



Universidad de San Carlos de Guatemala
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos -ERIS- a nivel Post-grado

**IMPLEMENTACIÓN DEL MATERIAL DENOMINADO
"RIPIO CLASIFICADO DE CONCRETO" COMO MATERIAL FILTRANTE EN
FILTROS PERCOLADORES EN LA PLANTA PILOTO
"ING. ARTURO PAZOS SOSA"**

ESTUDIO ESPECIAL PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL
DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS -
ERIS-

POR EL INGENIERO:

ALEX MANUEL LÓPEZ RAMÍREZ

Asesorado por el Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos

Guatemala, julio de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
**ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS -ERIS- A NIVEL POSTGRADO**



**IMPLEMENTACIÓN DEL MATERIAL DENOMINADO
"RIPIO CLASIFICADO DE CONCRETO" COMO MATERIAL
FILTRANTE EN FILTROS PERCOLADORES EN LA PLANTA
PILOTO "ING. ARTURO PAZOS SOSA"**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

ESTUDIO ESPECIAL PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL
DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS -
ERIS-

POR EL INGENIERO:

ALEX MANUEL LÓPEZ RAMÍREZ

ASESORADO POR EL DR. ING. ADÁN ERNESTO POCASANGRE C.

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICAE)
EN INGENIERA SANITARIA**

GUATEMALA, JULIO DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
**ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS -ERIS- A NIVEL POSTGRADO**



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
SECRETARIA	Ing. Marcia Ivonne Véliz Vargas

DIRECTOR DE LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

EXAMINADOR	MSc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Joram Gil Latoj
EXAMINADOR	Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la Ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración el trabajo de graduación titulado.:

IMPLEMENTACIÓN DEL MATERIAL DENOMINADO "RIPIO CLASIFICADO DE CONCRETO" COMO MATERIAL FILTRANTE EN FILTROS PERCOLADORES EN LA PLANTA PILOTO "ING. ARTURO PAZOS SOSA"

tema que se me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), en junio de 2009.

Atentamente,

Ing. Alex Manuel López Ramírez

Guatemala, julio de 2010

AGRADECIMIENTOS A:

Al Señor Dios Eterno, que ha sido mi fuerza y mi guía cada día de mi vida y por quien estoy en este lugar. A Él debo hasta el aire que respiro; todos los talentos que tengo, Él los depósito en mí, suyos son.

Mis padres, por su apoyo incondicional en todo momento; han sido mi báculo y mi sostén; mi ejemplo y mi motivación para seguir adelante caminando en excelencia.

Mis hermanos, que alegran y llenan mi vida con su gozo y su paz.

Mi esposa e hijo, sin cuyo apoyo constante no hubiera sido posible obtener este triunfo.

Mis amigos, compañeros y catedráticos, quienes han contribuido de muchas formas en este esfuerzo. Los admiro y respeto, he aprendido mucho de ustedes.

A la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recurso Hidráulicos (**ERIS**), por el apoyo brindado.

Al Dr. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, asesor que siempre nos brindó su apoyo en la parte técnica para la realización de este estudio.

Al MSc. Ing. Zenón Much Santos, por habernos brindado apoyo y asesoría en el transcurso de este estudio.

A todo el personal del laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria "**Doctora Alba Estela Tabarini Molina**" de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería.

DEDICATORIA

A ti Señor, eres el amor de mi vida, el primero y el último. Durante este tiempo me has enseñado más que ciencia y me has permitido crecer en todas las áreas de mi vida. Contigo las cargas son ligeras, eres mi luz y mi salvación. Tu bien y misericordia me han alcanzado. ¡Gracias!

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS, merecer de toda la gloria y honra, por brindarme la oportunidad de finalizar una etapa más en mi vida educativa, además de brindarme sabiduría, inteligencia, prudencia, el conocimiento y la fortaleza para soportar los momentos difíciles.

Mis padres, Víctor Manuel López y Graciela Ramírez, por su apoyo moral. Gracias por los consejos que me han ayudado a ser una mejor persona.

Mis hermanos, Erick Florentín y Cristian Iván por su cariño y palabras de aliento.

A toda mi familia, porque con sus oraciones han hecho posible que este proyecto llegue a ser una realidad. Mención especial a mi abuela Mama Tere y a mis tíos Lucía Guadalupe, Edmundo, Obdulio, Eduar.

A mi esposa e hijo, Jessica y Manuel, por su apoyo incondicional y que mi triunfo sea un modelo por seguir de nuestros hijos.

Mis amigos y compañeros, quienes me brindaron su apoyo en todo momento, en especial a Jimmy Cáceres.

Maestros y personal administrativo de la ERIS, por compartir sus conocimientos y experiencias.

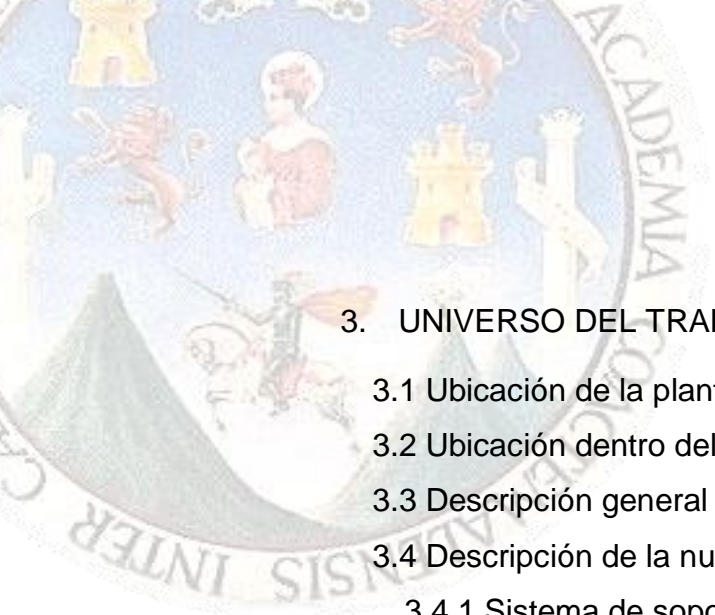


ÍNDICE GENERAL

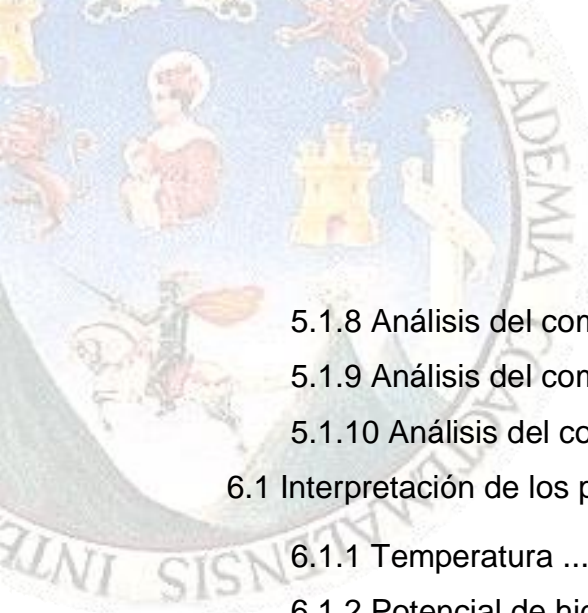
ÍNDICE GENERAL	1
ILUSTRACIONES.....	5
TABLAS	6
RESUMEN	7
1. ASPECTOS GENERALES	8
1.1 Introducción	8
1.2 Antecedentes	9
1.3 Planteamiento del problema.....	10
1.4 Hipótesis	11
1.5 Objetivos.....	11
1.5.1 Generales	11
1.5.2 Específicos	11
1.6 Justificaciones.....	12
1.7 Limitaciones	13
1.8 Alcances de la investigación	13
1.9 Enfoque de la investigación	14
1.10 Diseño de la investigación.....	14
1.11 Selección de la muestra	15
1.12 Recolección de datos	15
1.13 Análisis de datos	16
1.14 Viabilidad de estudio	16
1.15 Resultados esperados.....	16
1.16 Beneficiarios del estudio	17
1.17 Análisis económico del sistema.....	17



1.18	Análisis económico del medio filtrante	18
2.	ASPECTOS TEÓRICOS	19
2.1	Aguas residuales domésticas	19
2.1.1	Composición de las aguas residuales domésticas	20
2.1.2	Características de las aguas residuales domésticas	23
2.2	Tratamiento de aguas residuales por medio de filtro percolador	24
2.2.1	Filtro percolador	24
2.2.2	Clasificación de filtros percoladores	27
2.2.3	Consideraciones sobre el diseño del proceso	29
2.2.4	Diseño de las instalaciones	31
2.2.5	Sistemas de distribución	31
2.2.6	Medios filtrantes	32
2.2.7	Drenaje inferior.....	33
2.2.8	Ventilación	34
2.2.9	Dispositivos de regulación y control	36
2.3	Consideraciones técnicas para el diseño de filtro percolador.....	36
2.3.1	El número de unidades	37
2.3.2	Forma de los filtros.....	37
2.3.3	Velocidad de filtración	38
2.3.4	La turbiedad	38
2.3.5	El color	39
2.3.6	Características del lecho filtrante	39
2.3.7	Tamaño efectivo (E) mm	40
2.3.8	Coefficiente de uniformidad (Cu)	41
2.3.9	Espesor del lecho filtrante (m)	41
2.3.10	Sistemas de drenaje inferior.....	42
2.3.11	Altura de agua sobre el filtro.....	42
2.3.12	Sistemas de limpieza	42
2.3.13	Ventajas de los filtros percoladores con medio filtrante “RCC” ..	43



3. UNIVERSO DEL TRABAJO	45
3.1 Ubicación de la planta de tratamiento de agua residual	45
3.2 Ubicación dentro del proceso:	46
3.3 Descripción general del tratamiento de la planta	47
3.4 Descripción de la nueva unidad piloto filtro percolador	47
3.4.1 Sistema de soporte del material filtrante	47
3.4.2 Sistema de distribución del agua residual	49
3.4.3 Sistema recolector	51
4. METODOLOGÍA	53
4.1 Selección de los parámetros de control	53
4.1.1 Parámetros seleccionados	53
4.2 Tipos de muestreos	54
4.3 Análisis estadístico para determinar el número de muestras	54
4.4 Puntos de muestreo	55
4.5 Medición de caudales	56
4.6 Toma de muestras	56
4.7 Tiempo de retención	57
4.8 Granulometría del medio filtrante	57
4.9 Periodo de arranque del sistema	57
5. RESULTADOS	59
5.1 Tabla de resultados de los muestreos	59
5.1.1 Análisis de reducción de la DBO_5	59
5.1.2 Análisis de reducción de la DQO	60
5.1.3 Análisis del comportamiento del fosfato	62
5.1.4 Análisis del comportamiento de nitratos	63
5.1.5 Análisis del comportamiento de nitritos	64
5.1.6 Análisis del comportamiento del oxígeno disuelto	65
5.1.7 Análisis del comportamiento de los sulfatos	67



5.1.8	Análisis del comportamiento de la temperatura	68
5.1.9	Análisis del comportamiento de pH	69
5.1.10	Análisis del comportamiento de coliformes totales y fecales	70
6.1	Interpretación de los parámetros evaluados	71
6.1.1	Temperatura	71
6.1.2	Potencial de hidrogeno.....	72
6.1.3	Demanda bioquímica de oxígeno	73
6.1.4	Demanda química de oxígeno	74
6.1.5	Relación DBO ₅ /DQO	75
6.2	Comparación de resultados con las normas de Centroamérica	76
CONCLUSIONES		79
RECOMENDACIONES		81



ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura No. 1 Fotografía satelital de la planta experimental:	45
Figura No. 2 Ubicación del proceso de tratamiento	46
Figura No. 3 Fotografías del sistema de soporte del medio filtrante	48
Figura No. 4 Fotografías del sistema de distribución del agua residual	49
Figura No. 5 Fotografías del medio filtrante	50
Figura No. 6 Fotografías del sistema recolector del agua tratada	51
Figura No. 7 Grafica comparativa de eficiencia de la reducción de la DBO ₅ ..	60
Figura No. 8 Grafica comparativa de eficiencia de la reducción de la DQO ..	61
Figura No. 9 Grafica comparativa del comportamiento del fosfato	62
Figura No. 10 Grafica comparativa del comportamiento del nitrato.....	63
Figura No. 11 Grafica comparativa del comportamiento del nitrito	64
Figura No. 12 Grafica del comportamiento del oxígeno disuelto	65
Figura No. 13 Grafica del comportamiento del solidos sedimentables	66
Figura No. 14 Grafica comparativa del comportamiento de los sulfatos.....	67
Figura No. 15 Grafica comparativa del comportamiento de la temperatura ..	68
Figura No. 16 Grafica comparativa del comportamiento del pH	69
Figura No. 17 Grafica del comportamiento de las coliformes totales	70



TABLAS

Tabla I. Presupuesto de construcción del filtro percolador	17
Tabla II. Composición típica del agua residual doméstica bruta	23
Tabla III. Características operacionales los filtros percoladores	28
Tabla IV. Cargas superficiales de filtración según diferentes autores	38
Tabla V. Altura de agua dentro el filtro	42
Tabla VI. Tabla de análisis de reducción de la DBO ₅ según medio filtrante	59
Tabla VII. Tabla de análisis de reducción de la DQO según medio filtrante	61
Tabla VIII. Tabla de análisis del fosfato, según medio filtrante	62
Tabla IX. Tabla de análisis de nitratos según medio filtrante	63
Tabla X. Tabla de análisis de nitritos según medio filtrante	64
Tabla XI. Tabla de análisis del oxígeno disuelto según medio filtrante	65
Tabla XII. Tabla de análisis de los sólidos sedimentables	66
Tabla XIII. Tabla de análisis de los sulfatos según medio filtrante	67
Tabla XIV. Tabla de análisis de la temperatura según medio filtrante	68
Tabla XV. Tabla de análisis del pH según medio filtrante	69
Tabla XVI. Tabla de análisis de las coliformes totales y fecales	70
Tabla XVII. Relación DBO ₅ /DQO	75
Tabla XVIII. Comparación de relaciones DBO ₅ /DQO según tratamiento	75
Tabla XIX. Comparación de relaciones DBO ₅ /DQO	76
Tabla XX. Comparación de resultados con las normas de C.A.	77



RESUMEN

La investigación realizada sobre el uso del desperdicio de la construcción “ripió clasificado” como medio filtrante muestra el trabajo de campo y laboratorio que se efectuó en la implementación y evaluación de una unidad piloto de filtros percoladores que utilizan ripio clasificado como medio filtrante para tratar el efluente proveniente de un proceso biológico de aguas residuales de la colonia Aurora II, zona 13.

El filtro percolador fue evaluado desde el punto de vista de remoción de DBO_5 , DQO, coliformes totales, así como del contenido de nitratos (NO_3^-), fosfatos (PO_4^{3-}), turbiedad y color.

La investigación se basó en la realización de una serie de análisis de granulometría del medio filtrante con el objeto de preparar de manera sencilla el ripio clasificado de concreto deseado para colocarla en la unidad piloto. Esta unidad se construyó de acuerdo con los parámetros de diseño recomendados para filtros percoladores.

Luego, se realizó un registro de control de las pérdidas de carga del filtro con el fin de establecer el tiempo de maduración de la unidad. Así fue como se llevaron a cabo muestreos en la entrada y salida del filtro, los cuales se sometieron a análisis físicos, químicos y bacteriológicos; cuyos resultados fueron satisfactorios en la remoción de DBO_5 , DQO, turbiedad y coliformes totales. Con el presente estudio se pretende responder a las inquietudes que se tienen sobre el uso del ripio clasificado de concreto como medio filtrante en los filtros percoladores.



1. ASPECTOS GENERALES

1.1 Introducción

El presente estudio responde a la necesidad de profundizar en el conocimiento del empleo de nuevas propuestas de materiales para medios filtrantes en filtros percoladores. Para el logro de dicho propósito se llevará a cabo la evaluación de una unidad piloto de filtro percolador, juzgando su funcionamiento desde el punto de vista de la reducción de DBO_5 , DQO, coliformes totales, así como del contenido de nitratos (NO_3^-), fosfatos (PO_4^{3-}), turbiedad y color.

Los parámetros que se utilizarán en la evaluación serán definidos de acuerdo con la recopilación de estudios realizados por estudiantes de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria -ERIS-, además se consultó la información disponible sobre diseño, operación y evaluación de filtros percoladores con el objeto de comparar los resultados prácticos que se esperan con la presente investigación. El principal objetivo de este estudio consiste en comprobar la nueva propuesta del material filtrante denominado “ripió clasificado de concreto” desperdicio de la construcción: también interesa tratar de simplificar el diseño de filtros, ya que el mejor diseño es aquel del que se obtiene calidad óptima de efluente con el equipo más simple, seguro y económico.



1.2 Antecedentes

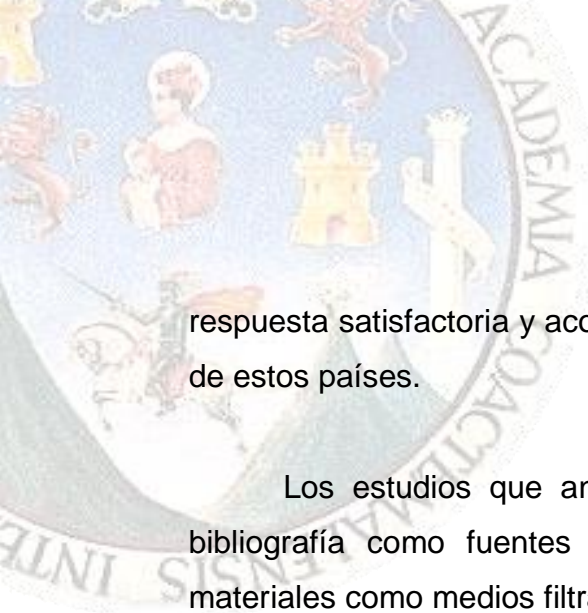
El uso de sistemas de filtros percoladores, denominados también filtros por goteo o filtros biológicos. En los filtros ocurre un proceso biológico tipo aerobio, por lo que debe ingresar aire en la parte superior e inferior de la unidad.

Los filtros percoladores deben diseñarse de modo que se reduzca al mínimo la utilización de equipo mecánico. El tratamiento previo a los filtros percoladores deben ser: rejillas, desarenadores y sedimentación primaria. El tratamiento posterior al filtro percolador debe ser un sedimentador secundario.

Se debe utilizar cualquier sistema de distribución que garantice la repartición uniforme del efluente primario sobre la superficie del medio de contacto.

A pesar de ser un tratamiento de agua de fácil construcción, operación y mantenimiento y simple de funcionar, con el desarrollo alcanzado en los últimos tiempos se ha descuidado su empleo, sin embargo, los avances de nuevas técnicas para el tratamiento de agua no responde a las condiciones económicas y tecnológicas de los países del área por lo que incluso la utilización del filtro percolador se ha limitado dado el alto costo de obtención y preparación del medio filtrante. Por tanto, la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- retoma el proyecto de diseño de un medio filtrante alternativo de bajo costo.

Como respuesta a esta alternativa, la ERIS ha definido una línea de acción con dicho objetivo y ha propuesto temas en los trabajos especiales (previos a la opción del grado de Maestro en Ingeniería Sanitaria), que implican una



respuesta satisfactoria y acorde con las condiciones económicas y tecnológicas de estos países.

Los estudios que anteceden a este trabajo han sido incluidos en la bibliografía como fuentes complementarias del uso alternativo de nuevos materiales como medios filtrantes.

1.3 Planteamiento del problema

En la planta experimental de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria - ERIS- “Ingeniero Arturo Pazos”, se han hecho procesos piloto de tratamiento en la cual en el presente estudio se trata de reutilizar el “ripio clasificado de concreto” desperdicio de la construcción, como medio filtrante teniendo que el mejor diseño es del que se obtiene calidad óptima de efluente con el equipo más simple, seguro y económico.

