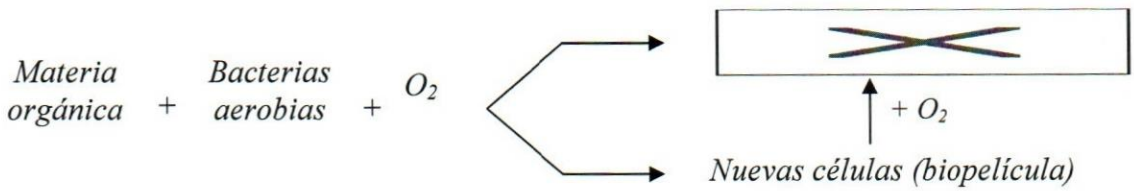
Toda oxidación supone la transferencia de electrones de una sustancia reducida o donante de electrones a una sustancia oxidante o aceptador de electrones. La materia orgánica es el alimento o donante de electrones para organismos vivos. Sin embargo, algunos materiales inorgánicos reducidos como el amoniaco, los sulfuros, el hierro

ferroso y el hidrógeno molecular pueden servir, para algunas bacterias, como donante de electrones, alimento o fuentes de energía.

2.2.1 Proceso aerobio

Es un proceso de respiración de oxígeno, en el cual el oxígeno libre es el único aceptor final de electrones; el oxígeno es reducido y el carbono es oxidado, al igual que la materia orgánica o inorgánica. Todos los organismos que usan oxígeno libre como aceptor de electrones son aerobios.

Si bien las reacciones involucradas en el proceso de oxidación aerobia son complejas, es posible representarlas a modo general de la siguiente forma:



En presencia de oxígeno, las bacterias aerobias convierten la materia orgánica en formas estables, como dióxido de carbono, agua, nitratos y fosfatos, así como otros materiales orgánicos.

2.2.2 Proceso anaerobio

Es la descomposición u oxidación de compuestos orgánicos, en ausencia de oxígeno, para obtener la energía requerida para el crecimiento y mantenimiento de los organismos anaerobios.

La digestión anaeróbica se realiza en tres etapas. En la primera, conocida como la fase de "licuefacción", los compuestos de estructura compleja, como las proteínas,

grasas y carbohidratos, son decompuestos en sustancias solubles de bajo peso molecular, como los aminoácidos y los azucares. En la segunda etapa, los nutrientes orgánicos son convertidos en ácidos grasos inferiores en una fase de "fermentación ácida", que baja el pH del sistema. Finalmente, en la etapa de "fermentación del metano" ó "metánica" los ácidos orgánicos son convertidos en metano, anhídrido carbónico y una pequeña cantidad de hidrogeno. El medio anaeróbico permite también prosperar a los organismos reductores de sulfato, de manera que se puede formar ácido sulfhídrico.

Es precisamente este proceso de descomposición, en ausencia de oxígeno, el cual produce olores desagradables producto de los gases que dichas bacterias liberan en su proceso metabólico (H_2S, CH_4, NH_3, etc.)

A continuación se presentan las ecuaciones que resumen de forma general el proceso anaerobio:

$$\textit{Materia orgánica} + \textit{nutrientes} \xrightarrow{\text{Bacterias}} \textit{células} + \textit{ácidos volátiles} + \textit{alcoholes} \boxed{\times}$$

$$\textit{ácidos volátiles} + \textit{alcoholes} \boxed{\times} + \textit{nutrientes} \xrightarrow{\text{Bacterias}} \boxed{\times}$$

2.3 SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE AGUAS SERVIDAS

Con el objeto de minimizar los efectos contaminantes de los líquidos residuales, se diseñan sistemas de tratamiento, combinando diferentes procesos, en unidades estructurales, modulares ó no, conocidas como Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas o Biorreactores. Podemos citar como las más utilizadas las siguientes:

2.3.1 Planta de lodos activados

El proceso de lodos activados es quizá el más común para el tratamiento de aguas residuales. Las aguas negras que provienen de un tratamiento primario de sedimentación pasan a un tanque de aireación en donde se hace burbujear aire o en algunos casos oxígeno por medio de difusores desde el fondo del tanque para favorecer el rápido crecimiento de las bacterias y otros microorganismos. Las bacterias utilizan el oxígeno para descomponer los desechos orgánicos de las aguas negras. Los sólidos en suspensión y las bacterias se coagulan formando una especie de lodo conocido como lodo activado, el cual se deja sedimentar y luego es llevado a un tanque digestor anaeróbico para que sea degradado. Finalmente el lodo activado puede ser incinerado, llevado a un relleno sanitario, arrojado al mar o secado para utilizarlo como fertilizante en los campos de cultivo.

2.3.2 Lagunas de estabilización

La laguna de estabilización es una forma de tratamiento biológico, la oxidación de la materia orgánica se produce por la acción de los microorganismos, la energía solar y del viento, es un proceso que ocurre de forma natural por lo que la intervención del ingeniero sanitario se limita a definir las dimensiones y proporciones de los biorreactores. Requieren una extensión de terreno considerable y, por tanto, suelen construirse en zonas rurales.

En el fondo de la laguna, donde se descomponen los sólidos, las condiciones son anaerobias; la zona próxima a la superficie es aeróbica, permitiendo la oxidación de la materia orgánica disuelta y coloidal. Puede lograrse una reducción de la DBO_5 de un 75 a un 85 por ciento.

2.3.3 Filtros por goteo o Biofiltros

En este proceso, una corriente de aguas residuales se distribuye intermitentemente sobre un lecho o columna de algún medio poroso, que al entrar en contacto con el líquido se va cubriendo de una película biológicamente activa donde los microorganismos realizan transformaciones que desdoblan la materia orgánica. La filtración por goteo, cuando va precedida de sedimentación, puede reducir inclusive más de un 85% la DBO_5. El funcionamiento de los sistemas de biofiltración se trata con detalle en el capítulo 3.

2.3.4 Biodiscos

Son reactores de película fija, con un funcionamiento similar al de los filtros por goteo. La película biológica crece sobre discos en rotación que se sumergen parcialmente en las aguas residuales a tratar. Cuando por la rotación una sección de los discos sale del agua, el líquido queda expuesto al contacto y al intercambio con el oxígeno atmosférico, lo que favorece el crecimiento de microorganismos que descomponen la materia orgánica empleando procesos aerobios. Los biodiscos se utilizan como elementos reductores de la materia orgánica, elementos nitrificadores y desnitrificadores.

2.3.5 Tanque séptico

El tanque séptico se usa para recibir la descarga de agua residual proveniente de residencias individuales y de otras instalaciones sin red de alcantarillado. Es una estructura subterránea diseñada para mantener las aguas negras bajo condiciones anaerobias durante un tiempo de retención, durante el cual se efectúa una gran eliminación de sólidos sedimentables. Estos sólidos se descomponen en el fondo del tanque, transformándose en compuestos y gases más estables como dióxido de carbono

(CO_2), metano (CH_4) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). Las grasas, aceites y demás material ligero tienden a acumularse en la superficie donde forman una capa flotante de espuma; las burbujas de gas que se originan producto de la descomposición del material sólido en el fondo del tanque, arrastran algunos sólidos y los obligan a subir a la superficie, contribuyendo a aumentar el espesor de la capa de espuma.

A largo plazo, la acumulación de lodo y espuma hace que se reduzca la capacidad volumétrica efectiva del tanque, por lo que es necesario realizarles mantenimiento periódico.

Los tanques sépticos pueden ser de una o dos cámaras, cuyas capacidades dependen del número de personas servidas, el consumo per cápita, el período de retención y los espacios dejados para los sedimentos y la cámara de aire. Son construidos de concreto vaciados *in situ* o prefabricados (fibra de vidrio, polietileno, etc).

En el tanque puede llevarse a cabo una reducción del DBO en el orden de 20 a 30% y una sedimentación de 60% aproximadamente.

El efluente de los tanques se puede disponer según diferentes métodos (Asapchi, 19xx):

- Sumideros
- Zanjas de absorción
- Zanjas filtrantes filtros superficiales
- Filtros superficiales de arena y, ocasionalmente, en
- Cursos o cuerpos de agua superficiales, siempre y cuando cumplan con la normativa

2.3.6 Tanque Imhoff

Es un tanque compuesto por dos cámaras: en la superior, llamada cámara de flujo o sedimentación, pasan las aguas negras a velocidades muy bajas y se produce la separación de los sólidos sedimentables; en la inferior o cámara de digestión ocurre la fermentación y la descomposición anaeróbica de los lodos producidos en la primera etapa. El proceso de sedimentación y digestión de lodos es similar a la que ocurre en un tanque séptico. Se considera como una solución intermedia entre los sistemas domiciliarios y los municipales.

CAPÍTULO 3
FILTRO BIOLÓGICO

El Filtro Biológico es un sistema de depuración biológica de aguas residuales. Su funcionamiento parte del principio de que cualquier superficie en contacto con un medio nutriente que contenga microorganismos desarrollará una capa biológicamente activa.

Basados en esto, se han desarrollado sistemas donde las aguas servidas se hacen fluir a través de un medio sólido de soporte generando una película biológica cuya población microbiana metaboliza el oxigeno y los nutrientes del líquido residual; además de adsorber las partículas en suspensión y las coloidales.

3.1 FUNDAMENTOS DEL PROCESO

En un filtro biológico las aguas servidas se vierten de la forma más uniforme posible sobre el lecho filtrante y se dejan percolar. El lecho filtrante consiste en un medio altamente permeable, al que se adhieren los microorganismos y a través del cual el residuo líquido se infiltra.

El agua residual fluye sobre la superficie del material filtrante en una delgada capa que está en contacto con la película biológica por un lado y con el aire en los espacios intersticiales por el otro. El oxigeno se disuelve en la superficie del líquido en movimiento y es transferido a la película biológica donde los microorganismos lo utilizan para metabolizar los nutrientes. A medida que la biopelícula aumenta de espesor, la materia orgánica absorbida es utilizada por los microorganismos aerobios de la parte externa. Como resultado de esto, las regiones cercanas a la superficie sólida de soporte y más alejadas del líquido se vuelven anaeróbicas, los procesos anaerobios originan cavidades de gas en la película que hacen que ésta pierda su capacidad de adherencia al medio, se desprenda por efecto de su peso y sea arrastrada por el flujo del

líquido fuera del sistema. Entonces se inicia el crecimiento de una nueva capa de microorganismos.

Los filtros incluyen un sistema de drenaje inferior para recoger el líquido tratado y los sólidos biológicos que se hayan separado del medio. El líquido recogido pasa a un tanque de sedimentación en el que se separan los sólidos del agua residual.

Si se comienza con un medio de soporte limpio, el crecimiento inicial de la película podrá necesitar varias semanas para alcanzar su desarrollo sobre la superficie del material del lecho. Al principio, la eficiencia de purificación es baja, pero aumenta según se acumula la película biológica.

La acumulación de sólidos en el lecho tiene un efecto muy significativo en el funcionamiento del filtro. La biopelícula se puede acumular hasta un grado tal que bloquee los espacios vacíos y el flujo de líquido se vea seriamente impedido. El líquido tiende entonces a acumularse sobre la superficie del lecho en un efecto conocido como "encharcamiento", y que ocurre cuando el crecimiento de la película sobrepasa la tasa a la que se desprende. Esto sucede cuando se trata un desecho con alto contenido de nutrientes que estimulan el crecimiento biológico, y cuando la tasa del flujo del líquido es demasiado baja para arrastrar la película. Los residuos con alto contenido de sólidos en suspensión pueden también causar bloqueo parcial del lecho que resulta en una desigual distribución de los líquidos a través del biofiltro, conocida como "canalización". Esto lleva a que parte del lecho se vea privado de nutrientes y oxígeno, mientras que otras partes están sobrecargadas, lo que genera una pérdida de eficiencia.

Las condiciones de las aguas a ser tratadas mediante el proceso de biofiltración son tres fundamentales (Hernández, 2001):

- La entrada del agua en los lechos debe estar precedida de una decantación primaria, para la eliminación de grasas y sólidos en suspensión, o proceso que evite la colmatación del lecho.

- Debe prestarse atención a los elementos tóxicos e inhibidores de los procesos biológicos. Por supuesto la contaminación vertida sobre el lecho debe ser biodegradable.
- Debe conseguirse una correcta maduración del lecho bacteriano para el establecimiento de una película biológica bien equilibrada.

3.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

3.2.1 Distribución del agua

El agua residual debe ser distribuida de la forma más uniforme y continua posible. Los aspersores pueden ser fijos o móviles. Los fijos requieren un dispositivo más complicado de distribución, y por lo tanto, una mayor pérdida de carga. Los móviles consisten en brazos giratorios dispuestos radialmente, con boquillas incorporadas y movidos por carga hidráulica, como se muestra en la figura 3.2.1 se aprecia en detalle la forma y características del brazo giratorio de distribución.

También existe la variante de lechos rectangulares, con sistemas de aplicación del agua mediante tuberías fijas o canales transversales de distribución que se mueven hacia delante y hacia atrás sobre el lecho; pero son poco adecuados para grandes instalaciones, ya que los intervalos de riego son demasiado largos.

3.2.2 Dosificación de caudal

Para asegurar la continuidad de distribución de agua sobre el lecho filtrante en algunos casos es necesario instalar tanques dosificadores para evitar que el sistema de biofiltración este expuesto a fluctuaciones de caudal que puedan intervenir en el correcto funcionamiento del mismo

3.2.3 Medio filtrante

El propósito del material del medio filtrante es el de proporcionar un soporte sólido y estable para la biopelícula que tenga la mayor superficie específica posible para que se pueda formar la mayor cantidad de película biológica. Pero esta característica hay que conjugarla con el índice de huecos, ya que estos serán los que permitirán el paso del aire del agua.

La superficie específica se define como los m^2 de superficie de relleno por m^3 de volumen total. Cuanto mayor sea la superficie específica, el área de contacto entre el líquido y la biopelícula será mayor, lo que aumentará la transferencia de nutrientes y oxigeno a los microorganismos, produciendo una mayor cantidad de lodo biológico por unidad de volumen.

Algunas de las características que debe cumplir el material del lecho filtrante se enumeran a continuación:

- Debe ser suficientemente resistente para soportar su propio peso y no estar sujeto a daño o desintegración bajo exposición al agua, aire, frío, crecimientos biológicos o dosificación de productos químicos para el control de insectos.
- Debe ser inerte a las sustancias en contacto con él, de manera que no inhiba el crecimiento de la biopelícula ni que sea atacado por sustancias presentes en las aguas residuales bajo tratamiento.
- La configuración del material dentro del lecho debe permitir suficientes espacios vacíos que permitan el crecimiento biológico sin que los conductos de paso se sellen, y permitir así el flujo del líquido y el aire a través del lecho.

En general podemos decir que el material del lecho filtrante debe ser: económico, duradero, de elevada superficie específica y con un índice de huecos que asegure su no atascamiento.

