



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos, ERIS

**INVESTIGACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS ETAPAS EN SERIE DEL
FILTRO PERCOLADOR DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS**

INGENIERO, ÓSCAR LUIS RAMÍREZ SÁNCHEZ

Asesorado por el Dr. Ing. ADÁN POCASANGRE COLLAZOS

Guatemala, junio del 2012.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

**INVESTIGACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS ETAPAS EN SERIE DEL
FILTRO PERCOLADOR DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS**

PRESENTADO AL COMITÉ DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA SANITARIA

POR

INGENIERO, ÓSCAR LUIS RAMÍREZ SÁNCHEZ

ASESORADO POR

Dr. Ing. ADÁN POCASANGRE COLLAZOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRÍA (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN INGENIERÍA SANITARIA

GUATEMALA, JUNIO DEL 2012.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



HONORABLE DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**DIRECTOR DE LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS**

M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXÁMEN GENERAL PRIVADO

EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	Dr. Ing. Adán 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 mi trabajo de graduación titulado:

INVESTIGACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS ETAPAS EN SERIE DEL FILTRO PERCOLADOR DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos ERIS, el 15 de agosto del 2011.

Ing. Óscar Luis Ramírez Sánchez

Guatemala, 5 Junio de 2012

Señores
Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

Respetuosamente les comunico que he revisado, en mi calidad de Asesor y Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el documento de Estudio Especial II titulado:

"INVESTIGACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS ETAPAS EN SERIE DEL FILTRO PERCOLADOR DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS"

Presentado por el estudiante de la maestría mencionada,

Ingeniero Oscar Luis Ramírez Sánchez

Les manifiesto que el estudiante cumplió en forma satisfactoria con los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS- y la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la realización de su estudio.

Agradeciéndoles la atención a la presente, se suscribe de ustedes.

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Dr. Ing. Adán E. Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hidráulicos
ERIS

Edificio ERIS
Area de Prefabricados
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86212, 86213 y 86239
(502) 2418 9140

Guatemala, 5 Junio de 2012

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hidráulicos
ERIS

Edificio ERIS
Area de Prefabricados
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86212, 86213 y 86239
(502) 2418 9140

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis, M.Sc. Ing. Zenón Much Santos, Dr. Ing. Adán Pocasangre Collazos, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria; Dr. Ing. Adán Pocasangre Collazos y la revisión lingüística realizada por el Licenciado Rafael Gutiérrez Esquivel, Colegiado No. 7245, al trabajo del estudiante Ingeniero Oscar Luis Ramírez Sánchez, titulado **INVESTIGACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS ETAPAS EN SERIE DEL FILTRO PERCOLADOR DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS**. En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los 5 días del mes de junio del 2012.

IMPRIMASE

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

DIRECTOR



ACTO QUE DEDICO A:

A Dios Todopoderoso, por darme la vida, sabiduría y entendimiento para reconocer la diferencia entre lo bueno y lo malo, que me permitió alcanzar una nueva meta.

Sofía, hijita por ser parte de la alegría e inspiración de mi vida, que me impulsan a ser mejor cada día.

Cynthia, ha sido muy difícil estar este tiempo sin tú compañía y amor, pero gracias por tu apoyo y comprensión para lograr este sueño, ya hecho realidad y ser un ejemplo positivo para nuestra hijita.

Carolina, hija, eres parte de la alegría de mi vida, aunque cueste siempre puedes alcanzar tus metas.

Papi y Mami, que sin importar lo que pase, siempre están ahí.

Mis hermanas y sobrinos, todo lo que deseamos se puede lograr.

AGRADECIMIENTOS A:

A Dios Todopoderoso, por su protección para mi persona y amigos de aventura, durante todo este tiempo que no hemos estado en nuestros países.

AyA, a todos mis compañeros y amigos en el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, por haberme apoyado en esta aventura intelectual.

DAAD, por haberme brindado la oportunidad de incrementar mis conocimientos por medio de una Maestría en Ciencias. Sigán apoyando al desarrollo de nuestros países.