La falta de un sistema de recolección y disposición económico de tratamientos de agua residuales conduce a la creación e implementación de materiales nuevos de medios filtrantes para el uso de tratamiento en filtros percoladores de una planta de tratamiento de aguas residuales con el fin de mejorar la calidad de las aguas residuales. Es viable reutilizar, en forma adecuada, el desperdicio de la construcción “ripio clasificado de concreto”, por lo que se plantea la posibilidad de utilizar estos materiales de desechos como medio filtrante en filtros biológicos, llamados también filtros percoladores, debido a que sus características y propiedades permiten una adecuada formación biológica para el tratamiento del agua residual.



1.4 Hipótesis

Es posible lograr que el medio filtrante de ripio clasificado de concreto sea una alternativa técnica y económica apropiada para la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno, de la demanda química de oxígeno, sólidos sedimentables, nitratos, nitritos, sulfatos, fosfatos, turbiedad y color del agua residual.

1.5 Objetivos

1.5.1 Generales

- ✓ Construir un filtro percolador empleando ripio clasificado de concreto como medio filtrante, para evaluar la funcionabilidad desde el punto de vista de la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno, de demanda química de oxígeno, sólidos sedimentables, nitratos, nitritos, sulfatos, fosfatos, turbiedad y color.

1.5.2 Específicos

- ✓ Establecer parámetros de diseño para los filtros percoladores que se emplearán como estructura para el material del medio filtrante denominado ripio clasificado de concreto. Dicho diseño contempla toneles metálicos con acabados de pintura anticorrosiva y con plástico protector interior para evitar la corrosión.
- ✓ Conocer las propiedades del ripio de concreto de la construcción como un material adherente y filtrante en el tratamiento de las aguas residuales.
- ✓ Establecer la eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, demanda química de oxígeno, sólidos sedimentables del filtro percolador con medio filtrante denominado ripio clasificado de concreto.



1.6 Justificaciones

Las aguas residuales procedentes de un tratamiento biológico en general presentan alto contenido bacterial y algunos contaminantes que intervienen con posibles usos posteriores tales como el consumo de agua potable, recreación y principalmente riego. Por tanto, la razón fundamental del estudio de ese filtro radica en la capacidad que éste demuestre en la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno, sólidos sedimentables, nitratos, nitritos, sulfatos, fosfatos, turbiedad y color que puedan llevarse a cabo en el proceso de filtración.

El empleo del filtro percolador se justifica cada vez más debido al agotamiento de las fuentes de agua subterránea y al empleo cada vez mayor de las aguas superficiales; sobre todo con el apareamiento de enfermedades como cólera morbus, fiebre tifoidea, shigelosis, poliomiелitis, meningitis, hepatitis A y E y diarrea, enfermedades endémicas en los países del área centroamericana.

Un avance tecnológico práctico de este trabajo marcaría un impacto de proyección de la Universidad de San Carlos de Guatemala, de la Facultad de Ingeniería y específicamente de la ERIS, hacia la identificación y solución de problemas nacionales y regionales.



1.7 Limitaciones

- ✓ La dedicación al trabajo de graduación se limita por la escasa disponibilidad de tiempo a causa de la excesiva carga académica del pensum de estudios de la ERIS.
- ✓ El material por investigar puede tener el constante desgaste de su granulometría y perder volumen que ocasiona menos adherencia y funcionalidad del medio filtrante.

1.8 Alcances de la investigación

El agua tratada por el filtro percolador está contaminada con desechos de origen doméstico que para su tratamiento fueron sometidos a los siguientes procesos:

- a) Sedimentación.
- b) Tratamientos biológicos (anaerobio y aerobio)
- c) Remoción de nutrientes.

El alcance del futuro estudio es lograr mejor calidad del efluente agregando a los procesos antes descritos el de la remoción bacteriana mediante el filtro percolador.



1.9 Enfoque de la investigación

Se considera que el alcance del presente estudio de graduación es de tipo correlacional-descriptivo, puesto que se pretende correlacionar y determinar si el material cumple la función en proceso de tratamiento del agua residual como medio filtrante.

1.10 Diseño de la investigación

El trabajo de graduación tendrá principalmente un diseño de tipo:

Experimental: en este caso el investigador desea comprobar los efectos de una intervención específica, tiene un papel activo, pues lleva a cabo una intervención en el funcionamiento convencional del filtro al introducir modificaciones en el lecho filtrante.

Cuantitativo: tiende a ser altamente estructurado, de modo que el investigador especificará las características principales del diseño antes de obtener un solo dato.

Longitudinal: se reúnen datos útiles para el tratamiento de problemas de investigación que involucran tendencias, cambios o desarrollos a través del tiempo, o bien, en los casos en que se busque demostrar la secuencia temporal de los fenómenos.



1.11 Selección de la muestra

Debido a que el presente estudio es de tipo correlacional-descriptivo sobre multivariabes observables a un único sujeto de estudio, la muestra se limita a dicho sujeto, es decir, el filtro percolador en observación. Sobre dicho sujeto se seleccionará la muestra de observación de la siguiente manera:

- ✓ Unidad de análisis: muestras puntuales y discretas de agua para análisis de laboratorio.
- ✓ Tamaño de la muestra: se tomarán dos muestras con frecuencia de cada quince días durante un período de estudio de tres meses, aproximadamente doce muestras.

1.12 Recolección de datos

Los datos observados en el sujeto de estudio del medio filtrante en un filtro percolador se recopilarán mediante los siguientes instrumentos:

- ✓ Recolección de datos por medio de muestreos de campo.
- ✓ Variables por medir: ocho parámetros fisicoquímicos y tres parámetros hidráulicos de operación.
- ✓ Almacenamiento de datos: mediante tablas comparativas en función del tiempo.



1.13 Análisis de datos

Se considera un objeto de estudio multivariables, pues son diferentes parámetros los que apoyan la conclusión del cumplimiento de los objetivos.

Se utilizarán algunos instrumentos de la estadística descriptiva, como correlaciones lineales, cálculo de tasas, etc.

1.14 Viabilidad de estudio

El proyecto de investigación propuesto se considera viable en varios aspectos:

- ✓ Viabilidad técnica: se cuenta con respaldo técnico, asesoría y disponibilidad local de los materiales e insumos necesarios, así como mano de obra.
- ✓ Viabilidad financiera: se cuenta con disponibilidad para gestionar los recursos financieros necesarios para desarrollar físicamente el proyecto.
- ✓ Viabilidad institucional: los resultados esperados son de interés para las instituciones involucradas.

1.15 Resultados esperados

Al finalizar el presente proyecto de investigación se espera haber logrado lo siguiente:

- ✓ Tener un documento de respaldo para las empresas y colegas que deseen incentivar y proponer alternativas nuevas y de bajo costo para el tratamiento del agua residual por medio de filtros percoladores.
- ✓ Que los Ingenieros Sanitaristas diseñadores de sistemas de tratamiento de aguas residuales por filtros percoladores utilicen este documento como guía de diseño y método de trabajo.

1.16 Beneficiarios del estudio

- ✓ Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Ingeniero Arturo Pazos”, Aurora II
- ✓ Tesario de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria ERIS/USAC
- ✓ Las instituciones que darán el apoyo para la elaboración del estudio.

1.17 Análisis económico del sistema

La construcción del filtro percolador se divide de la siguiente manera según el costo de inversión por unidad del filtro percolador.

Tabla I. Presupuesto de construcción del filtro percolador

Cantidad	Descripción	Unidad	Precio unitario	Costo total
2.00	toneles metálicos (recipiente contenedor del medio filtrante)	unidad	Q. 125.00	Q. 250.00
0.55	pintura anticorrosiva (protección interna y externa del filtro)	galón	Q. 300.00	Q. 165.00
1.00	nailon color negro (aislante entre medio filtrante y toneles metálicos)	global	Q. 25.00	Q. 25.00

1.00	accesorios de pvc y llaves	global	Q. 250.00	Q. 250.00
1.00	materiales de diversos (para base de concreto y malla galvanizada)	global	Q. 200.00	Q. 200.00
1.00	transporte de los materiales p/filtro percolador	unidad	Q. 175.00	Q. 175.00
1.00	mano de obra calificada por ensamble y colocación del filtro percolador+base+accesorios	global	Q. 350.00	Q. 350.00
Costo por unidad de filtro percolador				Q. 1,415.00

1.18 Análisis económico del medio filtrante

La relación del costo de colocación y manejo del medio filtrante se muestra de la siguiente manera:

- ✓ Costo del metro cubico colocado del material filtrante ripio clasificado de concreto incluyendo extracción, transporte, clasificación y colocación es de alrededor de Q. 150.00
- ✓ Costo del metro cubico colocado del material filtrante PET incluyendo fabricación, transporte y colocación es de alrededor de Q. 250.00
- ✓ Costo del metro cubico colocado del material filtrante roca volcánica incluyendo extracción, transporte y colocación es de alrededor de Q. 350.00
- ✓ Costo de metro cubico colocado de material filtrante de piedra bola incluyendo extracción, transporte y colocación es de alrededor de Q. 250.00

Teniendo las alternativas anteriores de medio filtrante reflejan la ventaja económica del ripio clasificado con respecto a los demás materias filtrante teniendo como conclusión que el ripio clasificado de concreto es una alternativa altamente económica para el uso del medio filtrante de un filtro percolador.



2. ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 Aguas residuales domésticas

De acuerdo con McKinney (1 992), una de las mayores funciones del ingeniero sanitarista consiste en diseñar adecuadamente sistemas en los que las aguas residuales sean colectadas y dispuestas sin causar daños a la salud y al ambiente.

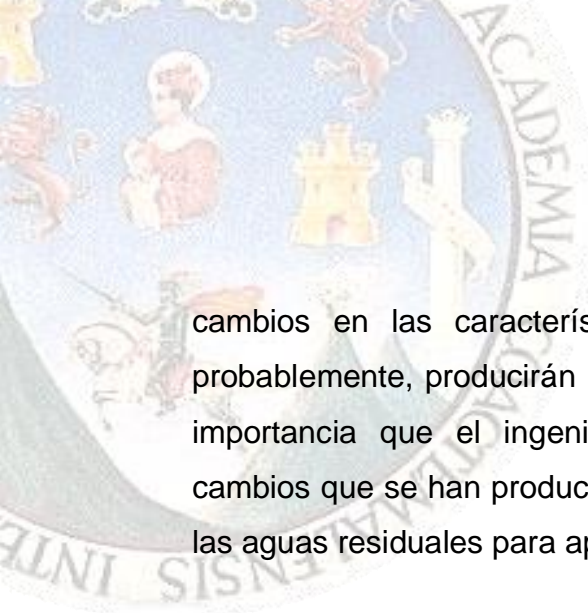
Hay dos grandes grupos de aguas residuales:

- ✓ Aguas residuales de origen doméstico
- ✓ Aguas residuales de origen industrial

Las características de estos tipos de aguas residuales son diferentes una con respecto a la otra, como consecuencia, sus tratamientos también deben serlo. Por ser objeto del presente estudio evaluar opciones de tratamiento para aguas residuales domésticas se dejarán a un lado las aguas residuales de origen industrial.

Las aguas residuales de las casas, provenientes de áreas residenciales, son definidas como aguas residuales domésticas; sus características son relativamente constantes. Las aguas residuales domésticas de una residencia son aproximadamente las mismas de cualquier otra residencia del área de una región o de un país. McKinney (1 962).

La diferencia de las aguas residuales entre los países desarrollados y los que se encuentran en vías de desarrollo puede atribuirse a factores como los cambios tecnológicos de la civilización moderna, que han producido ciertos




cambios en las características de las aguas residuales domésticas y, probablemente, producirán más en los siguientes años. Por ello es de suma importancia que el ingeniero sanitaria esté prevenido acerca de los cambios que se han producido y pueden producirse en las características de las aguas residuales para aplicar el tratamiento adecuado. McKinney (1962).

2.1.1 Composición de las aguas residuales domésticas

De acuerdo con el Departamento de Sanidad del estado de Nueva York (1964), las aguas residuales consisten en: agua, los sólidos disueltos y los sólidos suspendidos en ella. El agua provee solamente el volumen y es el vehículo para el transporte de los sólidos, los cuales pueden estar disueltos, suspendidos o flotando.

Los sólidos de las aguas residuales pueden clasificarse en dos grupos generales: según su composición o su condición física. Sólidos orgánicos e inorgánicos, los cuales a su vez pueden estar suspendidos o disueltos.

Los sólidos orgánicos: en general, son de origen animal o vegetal, que incluyen los productos de desechos animal y vegetal, la materia animal muerta, organismos o tejidos vegetales; pero pueden incluirse compuestos orgánicos sintéticos. Son sustancias que contienen carbono, hidrógeno y oxígeno; algunos pueden estar combinados con nitrógeno, azufre y fósforo. Los grupos principales son: proteínas, los hidratos de carbono y las grasas, junto con sus productos de descomposición. Están sujetos a degradación o descomposición por la actividad de las bacterias y otros organismos vivos; además, son combustible, es decir, pueden ser quemados.

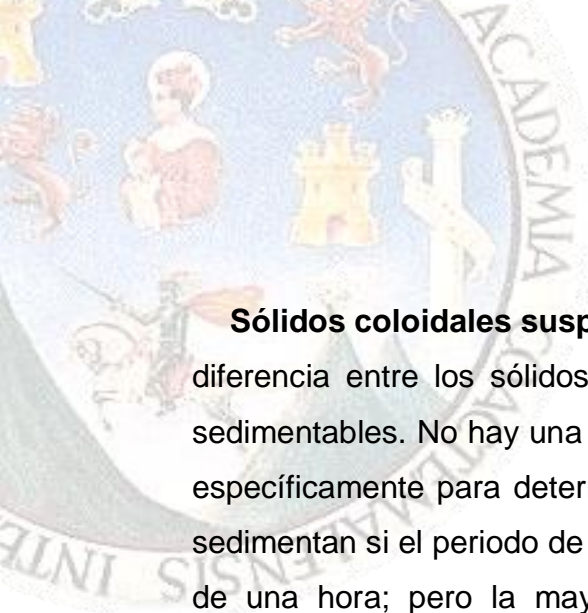


Sólidos inorgánicos: son sustancias inertes que no están sujetas a la degradación. Ciertos compuestos minerales se exceptúan de estas características, son sustancias más simples, como sucede en la reducción de los sulfatos a sulfuros. A los sólidos inorgánicos se les conoce como sustancias minerales: arena, grava, cieno y sales minerales del abastecimiento de agua que produce su dureza y contenido mineral. Por lo general, no son combustibles.

La cantidad de sólidos, tanto orgánicos como inorgánicos en las aguas residuales les da lo que frecuentemente se conoce como su fuerza. En realidad, la cantidad o concentración de los sólidos orgánicos, así como su capacidad para degradarse o descomponerse, es la parte principal de la fuerza de un agua residual. A mayor concentración de sólidos orgánicos, corresponde mayor fuerza de las aguas residuales.

Sólidos suspendidos: son los que están en suspensión y que son perceptibles a simple vista en el agua. Son los sólidos que pueden separarse de las aguas residuales por medios físicos o mecánicos, como la sedimentación y la filtración. Incluye las partículas flotantes mayores. Los sólidos suspendidos se dividen en dos partes: sólidos sedimentables y sólidos coloidales. Departamento de Sanidad del estado de Nueva York (1 964).

Sólidos sedimentables: son la porción de los sólidos suspendidos cuyo tamaño y peso es suficiente para que sedimente en un periodo determinado que, generalmente, es una hora. Debe entenderse que son los sólidos que sedimentan en una hora en un cono Imhoff. Generalmente, los resultados se expresan en mililitros de sólidos por litro de agua residual.



Sólidos coloidales suspendidos: se definen, de forma indirecta, como la diferencia entre los sólidos suspendidos totales y los sólidos suspendidos sedimentables. No hay una prueba sencilla o normal de laboratorio que sirva específicamente para determinar la materia coloidal. Una parte de estos se sedimentan si el periodo de reposo de la prueba del cono Imhoff fuese mayor de una hora; pero la mayor parte permanecería en suspensión durante periodos de varios días o más. Constituyen la fracción de sólidos suspendidos totales que no puede eliminarse fácilmente recurriendo a tratamientos físicos o mecánicos. Están sujetos a una rápida degradación y son un factor importante en el tratamiento y disposición de las aguas residuales.

Sólidos disueltos: este término utilizado de ordinario en los estudios de aguas residuales, no es técnicamente correcto. No todos los sólidos están verdaderamente disueltos, puesto que se incluyen sólidos en estado coloidal. La porción coloidal contiene mayor porcentaje de materia orgánica que la verdaderamente disuelta, debido a que ésta incluye todas las sales minerales del agua.

Sólidos totales: con este nombre se distinguen todos los constituyentes sólidos de las aguas residuales. Es la totalidad de sólidos orgánicos e inorgánicos, o la totalidad de sólidos suspendidos y disueltos. En las aguas residuales domésticas de composición media, cerca de la mitad son orgánicas y la otra mitad inorgánica y, aproximadamente unas dos terceras partes están en solución y una tercera parte, en suspensión. Es esa mitad orgánica de los sólidos sujeta a degradación es la que constituye el problema principal de tratamiento de aguas residuales.

2.1.2 Características de las aguas residuales domésticas

Según Fair et al (1973), las condiciones de las aguas residuales en las plantas de tratamiento o de la descarga del sistema de alcantarillado, es una función del tiempo de recorrido y de las temperaturas de las aguas de desecho; el tiempo depende de la longitud y de la pendiente del sistema colector. Las líneas largas con pendientes pequeñas (flujo lento) y las temperaturas altas destruyen la frescura de las aguas residuales. Las aguas residuales domésticas, frescas, tienen escaso olor, son de color gris y contienen oxígeno disuelto; sus sólidos retienen mucho de su volumen original.

De acuerdo con Metcalf & Eddy (1996), las aguas residuales se determinan por su composición física, química y biológica, pero existen parámetros preestablecidos para fijar los principales componentes que ayudan a la caracterización de las aguas, tal como se muestra en la tabla I. Composición típica del agua residual doméstica bruta.

Tabla II. Composición típica del agua residual doméstica bruta

Contaminante	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Alta
Sólidos totales	mg/l	350	720	1200
Sólidos sedimentables	ml/l	5	10	20
DBO ₅	mg/l	110	220	400
DBQ	mg/l	250	500	1000
Nitrógeno total	mg/l	20	40	85
Fósforo total	mg/l	4	8	15
Coliformes totales	NMP/100 cm ³	106 - 107	107 - 108	107 - 109

Fuente: Metcalf & Eddy. 1996




2.2 Tratamiento de aguas residuales por medio de filtro percolador

2.2.1 Filtro percolador

El concepto del filtro percolador nació del uso de los filtros de contacto, que eran estanques impermeables rellenos con piedra machacada. En su funcionamiento, el lecho de contacto se llenaba con el agua residual desde la parte superior y se dejaba que se pudiese en contacto con el medio durante un corto período de tiempo. El lecho se vaciaba a continuación y se le permitía que reposase antes de que se repitiese el ciclo. Un ciclo típico exigía 12 horas de las cuales había seis horas de reposo. Las limitaciones del filtro de contacto incluyen una posibilidad relativamente alta de obturaciones, el prolongado período de tiempo de reposos necesario y la carga relativamente baja que podía utilizarse

En el filtro percolador el agua residual es rociado sobre el ripio clasificado de concreto y se deja que se filtre a través del lecho, este filtro consiste en un lecho formado por un medio sumamente permeable al que los microorganismos se adhieren y a través del cual se filtra el agua residual. El tamaño de las piedras de que consta el medio filtrante está entre 4 – 5 cm de diámetro, la profundidad está de acuerdo con el diseño particular, de 0.9 – 2.4 m con un promedio de profundidad de 1.8 m.