Los tipos de materiales usados para los lechos de filtros biológicos se pueden clasificar en dos grupos: medios minerales o "convencionales" y, los medios sintéticos, específicamente fabricados y de reciente desarrollo, construidos generalmente con materiales plásticos.

Medios convencionales. Los medios de contacto minerales se han utilizado durante mucho tiempo como materiales en lechos de filtros percoladores, principalmente en las plantas de tratamiento de aguas negras. Generalmente se eligen el basalto y el granito triturados, pero también se emplea carbón duro, coque, escorias de altos hornos, y madera resistente a la putrefacción. También se ha tenido éxito en la utilización de materiales más baratos, como los escombros o ladrillos rotos; sin embargo, tienden a desmoronarse después de cierto tiempo de manera que el lecho se bloquea con el medio desintegrado.

La principal desventaja de los medios de soporte minerales es su peso, que limita de un modo efectivo la profundidad de los lechos usados, y su limitado espacio vacío, donde la mitad del volumen está ocupado por el propio medio filtrante. Estos problemas se han superado con el desarrollo de medios de soporte especialmente fabricados.

Medios Sintéticos. Por lo general, estos medios son de material plástico, con varias configuraciones alternativas. Entre las ventajas de los medios fabricados podemos mencionar:

- Tienen altas fracciones de espacios en general, mayores del 90%, con amplios espacios instertisiales y pesan aproximadamente la décima parte de lo que pesan los medios minerales en operación, por lo que la estructura de soporte es más económica.
- Permite utilizar lechos más profundos; por la ligereza de peso las capas inferiores son capaces de resistir una profundidad de lecho de hasta 12m.

- La alta fracción de espacios vacíos y los amplios espacios instertisiales permite aplicar al lecho grandes cargas de nutrientes orgánicos, sin correr el riesgo de obstrucción, debido al excesivo crecimiento biológico.
- La configuración de ciertos tipos de medios de soportes fabricados está diseñada para aumentar el desprendimiento.

El costo elevado de los materiales sintéticos, con respecto a los medios minerales, representa su principal desventaja.

El diseño de los medios fabricados de soporte se puede clasificar en dos grupos: medios ordenados y medios al azar. Los ordenados se forman por la distribución orientada de superficies sólidas de soporte, a fin de proporcionar una óptima distribución del líquido que fluye sobre la superficie. Generalmente están construidos con materiales plásticos y se ensamblan como módulos que se apilan cuidadosamente para formar la cama del percolador. Se pueden clasificar según su configuración como medios de láminas verticales, medios de tubos verticales y medios de redes geométricas.

Los medios de empaque al azar consisten en piezas plásticas apiladas sin una especial orientación dentro de una apropiada estructura de retención que puede ser de concreto, acero, plástico reforzado con vidrio, ladrillos o PVC. Estas piezas son anillos o tubos cortos de PVC o de polipropileno. El espacio de vacíos en lechos con estas piezas es aproximadamente el mismo que el de los empaques ordenados.

En general, la configuración de los medios sólidos de soporte debe favorecer la distribución uniforme del líquido, haciendo mínima la canalización, y presentar una superficie específica de alta capacidad de humectación.

Las propiedades físicas de algunos materiales, tanto minerales como sintéticos, utilizados en lechos de filtros percoladores, aparecen reseñadas en la tabla No. 3.1

Tabla 3.1 Propiedades físicas de medios para filtros percoladores

Medio	Tamaño nominal (cm)	Densidad (kg/m^3)	Área superficial específica (m^2/m^3)	Porcentaje de vacíos
Piedra de río				
Pequeña	2.5 - 7.5	1250 - 1450	55 - 70	40 - 50
Grande	10 - 12	800 - 1000	40 - 50	50 - 60
Escoria				
Altos hornos	5 - 7.5	1089	66	49
Pequeña	5 - 8	900 - 1200	55 - 70	40 - 50
Grande	7.5 - 12.5	800 - 1000	45 - 60	50 - 60
Plástico				
Convencional	60x60x120	30 - 100	80 - 100	94 - 97
Alta superficie especifica	60x60x120	30 - 100	100 - 200	94 - 97

3.2.4 Ventilación

Para el correcto funcionamiento de un filtro percolador es de esencial importancia la existencia de un flujo de aire a través del mismo, que proporcione las condiciones adecuadas para el proceso aerobio. La ventilación puede ser natural o forzada. La natural se logra por efecto de la diferencia de temperaturas del aire y el agua. Al calentarse o enfriarse el agua en el interior del lecho se produce una variación de densidad que provoca el movimiento de la masa de aire; cuando se produce la paralización del tiro de aire, se pueden producir efectos de anaerobiosis. La ventilación forzada, se usa cuando por causas exteriores como frío, se deben cerrar los lechos; hay que tener en cuenta que representa un incremento de potencia instalada.

3.2.5 Sistema de drenaje

La recogida del agua residual tratada se efectúa por medio de un dispositivo de drenaje en el fondo del lecho bacteriano, este sistema es importante como unidad de recolección y como estructura a través de la cual circula el aire. Cuenta con una serie de canales dispuestos en un falso fondo que drenan el agua hacia el centro del filtro, como

se muestra en la figura 3.2.1. Se diseñan de modo tal que no existan sedimentaciones, ya que el agua residual lleva sólidos biológicos que se han separado del medio; para ello la pendiente debe estar entre 1% y 5%, y la sección no irá nunca llena, ya que deberá servir también como canal de aireación.

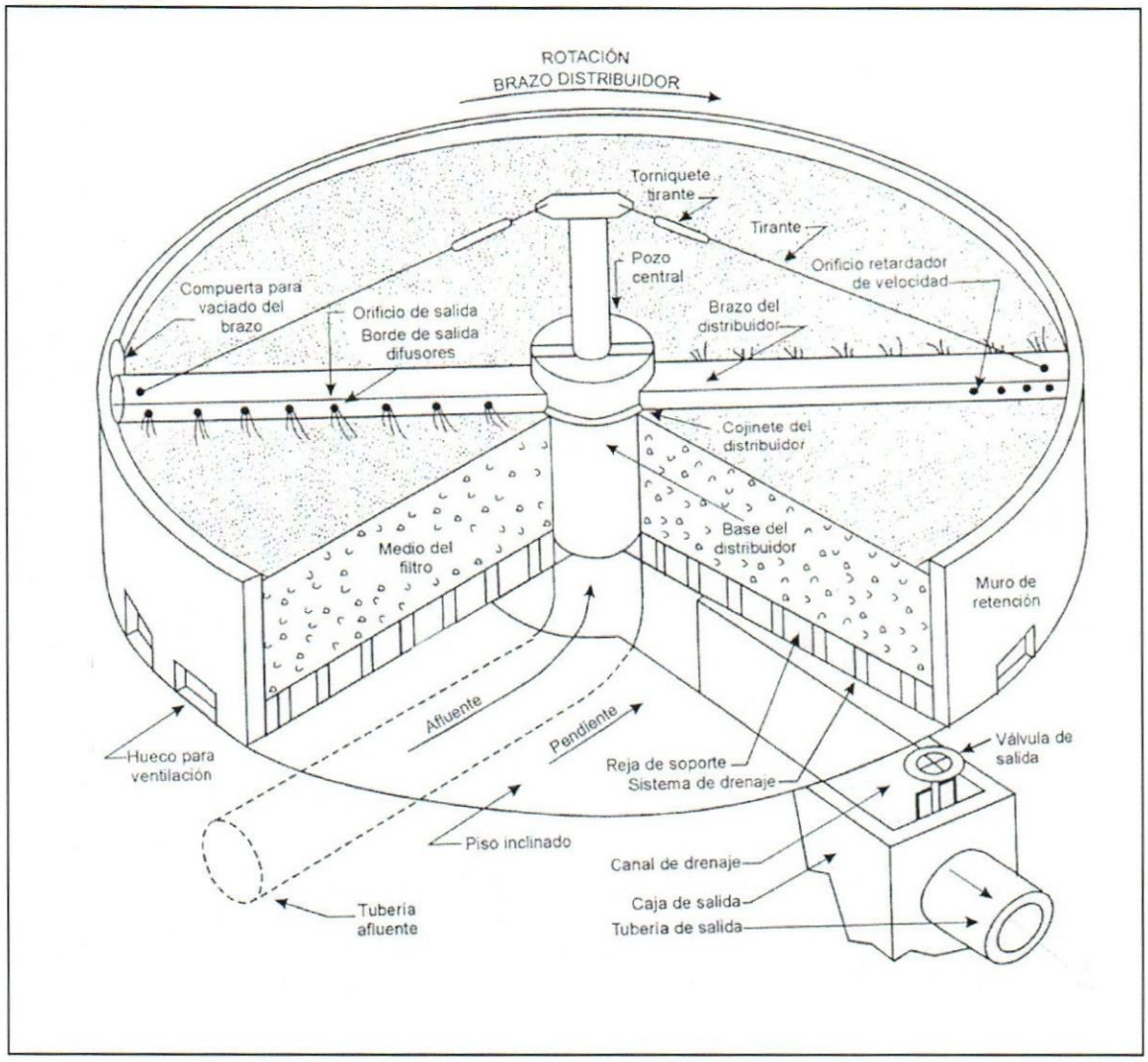


Figura 3.2 Esquema del filtro percolador

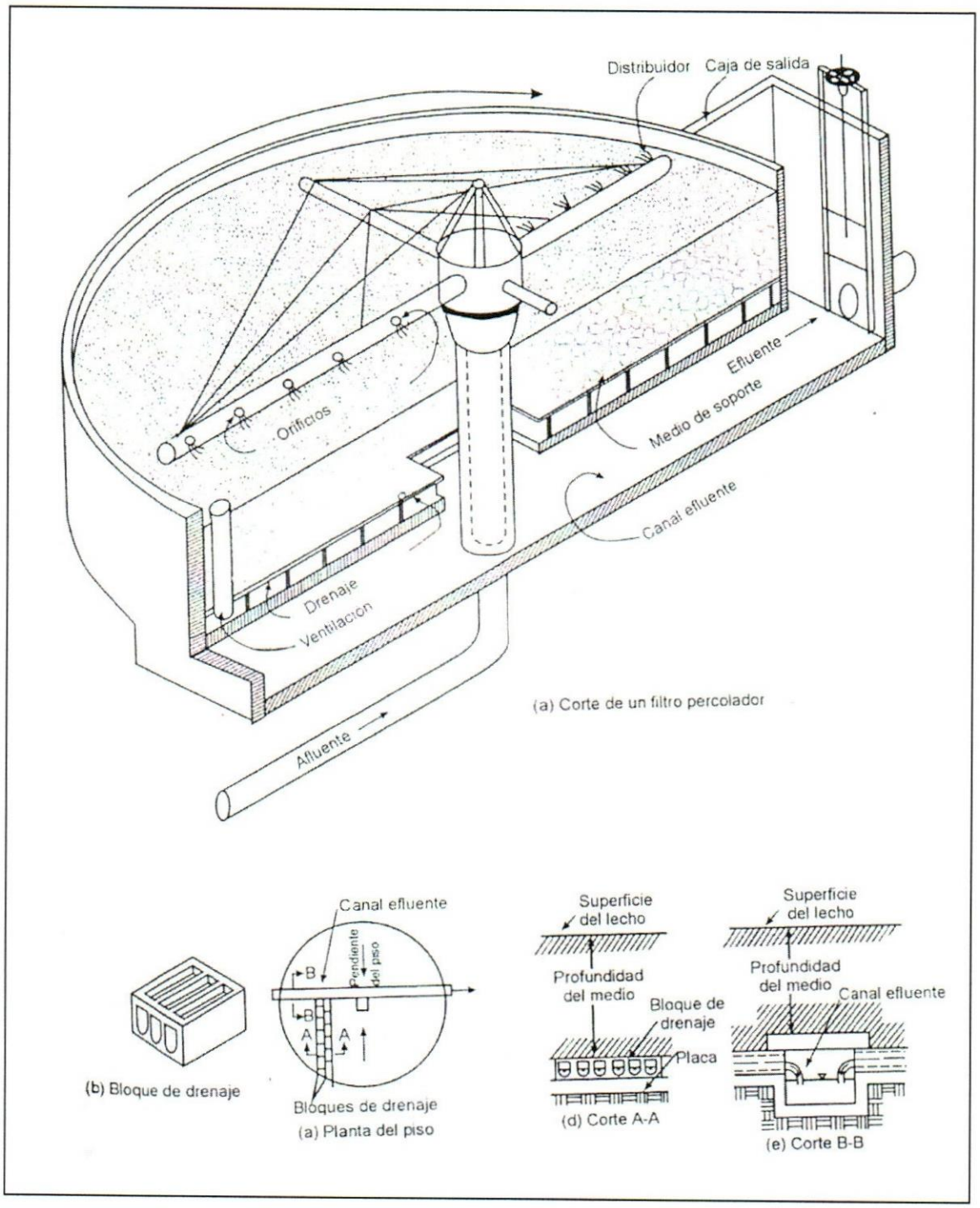


Figura 3.3 Corte y detalles de un filtro percolador típico

3.3 MICROBIOLOGÍA DEL PROCESO

La comunidad biológica presente en un filtro está compuesta por bacterias, hongos, algas, protozoos y algunos organismos superiores como gusanos, larvas de insectos y caracoles.

En el filtro percolador los organismos predominantes son las bacterias, encontrándose ejemplos de especies aeróbicas, anaeróbicas y facultativas, cuya misión es la de descomponer la materia orgánica del agua residual. También hay presencia de bacterias autotróficas en los estratos inferiores del lecho.

Las algas sólo crecen en las capas superiores del filtro, en las zonas hasta las que puede llegar la luz solar. No toman parte directa en la degradación de los residuos, pero añaden oxígeno al agua que se está filtrando durante las horas del día. En algunos casos su crecimiento excesivo puede causar obstrucción de la superficie del lecho impidiendo la distribución uniforme del líquido residual.

Los hongos, al igual que las bacterias contribuyen a la estabilización de materia orgánica, son importantes en sistemas de tratamiento de aguas industriales con pH ácidos. En ocasiones su crecimiento puede ser tan rápido que obstruyen el filtro y limitan la ventilación del mismo.

Los protozoos tienen como función controlar el crecimiento de la población bacteriana ya que consumen las bacterias dispersas que no han floculado.

Los animales superiores son útiles porque evitan la acumulación de biopelícula en la superficie del lecho ya que se alimentan de ésta. La presencia de caracoles puede representar un problema en los filtros nitrificantes porque consumen la mayor parte del crecimiento de las bacterias nitrifcantes.

3.4 TIPOS DE FILTRO

3.4.1 Filtros de baja tasa

Son unidades relativamente sencillas que separan un alto porcentaje de los nutrientes de agua residual, a una tasa de remoción que es baja en términos de la masa de nutrientes removidos por volumen unitario del sistema. Los medios de soporte sólido que generalmente se usan en el lecho de estos filtros son materiales minerales, aunque en plantas de nueva instalación se están utilizando medios plásticos debido a su relativa facilidad de ensamblaje.