USAC, por haberme acogido durante todo este tiempo como uno más de sus hijos, en este hermoso país.

ERIS, a todo su Personal, cada uno de ellos y ellas ha aportado algo nuevo en mi vida, espero ser digno de ello.

Personal del Laboratorio, por permitirme realizar mi trabajo de investigación en sus instalaciones, Moisés Dubón "*Fito*", gracias por ser la persona tan servicial que eres.

Compañero(a)s, llegamos como "*los extranjeros*" y nos vamos como sus amigos. Mantengamos el grupo ERIS 2011.

Personal de la Planta, al personal de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, por quienes la planta es un digno ejemplo de imitar y orgullo para la USAC. En especial a Don Arturo, por compartir su conocimiento y experiencia, sigan adelante.

Adam, Zenón y Pedro, gracias por todo el apoyo que me dieron no sólo para la culminación de esta investigación, sino en cada una de sus clases. Mis respetos.

Alejandra, gracias por haber aceptado hacerte cargo de la Dirección de Plantas Potabilizadoras durante mi ausencia, voy sin temor de nuevo al trabajo.

Rommel y Marvin, llegamos sin conocernos a este país y nos vamos como amigos a nuestros países.

GLOSARIO

Aforo: determinación del caudal que ingresa a una planta de tratamiento.

Afluente: caudal de agua que llega a una planta o unidad de tratamiento .

Agua residual: las aguas que han recibido uso y cuyas características han sido modificadas.

Carga: el resultado de multiplicar el caudal por la concentración determinados en un efluente y expresada en kilogramos por día.

Caudal: el volumen de agua por unidad de tiempo.

Cuerpo receptor: embalse natural, lago , laguna, río, quebrada, manantial, humedal, estuario, estero, manglar, pantano, aguas costeras y aguas subterráneas donde se descargan aguas residuales.

Demanda Bioquímica de Oxígeno: la medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales, que se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable durante un período de cinco días y una temperatura de 20°C. Se representa como DBO₅.

Demanda Química de Oxígeno: la medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales, que se determina por la cantidad equivalente de oxígeno utilizando en la oxidación química. Se representa como DQO.

Efluente: caudal de agua tratada que sale de una planta o unidad de tratamiento.

Eutrofización: proceso de disminución de la calidad de un cuerpo de agua como consecuencia del aumento de nutrientes, lo que a su vez propicia el desarrollo de microorganismos y limita la disponibilidad de oxígeno disuelto que requiere la flora y fauna.

Muestra: la parte representativa, a analizar del agua residual o agua para reuso.

Muestra compuesta: dos o más muestras simples que se toman en intervalos determinados de tiempo y que se adicionan para obtener un resultado promedio de las características del agua.

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos: instalación física constituida por procesos físicos, químicos, biológicos, utilizada para mejorar las características del agua residual. Se le conoce como Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VI
TABLAS	IX
RESUMEN	XI
ASPECTOS GENERALES	XII
INTRODUCCIÓN	XII
OBJETIVOS	XIII
HIPÓTESIS.....	XIII
ANTECEDENTES.....	XIV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVI
JUSTIFICACIÓN.....	XVI
ALCANCE	XVII
LIMITACIONES.....	XVII
1.MARCO TEÓRICO.....	1
.....	
1.1 Tratamiento biológico del agua residual.....	1
1.1.1 Microorganismos	2
1.1.2 Fuente de carbono y energía.....	3
1.1.3 Necesidades nutricionales.....	3
1.2 Microorganismos que intervienen en el tratamiento.....	4
1.2.1 Bacterias.....	5
1.2.2 Hongos	6
1.2.3 Protozoos.....	6
1.2.4 Rotíferos	7
1.2.5 Algas.....	7
1.2.6 Crecimiento de bacterias	7