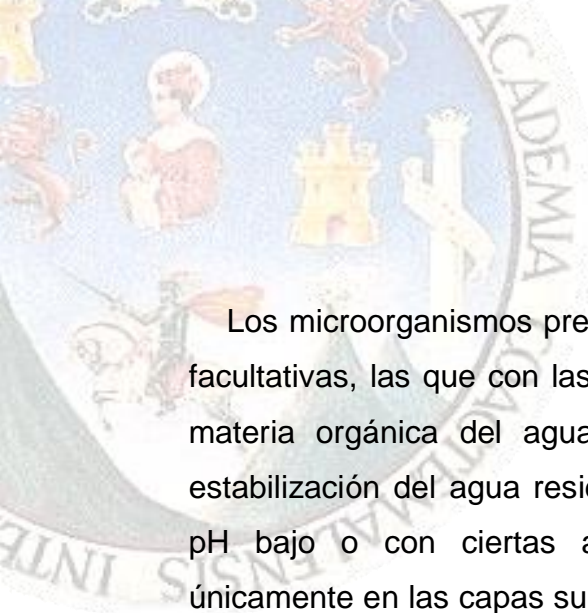
Actualmente el lecho del filtro es circular y el residuo líquido se distribuye por encima del lecho mediante un distribuidor y el agua residual se distribuía mediante una válvula de paso fija; cada uno de los filtros posee un sistema de desagüe inferior el cual recoge el agua tratada y los sólidos biológicos que se



han separado del medio, este sistema de desagüe es importante tanto como instalación de recogida como por su estructura porosa a través de la que el aire puede circular.

La materia orgánica presente en el agua residual es degradada por la población de microorganismos adherida al medio filtrante, esta materia es absorbida sobre una capa viscosa (película biológica), en cuyas capas externas es degradada por los microorganismos aerobios. A medida que los microorganismos crecen el espesor de la película aumenta y el oxígeno es consumido antes de que pueda penetrar todo el espesor de la película, por lo que se establece un medio ambiente anaerobio, cerca de la superficie del medio. Conforme esto ocurre la materia orgánica absorbida es metabolizada antes de que pueda alcanzar los microorganismos situados cerca de la superficie del medio filtrante. Como resultado de carecer de una fuente orgánica externa de carbón celular, los microorganismos situados cerca de la superficie del medio filtrante se hallan en la fase endógena de crecimiento, en la que pierden la capacidad de adherirse a la superficie del medio. En estas condiciones el líquido a su paso a través del medio filtrante arrastra la película y comienza el crecimiento de una nueva, esta pérdida de la película es función de la carga hidráulica y orgánica del filtro, donde la carga hidráulica origina las velocidades de arrastre y la orgánica influye en las velocidades del metabolismo de la película biológica, con base en estas cargas hidráulica y orgánica los filtros pueden dividirse en dos tipos: de baja y alta carga.

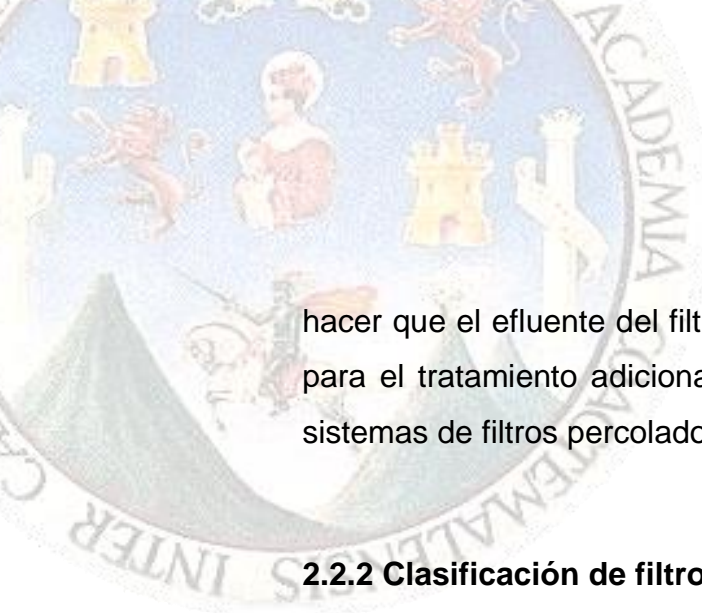
La comunidad biológica presente en un filtro se compone principalmente de protistas, incluyendo bacterias facultativas, aerobias y anaerobias, hongos, algas y protozoos. Suelen también encontrarse algunos animales superiores como gusanos, larvas de insectos y caracoles.



Los microorganismos predominantes en el filtro percolador son las bacterias facultativas, las que con las bacterias anaerobias y aerobias, descomponen la materia orgánica del agua residual; los hongos son los causantes de la estabilización del agua residual, pero su contribución es importante solo a un pH bajo o con ciertas aguas residuales industriales; las algas crecen únicamente en las capas superiores del filtro a donde llega la luz solar, por esta razón las algas no toman parte directa en la degradación de residuos, pero durante el día añaden oxígeno al agua residual que se está filtrando. Sin embargo, desde el punto de vista operacional las algas pueden causar el taponamiento de la superficie del filtro por lo que se consideran un estorbo. De los protozoos que se encuentran en el filtro, predominan los del grupo ciliata, cuya función no es estabilizar el agua residual, sino controlar la población bacteriana. Los animales superiores se alimentan de las capas biológicas del filtro, así ayudan a mantener la población bacteriana en estado de gran crecimiento o rápida utilización del alimento.

Las poblaciones individuales de la comunidad biológica sufrirán variaciones en toda la profundidad del filtro en función de los cambios en la carga orgánica hidráulica, composición del agua residual afluyente, disponibilidad del aire, temperatura, pH y otros.

La instalación de sedimentación es muy importante en el proceso del filtro percolador, pues es necesaria para eliminar los sólidos suspendidos que se desprenden durante los períodos de descarga en los filtros; si se utiliza recirculación una parte de estos sólidos sedimentados podría ser reciclada y el resto debe desecharse. Pero la recirculación de los sólidos sedimentados no es tan importante en este proceso, la mayoría de los microorganismos se adhieren al medio filtrante, la recirculación podría ayudar a la inoculación del filtro, sin embargo, los objetivos principales de ésta son disminuir las aguas residuales y



hacer que el efluente del filtro se ponga en contacto de nuevo con la población para el tratamiento adicional, la recirculación casi siempre forma parte de los sistemas de filtros percoladores de alta carga.

2.2.2 Clasificación de filtros percoladores

Los filtros percoladores se clasifican, según su carga hidráulica y su carga orgánica en dos tipos:

1. Filtro de alta carga.
2. Filtro de baja carga

2.2.2.1 Filtro de baja carga

Es un dispositivo relativamente sencillo y de funcionamiento seguro, que produce una cantidad estable de efluente, sin perjuicio de que el efluente sea de naturaleza cambiante. Predomina en él una gran población de bacterias nitrificantes, por lo que el efluente es pobre en amoníaco y rico en nitritos y nitratos. La pérdida de carga a través del filtro puede ser 1.5 – 3 m, lo que puede ser un impedimento si el terreno es demasiado plano para permitir la circulación por gravedad. Con una pendiente favorable, la posibilidad de utilizar la circulación por gravedad es una ventaja. Sin embargo, los filtros de este tipo también tienen algunos inconvenientes. Los olores son un problema frecuente, especialmente si el agua residual es poco reciente o séptica o si el clima es cálido. Los filtros no deberán colocarse en donde los olores puedan causar problemas. Las moscas (*psychoda*) se desarrollarán en los filtros, a menos que se tomen medidas de precaución para su control.

2.2.2.2 Filtro de alta carga

La recirculación del efluente final o efluente del filtro permite la aplicación de mayores cargas orgánicas. La recirculación del efluente desde el clarificador del filtro percolador permite que este tipo de filtro alcance la misma eficiencia de eliminación que los filtros normales o de baja carga. La recirculación del efluente alrededor del filtro da como resultado el retorno de organismos viables. Se ha observado que este método de operación mejora, con frecuencia, la eficiencia del tratamiento. La recirculación evita la obstrucción del filtro y reduce los problemas derivados del olor y las moscas."

Tabla III. Características operacionales los filtros percoladores

Factor	Filtro baja carga	Filtro alta carga
Carga hidráulica, en miles de m ³ / día	1.12 a 4.5	11.2 a 45
Carga orgánica, en DBO ₅ /m ³ *día	1 a 3.3	3.3 a 16.5
Profundidad, en m	1.8 a 3	0.9 a 2.4
Recirculación	Ninguna	1 : 1 a 4 : 1
Volumen de piedra	5 a 10 veces	1
Moscas en el filtro	Muchas	Pocas, las larvas son eliminadas
Arrastre de sólidos	Intermitente	Continua
Operación	Simple	Alguna práctica
Intervalo de alimentación	No superior a 5 min (generalmente intermitente)	No superior a 15 s (continuo)
Efluente	Totalmente nitrificado	Nitrificación a bajas cargas

Fuente: Metcalf & Eddy. 1 996

2.2.3 Consideraciones sobre el diseño del proceso

Al diseñar filtros percoladores se deben considerar tanto las cargas orgánicas como las hidráulicas, además del grado requerido de purificación.

La fórmula de Velz relaciona la eficiencia de tratamiento con la profundidad del medio de:

$$\frac{L_D}{L} = 10^{-33KD} \text{ Ec. 1.2-1}$$

Donde:

L = DBOL, aplicada que es eliminable, no por encima de 0.90 O; LO es la DBO aplicada.

LD = fracción del a DBOL que permanece a la profundidad D

K = tasa de eliminación (0.715 para filtros de baja carga, 0.15 para filtros de alta carga)

D = profundidad en m

Cuando se use recirculación, la DBOa aplicada se calcula mediante la ecuación que sigue:

$$La = \frac{LO + RL_e}{1 + R} \text{ Ec. 1.2-2}$$

Donde:

L_μ = DBOL aplicada a tras dilución por recirculación.

LO = DBO_L de agua residual sin tratar

Le = DBO_L del efluente

R = relación de recirculación Q_r / Q

Las ecuaciones del NRC para el rendimiento de filtros percoladores son expresiones empíricas desarrolladas con base en un estudio exhaustivo de los registros de funcionamiento de plantas con dichos filtros. Las fórmulas son aplicables a sistemas de fase única y de múltiples fases, con distintos factores de recirculación. La ecuación para un filtro de una sola fase o para la primera fase de una serie será:



$$E_1 = \frac{1}{1 + 0.433 \sqrt{\frac{WV}{F}}} \text{ Ec. 1.2-3}$$

Donde:

E_1 = eficiencia de la eliminación DBO para el proceso, incluyendo recirculación y sedimentación

W = carga de DBO al filtro, en kg/día

D = volumen del medio filtrante en m^3

F = factor de recirculación

El factor de recirculación se calcula utilizando la ecuación siguiente:

$$F = \frac{1 + R}{\left(1 + \frac{R}{10}\right)^2} \text{ Ec. 1.2-4}$$

El factor de recirculación representa el promedio de veces que pasa la materia orgánica afluyente a través del filtro. El término $R/10$ tiene en cuenta la observación experimental de que la facilidad de eliminación de la materia orgánica parece decrecer cuando aumenta el número de pasadas.

Para un filtro de segunda fase la ecuación será:

$$E_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{0.443}{1 - E_1}\right)^* \sqrt{\frac{W'}{VF}}} \text{ Ec. 1.2-5}$$

Donde:

E_2 = eficiencia de la eliminación de DBO para un proceso de filtración de segunda fase, incluyendo recirculación y sedimentación.

W' = carga de DBO al filtro de segunda fase, kg/día.



2.2.4 Diseño de las instalaciones

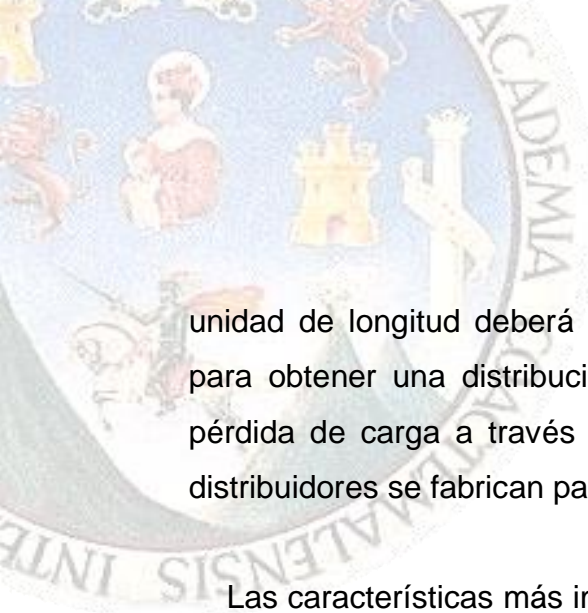
Los factores por considerar en el diseño de filtros percoladores son:

1. Tipo y características de alimentación del sistema de distribución.
2. Tipo de medio filtrante por utilizar.
3. Configuración del sistema de drenaje inferior.
4. Provisión de la ventilación adecuada, bien por corriente de aire natural de aire, o forzada.
5. Diseño de los depósitos de sedimentación requeridos.

2.2.5 Sistemas de distribución

El distribuidor rotativo en filtro percolador se ha convertido en un elemento estándar del proceso por su fiabilidad y facilidad en el mantenimiento. Este consiste en dos o más brazos montados sobre un pivote en el centro del filtro que giran en el plano horizontal, los brazos son huecos y tiene boquillas por las que se descarga residual sobre el lecho del filtro, el distribuidor puede ser impulsado por un motor eléctrico o por la reacción dinámica del agua residual que descarga por las boquillas. La velocidad de giro variará con el caudal en la unidad accionada por reacción, pero deberá ser del orden de una vuelta cada 10 min o menor en un distribuidor de dos brazos, la distancia entre el fondo del brazo del distribuidor y la parte superior del lecho deberá ser de 15 – 22 cm, esto permitirá que el agua residual salga de las boquillas, se extienda y cubra de manera uniforme todo el lecho; así se evita que en época de heladas el hielo acumulado interfiera con el movimiento del distribuidor.

Las boquillas de los brazos del distribuidor de sección transversal constante en las unidades pequeñas o de sección decreciente para una velocidad mínima de transporte, deberán ser espaciadas de forma irregular para conseguir más flujo por unidad de longitud cerca de la periferia que en el centro. El flujo por



unidad de longitud deberá ser proporcional a la distancia del centro del filtro para obtener una distribución uniforme sobre toda la superficie del filtro. La pérdida de carga a través del distribuidor es del orden de 0.6 – 1.5 m. Los distribuidores se fabrican para lechos con diámetros de hasta 60 m.

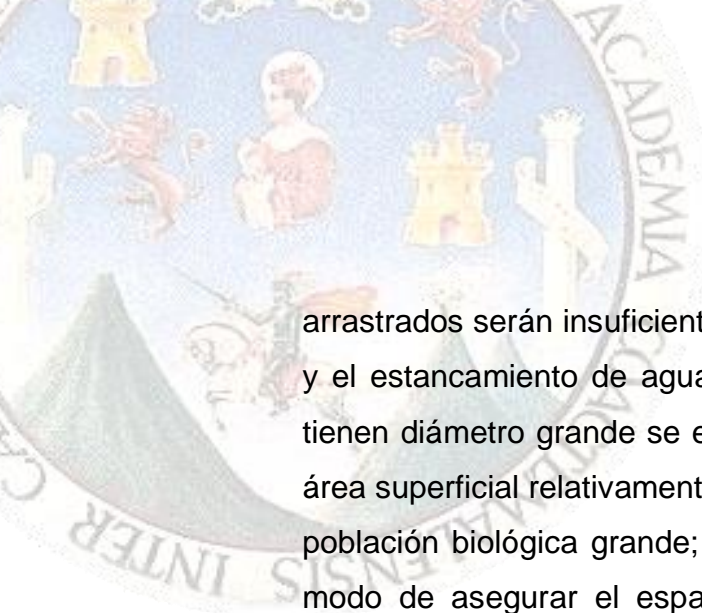
Las características más importantes que se debe tener en cuenta al elegir un distribuidor son:

- ✓ Robustez de construcción.
- ✓ Facilidad de limpieza.
- ✓ Capacidad de manejar grandes variaciones de caudal manteniendo la adecuada velocidad de giro.
- ✓ Resistencia a la corrosión.

Se pueden usar tanques de alimentación de operación intermitente o recirculación para asegurar que el caudal mínimo será suficiente para hacer girar el distribuidor y descargar el agua residual por las boquillas. Se pueden instalar distribuidores de cuatro brazos con sistemas de vertedero que limita el caudal a dos brazos durante dos caudales mínimos.

2.2.6 Medios filtrantes

El medio filtrante ideal es un material de elevada área superficial por unidad de volumen, que sea económico y duradero y que no se obstruya fácilmente. El material más aconsejable suele ser grava o piedra triturada clasificada por tamaño uniforme, generalmente 2.5 – 7.5 cm, la roca volcánica es conveniente, también se usan materiales tales como escoria, cenizas o antracita. No se aconseja usar piedras de diámetro inferior a 2.5 cm, pues el espacio de poros entre las piedras que permiten la libre fluencia del agua residual y los sólidos



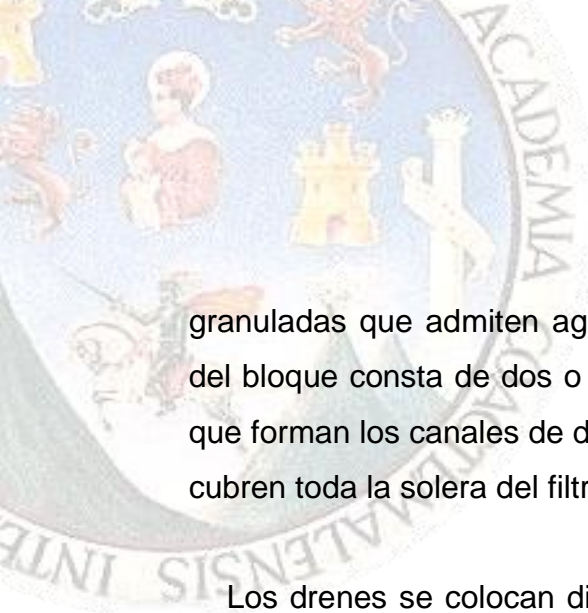
arrastrados serán insuficientes y darán como resultado la obstrucción del medio y el estancamiento de agua dentro del filtro o en la superficie. Si las piedras tienen diámetro grande se evita el problema de la obstrucción pero al tener un área superficial relativamente pequeña por unidad de volumen, no soportan una población biológica grande; por esas causas la uniformidad del tamaño es un modo de asegurar el espacio adecuado de los poros. Las especificaciones dentro de una gama de tamaño de 2.5 – 7.5 cm son por lo general, más restrictivas, como las de 2.5 – 5 cm, o 3.15 – 7 cm.

Una de las características más importantes de un medio filtrante es su resistencia y durabilidad, esta última puede determinarse mediante un ensayo de sulfato de sodio, el que se usa para probar la consistencia de los agregados de hormigón.

Recientemente se han utilizado con éxito medios sintéticos para el tratamiento de residuos industriales fuertes, estos consisten en láminas de plástico entrelazadas dispuestas como un panel para producir unos medios sumamente porosos y antiobstrucción, este tipo de medio filtrante puede ajustarse a cualquier configuración de filtro, se pueden construir filtros de hasta 6 m de profundidad. La elevada capacidad hidráulica y la resistencia a obstrucciones de estos medios sintéticos se aprovechan mejor en un filtro de alta carga.