En la mayoría de los filtros a baja tasa, el crecimiento biológico ocurre primordialmente en la parte superior del lecho, mientras que en la parte inferior se desarrollan comunidades de bacterias nitrificantes que oxidan el nitrógeno amoniacal generando un efluente con alto contenido de nitritos y nitratos.

Entre las desventajas que presenta este sistema podemos mencionar problemas de olores, especialmente si el agua residual es séptica y el clima es cálido, y presencia de moscas, las cuales deben controlarse.

3.4.2 Filtros de alta tasa

Han sido concebidos para actuar como procesos que produzcan altas tasas de remoción de nutrientes en términos de la masa de DBO eliminada, por volumen unitario del empaque. Las cargas orgánicas usadas en los sistemas de alta tasa son aproximadamente diez veces mayores que las usadas en las operaciones a baja tasa, y por consiguiente la rata de crecimiento biológico es proporcionalmente mayor. Esto necesita utilizar tanto medios de soporte con anchos espacios intersticiales, a fin de

reducir el riesgo de obstrucción, como de cargas hidráulicas suficientes para lavar el exceso de película biológica.

En términos generales, la masa de DBO eliminada aumenta con la carga hasta un valor límite, más allá del cual se elimina una cantidad constante, sin importar los aumentos adicionales de la carga (Eden, Truesdale y Mann, 1966).

Los filtros de alta tasa emplean recirculación lo que permite obtener la misma eficiencia de remoción que en los de baja tasa; el retorno de organismos vivos incrementa también la eficiencia del tratamiento. La recirculación ayuda a prevenir el taponamiento del filtro y reduce inconvenientes por malos olores y por presencia de moscas.

3.5 PARÁMETROS DE DISEÑO

Para diseñar correctamente un filtro percolador, es preciso conocer el papel y la importancia de los parámetros que van a condicionar el diseño. Entre los fundamentales podemos mencionar:

3.5.1 Carga Hidráulica

Se expresa en m^3 de agua aplicada por m^2 de superficie de lecho. Esta carga es la que condiciona la velocidad de paso a través del material, y por lo tanto el tiempo de retención, que es el factor del que depende, en condiciones normales, la eliminación de la DBO, y el rendimiento del sistema; además de ser fundamental para el arrastre de los flóculos desprendidos de la película biológica, evitando el colmado del lecho. (Hernández, 2002).

3.5.2 Carga Orgánica

Se expresa en términos de la tasa a la que se suministra al sistema la demanda de oxigeno, como masa de DBO (o DQO) por unidad de volumen del lecho y por unidad de tiempo (kg de DBO/m^3 de lecho-día) (Winkler, 2000).

En el caso de las aguas residuales con un contenido de nutrientes razonablemente constante, como las aguas servidas domesticas, la carga orgánica está implícita en la carga hidráulica.

Tabla 3.2 Carga hidráulica y orgánica para filtros de alta y baja tasa

	Filtros de baja tasa	Filtros de alta tasa
Carga hidráulica $m^3/m^2.d$	1 – 4	8 - 40
Carga Orgánica kg DBO/m^3.d	0.08 – 0.40	0.40 – 4.80

3.5.3 Tiempo de retención

Se puede definir como la cantidad total de sólidos (biopelícula) en el sistema, dividida por la tasa de pérdida de sólidos del sistema. Sin embargo, en un biofiltro en operación, tanto la cantidad total de sólidos biológicos como su tasa de pérdida, son muy difíciles de controlar.

3.5.4 Recirculación

La aplicación de la recirculación del efluente tratado, ya sea al sedimentador primario o al lecho bacteriano directamente, se usa como un método para equilibrar la carga hidráulica con la carga orgánica. Entre los beneficios que presenta podemos citar:

- Reduce la concentración de nutrientes en el suministro de líquido y se utiliza en el tratamiento de aguas residuales muy concentradas que necesitan una dilución previa para ser tratadas en filtros percoladores.
- Reduce la tasa de crecimiento de la película por el mismo efecto de dilución.
- Produce un mayor arrastre de las partes no activas de la película biológica, procurando un contacto más efectivo de ésta con el afluente y ayudando a prevenir el efecto de encharcamiento.
- Se produce un aumento de rendimiento como consecuencia del hecho de que el agua a tratar ya no pasa solamente una vez por el sistema, sino que, dependiendo del porcentaje de recirculación, hay una parte de aquella que pasa una o más veces.

CAPÍTULO 4
DISEÑO DEL BIOFILTRO

La metodología para el diseño de biofiltros debe tener en cuenta los parámetros de diseño y variables que participan en el proceso (caudal afluente, carga orgánica, carga hidráulica, tiempo de retención, recirculación y tamaño, forma y características del lecho filtrante) y la escogencia de las ecuaciones de diseño apropiadas para el caso en estudio.

A continuación se hace un análisis de cada uno de los factores que intervienen en el diseño del sistema propuesto: biofiltro para ser usado a escala domiciliaria como tratamiento secundario luego del tanque séptico.

4.1. PARÁMETROS DE DISEÑO

4.1.1 Caudal afluente

Viene determinado por el gasto de aguas servidas proveniente la vivienda. La magnitud de este caudal se discutió ampliamente en la sección 1.2.1. Para efectos de diseño se asume un gasto medio de aguas servidas Qmed = 250 litros/hab/día. Considerando una familia promedio venezolana de 5 personas el gasto de aguas servidas por vivienda será de: $Q_{med} = 250 \times 5 = 1250$ lit/día

Hay que recordar que este caudal diario no resulta de un flujo constante durante todo el día, ya que el agua de desecho producida en una vivienda tiene variaciones horarias.

Cuando hay recirculación el caudal afluente será:

$Qafluente = Q\ (1+R)$ donde R es el factor de recirculación

4.1.2 Carga orgánica del afluente

Los valores de DBO_5 en aguas servidas domésticas puede llegar a variar en un rango comprendido entre 100 y 300 mg/l tal como se aprecia en la Tabla 1.1 (Capítulo 1). Para el caso específico de nuestro país, según datos suministrados por la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas de la Universidad Central de Venezuela (PETA-UCV), las aguas municipales tienen una carga de DBO que oscila entre 120 y 150 mg/l. Para efectos del diseño, se toma como DBO del agua cruda 150 mg/l.

Es importante destacar que cuando hay recirculación del efluente clarificado, la carga orgánica aplicada al biofiltro disminuye, ya que al mezclar el agua proveniente del séptico (con valores elevados de DBO) con el agua tratada del biofiltro (DBO reducida) se produce un efecto de dilución. En este caso la carga orgánica aplicada al sistema se calcula como:

$$Li = \frac{Q * Lo + Qr * Le}{Q + Qr}$$

donde: Li = concentración de DBO aplicada al biofiltro

Lo = concentración de DBO del efluente del séptico

Le = concentración DBO del efluente del biofiltro

Q = caudal afluente sin incluir recirculación

Qr = caudal de recirculación $\qquad Q_r = Q*R$

El sistema de biofiltración a diseñar se ha propuesto como tratamiento secundario después de un tanque séptico, por lo que hay que tomar en cuenta la reducción de la carga orgánica que ocurre en el tratamiento primario. Según lo expuesto en la sección 2.3, la eficiencia de remoción de DBO en el séptico oscila entre un 20 y 30%. Para efectos del diseño se asume una reducción de DBO del 20%.

4.1.3 Carga Hidráulica

Representa el volumen de agua aplicado por unidad de área superficial de lecho

Carga Hidráulica = Q (m^3/día ó m^3/hora) / área superficial del lecho (m^2)

La magnitud de la carga hidráulica está relaciona con el tipo de filtro. Para filtros de baja tasa ésta varía entre 1 y 4 m^3/m^2/día; mientras que para filtros de alta tasa oscila entre 8 y 44 m^3/m^2/día (Tabla 3.2).

Habiéndose determinado un caudal afluente al sistema (con o sin recirculación) es posible estimar a partir de éste valor y la carga hidráulica, las áreas superficiales de lecho necesarias para filtros de alta y baja tasa.

Sin recirculación Q= 1,25m^3/día

Filtro de baja carga		
Carga HID (m^3/m^2/día)	Área Sup. (m^2)	Radio útil (m)
1	1.2500	0.6308
2	0.6250	0.4460
3	0.4167	0.3642
4	0.3125	0.3154

Filtro de alta carga		
Carga HID (m^3/m^2/día)	Área Sup. (m^2)	Radio útil (m)
8	0.1563	0.2230
9	0.1389	0.2103
10	0.1250	0.1995
11	0.1136	0.1902

Con recirculación 1:0.5 Qaf= 1,875 m^3/día

Filtro de baja carga		
Carga HID (m^3/m^2/día)	Área Sup. (m^2)	Radio útil (m)
1	1.8750	0.7725
2	0.9375	0.5463
3	0.6250	0.4460
4	0.4688	0.3863

Filtro de alta carga		
Carga HID (m^3/m^2/día)	Área Sup. (m^2)	Radio útil (m)
8	0.2344	0.2731
9	0.2083	0.2575
10	0.1875	0.2443
11	0.1705	0.2329

Con recirculación 1:1 $Q_{afluente} = 2.5\ m^3/día$

Filtro de baja carga		
Carga HID ($m^3/m^2/día$)	Área Sup. (m^2)	Radio útil (m)
1	2.5000	0.8921
2	1.2500	0.6308
3	0.8333	0.5150
4	0.6250	0.4460

Filtro de alta carga		
Carga HID ($m^3/m^2/día$)	Área Sup. (m^2)	Radio útil (m)
8	0.3125	0.3154
9	0.2778	0.2974
10	0.2500	0.2821
11	0.2273	0.2690

Se puede observar que, para un caudal determinado, el área superficial disminuye a medida que aumenta la carga hidráulica, es por esto que los valores de áreas superficiales correspondientes a filtros de alta rata operados con caudales domiciliarios sean tan pequeños.

Los cálculos se realizan para el límite inferior de cada rango; el diámetro del modelo definitivo puede ser igual o menor al correspondiente para este valor, siempre y cuando la carga hidráulica se mantenga dentro de los límites establecidos para cada tipo de filtro.

4.1.4 Recirculación

Para determinar la influencia que ejerce la recirculación sobre la eficiencia de funcionamiento del sistema de biofiltración propuesto se realizan los cálculos asumiendo tres escenarios: sin recirculación, con 50% de recirculación y con 100%.

4.1.5 Eficiencia

Viene determinada por la relación entre la carga orgánica del afluente y la carga orgánica reducida en el sistema:

$$E = \frac{L_{afluente} - L_{efluente}}{L_{afluente}}$$

La eficiencia del biofiltro debe ser tal que garantice el cumplimiento de las normas. En Venezuela, el Decreto 883 establece que para vertidos líquidos que sean descargados, en forma directa o indirecta, a ríos, estuarios, lagos, embalses, medios marinos-costeros o dispuestos en el suelo; la DBO_5 debe ser menor de 60mg/lit. Por lo tanto el diseño debe garantizar, como mínimo, la eficiencia asociada a este valor.

4.1.6 Materiales de lecho

Se realizan los cálculos para material de lecho mineral y sintético. En el caso de los medios plásticos se toman como superficies específicas de estudio 80 y 100m2/m3, que son los valores límites que aparecen reflejados en la tabla XX para medios plásticos convencionales.

4.1.7 Temperatura

Se toma una temperatura promedio para efectos del diseño de 25°C.

4.2 ECUACIONES DE DISEÑO

Para el diseño de filtros biológicos existen distintas ecuaciones propuestas por diferentes autores a lo largo de varios años. Entre las más reconocidas podemos mencionar las del National Research Council (1946), Velz (1948), Rankin (1955), Schulze (1960), Eckenfelder (1963), Germain (1966), Galler y Gotaas (1964), Bruce y Merkens (1973), Kincannon y Stover (1982) Logan (1987) y otras.

Si bien se reconoce que la remoción de DBO es función de muchas variables (profundidad, textura, permeabilidad, configuración y área superficial específica del medio, carga hidráulica, carga orgánica, relación de recirculación, tiempo de contacto, etc) los diferentes autores utilizan aproximaciones e ignoran variables, o le dan mayor

énfasis a un parámetro sobre otro a la hora de formular los diferentes modelos matemáticos de diseño.

4.2.1 Ecuaciones del National Research Council (NRC)

Estas ecuaciones son expresiones empíricas, desarrolladas a partir del estudio de los registros de operación de 34 plantas reales en instalaciones militares, con *medio de soporte de crecimiento biológico de piedra*. En este sistema de cálculo no se consideran algunos parámetros fundamentales como son la carga hidráulica y la superficie específica de las piedras que conforman el lecho, y sí el parámetro de rendimiento. Son aplicables a filtros de una o dos etapas, de alta o baja carga y con recirculación o sin ella.

Las fórmulas NRC proporcionan flexibilidad para estimar las eficiencias de plantas utilizando varias combinaciones de filtros, diferentes cargas y diferentes tasas de recirculación. [1]

Es importante señalar que estas fórmulas se aplican con las siguientes limitaciones:

- 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 la eficiencia a la carga orgánica, y en menor grado, a la carga hidráulica.
- 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.

[1] Water Pollution Control Federation. Manual of Practice No. 8. "Sewage Treatment Plant Desing"

Para filtros primarios o de una etapa:

$$E_1 = \frac{1}{1 + 0.443\sqrt{\frac{W_1}{V_1 F_1}}}$$

$$F_1 = \frac{1 + R_1}{(1 + 0.1R_1)^2}$$

$$R_1 = \frac{Q_R}{Q}$$

Donde:

E1	eficiencia fraccional de remoción de DBO para el proceso, incluyendo recirculación y sedimentación.
W1	carga orgánica aplicada al filtro de primera etapa, sin incluir recirculación, es decir, del agua cruda sedimentada, kg DBO/día
V1	volumen total del medio filtrante del filtro de primera etapa, m3
F1	factor de recirculación del filtro de primera etapa, o número de pasos del material orgánico.
R1	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.
QR	caudal de recirculación, m3/d
Q	caudal afluente, sin incluir recirculación, m3/d

Las formulaciones de la NRC para filtros de dos etapas no se consideran ya que no aplican para el diseño del sistema propuesto, que por ser a escala domiciliaria trabaja con caudales y niveles de carga orgánica cuya magnitud no justifica el uso de filtros de varias etapas.