1.2.7	Cultivos mixtos de microorganismos	9
1.3	Procesos de tratamiento biológico.....	9
1.3.1	Índice de Biodegradabilidad	12
1.3.2	Agua Residual	12
1.3.3	Composición del agua residual	13
1.3.4	Eficiencias de los tratamientos Primarios y Secundarios	13
1.3.5	Agua residual universitaria	14
1.4	Filtros Percoladores.....	15
1.4.1	Filtros de baja carga.....	18
1.4.2	Filtros de media y alta carga	19
1.4.3	Filtros de muy alta carga	19
1.4.4	Filtros de desbaste	19
1.4.5	Filtros de dos etapas	19
1.4.6	Componentes de un filtro percolador.....	21
1.4.6.1	Dosificación del agua residual.....	21
1.4.6.2	Sistema de distribución	22
1.4.6.3	Medio filtrante.....	23
1.4.6.4	Sistema de drenaje inferior.....	24
1.4.6.5	Ventilación.....	24
1.4.6.6	Sedimentadores y digestor de lodos	25
2.	ASPECTOS TEÓRICOS.....	26
2.1	Planta Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC	26
2.2	Ubicación.....	27
2.3	Localización Geográfica	28
2.4	Descripción de la planta de tratamiento.....	29
2.4.1	Tratamiento preliminar.....	30

2.4.1.1	Cámara de ingreso	31
2.4.1.2	Rejilla separadora.....	32
2.4.1.3	Canal desarenador	32
2.4.1.4	Fosa.....	32
2.4.2	Tratamiento primario.....	33
2.4.3.1	Sedimentador primario	33
2.4.3	Tratamiento secundario	35
2.4.3.1	Filtros percolador	35
2.4.3.2	Sedimentador secundario.....	37
2.4.4	Digestor de lodos y patio de secado.....	38
2.5	Personal operativo y mantenimiento	40
3.	METODOLOGÍA.....	43
3.1	Selección de los parámetros de control	43
3.2	Análisis estadístico para determinar el número de muestras.....	44
3.3	Puntos de recolección de muestras	45
3.4	Frecuencia de análisis de muestras.....	46
3.5	Selección del tipo de muestra	47
3.6	Medición de caudal	48
3.2.1.	Selección del tipo de estructura de medición.....	48
3.2.2.	Aforo volumétrico del caudal de agua residual	50
3.7	Evaluación preliminar de la granulometría	50
4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	51
4.1	Características del agua residual que ingresa, afluyente, a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC	51
4.1.1.	Índice de Biodegradabilidad.....	54

4.1.2.	Carga orgánica e hidráulica.....	55
4.1.3.	Caudal de agua residual que ingresa a la planta de tratamiento	56
4.2	Desempeño de cada unidad de tratamiento	58
4.2.1.	Variación de la concentración de la materia orgánica, DBO ₅	58
4.2.2.	Variación de la concentración de la demanda química de oxígeno, DQO.....	59
4.2.3.	Variación de la concentración de los sólidos suspendidos, SS.....	60
4.2.4.	Variación de la temperatura promedio, T.....	61
4.2.5.	Variación del pH promedio	62
4.3	Eficiencia por cada unidad de tratamiento	63
4.3.1.	Eficiencia por unidad de tratamiento en la remoción de la materia orgánica, DBO ₅	64
4.3.2.	Eficiencia por etapa del filtro percolador en la remoción de la materia orgánica, DBO ₅	65
4.3.3.	Eficiencia por unidad de tratamiento en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO.....	66
4.3.4.	Eficiencia por etapa del filtro percolador en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO..	67
4.3.5.	Eficiencia global para la remoción de los sólidos suspendidos, SS.....	68
4.4	Características del agua tratada, efluente, de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC	70
4.5	Evaluación preliminar de la granulometría del medio filtrante de las etapas del filtro percolador	74

5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	78
	
5.1	Características del agua residual que ingresa, afluente, a la Planta de Tratamiento de la USAC	78
5.2	Caudal de aguas residuales que ingresan a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	81
5.3	Remoción por cada unidad de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	83
5.4	Eficiencias de cada unidad de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	84
5.5	Evaluación preliminar de la granulometría del filtro percolador.....	86
5.6	Características del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	86
	CONCLUSIONES	89
	RECOMENDACIONES	91
	BIBLIOGRAFÍA.....	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