2.2.7 Drenaje inferior

El sistema de recogida recibe el agua residual filtrada y los sólidos descargados del medio filtrante y los lleva a un conducto que se prolonga hasta el tanque de sedimentación final, el sistema está compuesto de la solera del filtro del canal de recogida y de los drenes inferiores. Los drenes inferiores están compuestos de bloques de arcilla vitrificada, con las partes superiores



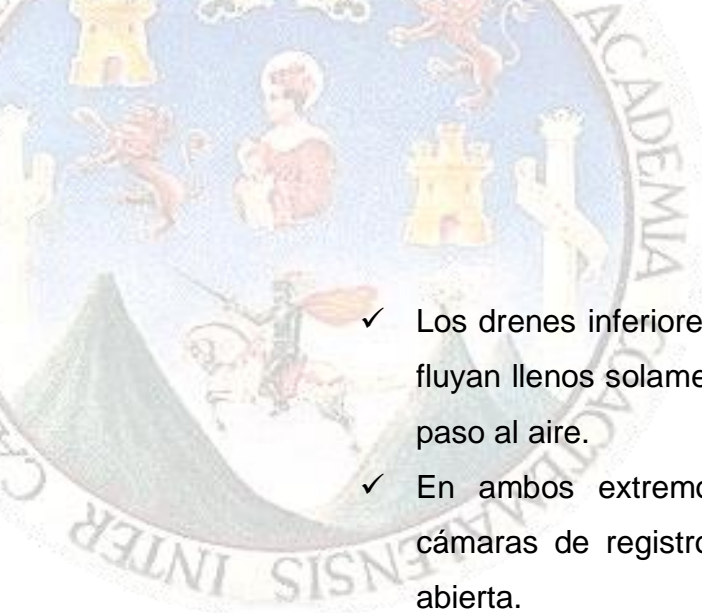
granuladas que admiten agua residual y soportan el medio filtrante, el cuerpo del bloque consta de dos o tres canales con las partes inferiores curvadas, las que forman los canales de drenaje inferior cuando se extienden de lado a lado y cubren toda la solera del filtro.

Los drenes se colocan directamente sobre la solera del filtro, que tiene una pendiente de 1 a 2% hacia el canal colector con el fin de facilitar la inspección, y evitar las obstrucciones, los drenes pueden estar abiertos en ambos extremos, se limpian con una descarga de agua. Otra función de los drenes inferiores es ventilar el filtro; así proporcionan aire para los microorganismo que viven en la película biológica de éste y deberán estar abiertos al menos a un canal periférico para la ventilación de la pared así como al canal colector central.

2.2.8 Ventilación


La ventilación normal tiene lugar por gravedad dentro del filtro, al existir generalmente una diferencia de temperatura entre el agua residual y el medio ambiente habrá un proceso de intercambio de calor dentro del lecho del filtro. El cambio de temperatura del aire dentro del filtro provoca un cambio de densidad y así se establece una corriente de convección, la dirección del flujo depende de las temperaturas relativas del aire y del agua residual. Si la temperatura del aire es mayor que la del agua residual el flujo de aire a través del filtro será descendente, si el aire está más frío que el agua, el flujo de aire será ascendente.

La ventilación natural ha resultado ser eficaz para los filtros percoladores, siempre que se tomen las siguientes precauciones:

- 
- ✓ Los drenes inferiores y canales de recogida deben diseñarse para que fluyan llenos solamente hasta la mitad de su altura, proporcionando así paso al aire.
 - ✓ En ambos extremos del canal central de recogida se instalarán cámaras de registro para la ventilación, provistas de tapas de rejilla abierta.
 - ✓ Los filtros de gran diámetro deberán tener canales colectores secundarios con orificios o chimeneas de ventilación situados cerca de la periferia del filtro.
 - ✓ La zona abierta de las ranuras, en la parte superior de los bloques de los drenes inferiores no será inferior al 15% del área del filtro.
 - ✓ Por cada 25m² del área del filtro deberá proporcionarse un área total de 0.1m² de rejilla abierta en las cámaras y chimeneas de ventilación.

En el caso de filtros extremadamente profundos o sumamente cargados es recomendable la ventilación forzada si se proyecta, instala y hace funcionar adecuadamente. Con el fin de evitar la congelación, en épocas de temperatura muy baja conviene limitar el flujo de aire a través del filtro, la cantidad de aire requerida por un filtro es de 0.03m³/min*m² de área del filtro.

Los filtros se diseñan de tal forma que todo el medio filtrante pueda inundarse con agua residual y, a continuación, desaguar sin provocar rebosamiento. La inundación es un método eficaz de lavar el filtro, corregir el estancamiento y controlar la acumulación de las larvas de moscas en el filtro.



2.2.9 Dispositivos de regulación y control

La parte operativa de un filtro percolador está depositada precisamente en los dispositivos de regulación y control de entrada y salida, por lo que se mantiene un control en el flujo, nivel de agua, pérdida de carga y caudales.

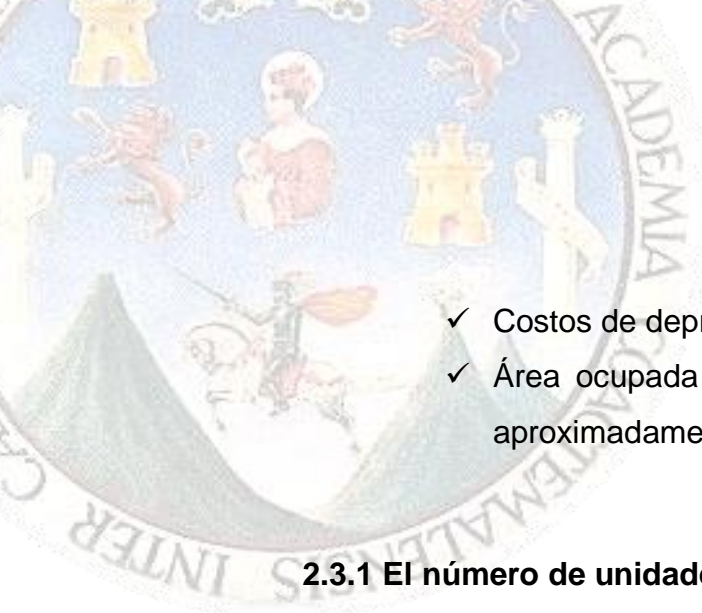
Los principales son los siguientes:

- ✓ Estructuras de entrada
- ✓ Vertedero de rebose
- ✓ Drenaje para agua sobrenadante
- ✓ Drenaje principal
- ✓ Medidor de caudal
- ✓ Regulación de la tasa de filtración
- ✓ Vertedero de salida
- ✓ Drenaje de cámara del vertedero
- ✓ Descarga de agua tratada

2.3 Consideraciones técnicas para el diseño de filtro percolador

Generalidades de tratamiento del agua por filtrar: Coagulación, floculación, sedimentación y según lo requiera la calidad del agua se necesitarán procesos suplementarios de desinfección, aireación, ablandamiento con cal y tratamientos químicos especiales.

- ✓ Costos de construcción relativamente bajos
- ✓ Costos de operación relativamente bajos

- 
- ✓ Costos de depreciación relativamente altos
 - ✓ Área ocupada por filtros percoladores pequeña, de 1 a 100 m² aproximadamente

2.3.1 El número de unidades

Por razones de operación, se debe disponer de por lo menos tres unidades con el flujo de los otros, de manera que si una unidad estuviera fuera de servicio por reparaciones y otra se estuviera lavando, aun trabajaría una o dos.

El número total de unidades se puede estimar mediante la siguiente fórmula sugerida por Morrill y Wallace:

$$N = 0.044 * Q^{0.5}$$

En donde:

N= número total de unidades

Q= caudal de la planta en m³/día

2.3.2 Forma de los filtros

Rectangular, con una relación K, de largo a ancho de:

$$K = b / a$$

En donde:

b= largo

a= ancho

Según Cleasby la relación de K más económica esta comúnmente entre 3 y 6.

2.3.3 Velocidad de filtración

La velocidad de filtración generalmente se expresa como carga superficial de filtración y sus unidades son: $m^3/m^2/día$.

Debido a que el proceso de filtración es lento, la penetración de la materia suspendida es superficial, las velocidades de filtración deben ser relativamente pequeñas. La carga superficial de filtración depende generalmente de la turbiedad. Según sugerencias de algunas asociaciones e investigadores pueden variar como se muestra en la tabla IV:

Tabla IV. Cargas superficiales de filtración según diferentes autores

Lugar de guía	Carga superficial ($m^3/m^2/día$)	
	Rango	
Azevedo Netto	2.5 a 7.5	Azevedo Netto
CEPIS	2.0 a 14.0	CEPIS
FAIR, Geyer, O.	0.9 a 9.4	FAIR, Geyer, O.
U.S. <i>Public Health</i>	2.3 a 7.0	U.S. <i>Public Health</i>
Normas de Guatemala	2.8 a 5.0	Normas de Guatemala
<i>Amerian S.C. Eng.</i>	2.8 a 5.0	<i>Amerian S.C. Eng.</i>
<i>Wáter Works</i>	1.8 a 9.4	<i>Wáter Works</i>
Charles R. Cox	1.9 a 4.7	Charles R. Cox
O. M. S.	2.4 a 9.6	O. M. S.

Fuente: Metcalf & Eddy. 1 996

2.3.4 La turbiedad

El agua por tratar se recomienda que esté por debajo de las 50 unidades de turbiedad (UTM).



2.3.5 El color

Se recomienda que esté por debajo de las 50 unidades de color. La suma de la turbiedad y el color deben ser menores de 75 unidades.

La acumulación de las impurezas ocurre en la superficie del lecho en un espesor de 2.50 a 5.00 centímetros por lo que el filtro trabaja con una carga superficial relativamente pequeña.


Estas consideraciones mencionadas representan en forma categórica los límites de la filtración lenta puesto que se señalan condiciones de color y turbiedad del agua por tratar, que limita la capacidad de volumen de esa agua, cuando es una carga superficial pequeña.

A continuación se presentan las consideraciones técnicas propias del diseño del filtro percolador.

2.3.6 Características del lecho filtrante

El lecho filtrante está compuesto del material de desperdicio clasificado de la construcción cuyas características difieren en tamaño, forma, densidad y composición química. Dicho lecho descansa sobre un estrato clasificado del mismo material de mayor tamaño, en forma descendente, con el propósito de sustentar los materiales comunes de un filtro percolador y distribuir mejor la filtración del agua, además de evitar la distribución del sistema de drenaje.

Con el propósito de establecer parámetros para la elección del material filtrante en lo que respecta al tamaño medio del grano y a la variancia en tamaño se han desarrollado técnicas basadas en el comportamiento



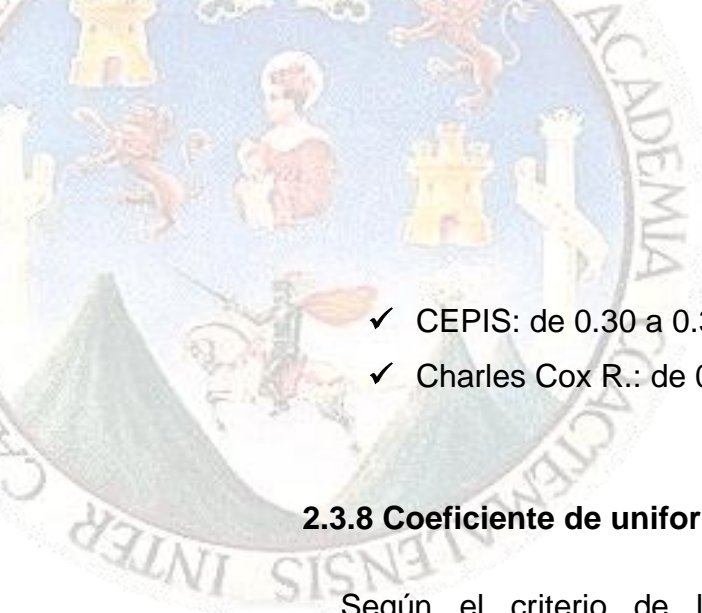
granulométrico del material, efectuado con una serie de mallas estándares (EE.UU.). La técnica usada en la práctica es la desarrollada por Allen, quien estableció un método de 10 y 60% en los tamices calibrados; llamó tamaño efectivo “E” al proporcionado por el tamiz que retiene el 10% y estableció una relación entre los porcentajes retenidos de P_{60}/P_{10} que llamó coeficiente de uniformidad (U), pero en realidad esta relación aumenta numéricamente con la no uniformidad en vez de con la uniformidad por lo que más lógicamente Fair–Geyer lo llaman coeficiente de no-uniformidad.

Los parámetros de tamaño efectivo (E) y coeficiente de no-uniformidad se establecen con el proceso de tamizado en donde se encuentra el peso del material que se retenido entre mallas contiguas, luego se suman y se obtienen los pesos acumulativos. Así se determina el porcentaje de material retenido que con la abertura de los tamices se usa para graficar la curva granulométrica en papel semi-logarítmico de probabilidades en donde se obtiene un comportamiento lineal, lo que facilita el análisis para establecer el rango granulométrico del material de acuerdo con los criterios establecidos por algunos investigadores o instituciones.

2.3.7 Tamaño efectivo (E) mm

Según el criterio de las distintas asociaciones e investigadores, el tamaño efectivo recomendado es el siguiente:

- ✓ *U.S. Public Health Service*: de 0.25 a 0.35
- ✓ Normas de Guatemala: de 0.35
- ✓ Azevedo Netto: de 0.25 a 0.35
- ✓ *American Water Works Association*: de 0.22 a 0.53, promedio 0.35
- ✓ Fair, Geyer y Okun: de 0.25 a 0.35, promedio 0.30

- 
- ✓ CEPIS: de 0.30 a 0.35, promedio 0.30
 - ✓ Charles Cox R.: de 0.20 a 0.40, promedio 0.30

2.3.8 Coeficiente de uniformidad (Cu)

Según el criterio de las distintas asociaciones e investigadores, se recomienda lo siguiente:

- ✓ *U.S. Public Health Service*: de 1.50 a 2.00
- ✓ Normas de Guatemala: no mayores de 1.65
- ✓ Azevedo Netto: menores de 1.60
- ✓ *American Water Works Association*: de 1.35 a 1.70
- ✓ Fair, Geyer y Okun: de 1.50 y menores
- ✓ CEPIS: de 1.50 a 1.70

2.3.9 Espesor del lecho filtrante (m)

Según el criterio de las distintas asociaciones e investigadores, se recomienda lo siguiente:

- ✓ *U.S. Public Health Service*: mínimo 0.51 m; recomendable: 0.9 – 1.02
- ✓ Normas de Guatemala: mínimo de 0.30 m; recomendable: 0.46
- ✓ Azevedo Netto: mínimo de 0.60 m; recomendable: 0.90 – 1.10
- ✓ Fair, Geyer y Okun: mínimo de 0.61 m; recomendable: 1.07
- ✓ CEPIS: mínimo de 0.60 m; recomendable: 0.90 – 1.20

2.3.10 Sistemas de drenaje inferior

Generalmente se construyen de ladrillos tendidos de canto, con otros ladrillos encima tendidos de soga, dejando un espaciamiento de 1 cm entre los lados. Otros usan bloques de concreto poroso en forma de U invertida, pero actualmente se ha generalizado el uso de tuberías perforadas con orificios no mayores de 2.53 cm (1"); estas tuberías se pueden colocar de diferentes formas.

2.3.11 Altura de agua sobre el filtro

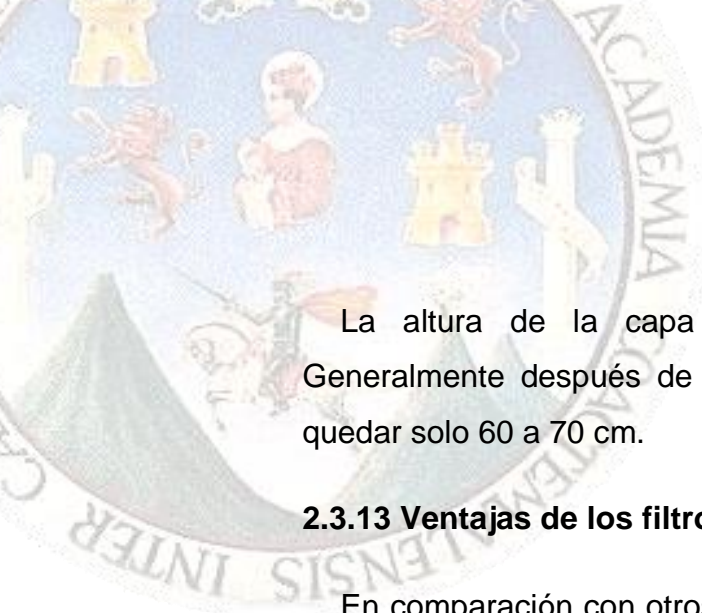
En filtros percoladores la altura de agua sobre el filtro según sugerencia de algunas asociaciones e investigadores puede variar de la siguiente manera (ver tabla V):

Tabla V. Altura de agua dentro el filtro

	Altura de agua
Normas de Guatemala	1.00 metros
CEPIS	1.0 – 1.5 metros
STEEL	1.20 metros con la arena a máxima altura
Charles R. Cox	1.22 metros

2.3.12 Sistemas de limpieza

Para efectuar la limpieza del filtro percolador se raspan de 2 a 5 cm se la superficie del lecho y se extrae el medio filtrante; el cual se lava inmediatamente después de retirarlo puesto que al dejarlo por mucho tiempo sin lavar adquiere mal olor y no se podrá volver a utilizar posteriormente.



La altura de la capa filtrante va disminuyendo con cada raspado. Generalmente después de 10 a 15 raspados el lecho se ha reducido hasta quedar solo 60 a 70 cm.

2.3.13 Ventajas de los filtros percoladores con medio filtrante “RCC”

En comparación con otros métodos de tratamiento destinados a la remoción de la materia orgánica, de organismos patógenos y turbiedad, el filtro percolador tiene muchas ventajas, ya que es la única operación unitaria conocida que consigue un alto grado de mejora simultánea en la calidad física, química y bacteriológica del agua cruda. El filtro percolador posee las siguientes ventajas:

- ✓ Sencillez de diseño, construcción y operación
- ✓ Aplicación de materiales y capacidades locales
- ✓ Supervisión técnica limitada
- ✓ Tuberías y dispositivos comunes, sin necesidad de equipo especial
- ✓ Costo relativamente bajo (siempre que se disponga de suficiente material para lecho filtrante. No es necesario importar equipo ni materiales)
- ✓ No son necesarios compuestos químicos
- ✓ No se requiere coagulación previa y en caso de que la turbiedad fuera mayor que los límites recomendables solo se necesita una sedimentación simple.

Los filtros percoladores de ripio clasificado desperdicio de la construcción son los más prácticos para el tratamiento de agua con turbiedades menores de 50 UTM; si bien se pueden tolerar turbiedades más altas por unos cuantos días, la mejor eficiencia ocurre cuando la turbiedad es menor de 10 UTM.