4.2.2 Ecuación de Bruce y Merkens

Responde a una cinética de primer orden:

$$\frac{Le}{Li} = e^{\frac{KVS}{Q}}$$

donde: Li = concentración de DBO aplicada al biofiltro

Le = concentración DBO del efluente del biofiltro

K = constante que depende de la temperatura (m/día)

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

V = volumen del lecho

Q = caudal aplicado al biofiltro (m^3/día)

S = superficie específica (m^2/m^3)

4.3 CÁLCULOS

4.3.1 Filtro con lecho de rocas

SIN RECIRCULACIÓN

Filtro de una etapa

Caudal = 1.25 m3/dia

DBO agua cruda = 150 mg/l

DBO agua sedimentada = 120 mg/l

Carga Orgánica = 0.15 kg DBO/día

Factor de recirculación: F=1

DBOentrada (mg/lt)	DBOsalida (mg/lt)	DBOred. (mg/lt)	Eficiencia %	Volumen (m^3)	Carga Org. (kg/m^3/día)
120	60	60	0.5000	0.0294	5.0956
120	55	65	0.5417	0.0411	3.6483
120	50	70	0.5833	0.0577	2.5998
120	45	75	0.6250	0.0818	1.8344
120	40	80	0.6667	0.1177	1.2739
120	35	85	0.7083	0.1736	0.8640
120	30	90	0.7500	0.2649	0.5662
120	25	95	0.7917	0.4251	0.3529
120	20	100	0.8333	0.7359	0.2038

Volumen (m^3)	Área Sup. (m^2)	Radio útil (m)	Alt. Lecho (m)
0.0411	0.1563	0.223	0.2631
0.0577	0.1563	0.223	0.3691
0.0818	0.1563	0.223	0.5232
0.1177	0.1563	0.223	0.7534
0.1736	0.1563	0.223	1.1108
0.2649	0.1563	0.223	1.6950
0.4251	1.2500	0.6308	0.3401
0.7359	1.2500	0.6308	0.5887

CON RECIRCULACIÓN 1:0.5

Filtro de una etapa

Caudal = 1.875 m3/dia

DBO agua cruda = 150 mg/l

DBO agua sedimentada = 120 mg/l

Carga Orgánica = 0.225 kg DBO/día

Factor de Recirculación: F = 1.36

DBOentrada (mg/lt)	DBOsalida (mg/lt)	DBOred. (mg/lt)	Eficiencia %	Volumen (m^3)	Carga Org. (kg/m^3/día)
120	60	60	0.5000	0.0325	6.1600
120	55	65	0.5417	0.0453	4.4104
120	50	70	0.5833	0.0636	3.1428
120	45	75	0.6250	0.0902	2.2176
120	40	80	0.6667	0.1299	1.5400
120	35	85	0.7083	0.1915	1.0444
120	30	90	0.7500	0.2922	0.6844
120	25	95	0.7917	0.4688	0.4266
120	20	100	0.8333	0.8117	0.2464

Volumen (m^3)	Área Sup. (m^2)	Radio útil (m)	Alt. Lecho (m)
0.0325	0.2344	0.2731	0.1385
0.0453	0.2344	0.2731	0.1935
0.0636	0.2344	0.2731	0.2715
0.0902	0.2344	0.2731	0.3848
0.1299	0.2344	0.2731	0.5541
0.1915	0.2344	0.2731	0.8170
0.2922	0.2344	0.2731	1.2468
0.4688	0.2344	0.2731	2.0004
0.8117	1.8750	0.7725	0.4329

CON RECIRCULACIÓN 1:1

Filtro de una etapa

Caudal = 2.5 m3/dia

DBO agua cruda = 150 mg/l

DBO agua sedimentada = 120 mg/l

Carga Orgánica = 0.3 kg DBO/día

Factor de Recirculación: F = 1.65

DBOentrada (mg/l)	DBOsalida (mg/l)	DBOred. (mg/l)	Eficiencia %	Volumen (m^3)	Carga Org. (kg/m^3/día)
120	60	60	0.5000	0.0357	4.2038
120	55	65	0.5417	0.0498	3.0099
120	50	70	0.5833	0.0699	2.1448
120	45	75	0.6250	0.0991	1.5134
120	40	80	0.6667	0.1427	1.0510
120	35	85	0.7083	0.2104	0.7128
120	30	90	0.7500	0.3211	0.4671
120	25	95	0.7917	0.5152	0.2911
120	20	100	0.8333	0.8920	0.1682

Volumen (m^3)	Área Sup. (m^2)	Radio útil (m)	Alt. Lecho (m)
0.0357	0.3125	0.3154	0.2115
0.0498	0.3125	0.3154	0.2774
0.0699	0.3125	0.3154	0.3683
0.0991	0.3125	0.3154	0.4973
0.1427	0.3125	0.3154	0.6851
0.2104	0.3125	0.3154	1.6019
0.3211	0.3125	0.3154	1.4294
0.5152	2.5000	0.8921	0.2775
0.8920	2.5000	0.8921	0.4662

4.3.1 Filtro con lecho plástico

SIN RECIRCULACIÓN

Filtro de una etapa

Caudal = 1.25 m3/dia

DBO agua cruda = 150 mg/l

DBO agua sedimentada = 120 mg/l

Factor de recirculación: F=1

Temperatura 25 °C – Kt = 0.08 m/dia

MEDIO PLÁSTICO CONVENCIONAL **S = 80 m2/m3**

DBOaf (mg/lt)	DBOef (mg/lt)	Volúmen (m^3)	Alt. lecho (m)	Carga Org. (kg/m^3/día)
120	60	0.1354	0.8662	1.4773
120	55	0.1524	0.9749	1.3126
120	50	0.1710	1.0940	1.1697
120	45	0.1916	1.2256	1.0440
120	40	0.2146	1.3728	0.9321
120	35	0.2407	1.5397	0.8311
120	30	0.2708	1.7323	0.7387
120	25	0.3064	1.9601	0.6528
120	20	0.3500	2.2390	0.5715

MEDIO PLÁSTICO CONVENCIONAL **S = 100 m2/m3**

DBOaf (mg/lt)	DBOef (mg/lt)	Volúmen (m^3)	Alt. lecho (m)	Carga Org. (kg/m^3/día)
120	60	0.1083	0.6929	1.8466
120	55	0.1219	0.7799	1.6407
120	50	0.1368	0.8752	1.4621
120	45	0.1533	0.9805	1.3050
120	40	0.1717	1.0983	1.1651
120	35	0.1925	1.2317	1.0388
120	30	0.2166	1.3859	0.9233
120	25	0.2451	1.5681	0.8160
120	20	0.2800	1.7912	0.7144

CON RECIRCULACIÓN 1:0.5

Filtro de una etapa

Caudal = 1.875 m3/dia

DBO agua cruda = 150 mg/l

DBO agua sedimentada = 120 mg/l

Factor de Recirculación: F = 1.36

Temperatura 25 °C – Kt = 0.08 m/dia

MEDIO PLÁSTICO CONVENCIONAL **S = 80 m2/m3**

DBOsedim. (mg/l)	DBOsalida (mg/l)	DBOentrada (mg/l)	Volumen (m^3)	Alt. lecho (m)	Carga Org. (kg/m^3/día)
120	60	100.00	0.0998	0.4256	2.0046
120	55	98.33	0.1135	0.4841	1.7624
120	50	96.67	0.1288	0.5493	1.5533
120	45	95.00	0.1459	0.6226	1.3704
120	40	93.33	0.1655	0.7060	1.2085
120	35	91.67	0.1880	0.8023	1.0636
120	30	90.00	0.2146	0.9154	0.9321
120	25	88.33	0.2465	1.0518	0.8113
120	20	86.67	0.2864	1.2218	0.6983

MEDIO PLÁSTICO CONVENCIONAL **S = 100 m2/m3**

DBOsedim. (mg/l)	DBOsalida (mg/l)	DBOentrada (mg/l)	Volumen (m^3)	Alt. lecho (m)	Carga Org. (kg/m^3/día)
120	60	100.00	0.0798	0.3405	2.3491
120	55	98.33	0.0908	0.3873	2.0309
120	50	96.67	0.1030	0.4395	1.7596
120	45	95.00	0.1168	0.4981	1.5257
120	40	93.33	0.1324	0.5648	1.3218
120	35	91.67	0.1504	0.6418	1.1425
120	30	90.00	0.1717	0.7323	0.9831
120	25	88.33	0.1972	0.8414	0.8398
120	20	86.67	0.2291	0.9775	0.7093

CON RECIRCULACIÓN 1:1

Filtro de una etapa

Caudal = 2.5 m3/dia

DBO agua cruda = 150 mg/l

DBO agua sedimentada = 120 mg/l

Factor de Recirculación: F = 1.65

Temperatura 25 °C – Kt = 0.08 m/dia

MEDIO PLÁSTICO CONVENCIONAL **S = 80 m2/m3**

DBOsedim. (mg/l)	DBOsalida (mg/l)	DBOentrada (mg/l)	Volumen (m^3)	Alt. lecho (m)	Carga Org. (kg/m^3/día)
120	60	90.00	0.1584	0.5068	1.2627
120	55	87.50	0.1814	0.5804	1.1027
120	50	85.00	0.2073	0.6633	0.9649
120	45	82.50	0.2368	0.7577	0.8447
120	40	80.00	0.2708	0.8664	0.7387
120	35	77.50	0.3105	0.9937	0.6441
120	30	75.00	0.3579	1.1454	0.5588
120	25	72.50	0.4159	1.3309	0.4809
120	20	70.00	0.4894	1.5660	0.4087

MEDIO PLÁSTICO CONVENCIONAL **S = 100 m2/m3**

DBOsedim. (mg/l)	DBOsalida (mg/l)	DBOentrada (mg/l)	Volumen (m^3)	Alt. lecho (m)	Carga Org. (kg/m^3/día)
120	60	90.00	0.1267	0.4055	1.3318
120	55	87.50	0.1451	0.4643	1.1307
120	50	85.00	0.1658	0.5306	0.9611
120	45	82.50	0.1894	0.6061	0.8166
120	40	80.00	0.2166	0.6931	0.6925
120	35	77.50	0.2484	0.7949	0.5850
120	30	75.00	0.2863	0.9163	0.4911
120	25	72.50	0.3327	1.0647	0.4086
120	20	70.00	0.3915	0.1566	0.3353

ANÁLISIS DE RESULTADOS

I. SISTEMA DE BIOFILTRACIÓN

Selección del modelo

Para hacer un análisis detallado de la influencia que ejercen sobre el funcionamiento del sistema las diferentes variables que intervienen en el diseño, se seleccionan dos prototipos dentro de los modelos calculados, uno considerando tratamiento a baja tasa, con lecho de rocas, y otro de alta tasa con lecho sintético.

En base a los resultados obtenidos reflejados en las tablas XXX-XXX, se hacen las siguientes observaciones:

Dimensiones

Los volúmenes obtenidos se modifican para ajustarlos a diámetros y longitudes comerciales, facilitando su construcción y en algunos casos mejorando su eficiencia

Recirculación

Por ser de uso domiciliario, la recirculación no se considera necesaria puesto que:

- El sistema propuesto trabaja a cargas orgánicas relativamente constantes y con bajos caudales.
- La eficiencia de remoción esperada se cumple con un sistema sin recirculación.
- La magnitud de los volúmenes obtenidos sin recirculación son manejables desde el punto de vista constructivo y operativo.

Si bien no se asume para los modelos propuestos recirculación del efluente clarificado con el fin de mejorar la eficiencia, hay que tener en cuenta que debido a las

variaciones horarias del gasto de aguas servidas en la vivienda, se hace necesario incluir un sistema de recirculación para mantener la humedad en la película biológica.

Biofiltro con lecho de rocas – Tratamiento a baja tasa

En las tablas 4.1 y 4.2 se muestran los volúmenes y alturas de lecho obtenidos mediante la fórmula NRC para filtros de una etapa con lecho de roca. Se observa que los modelos cuyas eficiencias oscilan entre 50 y 75% tienen un valor de carga orgánica correspondiente a filtros de alta tasa y se descartan ya que sus dimensiones no son funcionales desde el punto de vista constructivo y operativo. Por ello se escoge el modelo correspondiente a una eficiencia de 79% y para el cual la carga orgánica aplicada al sistema se encuentra en el rango establecido para filtros a baja tasa.

Basándonos en los resultados obtenidos de volumen, altura y área superficial de lecho del modelo escogido y en la disponibilidad de tanques comerciales que faciliten la construcción del prototipo, se propone un biofiltro con las siguientes características:

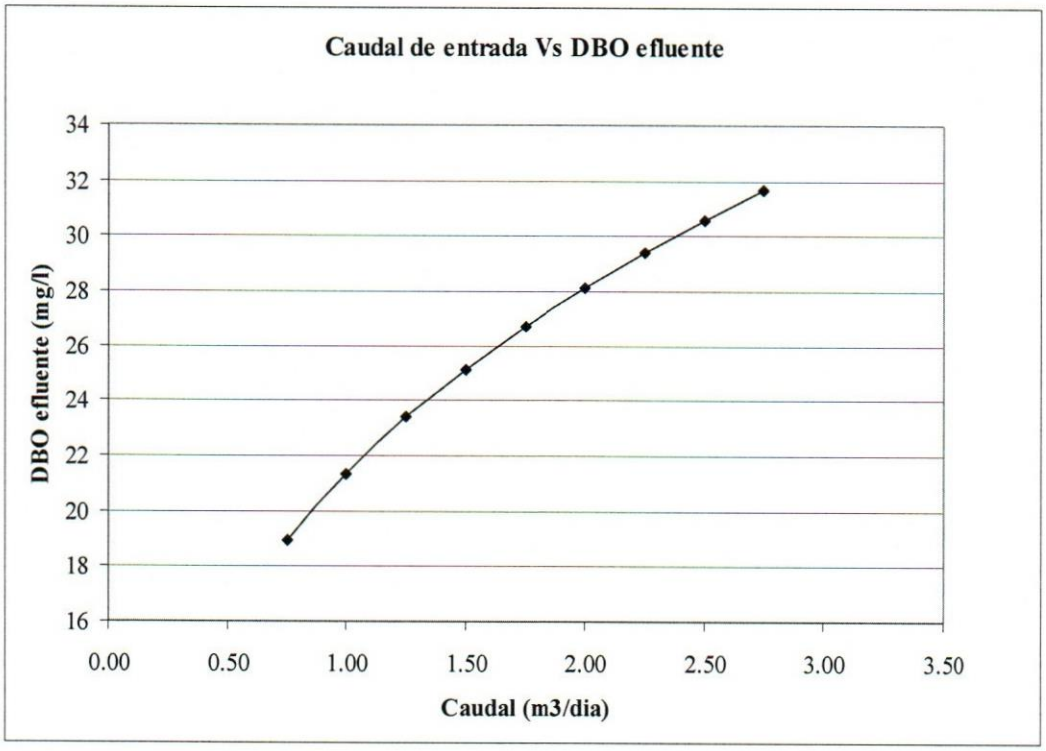
- Radio del lecho = 0.8 m
- Área superficial = 0.5027 m2
- Altura de lecho = 1 m
- Volumen = 0.5027 m^3
- Material de lecho filtrante: roca

Para este modelo se hace un análisis de sensibilidad con la finalidad de evaluar su comportamiento respecto a variaciones de caudal y carga orgánica del afluente. A continuación se presentan los cuadros y gráficas correspondientes a cada caso.