1.	Tratamiento biológico de la materia orgánica	2
2.	Curva de crecimiento bacteriano	8
3.	Crecimiento microbiano en cultivos mixtos	9
4.	Valores usuales para la remoción de DBO y SS en sedimentadores primarios.....	14
5.	Esquema de la película biológica en un filtro percolador	17
6.	A- Sistema de distribución rotatorio del filtro percolador ubicado en la Planta de tratamiento de aguas residuales de Villa Floresta. B- Sistema de distribución por manifold del filtro percolador ubicado en la Planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC	22
7.	Medios filtrantes utilizados en filtros percoladores; A-Piedra, B-Esferas flujo mezclado.	23
8.	Rótulo ubicado en la Planta Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC	27
9.	Ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC	28
10.	Vista aérea de la localización de las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC	29
11.	Esquema de la Planta Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC	30
12.	Cámara de ingreso	31
13.	Vista general de la cámara ingreso, rejillas, canal desarenador y fosa	33
14.	Sedimentador primario.....	34

15.	Variaciones de tamaño en la roca volcánica del filtro percolador.....	35
16.	Sistema de manifiol de tuberías para distribución del agua residual.....	36
17.	Sistema de aireación de la Etapa I, Filtro percolador.....	37
18.	Sedimentador secundario	38
19.	Digestor de lodos y patio de secado	39
20.	Lodo deshidratado y seco	39
21.	Personal de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	40
22.	Sedimentador primario, Filtro percolador y Sedimentador secundario, año 2001	41
23.	Sedimentador primario y Filtro percolador, año 2006.....	41
24.	Sedimentador primario, Filtro percolador y Sedimentador secundario, año 2012.....	42
25.	Número aproximado de muestras necesarias para calcular una concentración media	45
26.	Puntos de recolección de muestra en los efluentes de las unidades de tratamiento.....	46
27.	Esquema del diseño del vertedero triangular	49
28.	Concentración de materia orgánica, DBO ₅ , en el afluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	52
29.	Demanda química de oxígeno, DQO, en el afluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	52
30.	Concentración de sólidos suspendidos, SS, en el afluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	53
31.	Temperatura y pH promedios en el afluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	53

32.	Índice de Biodegradabilidad en el afluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC	54
33.	Cargas orgánicas e hidráulicas aplicadas a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC	56
34.	Variación del caudal promedio de agua residual que ingresa a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.	57
35.	Variación de la concentración de materia orgánica, DBO ₅ , en las unidades de tratamiento	59
36.	Variación de la demanda química de oxígeno, DQO, en las Unidades de tratamiento	60
37.	Variación de la concentración de sólidos suspendidos, SS, en las unidades de tratamiento	61
38.	Variación de la temperatura en las unidades de tratamiento	62
39.	Variación del pH en las unidades de tratamiento	63
40.	Eficiencia por unidad de tratamiento en la remoción de la materia orgánica, DBO ₅	65
41.	Eficiencia por etapa del filtro percolador, en la remoción de la materia orgánica, DBO ₅	66
42.	Eficiencia por unidad de tratamiento en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO.....	67
43.	Eficiencia por etapa del filtro percolador, en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO.....	68
44.	Eficiencia global para la remoción de los sólidos suspendidos, SS.....	69
45.	Concentración de materia orgánica, DBO ₅ , en el efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC	71
46.	Demanda química de oxígeno, DQO, en el efluente de las Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC	71
47.	Concentración de sólidos suspendidos, SS, en el efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC	72

48.	Temperatura y pH promedios en el efluente de las Planta de Tratamiento de la USAC	72
49.	Nitrógeno y Fósforo en el efluente de las Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	73
50.	Curva granulométrica por etapas del filtro percolador.....	77