3. UNIVERSO DEL TRABAJO

3.1 Ubicación de la planta de tratamiento de agua residual

La planta experimental de tratamiento de agua residual “Ingeniero Arturo Pazos Sosa” se localiza en: diagonal 26 final, 20-56, zona 13 colonia Aurora II, zona 13, ciudad de Guatemala:

- 14 grados, 34´ 36” latitud norte
- 90 grados, 32´ 12” longitud oeste
- Colinda al sur y al este con barrancos
- Altitud varía entre 1502 a 1455 msnm
- A 4 kilómetros de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria -ERIS-

Figura No. 1 Fotografía satelital de la planta experimental:

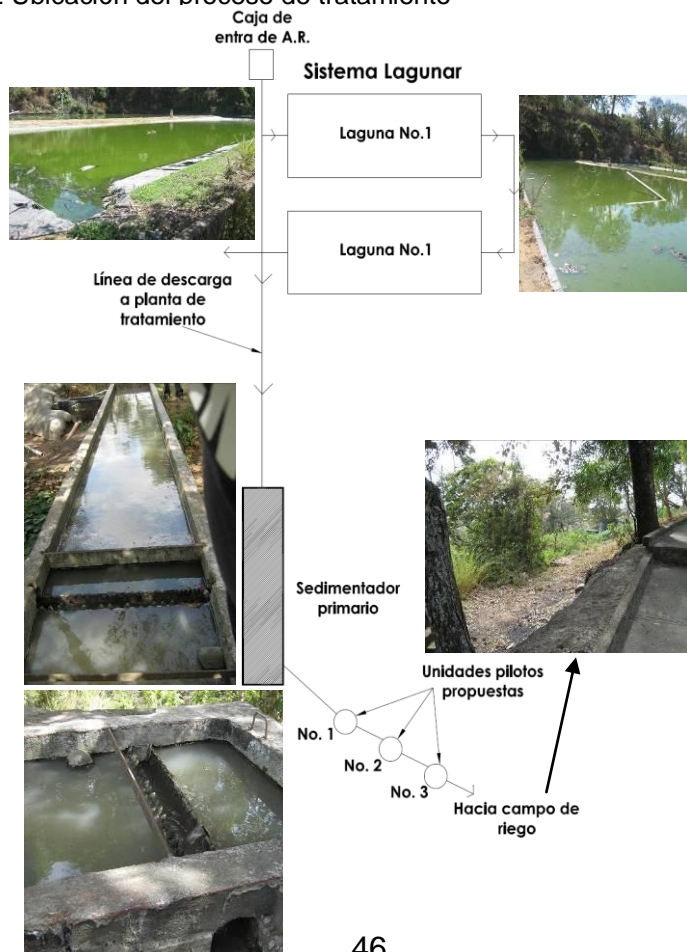


3.2 Ubicación dentro del proceso:

Las tres unidades piloto de filtros percoladores en serie estarán en el tratamiento secundario de las aguas residuales, provenientes del sistema de alcantarillado de la colonia Aurora II, dicho tratamiento consiste en:

- Unidad de rejas
- Sedimentador primario
- Filtros percoladores (tres unidades piloto propuestas en este estudio)
- Reutilización del agua residual tratada para riego de la vegetación existente.

Figura No. 2 Ubicación del proceso de tratamiento





3.3 Descripción general del tratamiento de la planta

La planta experimental de tratamiento de aguas residuales domesticas “Ingeniero Arturo Pazos Sosa”, cuenta con seis sistemas de tratamiento independientes que trabajan por gravedad. A continuación se menciona cada uno de los sistemas existentes en dicha planta:

- ✓ Sistema lagunar
- ✓ Sistema de riego, post-sedimentación primaria
- ✓ Sistema RAFA, filtro percolador, estanque de juncitos
- ✓ Biodigestor clarificador
- ✓ Sistema RAFA, filtro percolador, sedimentador secundario y patio de secado de lodos (todas las unidades prefabricadas de polietileno de alta densidad)
- ✓ Sistema de filtros percoladores torre

3.4 Descripción de la nueva unidad piloto filtro percolador

El filtro percolador tendrá un dispositivo que pone en contacto a las aguas residuales sedimentadas con cultivos biológicos y oxígeno. El filtro percolador propiamente consta de las siguientes partes:

3.4.1 Sistema de soporte del material filtrante

Está compuesto de dos tanques metálicos de 75 centímetros de diámetro por 125 centímetros de alto; al unir por medio de soldadura los dos tanques y colocarlos uno encima de otro, ambos estará recubierto de pintura anticorrosiva para evitar la corrosión del metal e interfiera con el proceso biológico del filtro percolador.



Figura No. 3 Fotografías del sistema de soporte del medio filtrante



3.4.2 Sistema de distribución del agua residual

Está colocado en la parte superior del filtro y su función es distribuir el agua residual de la forma más uniforme posible, con el objeto de tener la misma carga hidráulica por unidad de superficie del filtro.

Figura No. 4 Fotografías del sistema de distribución del agua residual



3.4.3 Sistema filtrante (ripio clasificado de concreto)

Tiene por objeto servir de soporte de una capa de microorganismos adherida a un medio permeable que permite la depuración de agua residual de manera aerobia. El medio permeable recibe el nombre de empaque o medio filtrante y los microorganismos forman una capa en el empaque a la que se le denomina biopelícula o lama.

Figura No. 5 Fotografías del medio filtrante



3.4.3 Sistema recolector

Permite recolectar las aguas tratadas en el filtro, asimismo, proporciona el área necesaria para la circulación del aire.

Figura No. 6 Fotografías del sistema recolector del agua tratada







4. METODOLOGÍA

4.1 Selección de los parámetros de control

4.1.1 Parámetros seleccionados

Los parámetros principales para evaluar la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales son: la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno, ya que son los indicativos más significativos de la remoción de materia orgánica.

Los filtros percoladores son tratamiento biológicos, por lo tanto, el pH y la temperatura son parámetros muy importantes para conocer si las condiciones dentro del filtro percolador son adecuadas para el crecimiento bacteriano.

El propósito de evaluar la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno fue conocer la eficiencia de los filtros percoladores con medio filtrante ripio clasificado de concreto. El solo hecho de alcanzar eficiencias de remoción del orden del 50% al 70% de sólidos sedimentables, implica una remoción del 85% del DBO_5 .

A continuación se presentará un resumen de los parámetros que se evaluaron en este estudio:

- ✓ Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días a 20 °C.
- ✓ Demanda química de oxígeno
- ✓ Sólidos sedimentables
- ✓ Potencial de hidrógeno

- 
- ✓ Nitratos
 - ✓ Nitritos
 - ✓ Fosfatos
 - ✓ Sulfatos
 - ✓ Oxígeno disuelto
 - ✓ Temperatura

4.2 Tipos de muestreos

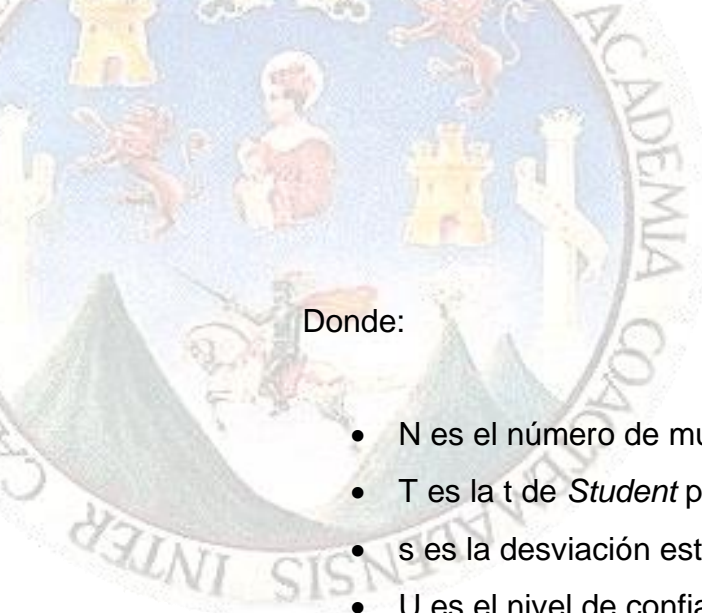
Una vez definidos los parámetros de control para la evaluación de la planta de tratamiento, es importante definir el tipo de muestras que se recolectará.

Hay dos tipos de muestras que deben recolectarse, dependiendo del tiempo disponible, de los análisis que se tenga que verificar y del propósito de los análisis. A una se le llama muestra “instantánea” y consiste en una porción de aguas residuales que se toma de una vez. La otra es una muestra integrada o compuesta y consiste en porciones de agua residuales que se toman a intervalos regulares, proporcional al volumen de cada flujo de agua residual en el momento de recolección. Todas las porciones se mezclan para formar una muestra final representativa de las aguas residuales.

4.3 Análisis estadístico para determinar el número de muestras

Con el propósito de calcular el número de muestras por tomar en cada punto de muestreo, de conformidad con el método 1060 B, de los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, se utilizaron las curvas de niveles de confianza establecidos a partir de la fórmula:

$$N \geq (ts / U)^2$$



Donde:

- N es el número de muestras
- T es la t de *Student* para un nivel de confianza determinado
- s es la desviación estándar global
- U es el nivel de confianza aceptable

De los resultados experimentales se tiene que:

$$s=0.020$$

$$U=0.015$$

Entonces,

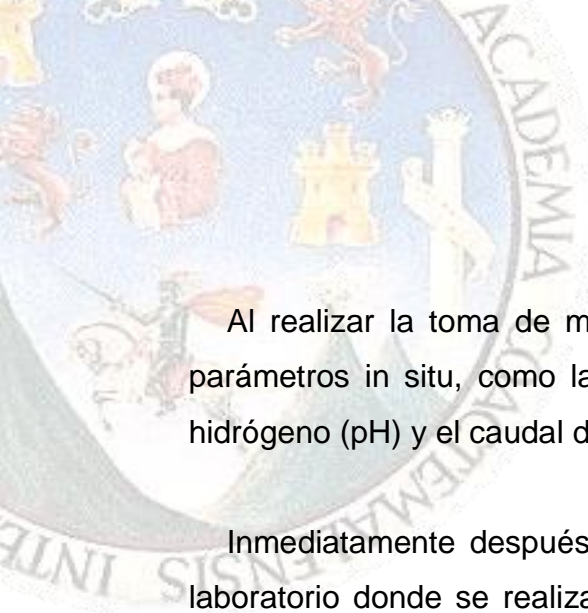
$$s/U=1.33$$

Con dicho resultado se procede, como muestra la figura siguiente, a interpolar en las curvas respectivas para un nivel de confianza del 95% y se establece que el número de muestras por tomar debe ser mayor o igual a 9.0.

Finalmente, a partir del valor calculado, para los efectos del presente estudio, el número de muestras es de 10.00.

4.4 Puntos de muestreo

Los puntos seleccionados para la toma de muestras se determinó de tal manera que fueran válidos para encontrar la eficiencia de cada uno de los filtros percoladores.



Al realizar la toma de muestras en los puntos seleccionados, se midieron parámetros in situ, como la temperatura, el oxígeno disuelto, el potencial de hidrógeno (pH) y el caudal de entrada a la planta de tratamiento.

Inmediatamente después de la toma, las muestras fueron transportadas al laboratorio donde se realizaron los respectivos análisis; procurando mantener en el tiempo de transporte una temperatura adecuada para su conservación.

4.5 Medición de caudales

La medición de caudales fue realizado con el método de aforo volumétrico donde se utilizó un recipiente plástico con capacidad de cinco litros.

4.6 Toma de muestras

Para la toma de muestras se realizó en un recipiente plástico previo esterilizado para que no afecte los parámetros a medir en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Doctora Alba Estela Tabarini Molina”, de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Cada vez que se realizó la toma de muestras se midió el caudal, mediante un aforo volumétrico en cada punto de muestreo, se realizaron ocho muestreos, tomando un volumen de 900 cm^3 en cada uno.

Al momento de la toma de muestras se tomaron los parámetros de campo: el potencial de hidrogeno y temperatura.

Al momento de la toma de muestras se tomaron los parámetros de campo: el potencial de hidrogeno y temperatura.



4.7 Tiempo de retención

El tiempo de retención del agua residual calculado fue de cinco minutos en el cual el agua residual fue filtrada en el ripio clasificado de concreto.

4.8 Granulometría del medio filtrante

La granulometría propuesta para el medio filtrante de los filtros percoladores fue de tres a cuatro pulgadas de diámetro; teniendo una altura de dos metros del medio filtrante; dicha granulometría fue constante en el filtro percolador piloto con medio filtrante ripio clasificado de concreto.

4.9 Periodo de arranque del sistema

El tiempo de arranque del sistema al estar en contacto con el agua residual se estima que fue de cinco a siete días logrando una eficiencia de remoción del 85% con respecto a la DBO_5



5. RESULTADOS

5.1 Tabla de resultados de los muestreos

La toma de muestra fue realizada al filtro percolador existente con medio filtrante piedra volcánica y a los filtros percoladores pilotos con medios filtrantes ripio clasificado de concreto y material PET respectivamente.

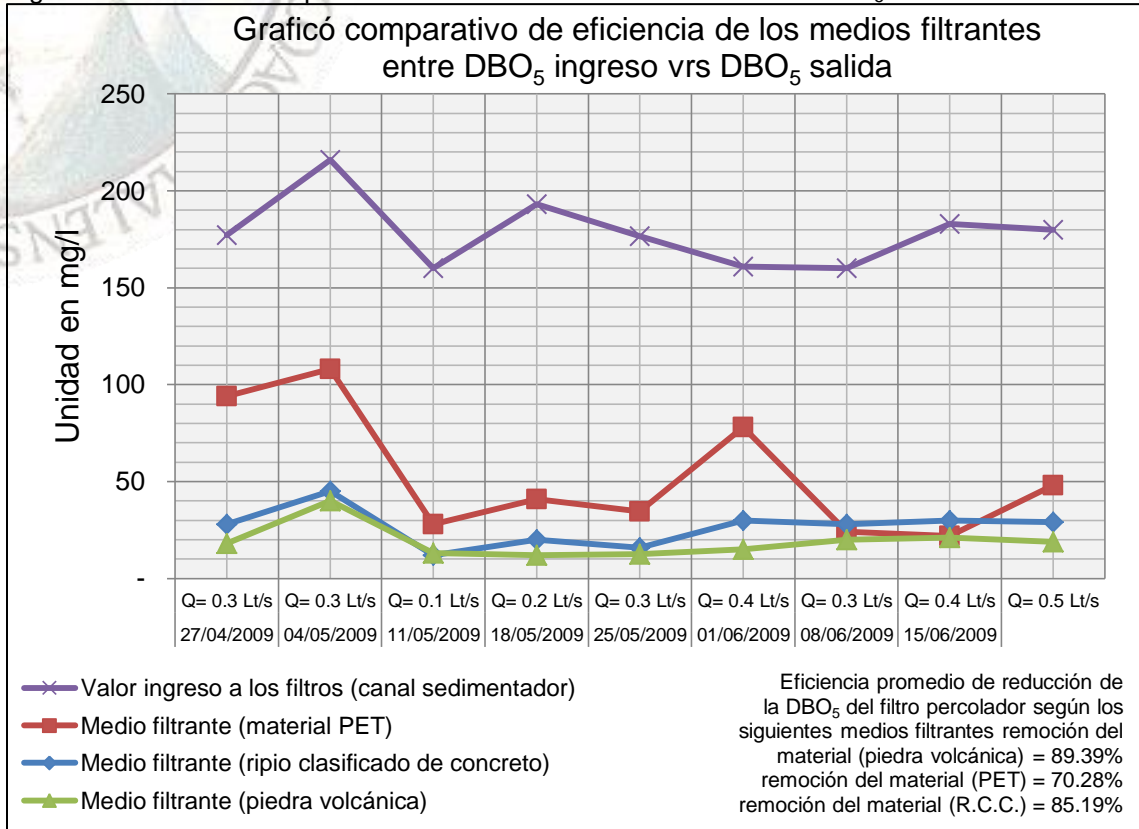
5.1.1 Análisis de reducción de la DBO₅

Análisis comparativo del comportamiento y eficiencia de la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días, del medio filtrante ripio clasificado de concreto con respecto al existente de piedra volcánica y material PET.

Tabla VI. Tabla de análisis de reducción de la DBO₅ según medio filtrante

Parametro analizado	Unidad	Valor ingreso a los filtros (canal sedimentador)	Medio filtrante (piedra volcánica)	Medio filtrante (material PET)	Medio filtrante (ripio clasificado de concreto)	Datos del muestreo	
		Valor inicial	Valor final	Valor final	Valor final	Fecha	Caudal
DBO ₅	mg/L	177.00	18.00	94.00	28.00	27/04/2009	Q= 0.3 Lt/s
DBO ₅	mg/L	216.00	40.00	108.00	45.00	04/05/2009	Q= 0.3 Lt/s
DBO ₅	mg/L	160.00	13.00	28.00	12.00	11/05/2009	Q= 0.1 Lt/s
DBO ₅	mg/L	193.00	12.00	41.00	20.00	18/05/2009	Q= 0.2 Lt/s
DBO ₅	mg/L	176.50	12.50	34.50	16.00	25/05/2009	Q= 0.3 Lt/s
DBO ₅	mg/L	161.00	15.00	78.00	30.00	01/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
DBO ₅	mg/L	160.00	20.00	24.00	28.00	08/06/2009	Q= 0.3 Lt/s
DBO ₅	mg/L	183.00	21.00	22.00	30.00	15/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
DBO ₅	mg/L	180.00	19.00	48.00	29.00	22/06/2009	Q= 0.5 Lt/s
Reducción de la DBO₅			89.3869%	70.2770%	85.1852%		

Figura No. 7 Grafica comparativa de eficiencia de la reducción de la DBO₅



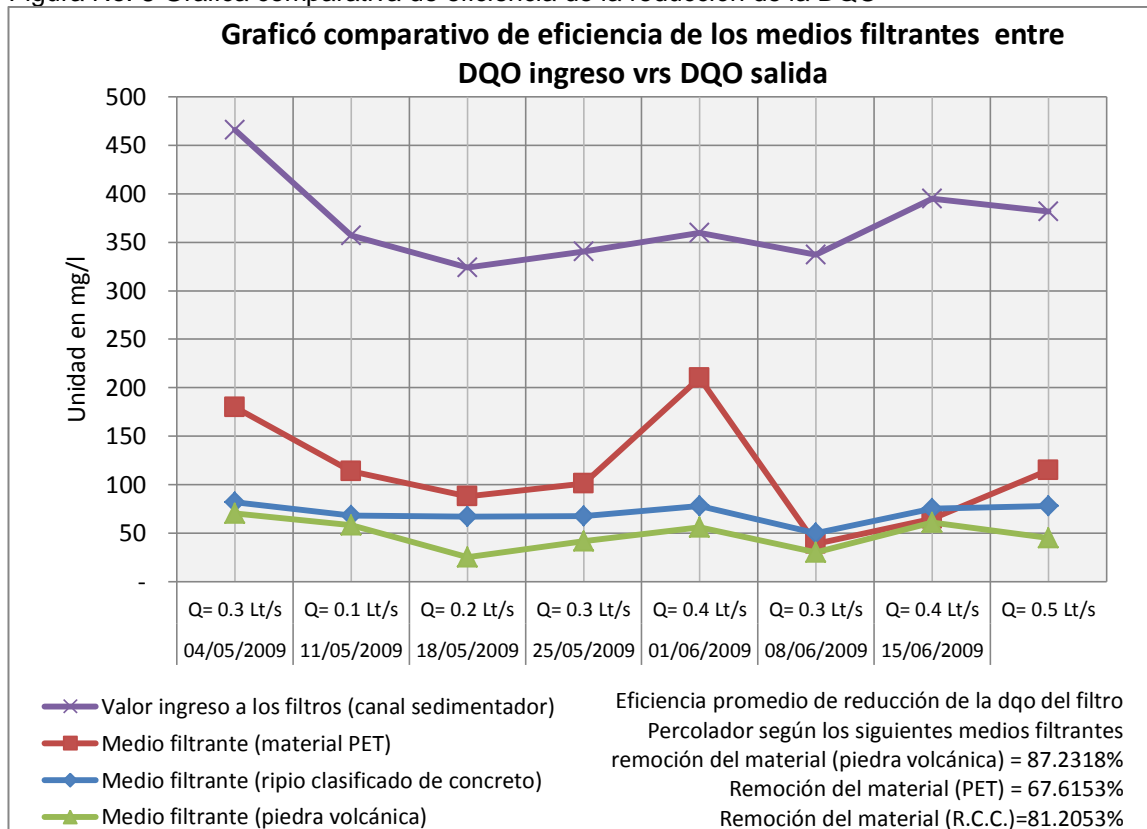
5.1.2 Análisis de reducción de la DQO

Análisis comparativo del comportamiento y eficiencia de la reducción de la Demanda Química de Oxígeno, del medio filtrante ripio clasificado de concreto con respecto al existente de piedra volcánica y material PET.