Análisis de sensibilidad por variación de caudal afluente.

Qentrada lt/día	Qentrada m^3/día	Carga Hid. m^3/m^2/día	DBOent kg/día	DBOsal kg/día	DBOsal mg/lt
2750	2.75	5.4705	0.33	0.0872	31.70
2500	2.50	4.9731	0.3	0.0765	30.60
2250	2.25	4.4758	0.27	0.0662	29.41
2000	2.00	3.9785	0.24	0.0562	28.12
1750	1.75	3.4812	0.21	0.0467	26.71
1500	1.50	2.9839	0.18	0.0377	25.14
1250	1.25	2.4866	0.15	0.0292	23.38
1000	1.00	1.9893	0.12	0.0214	21.35
750	0.75	1.4919	0.09	0.0142	18.94

Rango para el cual el funcionamiento del sistema cumple con los parámetros de carga hidráulica y orgánica de filtros de baja tasa.



Se observa que la eficiencia de reducción es elevada aun para un amplio rango de variaciones de caudal de entrada. En este caso, los límites entre los que puede oscilar el caudal afluente vienen determinados por la carga hidráulica, que para filtros de baja tasa debe mantenerse entre 1 y 4 m^3/m^2/día. En la tabla XX se aprecia que el biofiltro propuesto puede trabajar con caudales comprendidos entre 750 y 2000 lt/día generando un efluente con una concentración de DBO muy por debajo de los límites establecidos en las normas.

Análisis de sensibilidad por variación de carga orgánica del afluente.

Tabla XX

DBOaf Mg/lt	DBOaf kg/día	DBOef kg/día	DBOef mg/lt	CargaOrg. kg/m^3/día
260	0,325	0,0854	68,29	0,65
240	0,300	0,0765	61,19	0,60
220	0,275	0,0679	54,29	0,55
200	0,250	0,0595	47,61	0,50
180	0,225	0,0514	41,15	0,45
160	0,200	0,0437	34,94	0,40
140	0,175	0,0363	29,01	0,35
120	0,150	0,0292	23,38	0,30
100	0,125	0,0226	18,09	0,25
80	0,100	0,0165	13,20	0,20

Rango para el cual el funcionamiento del sistema cumple con los parámetros de carga hidráulica y orgánica de filtros de baja tasa.

En la Figura XX se aprecia que el biofiltro genera un efluente de calidad aceptable (DBO menor de 60 mg/lt) para aguas con elevada DBO, pero hay que destacar que por ser un sistema de baja tasa, la carga orgánica debe mantenerse dentro del rango establecido para este tipo de filtros. Por ello el diseño verifica un funcionamiento eficiente para afluentes con DBO de hasta 160 mg/lt. Para el caso en estudio, en el que se considera el biofiltro como un sistema de tratamiento secundario después de un

tanque séptico, se puede asegurar que el sistema propuesto es eficiente incluso para aguas crudas de 200 mg/lt.

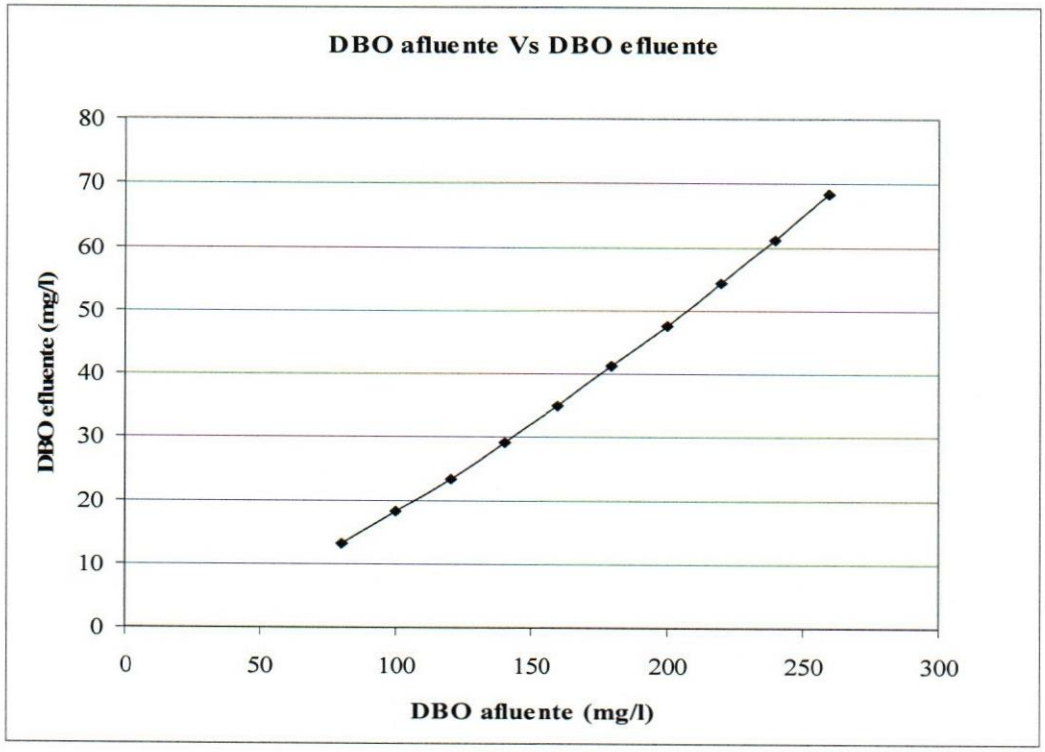


Figura XX

Biofiltro con lecho plástico – Tratamiento a alta tasa

Como se señaló anteriormente se escoge un modelo de biofiltro de lecho sintético como prototipo para alta tasa. En las tablas XX y XX se muestran las dimensiones obtenidas aplicando el modelo de Bruce y Merkens para eficiencias entre 50 y 83%. Se observa que tanto la carga orgánica como la hidráulica están dentro del rango correspondiente a filtros de alta tasa, por lo tanto no representan un factor limitante a la hora de seleccionar un modelo; de ahí que el parámetro utilizado para determinar el volumen del lecho sea un margen de seguridad respecto a la eficiencia mínima requerida para cumplir con lo establecido en las normas.

Asumiendo un margen de seguridad del 25%, ajustando las dimensiones y considerando un material de lecho con una superficie específica comercial, el biofiltro propuesto cumple con las siguientes características:

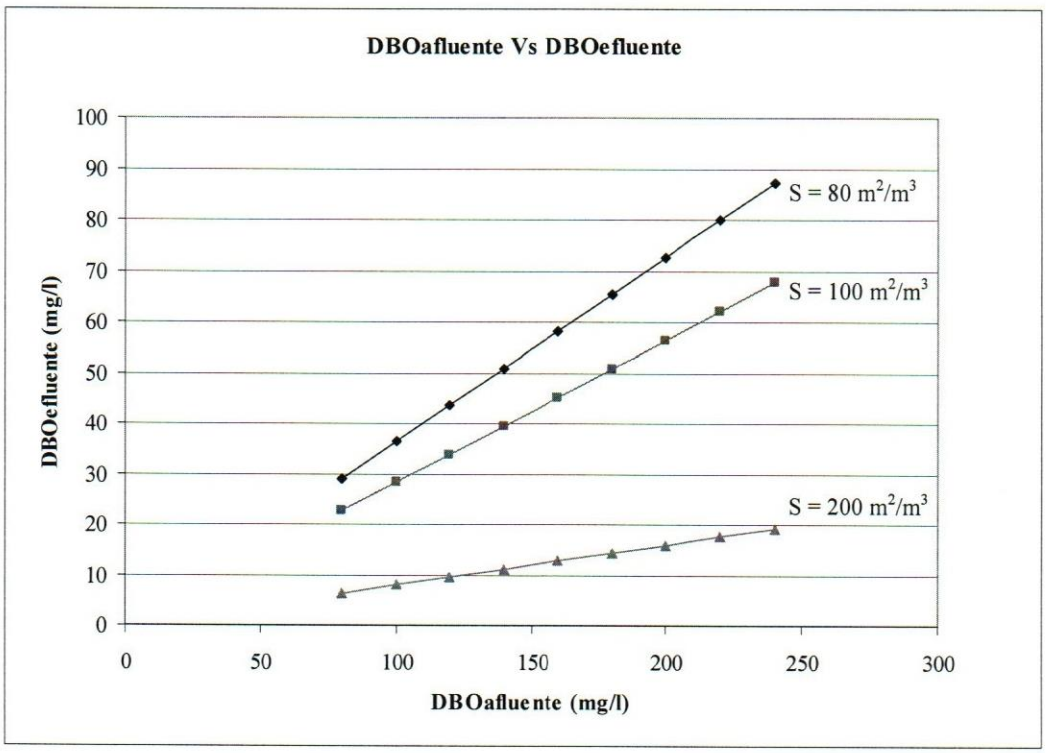
- Radio del lecho = 0.44 m
- Área superficial = 0.1521 m^2
- Altura de lecho = 1.3 m
- Volumen = 0.1977 m^3
- Material de lecho: plástico convencional
- Superficie específica = 100 m^2/ m^3 de lecho
- Temperatura de diseño = 25°C

A continuación se analiza la influencia que ejercen las variaciones de caudal afluente, carga orgánica y temperatura sobre el funcionamiento del biofiltro propuesto.

Análisis de sensibilidad por variación de carga orgánica del afluente

Tabla XX

DBOaf Mg/lt	SUP Esp. m^2/m^3	DBOef mg/lt	SUP Esp. m^2/m^3	DBOef mg/lt	SUP Esp. m^2/m^3	DBOef mg/lt
240	80	87.2184	100	67.7185	200	19.1075
220	80	79.9502	100	62.0753	200	17.5152
200	80	72.6820	100	56.4321	200	15.9229
180	80	65.4138	100	50.7889	200	14.3306
160	80	58.1456	100	45.1456	200	12.7383
140	80	50.8774	100	39.5024	200	11.1460
120	80	43.6092	100	33.8592	200	9.5537
100	80	36.3410	100	28.2160	200	7.9614
80	80	29.0728	100	22.5728	200	6.3692



En la figura XX se aprecia la reducción de DBO que logra un biofiltro con las dimensiones planteadas para materiales de lecho con diferentes superficies específicas. Se observa que a medida que aumenta la superficie específica, se logra una mayor remoción de DBO.

A partir de la gráfica, conocida la DBO del agua cruda y la calidad esperada en el efluente clarificado, es posible estimar la superficie específica del material necesario para el lecho del biofiltro.

Para el material de lecho propuesto, de superficie específica 100 m^2/m^3, es posible lograr un efluente clarificado con una DBO menor de 60 mg/lt inclusive para afluentes con concentraciones de mas de 200 mg/lt de DBO.

Análisis de sensibilidad por variación de caudal afluente

Tabla XX

Q afluente m^3/día	DBOaf mg/lt	DBOef mg/lt
2.75	120	67.5160
2.50	120	63.7425
2.25	120	59.4157
2.00	120	54.4178
1.75	120	48.6047
1.50	120	41.8082
1.25	120	33.8592

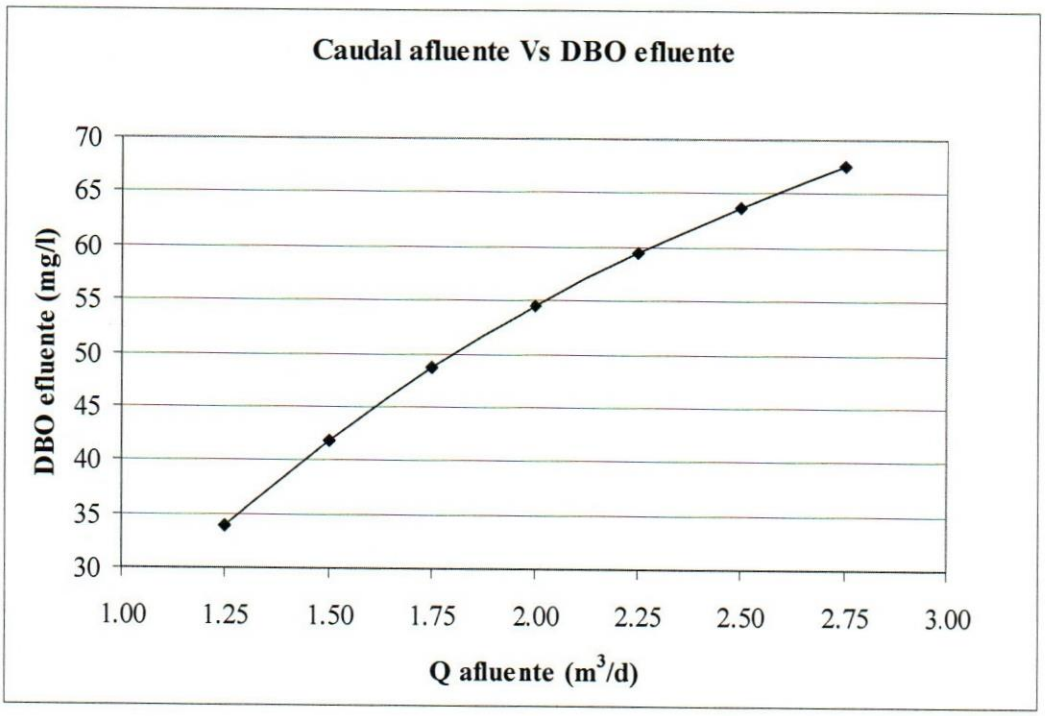


Figura XX

Del análisis de la figura XX se concluye que el sistema propuesto puede trabajar con caudales hasta 2250 lt/día, generando un efluente de calidad tal que cumpla con la concentración de DBO esperada de 60mg/lt o menor.

Análisis de sensibilidad por variación de temperatura

Tabla XX

Temperatura °C	Kt m/día	DBOef mg/lt
13	0.0317	72.6595
14	0.0343	69.8009
15	0.0370	66.8399
16	0.0400	63.7829
17	0.0432	60.6381
18	0.0466	57.4157
19	0.0503	54.1276
20	0.0544	50.7876
21	0.0587	47.4115
22	0.0634	44.0170
23	0.0685	40.6233
24	0.0740	37.2514
25	0.0799	33.9234
26	0.0863	30.6623
27	0.0932	27.4916
28	0.1006	24.4343
29	0.1087	21.5133
30	0.1174	18.7494

En la figura XX se observa que el rendimiento del biofiltro aumenta a medida que la temperatura es mayor, esto se debe a que las altas temperaturas favorecen el crecimiento de las bacterias responsables de reducir las concentraciones de carga orgánica del agua residual.

Si bien los cálculos se realizaron para una temperatura de 25°C, la figura XX muestra que se puede lograr un efluente de calidad para temperaturas menores a la de diseño. Se verifica la eficiencia de remoción establecida para temperaturas mayores a 18°C. En caso de que la temperatura media en el biofiltro sea menor a este valor se tendrá que hacer una revisión del diseño.