TABLAS

I.	Intervalos de temperatura típicos para algunas clases de bacterias.....	5
II.	Principales procesos biológicos utilizados para el tratamiento del agua residual	10
III.	Índice de biodegradabilidad	12
IV.	Composición típica del agua residual doméstica.....	13
V.	Rendimiento logrado en el tratamiento del agua residual	14
VI.	Valores promedios de los parámetros de agua residual de centros universitarios.....	15
VII.	Características técnicas usuales para el diseño de filtros percoladores.....	20
VIII.	Caudales de dosificación típicos de filtros percoladores	21
IX.	Parámetros de análisis seleccionados	71
X.	Características del agua residual que ingresan a la Planta Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	51
XI.	Índice de biodegradabilidad del agua residual que ingresa a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	54
XII.	Carga orgánica e hidráulica que ingresa a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.....	55
XIII.	Mediciones volumétricas del caudal de agua residual que ingresan a la Planta Tratamiento de Aguas Residuales	

	de la USAC.	57
XIV.	Variación de la concentración de materia orgánica, DBO ₅	58
XV.	Variación de la demanda química de oxígeno, DQO	59
XVI.	Variación de la concentración de sólidos suspendidos, SS	60
XVII.	Variación de la temperatura (promedio), T.....	61
XVIII.	Variación del pH (promedio)	62
XIX.	Eficiencia por unidad de tratamiento en la remoción de la materia orgánica, DBO ₅	64
XX.	Eficiencia por etapa del filtro percolador, en la remoción de la materia orgánica, DBO ₅	65
XXI.	Eficiencia por unidad de tratamiento en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO.....	66
XXII.	Eficiencia por etapa del filtro percolador, en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO	67
XXIII.	Eficiencia de la remoción de los sólidos suspendidos, SS.....	69
XXIV.	Características del efluente de la Planta Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC	70
XXV.	Muestro del tamaño, longitud mayor, de los materiales que conforman el medio filtrante de cada etapa del filtro percolador	74
XXVI.	Características del medio filtrante de cada etapa del filtro percolador	75
XXVII.	Distribución de frecuencias de tamaños, dimensión mayor, de los medios filtrantes de cada etapa del filtro percolador	76
XXVIII.	Distribución de frecuencias acumuladas de tamaños, dimensión mayor, de los medios filtrantes de cada etapa del filtro percolador.....	76
XXIX.	Tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad del medio filtrante de cada etapa del filtro percolador	77

RESUMEN

El siguiente trabajo tiene como objetivo determinar la eficiencia en la remoción de la materia orgánica, medida como la demanda biológica de oxígeno, DBO₅, de cada Etapa del Filtro Percolador de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.

Para esto, se determinó el caudal de agua residual, demanda biológica de oxígeno, DBO₅, la demanda química de oxígeno, DQO, sólidos suspendidos, la temperatura y el pH, en los efluentes de cada una de las unidades de tratamiento; Afluente, Sedimentador Primario, Filtro Percolador (Etapas I, II y III), Sedimentador Secundario.

El caudal de 7 l/s, de agua residual generada en la Universidad, posee características propias de las de origen domésticos y similar a las reportadas para otras universidades. En cuanto a las eficiencias obtenidas, de forma global e inesperada, la primera unidad de tratamiento o Sedimentador Primario alcanza en promedio un 63.09%. y el Filtro Percolador un 32.62%. Al considerar solamente al Filtro Percolador, la Etapa I alcanza una eficiencia promedio del 71.71%, la Etapa II del 25.08% y Etapa III del 3.97%.

La evaluación preliminar de la granulometría del medio filtrante en el Filtro Percolador, muestra que los tamaños efectivos para las Etapas I, II y III son 12.5, 12.3 y 10.5 cm, respectivamente, siendo valores superiores a los conocidos para cada etapa.

El efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales cumple con los parámetros establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006, vigentes hasta el año 2020. Por lo cual debe analizarse entre el reuso del efluente en actividades permitidas o un tratamiento terciario para la remoción de nutrientes (nitrógeno).