Tabla VII. Tabla de análisis de reducción de la DQO según medio filtrante

Parametro analizado	Unidad	Valor ingreso a los filtros (canal sedimentador)	Medio filtrante (piedra volcánica)	Medio filtrante (material PET)	Medio filtrante (ripio clasificado de concreto)	Datos del muestreo	
		Valor inicial	Valor final	Valor final	Valor final	Fecha	Caudal
DQO	mg/L	324.00	33.00	152.00	52.00	27/04/2009	Q= 0.3 Lt/s
DQO	mg/L	466.00	70.00	180.00	82.00	04/05/2009	Q= 0.3 Lt/s
DQO	mg/L	357.00	58.00	114.00	68.00	11/05/2009	Q= 0.1 Lt/s
DQO	mg/L	324.00	25.00	88.00	67.00	18/05/2009	Q= 0.2 Lt/s
DQO	mg/L	340.50	41.50	101.00	67.50	25/05/2009	Q= 0.3 Lt/s
DQO	mg/L	360.00	56.00	210.00	78.00	01/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
DQO	mg/L	337.00	30.00	39.00	50.00	08/06/2009	Q= 0.3 Lt/s
DQO	mg/L	395.00	61.00	65.00	75.00	15/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
DQO	mg/L	382.00	45.00	115.00	78.00	22/06/2009	Q= 0.5 Lt/s
Reducción de la DQO			87.2318%	67.6153%	81.2053%		

Figura No. 8 Grafica comparativa de eficiencia de la reducción de la DQO



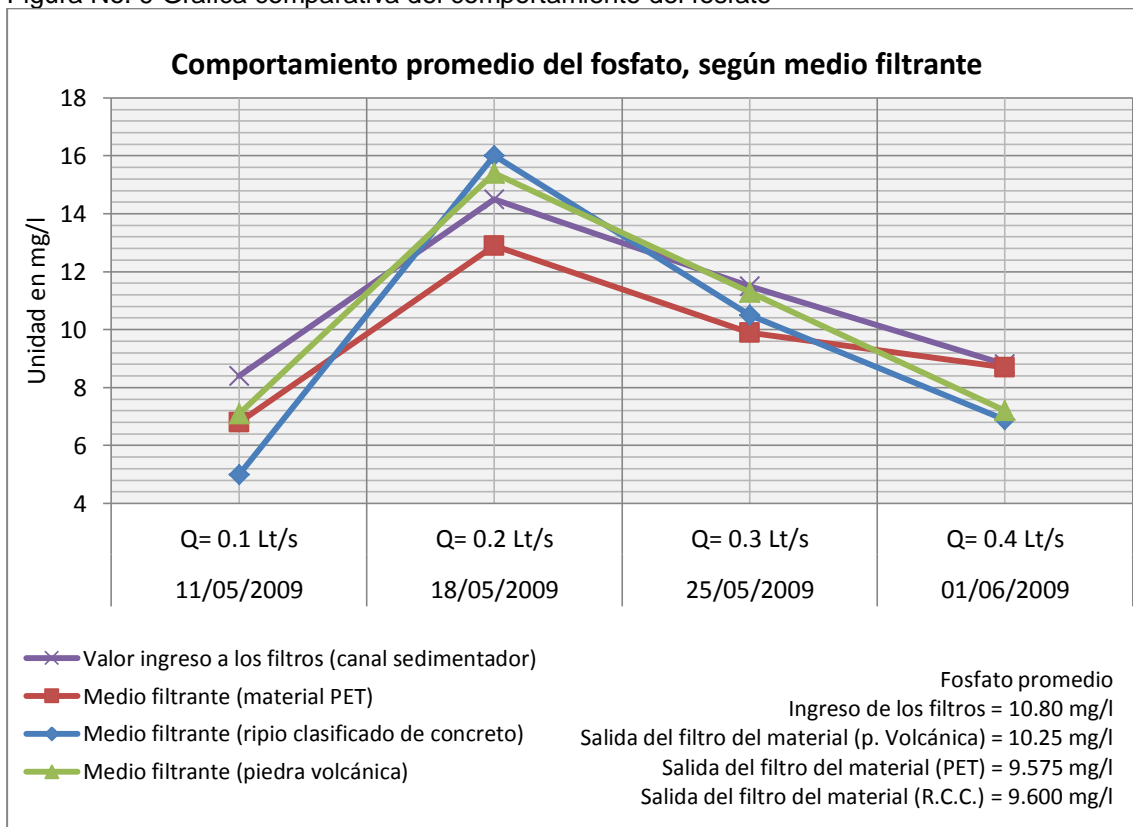
5.1.3 Análisis del comportamiento del fosfato

Análisis comparativo del comportamiento del Fosfato, del medio filtrante ripio clasificado de concreto con respecto al existente de piedra volcánica y material PET.

Tabla VIII. Tabla de análisis del fosfato, según medio filtrante

Parametro analizado	Unidad	Valor ingreso a los filtros (canal sedimentador)	Medio filtrante (piedra volcánica)	Medio filtrante (material PET)	Medio filtrante (ripio clasificado de concreto)	Datos del muestreo	
		Valor inicial	Valor final	Valor final	Valor final	Fecha	Caudal
Fosfato	mg/L	8.400	7.100	6.800	5.000	11/05/2009	Q= 0.1 Lt/s
Fosfato	mg/L	14.500	15.400	12.900	16.000	18/05/2009	Q= 0.2 Lt/s
Fosfato	mg/L	11.500	11.300	9.900	10.500	25/05/2009	Q= 0.3 Lt/s
Fosfato	mg/L	8.800	7.200	8.700	6.900	01/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
Fosfato promedio		10.800	10.250	9.575	9.600		

Figura No. 9 Grafica comparativa del comportamiento del fosfato



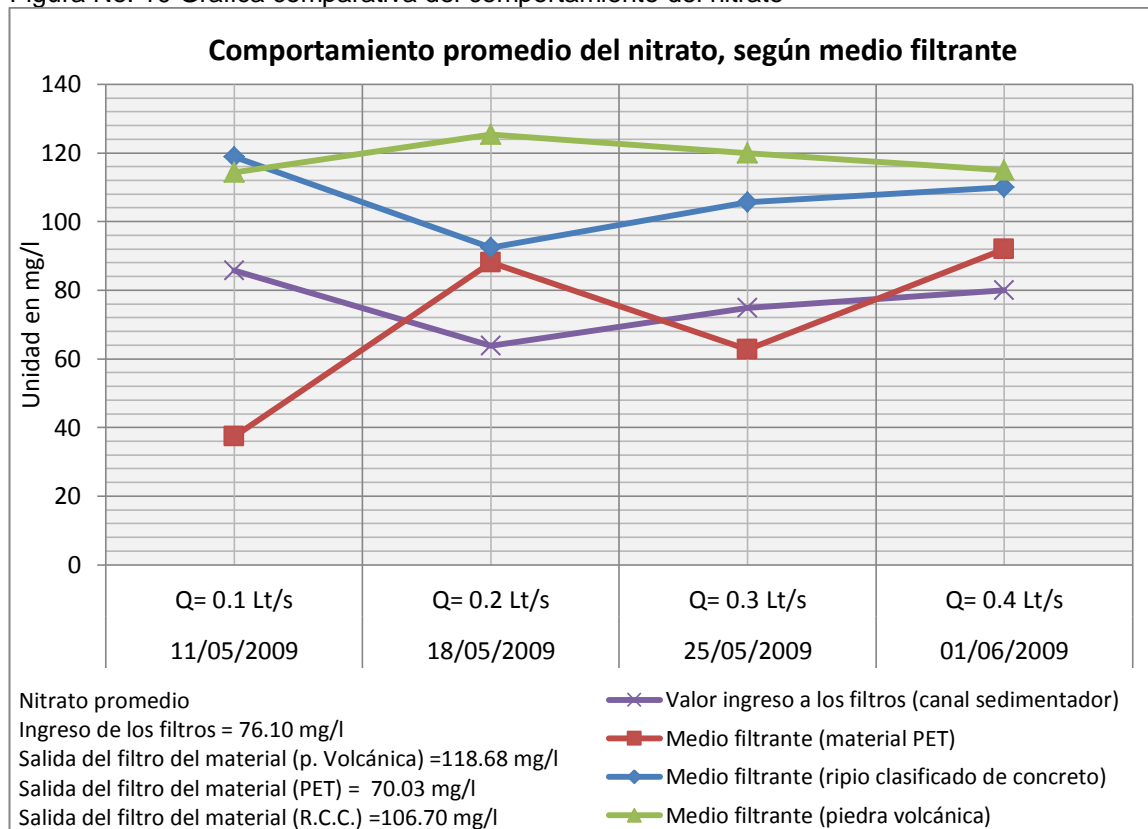
5.1.4 Análisis del comportamiento de nitratos

Análisis comparativo del comportamiento de Nitratos, del medio filtrante ripio clasificado de concreto con respecto al existente de piedra volcánica y material PET.

Tabla IX. Tabla de análisis de nitratos según medio filtrante

Parametro analizado	Unidad	Valor ingreso a los filtros (canal sedimentador)	Medio filtrante (piedra volcánica)	Medio filtrante (material PET)	Medio filtrante (ripio clasificado de concreto)	Datos del muestreo	
		Valor inicial	Valor final	Valor final	Valor final	Fecha	Caudal
Nitrato	mg/L	85.800	114.400	37.400	118.800	11/05/2009	Q= 0.1 Lt/s
Nitrato	mg/L	63.800	125.400	88.000	92.400	18/05/2009	Q= 0.2 Lt/s
Nitrato	mg/L	74.800	119.900	62.700	105.600	25/05/2009	Q= 0.3 Lt/s
Nitrato	mg/L	80.000	115.000	92.000	110.000	01/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
Nitrato promedio		76.10	118.68	70.03	106.70		

Figura No. 10 Grafica comparativa del comportamiento del nitrato



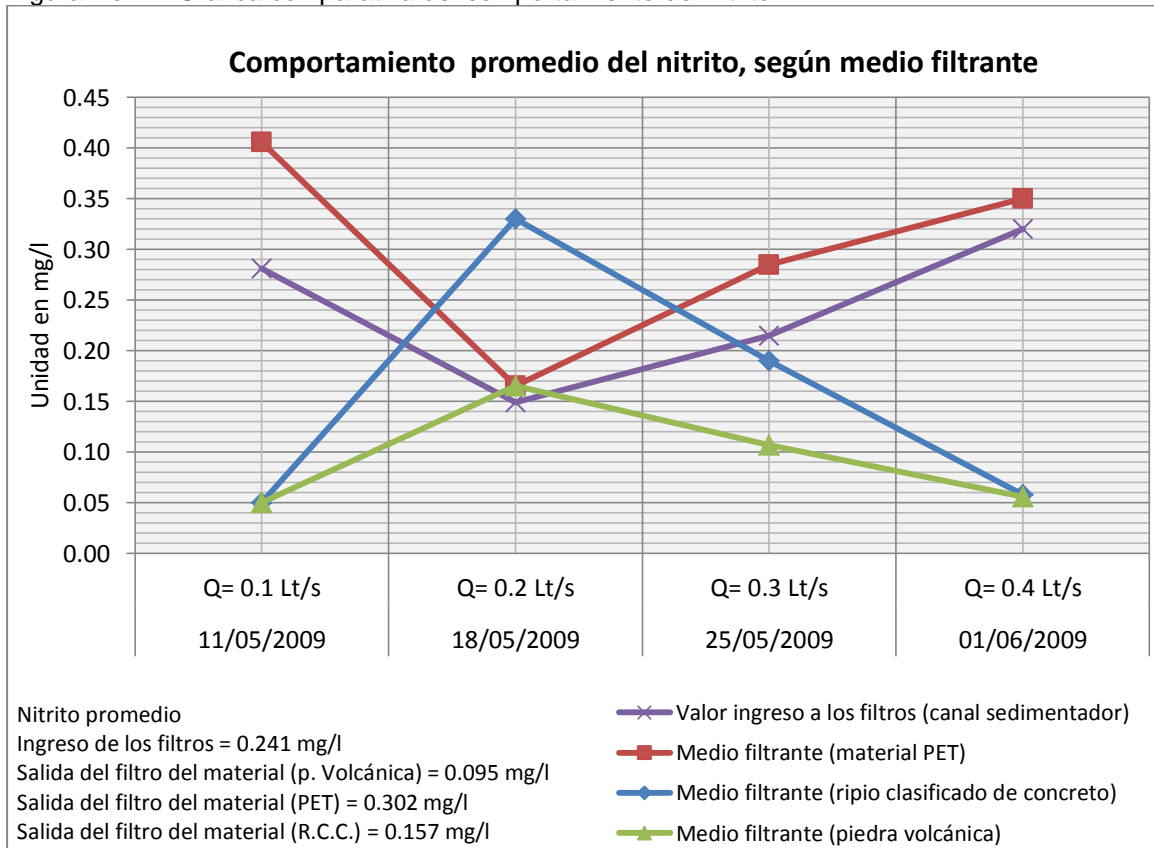
5.1.5 Análisis del comportamiento de nitritos

Análisis comparativo del comportamiento de Nitritos, del medio filtrante ripio clasificado de concreto con respecto al existente de piedra volcánica y material PET.

Tabla X. Tabla de análisis de nitritos según medio filtrante

Parametro analizado	Unidad	Valor ingreso a los filtros (canal sedimentador)	Medio filtrante (piedra volcánica)	Medio filtrante (material PET)	Medio filtrante (ripio clasificado de concreto)	Datos del muestreo	
		Valor inicial	Valor final	Valor final	Valor final	Fecha	Caudal
Nitrito	mg/L	0.281	0.050	0.406	0.050	11/05/2009	Q= 0.1 Lt/s
Nitrito	mg/L	0.149	0.165	0.165	0.330	18/05/2009	Q= 0.2 Lt/s
Nitrito	mg/L	0.215	0.107	0.285	0.190	25/05/2009	Q= 0.3 Lt/s
Nitrito	mg/L	0.320	0.056	0.350	0.058	01/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
Nitrito promedio		0.241	0.095	0.302	0.157		

Figura No. 11 Grafica comparativa del comportamiento del nitrito



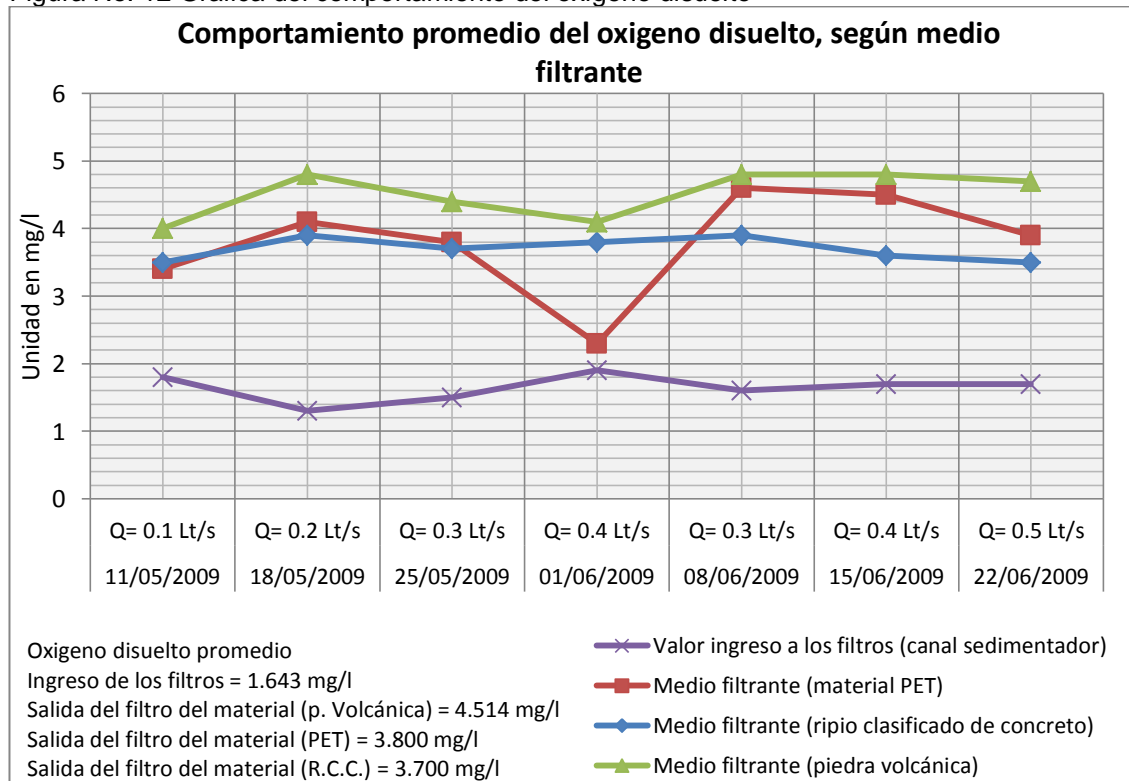
5.1.6 Análisis del comportamiento del oxígeno disuelto

Análisis comparativo del comportamiento del oxígeno disuelto, del medio filtrante ripio clasificado de concreto con respecto al existente de piedra volcánica y material PET.

Tabla XI. Tabla de análisis del oxígeno disuelto según medio filtrante

Parametro analizado	Unidad	Valor ingreso a los filtros (canal sedimentador)	Medio filtrante (piedra volcánica)	Medio filtrante (material PET)	Medio filtrante (ripio clasificado de concreto)	Datos del muestreo	
		Valor inicial	Valor final	Valor final	Valor final	Fecha	Caudal
Oxigeno disuelto	mg/L	1.800	4.000	3.400	3.500	11/05/2009	Q= 0.1 Lt/s
Oxigeno disuelto	mg/L	1.300	4.800	4.100	3.900	18/05/2009	Q= 0.2 Lt/s
Oxigeno disuelto	mg/L	1.500	4.400	3.800	3.700	25/05/2009	Q= 0.3 Lt/s
Oxigeno disuelto	mg/L	1.900	4.100	2.300	3.800	01/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
Oxigeno disuelto	mg/L	1.600	4.800	4.600	3.900	08/06/2009	Q= 0.3 Lt/s
Oxigeno disuelto	mg/L	1.700	4.800	4.500	3.600	15/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
Oxigeno disuelto	mg/L	1.700	4.700	3.900	3.500	22/06/2009	Q= 0.5 Lt/s
Oxigeno disuelto promedio		1.643	4.514	3.800	3.700		

Figura No. 12 Grafica del comportamiento del oxígeno disuelto



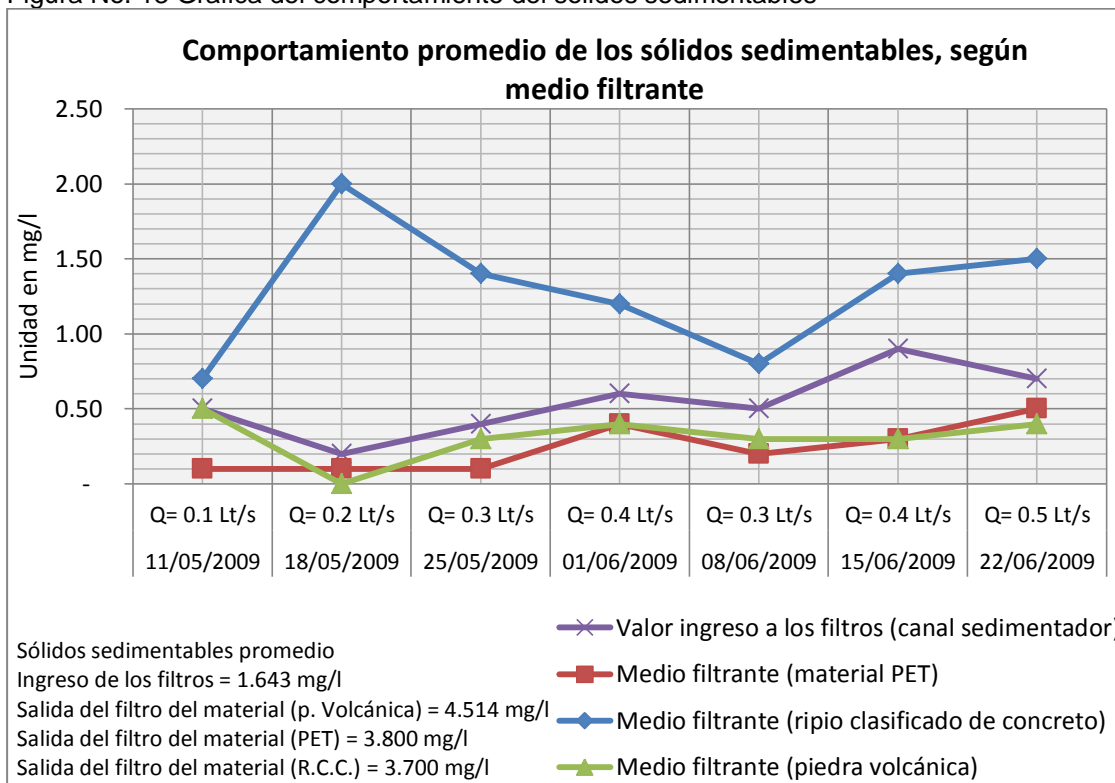
5.1.7 Análisis del comportamiento del sólidos sedimentables

Análisis comparativo del comportamiento del Sólidos Sedimentables, del medio filtrante ripio clasificado de concreto con respecto al existente de piedra volcánica y material PET.