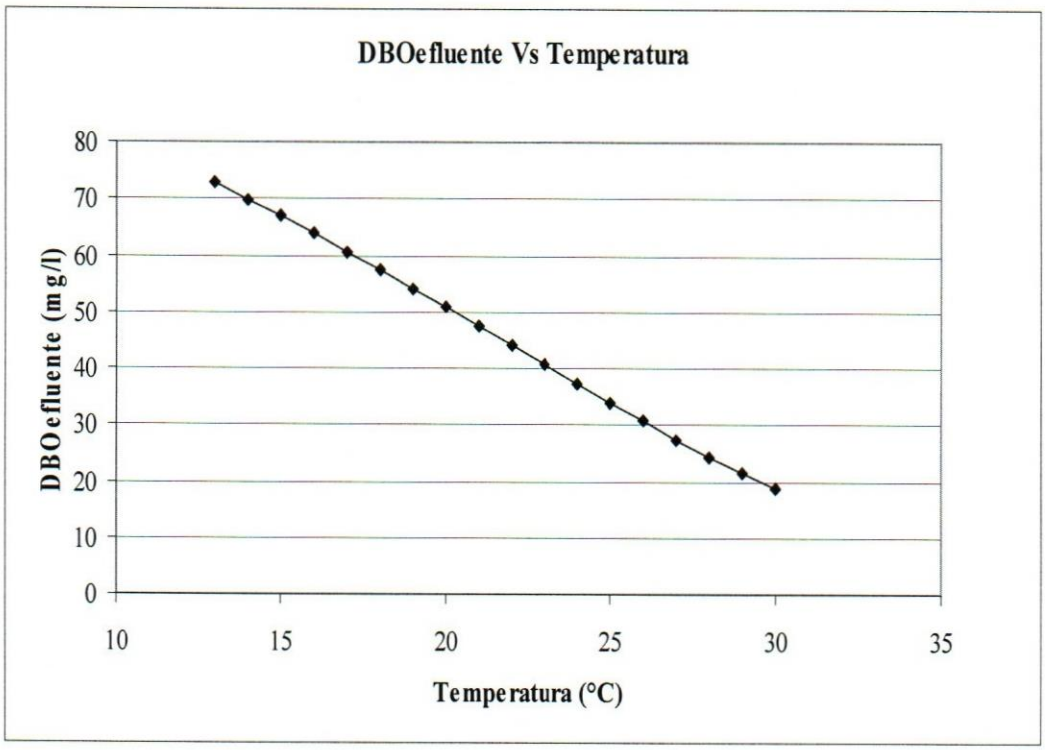

DBOefluente Vs Temperatura
DBOefluente (mg/l)
80
70
60
50
40
30
20
10
0
10
15
20
25
30
35
Temperatura (°C)

Figura XX

II. FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO

Hidráulicamente existen muchos parámetros que determinan el comportamiento de un sistema de biofiltración. Para analizar los modelos propuestos, se establecen las siguientes condiciones de operación:

- Se considera que el caudal de descarga entra al tanque dosificador durante dos períodos al día que corresponden a los máximos de la curva de variación horaria de consumo
- Se incluye un sistema de recirculación biofiltro-tanque dosificador para mantener la humedad de la película biológica
- Se instalan 2 bombas para suministrar el caudal necesario que garantice una operación eficiente del biofiltro
- La conexión entre el tanque dosificador y el biofiltro para la recirculación se hace a través de una tubería, al igual que la descarga del efluente clarificado

Cálculos para el diseño hidráulico:

1.- Caudal de diseño:

La fluctuación del gasto afluente mantiene un comportamiento similar a la curva de variación horaria de consumo, por lo que es posible determinar el porcentaje de caudal medio que corresponde a los picos; tomando los datos de la curva de Caricuao (Figura 1.1):

Para la hora de consumo máximo en la mañana el caudal será $Q_{mañana} = 1.21\ Q_{med}$

Para la hora de consumo máximo en la tarde el caudal será $Q_{tarde} = 1.05\ Q_{med}$

Estableciendo la relación $Q_{mañana} / Q_{tarde} = 1.1524$ y conocido el gasto diario de aguas servidas $Q = 1.25\ m^3$/día se determina el volumen de agua que entra al sistema durante las horas pico:

$$V_{mañana} = 0.67\ m^3 \qquad V_{tarde} = 0.58\ m^3$$

2.- Caudal de recirculación:

Filtro de alta tasa. El modelo de alta tasa propuesto es de diámetro 0.44m (área superficial = 0.1521m2); para asegurar la carga hidráulica mínima de 8 m^3/m^2/día es necesario aplicar un caudal de:

$$8m^3 / m^2 / día = \frac{Q}{0.1521m^2}$$

$$Q_{rec\ ALTA\ TASA} = 1.22\ m^3 / día$$

Asumiendo que la recirculación se hace cada 30 min., se debe aplicar un volumen de 26 litros en cada ciclo.

Filtro de baja tasa. El sistema de biofiltro planteado para baja carga es de diámetro 0.8m, al igual que el de alta tasa requiere de un caudal de recirculación correspondiente a la carga hidráulica mínima, que en este caso es de 1 m^3/m^2/día, por lo tanto el caudal de recirculación será:

$$1m^3 / m^2 / día = \frac{Q}{0.5027m^2}$$

$$Q_{rec\ BAJA\ TASA} = 0.5027\ m^3 / día$$

Para cada ciclo de 30 min. el volumen que se debe aplicar al biofiltro es de 11lt.

Sistema de bombeo

Bomba ***principal.*** Se activa cuando el agua en el tanque dosificador alcanza un nivel determinado. Para el modelo hidráulico planteado se considera que el tanque dosificador recibe el total del gasto diario en dos descargas, una en la mañana y otra en la noche, por lo que en condiciones normales la bomba se encenderá dos veces al día. El nivel de apagado de la bomba debe estar por encima del nivel de agua correspondiente al volumen de recirculación, para garantizar que éste se mantenga en el sistema.

Para el análisis se establece un caudal de bombeo constante de 0,1 lt/seg tomando en cuenta la presión necesaria para que los dispersores puedan distribuir el agua uniformemente sobre la superficie del lecho pero conscientes de que la fuerza del chorro debe ser tal que no produzca un arrastre excesivo de biopelícula.

Bomba de ***recirculación.*** Se enciende cada 30 minutos para bombear el caudal de recirculación correspondiente a cada prototipo. Opera durante todo el día para garantizar la humedad de la película biológica aun cuando el tanque dosificador no este recibiendo descargas del séptico.

Los caudales y condiciones de operación de las bombas para los dos tipos de biofiltro propuestos aparecen reflejados en la tabla XXX:

Tabla XX. Caudales de bombeo para los biofiltros propuestos

	Unidad	Lecho plástico	Lecho de roca
Bomba principal			
Qbombeo	lps	0.1	0.1
Volumen 1*	litros	670	670
Volumen 2**	litros	580	580
Bomba de recirculación			
Qrecirculación	m^3/día	1.22	0.5027
Tiempo de bombeo	min	10	5
Qbombeo	lps	0.0433	0.0366

* Volumen correspondiente al pico principal
** Volumen correspondiente al pico secundario

Operación del sistema

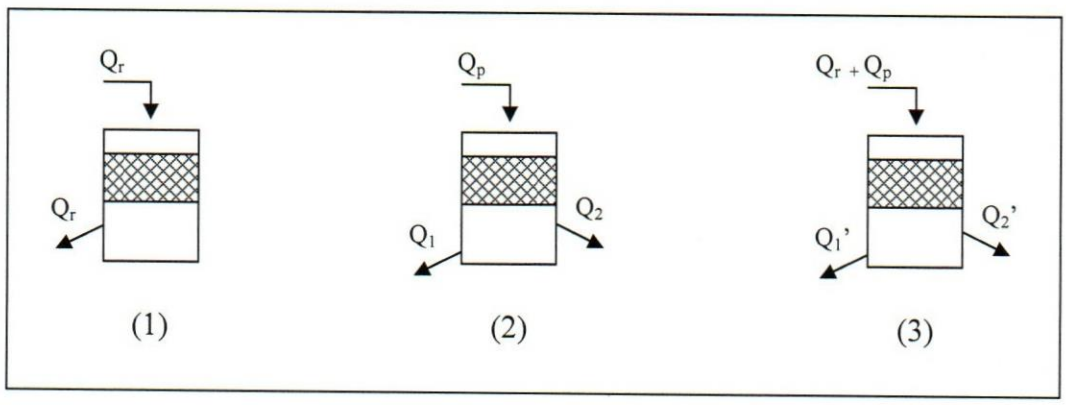
La operación hidráulica del biofiltro se analiza estableciendo similitudes con sistemas hidráulicos matemáticamente determinados para los cuales existen formulaciones que permiten modelar su funcionamiento.

El biofiltro se considera como un sistema al que entra determinado caudal y del que debe salir un caudal equivalente al de ingreso, bien sea por la tubería de descarga o por la de recirculación. Es posible determinar tres escenarios de operación:

1. Bomba principal apagada – Bomba de recirculación encendida
   Este es el caso más frecuente, ocurre la mayoría del tiempo. Sólo entra al sistema el caudal de recirculación (Qr) que debe regresar al tanque de almacenamiento a través de la tubería de recirculación.

2. Bomba principal encendida – Bomba de recirculación apagada
   El caudal de entrada corresponde al de la bomba principal (Qp = 0.1 lps), hay descarga por ambas tuberías: la de salida y la de recirculación.

3. Bomba principal encendida – Bomba de recirculación encendida
   Este caso ocurre durante las horas pico cuando la bomba principal está en funcionamiento y además se activa el mecanismo de recirculación. El caudal afluente se descarga por la tubería de recirculación y también hay gasto a través de la tubería de salida.



Tuberías

Tubería de recirculación. Para efectos del diseño se considera que opera como una alcantarilla con control a la entrada, de ahí que a la hora de llevar el diseño a detalle se debe garantizar que la tubería tenga una pendiente suficiente y que la salida nunca este sumergida.

El procedimiento para determinar el diámetro es el siguiente:

- Se escoge un diámetro comercial y se genera para ese diámetro la curva de gastos (los cálculos se realizaron en Excel y aparecen reflejados en las tablas del Anexo 1).
- Conocido el caudal de recirculación y la curva de gastos, se hace un análisis considerando que el comportamiento del sistema es similar a un embalse: el hidrograma de entrada en este caso tiene una duración de 30 min; asumiendo que la bomba de recirculación se enciende en el minuto cero, durante los primeros 10 o 5 min del ciclo (dependiendo del tipo de lecho) hay un aporte de caudal correspondiente al Q de recirculación; haciendo el tránsito de creciente es posible determinar si antes de finalizar el ciclo el caudal bombeado ha regresado al tanque dosificador; también se obtienen las alturas máximas que alcanza el agua en la cámara inferior del biofiltro. (Ver Anexo 2)
- Se selecciona el diámetro cuya capacidad de conducción garantice que el caudal que pase a través de la tubería sea el más próximo al estricto necesario para la recirculación.

Para el modelo hidráulico planeado y en base a los resultados reflejados en las tablas del Anexo 1 y 2, se selecciona un diámetro de ½" para la tubería de recirculación.

Tubería de descarga. Al igual que la tubería de recirculación, esta tubería se estudia como una alcantarilla con control a la entrada. La cota a la que se debe colocar, viene determinada por la máxima altura de agua alcanzada durante el ciclo de

recirculación, de forma de garantizar que el caudal mínimo necesario para mantener la humedad en la biopelícula no sea descargado fuera del sistema.

El diámetro de la tubería de salida debe ser mayor al de la tubería de recirculación de manera que el agua tenga la tendencia a descargar por ella. Para estudiar el comportamiento del sistema se realiza un tránsito de creciente, incluyendo en el hidrograma de entrada el arranque de la bomba principal durante las horas pico (Figura XX). Mediante éste análisis es posible estimar:

- Las condiciones de operación de la tubería de descarga (si está sumergida o trabaja como canal)
- El número de horas en que la bomba principal está en funcionamiento. Este valor se obtiene asumiendo que la bomba se detiene cuando el volumen de aguas descargadas es equivalente al volumen de ingreso en las horas pico.
- La altura máxima que alcanza el agua en la cámara inferior del filtro cuando la bomba principal está en funcionamiento; este valor es importante a la hora de dimensionar el biofiltro, ya que se debe asegurar un borde libre entre el nivel de agua y la base del lecho que garantice el flujo de aire a través del sistema.

Ecuaciones para el diseño hidráulico

Ecuaciones de diseño de alcantarilla con control a la entrada

No Sumergido:

$$\frac{HE}{D} = \frac{H_c}{D} + K\left[\frac{Q}{AD^{0.5}}\right]^M - 0.5S$$

$$\frac{HE}{D} = K\left[\frac{Q}{AD^{0.5}}\right]^M$$

Sumergido:

$$\frac{HE}{D} = c\left[\frac{Q}{AD^{0.5}}\right]^2 + Y - 0.5S$$

donde:

HE = Altura del tirante de agua

D = Dimesión caracterísica (diámetro para tuberías-altura para cajón)

H_c = Altura crítica

Q = Caudal de descarga

A = Área de la tubería a sección llena

S = Pendiente de la tubería

K, M, c, Y = Constantes de control a la entrada

Las ecuaciones para entrada no sumergida aplican para $Q/AD^{0.5}$ de hasta 3.5

Las ecuaciones para entrada sumergida aplican cuando $Q/AD^{0.5}$ es mayor de 4

Para el caso en estudio se toman los valores de las constantes correspondientes a tuberías circulares de concreto con aletas a 90°:

K = 0.0098	M = 2.0
Y = 0.67	c =0.0398

Ecuaciones de movimiento de embalse

Cálculos y Resultados.

1.- Determinación de la curva de gastos

Utilizando las ecuaciones para alcantarillas con control a la entrada ya descritas y para diámetros previamente determinados; se calcula, para diferentes alturas de agua en la entrada, el caudal que pasa a través de la tubería; los cálculos correspondientes a tuberías de ½" y 1" se muestran en las Tablas 1 y 2 del Anexo 1.

Para el estudio del sistema de recirculación se emplea únicamente la curva de gastos correspondiente a la tubería de ½" de diámetro, mientras que para analizar el comportamiento del sistema cuando hay descarga por la tubería de salida (1" de diámetro) es necesario generar una curva de gastos total.

2.- Determinación de la cota de la tubería de salida

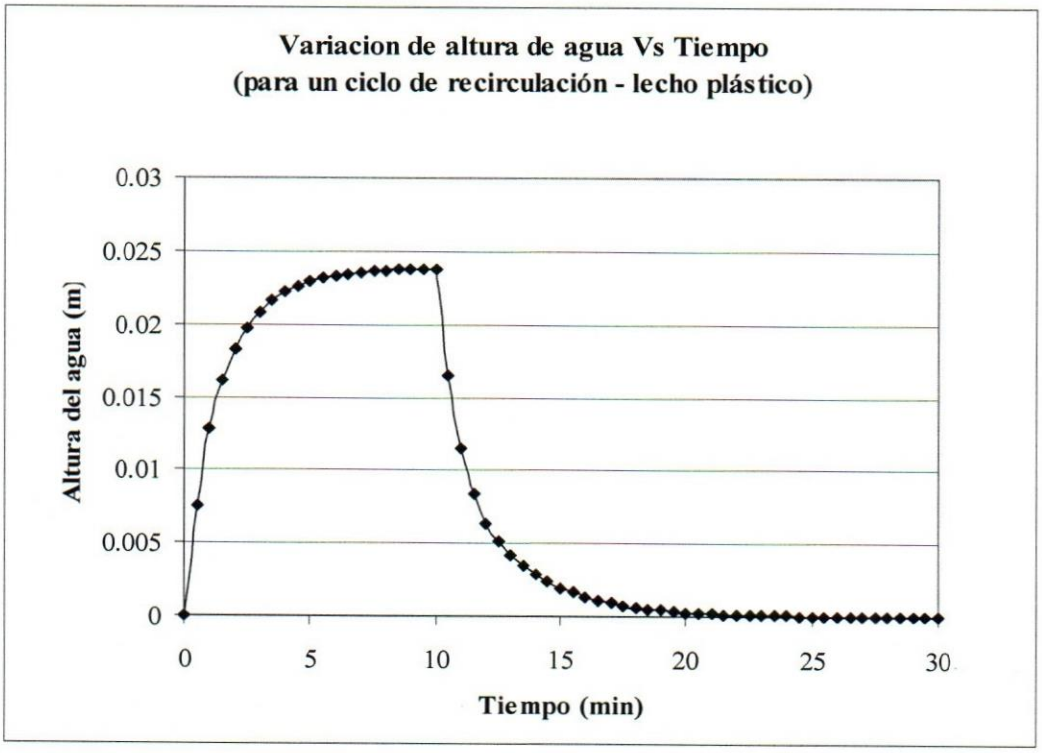


Figura XX Variaciones de altura de agua durante un ciclo de recirculación Lecho Plástico. Diámetro de la tubería de recirculación ½"

Cuando la bomba de recirculación comienza a funcionar, el nivel de agua en la cámara inferior del biofiltro aumenta hasta alcanzar un valor de 2.4cm a los 6 min; a partir del minuto 6 y hasta el minuto 10 este nivel se mantiene constante ya que se ha establecido un equilibrio entre el caudal de entrada y de salida. En el minuto 10 la bomba se apaga y el agua acumulada en el biofiltro continúa fluyendo a través de la tubería de recirculación hacia el tanque dosificador durante un período de aproximadamente 10 min Pasados los 30 minutos la bomba vuelve a encenderse y se repite el proceso (Tabla 1. Anexo 2).

A partir de este gráfico se determina que la tubería de salida debe ubicarse 2.4cm por encima de la tubería de recirculación para garantizar que el volumen necesario de recirculación no sea descargado fuera del sistema.

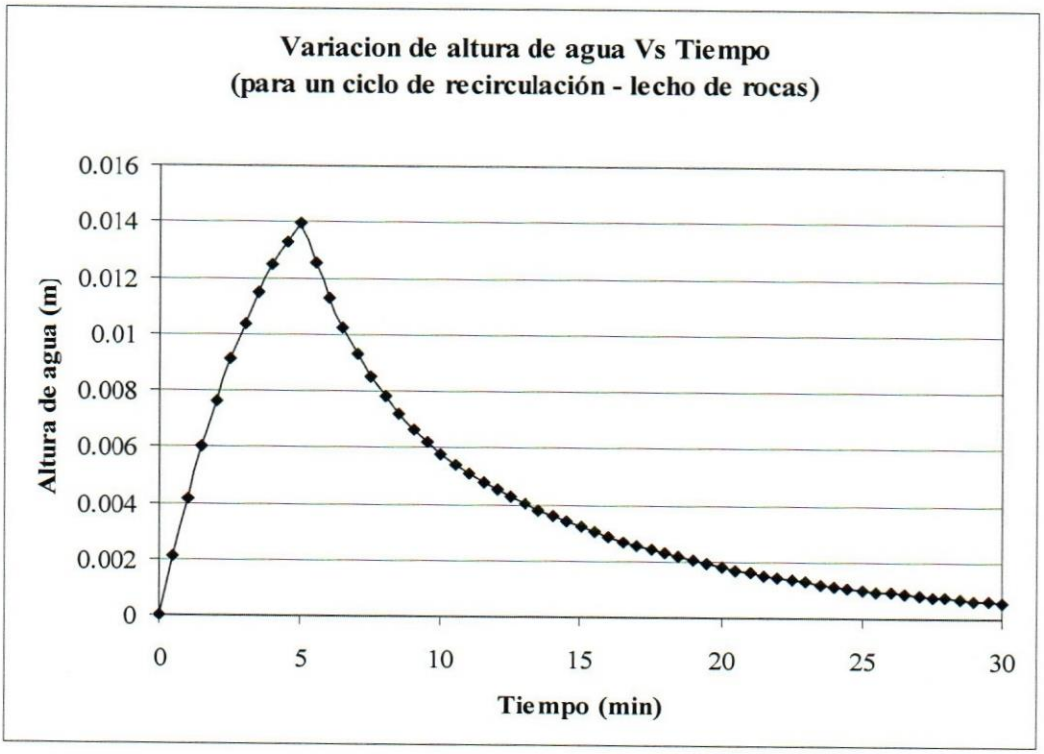


Figura XX Variaciones de altura de agua durante un ciclo de recirculación Lechote roca. Diámetro de la tubería de recirculación ½"

Para el biofiltro con lecho de roca, se ha establecido 5min como el tiempo de operación de la bomba de recirculación. Es posible apreciar que para este caso, a diferencia del biofiltro con lecho sintético, el nivel de agua no llega a estabilizarse; la máxima cota alcanzada indica que la tubería de descarga debe ubicarse por lo menos a 1.4 cm. por encima de la tubería de recirculación (Tabla 1. Anexo 3).

3.- Tiempo de operación de la bomba principal

La bomba principal se enciende cuando el agua alcanza determinado nivel dentro del tanque dosificador y se apaga al llegar a una cota establecida; por lo tanto el tiempo de operación de esta bomba dependerá del volumen de agua que reciba el sistema en cada pico. Para efectos del diseño se ha establecido que la descarga del séptico es de 670 litros en el pico de la mañana y 580 litros en el pico de la noche, por lo tanto se puede asumir que cuando por la tubería de salida ha sido descargado un volumen equivalente al que ha entrado al sistema la bomba debe apagarse.

Al hacer el tránsito de creciente, hay que tener en cuenta que para el caso en estudio, haciendo la similitud con el funcionamiento de un embalse, el alivio puede llegar a ocurrir por dos tuberías (la de la salida y la de recirculación) por lo tanto es necesario generar una curva de gastos total. En la Tabla XX se presenta la curva de gastos total para el Biofiltro con lecho de roca; se observa que se han solapado las curva de gasto correspondiente a cada tubería teniendo en cuenta que la tubería de salida comienza a descargar sólo cuando el nivel de agua ha alcanzado 1,5 cm (cota de la tubería de salida).

Tabla XX. Curvas de gastos. Biofiltro de Roca

Curva de gastos Tubería 1/2"		Curva de gastos Tubería 1"		Curva de gastos total	
HE_1 (cm)	$Q_{1/2"}$ (lps)	HE_2 (cm)	$Q_{1"}$ (lps)	HE (cm)	Q_{suma} (lps)
0,5	0,00482			0,5	0,00482
1,0	0,01588			1,0	0,01588
1,5	0,02823	0,0	0,0000	1,5	0,02823
2,0	0,03758	0,5	0,0073	2,0	0,04486
2,5	0,04502	1,0	0,0272	2,5	0,07226
3,0	0,05139	1,5	0,0561	3,0	0,10753
3,5	0,05706	2,0	0,0898	3,5	0,14687
4,0	0,06221	2,5	0,1250	4,0	0,18721
4,5	0,06697	3,0	0,1597	4,5	0,22666
5,0	0,07141	3,5	0,1880	5,0	0,25944
5,5	0,07559	4,0	0,2126	5,5	0,28816
6,0	0,07955	4,5	0,2346	6,0	0,31411
6,5	0,08332	5,0	0,2547	6,5	0,33798
7,0	0,08693	5,5	0,2733	7,0	0,36021
7,5	0,09040	6,0	0,2907	7,5	0,38111
8,0	0,09373	6,5	0,3072	8,0	0,40089
8,5	0,09695	7,0	0,3228	8,5	0,41972
9,0	0,10007	7,5	0,3377	9,0	0,43773
9,5	0,10310	8,0	0,3519	9,5	0,45501
10,0	0,10604	8,5	0,3656	10,0	0,47165
10,5	0,10889	9,0	0,3788	10,5	0,48771
11,0	0,11168	9,5	0,3916	11,0	0,50326
11,5	0,11440	10,0	0,4039	11,5	0,51834
12,0	0,11705	10,5	0,4159	12,0	0,53298
12,5	0,11965	11,0	0,4276	12,5	0,54723
13,0	0,12219	11,5	0,4389	13,0	0,56112
13,5	0,12468	12,0	0,4500	13,5	0,57467
14,0	0,12712	12,5	0,4608	14,0	0,58790
14,5	0,12951	13,0	0,4713	14,5	0,60085
15,0	0,13186	13,5	0,4816	15,0	0,61351
15,5	0,13417	14,0	0,4917	15,5	0,62592
16,0	0,13644	14,5	0,5016	16,0	0,63809
16,5	0,13868	15,0	0,5114	16,5	0,65003
17,0	0,14088	15,5	0,5209	17,0	0,66175

17,5	0,14304	16,0	0,5302	17,5	0,67327
18,0	0,14517	16,5	0,5394	18,0	0,68459
18,5	0,14727	17,0	0,5485	18,5	0,69573
19,0	0,14935	17,5	0,5573	19,0	0,70669
19,5	0,15139	18,0	0,5661	19,5	0,71749
20,0	0,15340	18,5	0,5747	20,0	0,72812

El tiempo de bombeo, como ya se ha expuesto, puede estimarse con un registro del volumen de salida acumulado; se asume que la bomba principal está en funcionamiento hasta que se haya descargado un volumen equivalente al de entrada, que para efectos del modelo hidráulico en estudio es de 670 litros para la hora pico de la mañana y 580 litros para el pico de la noche. En las Figuras XX y XX se observa que para el biofiltro con lecho plástico el tiempo de operación de la bomba es de aproximadamente 210 minutos (3.5 horas) para el pico de la mañana y de 180 minutos para el pico de la noche.

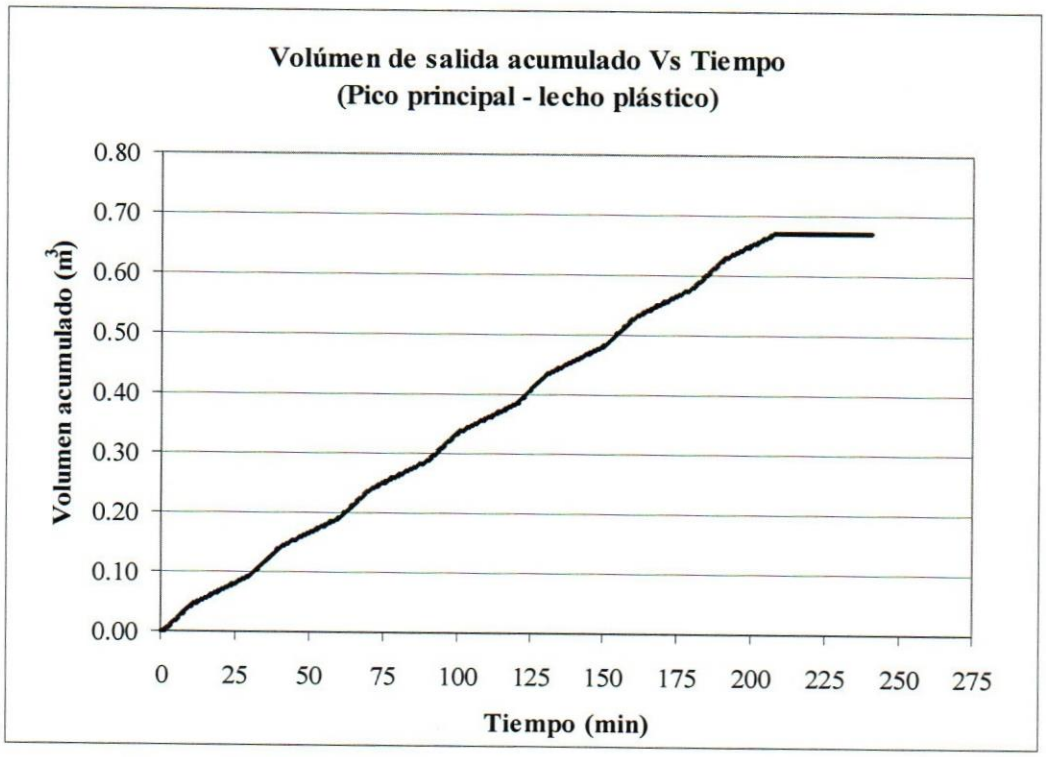


Figura XX Volumen de agua descargado Vs Tiempo de bombeo Pico principal - Lecho plástico.