Tabla XII. Tabla de análisis de los sólidos sedimentables

Parámetro analizado	Unidad	Valor ingreso a los filtros (canal sedimentador)	Medio filtrante (piedra volcánica)	Medio filtrante (material PET)	Medio filtrante (ripio clasificado de concreto)	Datos del muestreo	
		Valor inicial	Valor final	Valor final	Valor final	Fecha	Caudal
Sólidos sedimentables	mg/L	0.50	0.50	0.10	0.70	11/05/2009	Q= 0.1 Lt/s
Sólidos sedimentables	mg/L	0.20	-	0.10	2.00	18/05/2009	Q= 0.2 Lt/s
Sólidos sedimentables	mg/L	0.40	0.30	0.10	1.40	25/05/2009	Q= 0.3 Lt/s
Sólidos sedimentables	mg/L	0.60	0.40	0.40	1.20	01/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
Sólidos sedimentables	mg/L	0.50	0.30	0.20	0.80	08/06/2009	Q= 0.3 Lt/s
Sólidos sedimentables	mg/L	0.90	0.30	0.30	1.40	15/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
Sólidos sedimentables	mg/L	0.70	0.40	0.50	1.50	22/06/2009	Q= 0.5 Lt/s
Sólidos sedimentables promedio		0.543	0.314	0.243	1.286		

Figura No. 13 Grafica del comportamiento del solidos sedimentables



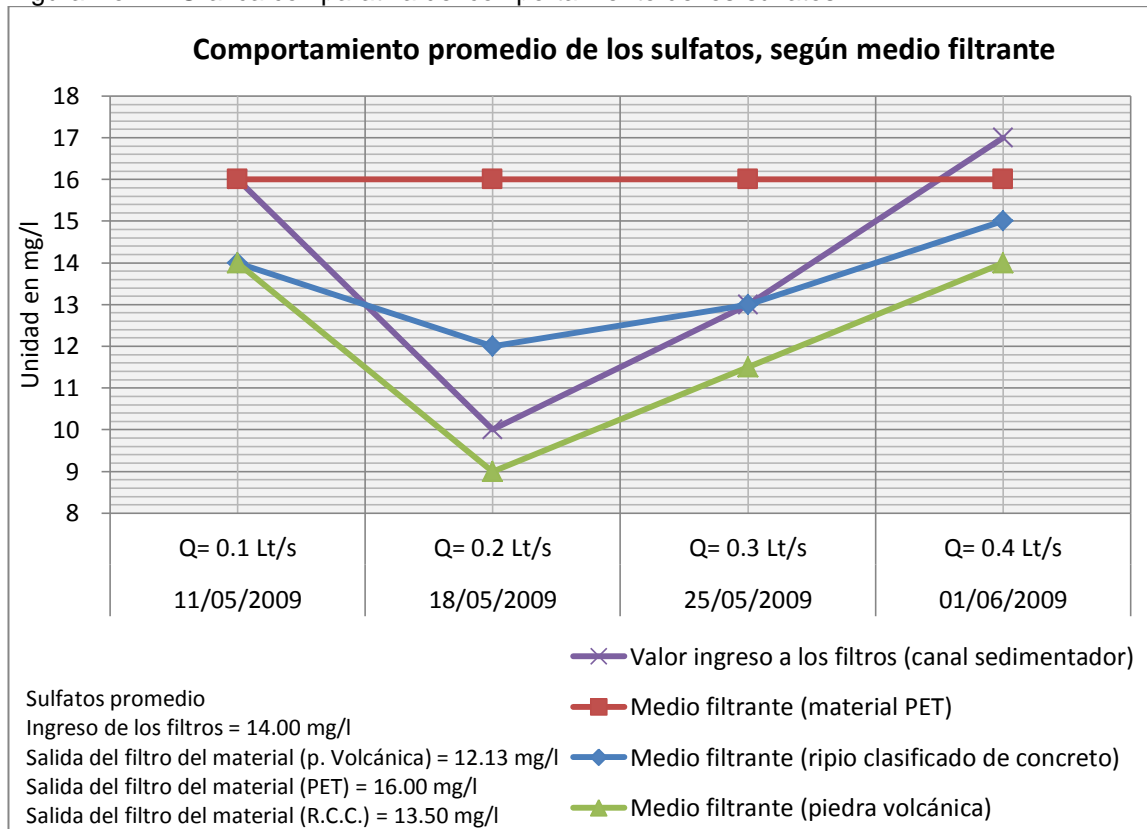
5.1.7 Análisis del comportamiento de los sulfatos

Análisis comparativo del comportamiento de los Sulfatos, del medio filtrante ripio clasificado de concreto con respecto al existente de piedra volcánica y material PET.

Tabla XIII. Tabla de análisis de los sulfatos según medio filtrante

Parámetro analizado	Unidad	Valor ingreso a los filtros (canal sedimentador)	Medio filtrante (piedra volcánica)	Medio filtrante (material PET)	Medio filtrante (ripio clasificado de concreto)	Datos del muestreo	
		Valor inicial	Valor final	Valor final	Valor final	Fecha	Caudal
Sulfatos	mg/L	16.00	14.00	16.00	14.00	11/05/2009	Q= 0.1 Lt/s
Sulfatos	mg/L	10.00	9.00	16.00	12.00	18/05/2009	Q= 0.2 Lt/s
Sulfatos	mg/L	13.00	11.50	16.00	13.00	25/05/2009	Q= 0.3 Lt/s
Sulfatos	mg/L	17.00	14.00	16.00	15.00	01/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
Sulfato promedio		14.00	12.13	16.00	13.50		

Figura No. 14 Grafica comparativa del comportamiento de los sulfatos



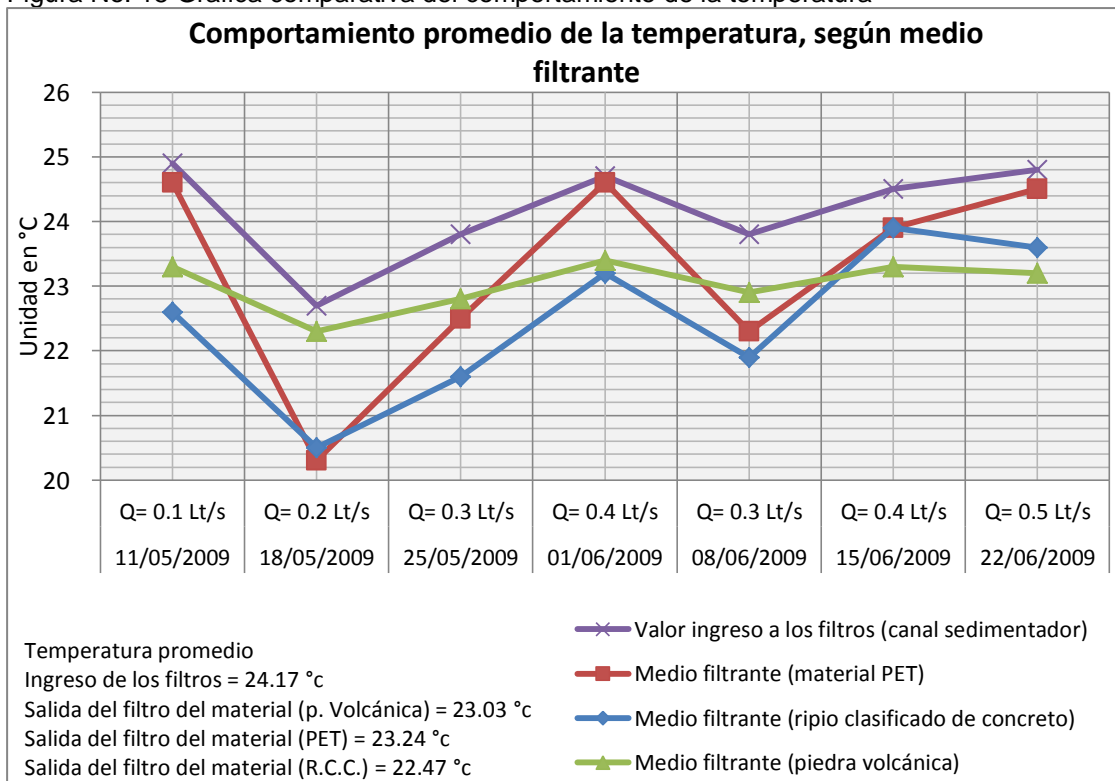
5.1.8 Análisis del comportamiento de la temperatura

Análisis comparativo del comportamiento de la Temperatura, del medio filtrante ripio clasificado de concreto con respecto al existente de piedra volcánica y material PET.

Tabla XIV. Tabla de análisis de la temperatura según medio filtrante

Parámetro analizado	Unidad	Valor ingreso a los filtros (canal sedimentador)	Medio filtrante (piedra volcánica)	Medio filtrante (material PET)	Medio filtrante (ripio clasificado de concreto)	Datos del muestreo	
		Valor inicial	Valor final	Valor final	Valor final	Fecha	Caudal
Temperatura	°C	24.900	23.300	24.600	22.600	11/05/2009	Q= 0.1 Lt/s
Temperatura	°C	22.700	22.300	20.300	20.500	18/05/2009	Q= 0.2 Lt/s
Temperatura	°C	23.800	22.800	22.500	21.600	25/05/2009	Q= 0.3 Lt/s
Temperatura	°C	24.700	23.400	24.600	23.200	01/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
Temperatura	°C	23.800	22.900	22.300	21.900	08/06/2009	Q= 0.3 Lt/s
Temperatura	°C	24.500	23.300	23.900	23.900	15/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
Temperatura	°C	24.800	23.200	24.500	23.600	22/06/2009	Q= 0.5 Lt/s
Temperatura promedio		24.17	23.03	23.24	22.47		

Figura No. 15 Grafica comparativa del comportamiento de la temperatura



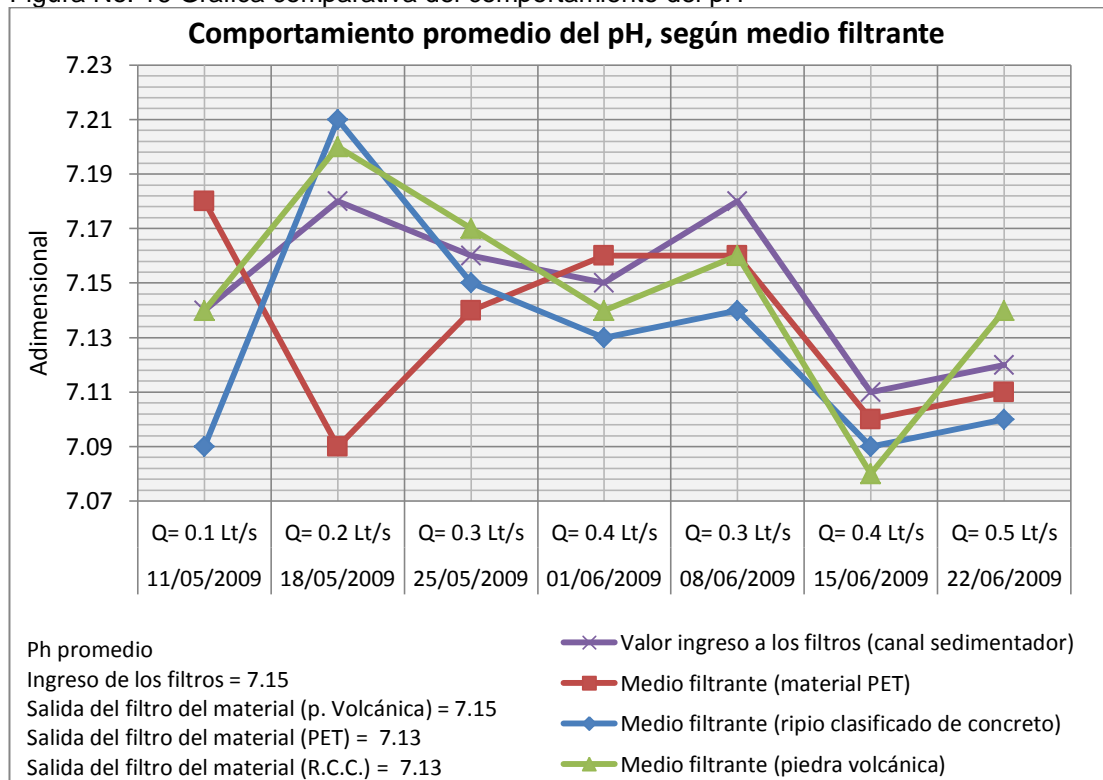
5.1.9 Análisis del comportamiento de pH

Análisis comparativo del comportamiento del Potencial de Hidrogeno, del medio filtrante ripio clasificado de concreto con respecto al existente de piedra volcánica y material PET.

Tabla XV. Tabla de análisis del pH según medio filtrante

Parámetro analizado	Valor ingreso a los filtros (canal sedimentador)	Medio filtrante (piedra volcánica)	Medio filtrante (material PET)	Medio filtrante (ripio clasificado de concreto)	Datos del muestreo	
	Valor inicial	Valor final	Valor final	Valor final	Fecha	Caudal
Potencial de Hidrogeno	7.140	7.140	7.180	7.090	11/05/2009	Q= 0.1 Lt/s
Potencial de Hidrogeno	7.180	7.200	7.090	7.210	18/05/2009	Q= 0.2 Lt/s
Potencial de Hidrogeno	7.160	7.170	7.140	7.150	25/05/2009	Q= 0.3 Lt/s
Potencial de Hidrogeno	7.150	7.140	7.160	7.130	01/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
Potencial de Hidrogeno	7.180	7.160	7.160	7.140	08/06/2009	Q= 0.3 Lt/s
Potencial de Hidrogeno	7.110	7.080	7.100	7.090	15/06/2009	Q= 0.4 Lt/s
Potencial de Hidrogeno	7.120	7.140	7.110	7.100	22/06/2009	Q= 0.5 Lt/s
pH promedio	7.15	7.15	7.13	7.13		

Figura No. 16 Grafica comparativa del comportamiento del pH



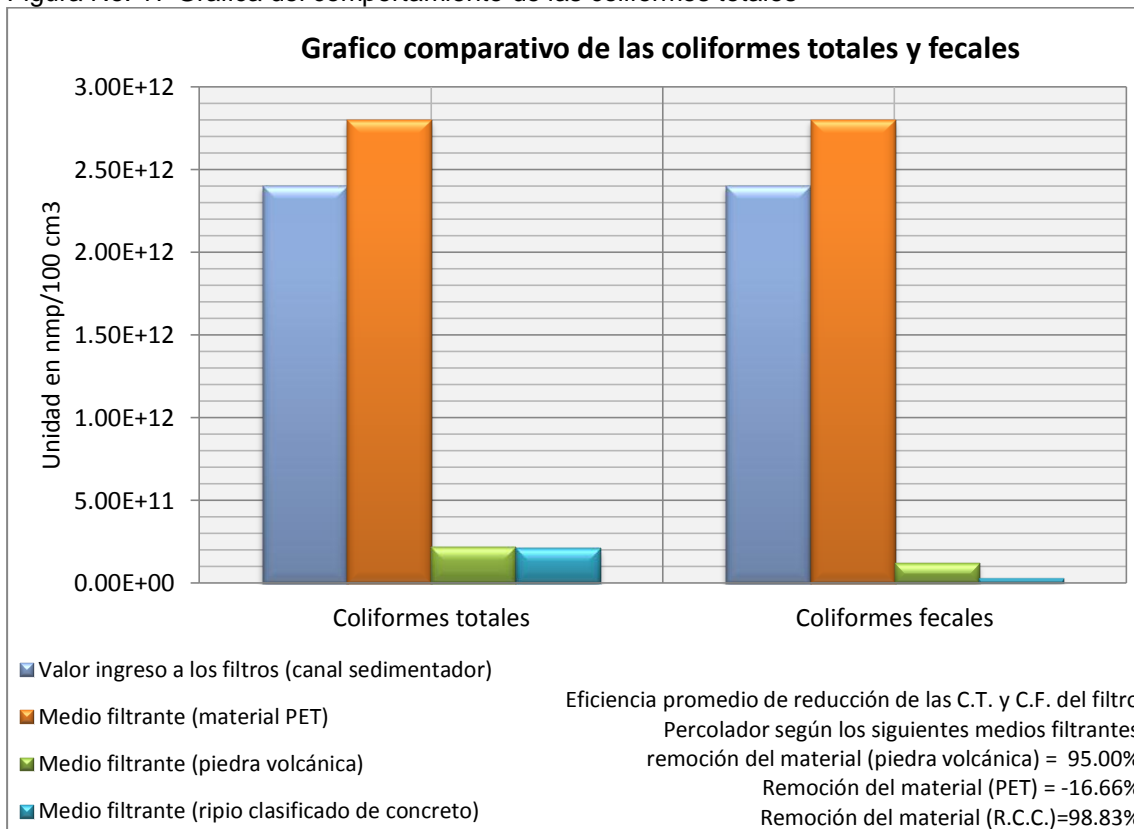
5.1.10 Análisis del comportamiento de coliformes totales y fecales

Análisis comparativo del comportamiento de las coliformes totales y fecales, del medio filtrante ripio clasificado de concreto con respecto al existente de piedra volcánica y material PET.

Tabla XVI. Tabla de análisis de las coliformes totales y fecales

Parámetro analizado	Unidad	Valor ingreso a los filtros (canal sedimentador)	Medio filtrante (piedra volcánica)	Medio filtrante (material PET)	Medio filtrante (ripio clasificado de concreto)	Datos del muestreo	
		Valor inicial	Valor final	Valor final	Valor final	Fecha	Caudal
Coliformes totales	NMP/100 CM3	2.40E+12	2.20E+11	2.80E+12	2.10E+11	22/06/2009	Q= 0.3 Lt/s
Coliformes fecales	NMP/100 CM3	2.40E+12	1.20E+11	2.80E+12	2.80E+10	22/06/2009	Q= 0.3 Lt/s
Eficiencia de la reducción de coliformes totales			90.8333%	-16.6667%	91.2500%		
Eficiencia de la reducción de coliformes fecales			95.0000%	-16.6667%	98.8333%		

Figura No. 17 Grafica del comportamiento de las coliformes totales





6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

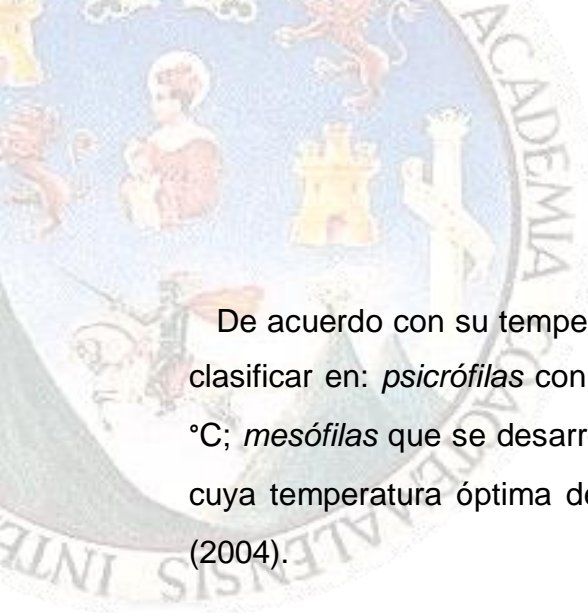
De los valores obtenidos en las tablas IV a la XIV se obtienen las eficiencias de cada uno de los medios filtrantes que contienen los tres tipos de filtros percoladores existentes en la planta experimental de tratamiento de agua residual “Ingeniero Arturo Pazos Sosa”, los cuales se muestran al pie de cada tabla mencionada. Algunos de estos valores están en blanco, debido a que los resultados de estas pruebas no fueron confiables, razón por la cual se decidió obviarlos.

Para realizar el análisis comparativo de las unidades existentes según su medio filtrante se trató de que ambas unidades trabajen con las mismas condiciones de carga orgánica y carga hidráulica. En el caso del filtro percolador con medio filtrante ripio clasificado de concreto el caudal máximo fue de 0.5 litros por segundo, mientras el mínimo fue de 0.1 litros por segundo, muy por debajo del rango mínimo; este factor incrementa el tiempo de retención de la unidad.

6.1 Interpretación de los parámetros evaluados

6.1.1 Temperatura

La estabilización de la materia orgánica se consigue biológicamente, gracias a la acción de una variedad de microorganismos, principalmente bacterias. Las condiciones ambientales, temperatura y el pH tienen un papel importante en la supervivencia y crecimiento de las bacterias en la biopelícula formada en el medio filtrante. Según el intervalo de temperaturas en el que se desarrollaron los análisis, es óptimo. Metcalf & Eddy (2004).



De acuerdo con su temperatura óptima de desarrollo las bacterias se pueden clasificar en: *psicrófilas* con temperaturas óptimas de desarrollo de 12 °C a 18 °C; *mesófilas* que se desarrollan mejor entre los 25 °C y 40 °C; y las *termófilas* cuya temperatura óptima de desarrollo es de 55 °C a 65 °C. Metcalf & Eddy (2004).

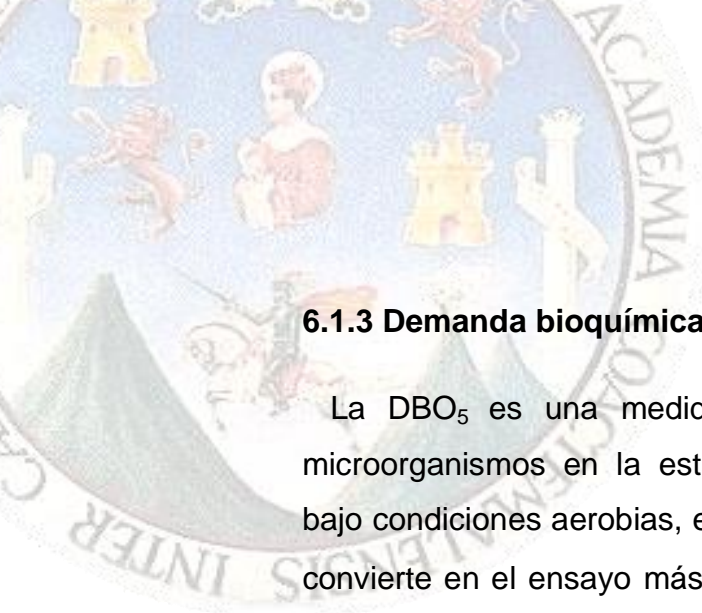
La temperatura registrada en ambos sistemas de tratamiento evaluados, varían en un rango de 22 a 25 °C, por tanto, se encuentran dentro del rango mesófilico. La operación de los filtros percoladores, generalmente, ocurre en el rango mesófilico. Barboza (1990). Debido a la similitud de temperaturas que se presentan en ambas unidades se ve que los filtros percoladores en estudio se encuentran operando en el rango mesofílico.

6.1.2 Potencial de hidrogeno

Como se mencionó en el párrafo anterior, el pH desempeña un papel importante en el crecimiento de las bacterias. La mayoría de ellas no toleran niveles de pH por debajo de 4.0 ni superiores a 9.5. En general, el pH óptimo para el crecimiento bacteriano se sitúa entre 6.5 y 7.5.

Los resultados promedio del pH del filtro percolador con medio filtrante ripio clasificado de concreto fueron 7.15 para la entrada y 7.13 para la salida; mientras que en el filtro percolador con medio filtrante material PET fue el mismo. Los valores máximos y mínimos de entradas y salidas de cada filtro percolador se puede observar en la tabla XIV.

Se observa que el pH se encuentra dentro del rango óptimo para este tipo de tratamientos; esto permite un rápido crecimiento bacteriano en ambas unidades estudiadas.



6.1.3 Demanda bioquímica de oxígeno

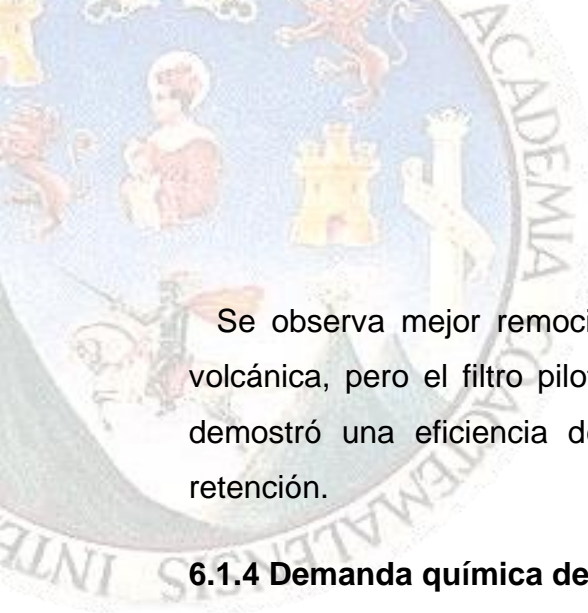
La DBO_5 es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable; bajo condiciones aerobias, en un período de cinco días y a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; por lo que se convierte en el ensayo más importante para determinar la concentración de la materia orgánica en aguas residuales. Romero (1999).

El valor promedio obtenido en el agua cruda en la fase del sedimentador primario fue de 178.50 mg/l para la entrada al filtro percolador con medio filtrante ripio clasificado de concreto. De acuerdo con la tabla I, la composición típica del agua residual doméstica bruta, se puede caracterizar como un agua residual doméstica cruda de concentración media.

La variación de la concentración de DBO_5 en el agua de entrada de los filtros percoladores puede deberse a un proceso de sedimentación.

Los valores promedio de DBO_5 del efluente para el filtro percolador con medio filtrante ripio clasificado de concreto y el filtro percolador existente con medio filtrante piedra volcánica son de 26.44 mg/l y 18.94 mg/l respectivamente. Estos valores representan un porcentaje de remoción del 85.19% para el filtro percolador con medio filtrante ripio clasificado de concreto y de un 89.38% para el filtro percolador con medio filtrante piedra volcánica.

Las eficiencias promedio obtenidas de los filtros percoladores fueron 85.19% para el filtro percolador con medio filtrante ripio clasificado de concreto y de 89.38% para el filtro percolador con medio filtrante piedra volcánica. Según Yáñez (1993), los filtros percoladores registran eficiencias de remoción de DBO_5 del 89.38% .



Se observa mejor remoción del filtro percolador con medio filtrante piedra volcánica, pero el filtro piloto con medio filtrante ripio clasificado de concreto demostró una eficiencia de 90.83%, esto puede ser debido al tiempo de retención.

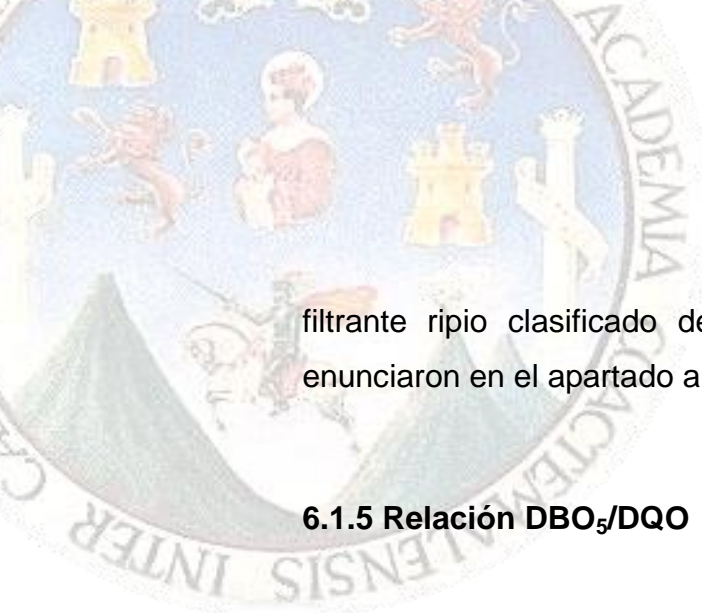
6.1.4 Demanda química de oxígeno

La DBO_5 es una medida de la cantidad de oxígeno consumida por la porción de la materia orgánica existente en la muestra y oxidable por un agente químico oxidante fuerte. El valor de la DQO es usado extensivamente en el análisis de las aguas residuales; junto con el valor de la DBO_5 permiten determinar las condiciones de la biodegradabilidad y el contenido de sustancias tóxicas en la muestra, así como las eficiencias de las unidades de tratamiento. Romero (1999).

El valor promedio obtenido en el agua cruda en la fase del sedimentador primario fue de 365.06 mg/l para la entrada al filtro percolador con medio filtrante ripio clasificado de concreto. De acuerdo con la tabla II, Composición típica del agua residual doméstica bruta, se puede caracterizar como un agua residual doméstica cruda de concentración media.

Los valores promedio de DQO del efluente para el filtro percolador con medio filtrante ripio clasificado de concreto y el filtro percolador existente con medio filtrante piedra volcánica son de 68.61 mg/l y 46.61 mg/l respectivamente. Estos valores representan un porcentaje de remoción de 87.23% para el filtro percolador con medio filtrante ripio clasificado de concreto y de 81.21% para el filtro percolador con medio filtrante piedra volcánica.

Al igual que la DBO_5 el filtro percolador con medio filtrante piedra volcánica presenta una eficiencia ligeramente mayor que el filtro percolador con medio



filtrante ripio clasificado de concreto, esto se debe a las causas que se enunciaron en el apartado anterior.

6.1.5 Relación DBO_5/DQO

Los valores de la relación DBO_5/DQO proporcionan una idea de la biodegradabilidad del agua residual y del tipo de proceso por aplicar, según se muestra en la siguiente tabla.

Tabla XVII. Relación DBO_5/DQO

Biodegradabilidad del agua residual	DBO_5/DQO
Poco biodegradable	< 0.20
Biodegradable	0.20 – 0.40
Muy biodegradable	> 0.40

Fuente: Carrillo (2006)

Si la relación DBO_5/DQO para aguas residuales no tratadas es mayor a 0.40 se considera fácilmente tratable mediante procesos biológicos; si la relación es menor que 0.20, el agua residual puede contener constituyentes tóxicos o se pueden requerir microorganismos aclimatados para su estabilización.

Tabla XVIII. Comparación de relaciones DBO_5/DQO según tratamiento

Tipo de tratamiento	DBO_5/DQO
No tratada	0.3 – 0.8
Después de tratamiento primario	0.4 – 0.6
Efluente final	0.1 – 0.3

Fuente: Crites, Tchobanoglous (2000)

A continuación se presentan los resultados de la relación de DBO_5/DQO en cada uno de los filtros percoladores, tanto a la entrada de la unidad, como el efluente final de estas.

Tabla XIX. Comparación de relaciones DBO₅/DQO

Relación	Relación DBO ₅ /DQO					
	F.P. con medio filtrante piedra volcánica		F.P. con medio filtrante ripió clasificado de concreto		F.P. con medio filtrante material PET	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
DBO₅/DQO	0.4890	0.4064	0.4890	0.3854	0.4890	0.2819

Fuente: Crites, Tchobanoglous (2000)





Los resultados de la relación de DBO₅/DQO en los efluentes de cada filtro percolador con medio filtrante ripio clasificado de concreto permiten observar que el agua es biodegradable, por lo que es fácilmente tratada por medios biológicos.

Según Crites, Tchobanoglous (2000), la relación de DBO₅/DQO en los efluentes del sistema es alta, por lo que es claro que los filtros percoladores deben ir acompañados con tratamientos secundarios para asegurar una mejor calidad del efluente final.

6.2 Comparación de resultados con las normas de Centroamérica

A continuación se muestra la tabla XIX, que incluye los valores máximos permisibles de los parámetros de rigor, utilizados en las distintas normas de Guatemala y Honduras, de vertidos de aguas residuales tratadas a cuerpos receptores, junto con los resultados de los efluentes de los filtros percoladores evaluados. Esta información permite concluir si el sistema evaluado cumple con los requisitos de las normas referidas de los países mencionados.

Tabla XX. Comparación de resultados con las normas de C.A.

Normas centroamericanas de vertidos de agua residual							
Parámetros	Unidad						
					F.P. Piedra volcánica	F.P. Ripio clasificado de concreto	F.P. Materia I PET
Temperatura	°C	+/- 7	<25	23.09	22.47	23.24	
pH	U	6 a 9	6 a 9	7.15	7.13	7.13	
Sólidos sedimentables	cm ³ /l/h		1	0.31	1.29	0.24	
DBO ₅	mg/l	100	50	18.94	26.44	53.06	
DQO	mg/l		200	46.61	68.61	118.22	

1. Reglamento de las descargas y reúso de las aguas residuales y la disposición de lodos Acuerdo Gubernativo número 236-2006. Revisión cuatro, dos de mayo de dos mil veinticuatro.
2. Normas Técnicas de las Descargas de Aguas Residuales a Cuerpos Receptores y Alcantarillados Sanitarios. Acuerdo No. 058.


Como se puede observar en la tabla XIX, los tres filtros percoladores cumplen con los parámetros de temperatura, pH, sólidos sedimentables de ambos países. En caso de la DBO₅ y la DQO los filtros percoladores con medio filtrante ripio clasificado de concreto y piedra volcánica cumplen con la norma en ambos países a excepción del filtro percolador con medio filtrante material PET que no cumple con la norma en mención.





CONCLUSIONES

1. La hipótesis planteada en esta investigación es verdadera ya que es una alternativa económica apropiada para la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno, de demanda química de oxígeno, sólidos sedimentables y por el lado técnico fue viable desde la fase constructiva hasta el análisis de parámetros evaluados.
2. Según los cálculos realizados aplicando la fórmula de Velz, para que el filtro percolador con medio filtrante ripio clasificado de concreto opere con las condiciones de carga orgánica y carga hidráulica, debe contar con un caudal mínimo de 0.1 litros por segundo y un caudal máximo de 0.5 litros por segundo. El caudal máximo que se obtuvo durante el desarrollo del estudio fue de 0.6 litros por segundo: esto muestra un déficit en cuanto al caudal en el que debe operar la unidad; con ello aumenta el tiempo de retención.
3. El desarrollo del estudio fue demostrativo pues fue posible comparar los tres filtros percoladores existentes tras realizar el análisis comparativo de las unidades existentes según su medio filtrante, dado que las unidades trabajan con las mismas condiciones de carga orgánica e hidráulica. En el caso del filtro percolador con medio filtrante ripio clasificado de concreto, el caudal máximo fue de 0.5 litros por segundo, mientras el mínimo fue de 0.1 litros por segundo; muy por debajo del rango mínimo, factor que incrementa el tiempo de retención de la unidad.

- 
4. El monitoreo de las características del agua residual que ingresa a cada unidad establece que la DBO_5 promedio para el ingreso de los filtros percoladores es de 178.50 mg/litro; la DQO promedio de ingreso en los filtros respectivos, de 365.06 mg/litro; los sólidos sedimentables para los filtros respectivos, de $0.543 \text{ cm}^3/\text{litro/hora}$. Esto demuestra las diferencias en cuanto a la calidad de agua que ingresa a cada unidad, a pesar de las modificaciones para procurar que ingrese un caudal con características similares.
 5. Para la unidad con medio filtrante piedra volcánica se obtuvo una eficiencia de remoción promedio de la DBO_5 de 89.38%; para la unidad con medio filtrante material PET, fue de 70.27%; y para la unidad con medio filtrante ripio clasificado de concreto fue de 85.18%. La remoción obtenida para las respectivas unidades, según su medio filtrante, se encuentra por arriba del 50% que es el valor citado en la bibliografía consultada (Yáñez 1993). Sin embargo, se deberá considerar que esta unidad presenta un periodo de retención superior al rango en que debe operar.
 6. La eficiencia promedio de remoción de la DQO obtenida fue de 87.23% para la unidad con medio filtrante piedra volcánica, de 67.61% para la unidad con medio filtrante material PET y de 81.20% para la unidad con medio filtrante ripio clasificado de concreto.
 7. El costo de cada unidad piloto incluyendo materiales, mano de obra calificada y transporte es de Q 1,415.00. El total de inversión por las tres unidades es de Q 4,245.00.



RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio que determine las dimensiones reales de las unidades evaluadas (internas y externas), con el objeto de proponer mejoras que permitan que éstas se adapten a los caudales disponibles dentro de la planta experimental de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria “Ingeniero Arturo Pazos Sosa”.
2. Mantener un control estricto de los caudales que ingresan a cada unidad para evitar que estos sean manipulados con la llave de paso e intervenga en la eficiencia de las unidades localizadas en la planta experimental de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria “Ingeniero Arturo Pazos Sosa”.
3. Realizar un estudio que determine los caudales que ingresan a cada unidad localizada dentro de la planta experimental de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria “Ingeniero Arturo Pazos Sosa”.





BIBLIOGRAFÍA

1. *American Water Works Association. American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21th edition.* Washington, EEUU. 2002.
2. *Calidad y tratamiento del agua. Manual de suministros de agua comunitaria. 5ª Ed. En Inglés. EEUU. McGraw Hill. 2002.*
3. *Arboleda Valencia, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. 3ª Ed. EEUU. McGraw Hill. 2000.*
4. *Fair G., Geyer, D. y Okun, D. Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales. Tomo II. México, LIMUSA. 1979.*
5. *Manual de tratamiento de aguas negras. Departamento de Sanidad del estado de New York. México. LIMUSA. 1980.*
6. *Nalco Chemical Company / Kemmer, Frank. Manual del agua. México, McGraw Hill. 1989.*
7. *Pelczar, Michael J. / Reid, Roger. Microbiología. 3ª. Ed. EEUU. McGraw Hill. 1990.*
8. *Tabarini de Abreu, Alba. Apuntes de taller de calidad del agua. ERIS-USAC, Guatemala. 1992.*
9. *Tchobanoglous & Crites. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Colombia, McGraw Hill. 2000.*
10. *Walter, William G. / Mcbee, Richard H. Microbiologic general. Mexico, Continental. 1985.*