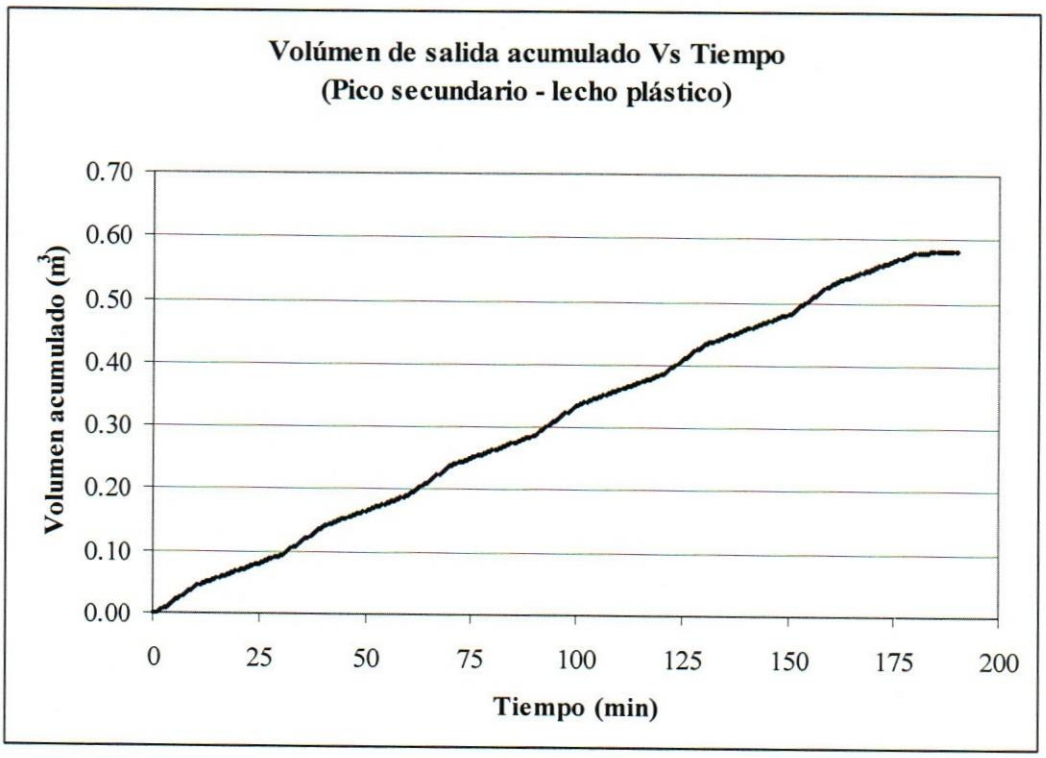


Figura XX Volumen de agua descargado Vs Tiempo de bombeo Pico secundario - Lecho plástico.

En el caso de biofiltro con lecho de rocas, el comportamiento es similar al de lecho plástico, debido a que se ha fijado que el caudal de la bomba principal es igual para ambos casos (Qp = 0.1 lps). Ver Figuras XX y XX

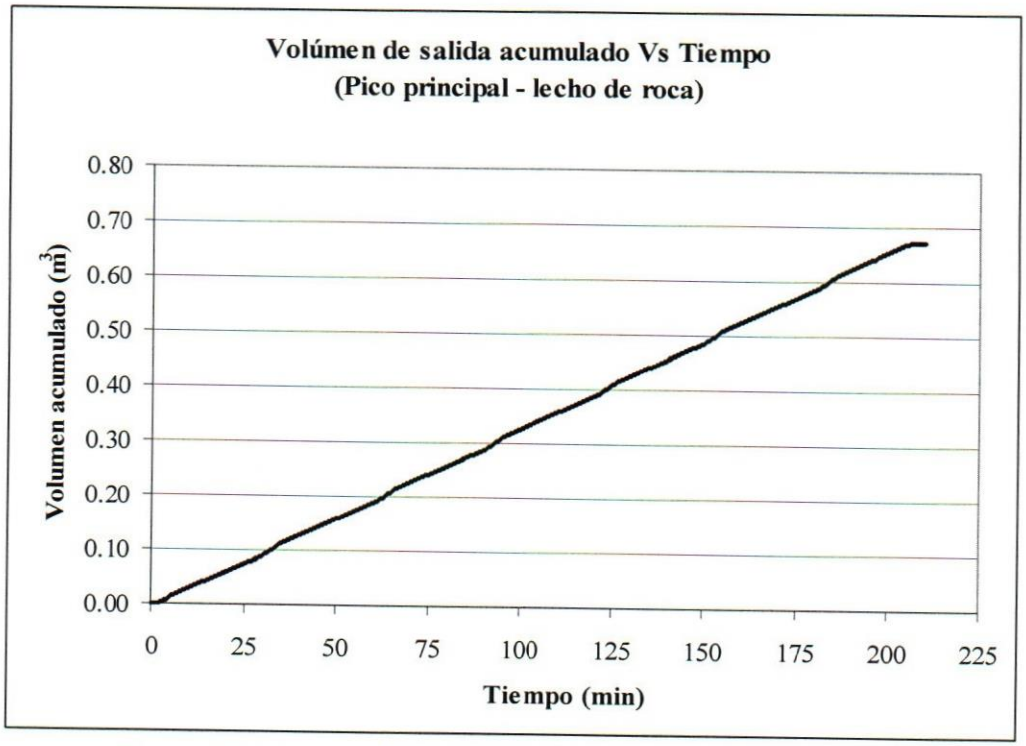


Figura XX Volumen de agua descargado Vs Tiempo de bombeo Pico principal – Lecho de roca.

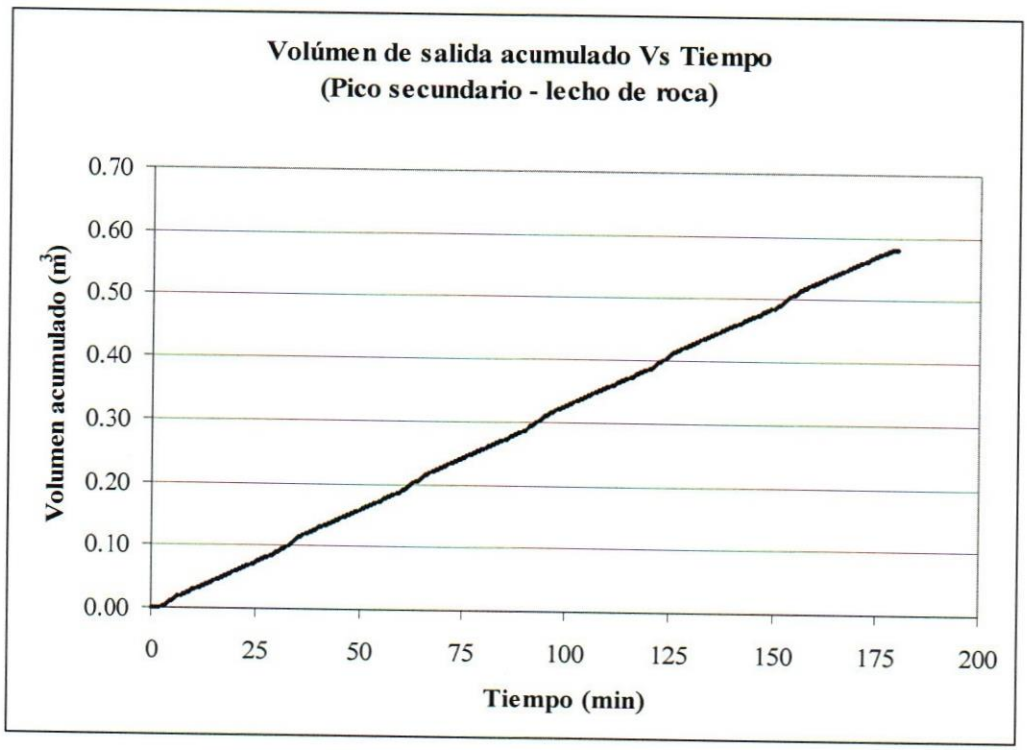


Figura XX Volumen de agua descargado Vs Tiempo de bombeo Pico secundario - Lecho de roca.

ANEXO 1

Diseño Hidráulico
Biofiltro con medio plástico

Tabla 1. Tránsito de creciente - tubería de recirculación

t (min)	Qe (m^3/seg)	$2S_1 / \Delta t - Qss_1$ (m^3/seg)	$2S_2 / \Delta t + Qss_2$ (m^3/seg)	Qs (m^3/seg)	Qe - Qs (m^3/seg)	$\overline{Qe - Qs}$ (m^3/seg)	ΔS (m^3)	S (m^3)	Cota de Agua (m.s.n.m.)	H (m)
0.00	0.000043	0.000000	0.000000	0.000000	0.000043	***	***	0.00	0.000	0.000
0.50	0.000043	0.000066	0.000087	0.000010	0.000033	0.00	0.0011441	0.001144	0.008	0.008
1.00	0.000043	0.000107	0.000153	0.000023	0.000021	0.00	0.0008023	0.001946	0.013	0.013
1.50	0.000043	0.000133	0.000194	0.000030	0.000013	0.00	0.0005037	0.002450	0.016	0.016
2.00	0.000043	0.000151	0.000220	0.000034	0.000009	0.00	0.0003301	0.002780	0.018	0.018
2.50	0.000043	0.000163	0.000238	0.000037	0.000006	0.00	0.0002273	0.003007	0.020	0.020
3.00	0.000043	0.000172	0.000250	0.000039	0.000005	0.00	0.0001605	0.003168	0.021	0.021
3.50	0.000043	0.000179	0.000259	0.000040	0.000003	0.00	0.0001183	0.003286	0.022	0.022
4.00	0.000043	0.000184	0.000266	0.000041	0.000003	0.00	0.0000880	0.003374	0.022	0.022
4.50	0.000043	0.000188	0.000271	0.000041	0.000002	0.00	0.0000655	0.003440	0.023	0.023
5.00	0.000043	0.000191	0.000275	0.000042	0.000001	0.00	0.0000487	0.003489	0.023	0.023
5.50	0.000043	0.000193	0.000277	0.000042	0.000001	0.00	0.0000363	0.003525	0.023	0.023
6.00	0.000043	0.000194	0.000279	0.000043	0.000001	0.00	0.0000270	0.003552	0.023	0.023
6.50	0.000043	0.000195	0.000281	0.000043	0.000001	0.00	0.0000201	0.003572	0.023	0.023
7.00	0.000043	0.000196	0.000282	0.000043	0.000000	0.00	0.0000149	0.003587	0.024	0.024
7.50	0.000043	0.000197	0.000283	0.000043	0.000000	0.00	0.0000111	0.003598	0.024	0.024
8.00	0.000043	0.000197	0.000284	0.000043	0.000000	0.00	0.0000083	0.003606	0.024	0.024
8.50	0.000043	0.000198	0.000284	0.000043	0.000000	0.00	0.0000062	0.003612	0.024	0.024
9.00	0.000043	0.000198	0.000284	0.000043	0.000000	0.00	0.0000046	0.003617	0.024	0.024
9.50	0.000043	0.000198	0.000285	0.000043	0.000000	0.00	0.0000034	0.003620	0.024	0.024
10.00	0.000043	0.000198	0.000285	0.000043	0.000000	0.00	0.0000025	0.003623	0.024	0.024
10.00	0.000000	0.000198	0.000285	0.000043	-0.000043	0.00	0.0000000	0.003623	0.024	0.024
10.50	0.000000	0.000136	0.000198	0.000031	-0.000031	0.00	-0.0011143	0.002509	0.016	0.016
11.00	0.000000	0.000097	0.000136	0.000020	-0.000020	0.00	-0.0007592	0.001749	0.012	0.012
11.50	0.000000	0.000073	0.000097	0.000012	-0.000012	0.00	-0.0004776	0.001272	0.008	0.008
12.00	0.000000	0.000057	0.000073	0.000008	-0.000008	0.00	-0.0003018	0.000970	0.006	0.006
12.50	0.000000	0.000047	0.000057	0.000005	-0.000005	0.00	-0.0001937	0.000776	0.005	0.005
13.00	0.000000	0.000039	0.000047	0.000004	-0.000004	0.00	-0.0001365	0.000640	0.004	0.004
13.50	0.000000	0.000032	0.000039	0.000003	-0.000003	0.00	-0.0001110	0.000529	0.003	0.003
14.00	0.000000	0.000026	0.000032	0.000003	-0.000003	0.00	-0.0000918	0.000437	0.003	0.003
14.50	0.000000	0.000022	0.000026	0.000002	-0.000002	0.00	-0.0000758	0.000361	0.002	0.002
15.00	0.000000	0.000018	0.000022	0.000002	-0.000002	0.00	-0.0000627	0.000299	0.002	0.002
15.50	0.000000	0.000015	0.000018	0.000002	-0.000002	0.00	-0.0000518	0.000247	0.002	0.002
16.00	0.000000	0.000012	0.000015	0.000001	-0.000001	0.00	-0.0000428	0.000204	0.001	0.001
16.50	0.000000	0.000010	0.000012	0.000001	-0.000001	0.00	-0.0000354	0.000169	0.001	0.001
17.00	0.000000	0.000008	0.000010	0.000001	-0.000000882	0.00	-0.0000293	0.000139	0.001	0.001

Tabla 1. Tránsito de creciente - tubería de recirculación

17.50	0.000000	0.000007	0.000008	0.000001	-0.000000729	0.00	-0.0000242	0.000115	0.001	0.001
18.00	0.000000	0.000006	0.000007	0.000001	-0.000000603	0.00	-0.0000200	0.000095	0.001	0.001
18.50	0.000000	0.000005	0.000006	0.000000	-0.000000498	0.00	-0.0000165	0.000079	0.001	0.001
19.00	0.000000	0.000004	0.000005	0.000000	-0.000000412	0.00	-0.0000137	0.000065	0.000	0.000
19.50	0.000000	0.000003	0.000004	0.000000	-0.000000340	0.00	-0.0000113	0.000054	0.000	0.000
20.00	0.000000	0.000003	0.000003	0.000000	-0.000000281	0.00	-0.0000093	0.000044	0.000	0.000
20.50	0.000000	0.000002	0.000003	0.000000	-0.000000233	0.00	-0.0000077	0.000037	0.000	0.000
21.00	0.000000	0.000002	0.000002	0.000000	-0.000000192	0.00	-0.0000064	0.000030	0.000	0.000
21.50	0.000000	0.000002	0.000002	0.000000	-0.000000159	0.00	-0.0000053	0.000025	0.000	0.000
22.00	0.000000	0.000001	0.000002	0.000000	-0.000000131	0.00	-0.0000044	0.000021	0.000	0.000
22.50	0.000000	0.000001	0.000001	0.000000	-0.000000109	0.00	-0.0000036	0.000017	0.000	0.000
23.00	0.000000	0.000001	0.000001	0.000000	-0.000000090	0.00	-0.0000030	0.000014	0.000	0.000
23.50	0.000000	0.000001	0.000001	0.000000	0.000000	0.00	-0.0000025	0.000012	0.000	0.000
24.00	0.000000	0.000001	0.000001	0.000000	0.000000	0.00	-0.0000020	0.000010	0.000	0.000
24.50	0.000000	0.000000	0.000001	0.000000	0.000000	0.00	-0.0000017	0.000008	0.000	0.000
25.00	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	-0.0000014	0.000007	0.000	0.000
25.50	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	-0.0000011	0.000005	0.000	0.000
26.00	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	-0.0000009	0.000005	0.000	0.000
26.50	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	-0.0000008	0.000004	0.000	0.000
27.00	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	-0.0000006	0.000003	0.000	0.000
27.50	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	-0.0000005	0.000003	0.000	0.000
28.00	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	-0.0000004	0.000002	0.000	0.000
28.50	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	-0.0000004	0.000002	0.000	0.000
29.00	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	-0.0000003	0.000001	0.000	0.000
29.50	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	-0.0000002	0.000001	0.000	0.000
30.00	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	-0.0000002	0.000001	0.000	0.000
30.00	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.0000000	0.000001	0.000	0.000
30.00	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00	0.0000000	0.000001	0.000	0.000