ASPECTOS GENERALES

INTRODUCCIÓN

Dentro del tratamiento de las aguas residuales, se busca la sostenibilidad de los procesos así como la reutilización para diferentes usos de las aguas residuales tratadas. Entendiéndose la sostenibilidad como unidades que trabajen a gravedad y con un mínimo de operación y mantenimiento. Esta investigación se basó en evaluar el tratamiento secundario de la planta de tratamiento de aguas residuales generadas por la Universidad de San Carlos de Guatemala. El tratamiento secundario es por medio de procesos biológicos tipo aerobios con unidades de filtros percoladores los cuales están colocadas en serie (Etapa I, Etapa II y Etapa III) y este estudio se desarrolló partiendo de la hipótesis que la primer unidad del filtro percolador (Etapa I) tiene una mayor eficiencia que las Etapas II y III. Como una réplica de los filtros torre (gran altura), durante mucho tiempo se estuvo utilizando los filtros percoladores en serie, tomando como premisa que la sumatoria de la altura de las 3 etapas eran equivalentes a la altura total de un filtro torre; se utilizaba el área superficial de la Etapa I, como criterio de diseño para la carga hidráulica y orgánica.

Este estudio viene a comprobar que el criterio de diseño a adoptar es el de área superficial de la sumatoria de las áreas de cada una de las etapas de un filtro percolador; lo que conlleva para este caso de estudio (PTAR de la Universidad de San Carlos de Guatemala) que se podría triplicar el área superficial y con esto aumentar considerablemente el caudal a tratar para el tratamiento secundario. En conclusión se puede mencionar que el 71% de la carga de reducción de la carga orgánica medida por la DBO_5 ocurre en la primera etapa del filtro percolador.

Quisiera felicitar al estudiante Oscar Ramírez por haber aceptado este reto y haber concluido satisfactoriamente la investigación, dando aportes a la ingeniería sanitaria y especialmente al tratamiento de los procesos de las aguas residuales.

Adán E. Pocasangre Collazos

Asesor

*Profesor y coordinador de la maestría de Ingeniería Sanitaria
ERIS / USAC*

OBJETIVOS

General

Determinar el porcentaje de eficiencia de cada Etapa en serie del Filtro Percolador de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC para la remoción de la materia orgánica, DBO₅, en el agua residual generada en la Ciudad Universitaria.

Específicos

- Analizar las variaciones del caudal del agua residual que ingresan a la planta de tratamiento.
- Analizar la concentración de la materia orgánica, DBO₅, y carga orgánica, del agua residual que ingresa a la planta de tratamiento.
- Evaluar la eficiencia en la remoción de la materia orgánica, DBO₅, de cada unidad de tratamiento.
- Realizar una evaluación preliminar de la granulometría del medio filtrante en cada una de las etapas del filtro percolador.

HIPÓTESIS

La Etapa I del Filtro Percolador de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos, está alcanzando una eficiencia superior al 60% en la remoción de la materia orgánica, DBO₅, con respecto a las demás etapas.

ANTECEDENTES

El uso de Filtros Percoladores constituye una importante alternativa de diseño y construcción de plantas de tratamiento de agua residual, con altas eficiencias en la estabilización de la materia orgánica. Especialmente, en aquellas comunidades con limitados recursos económicos, ya que sus requerimientos de equipos electromecánicos pueden ser mínimos y hasta nulos.

Ante esta situación, en el año 1972, bajo la dirección del Ing. Arturo Pazos Sosa, profesor de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, ERIS, se emprendió el programa de investigación para buscar soluciones al tratamiento del agua residual doméstica, entre ellas mediante el uso de filtros percoladores. (Oakley 2011/ Cruz, 1990).

Para ello, la ERIS ha utilizado las instalaciones de la Planta de Tratamiento Aurora II “Ing. Arturo Pazos”, tanto para actividades didácticas como de investigación de los mismos estudiantes.

Lo cual ha producido una gran variedad de investigaciones relacionadas al uso de filtros percoladores, entre las que se pueden mencionar:

- Proyecto de investigación filtro percolador piloto. Ing. Arturo Pazos. 1972.
- Evaluación de dos filtros percoladores para tratamiento de aguas negras, Ing. Héctor Cruz Núñez. 1990.
- Eficiencia en el tratamiento de aguas servidas, por medio de un sistema de filtros percoladores construidos en serie. Ing. Javier Mayorga. 1980.
- Determinación de la eficiencia de remoción de materia orgánica de dos filtros percoladores en serie. Ing. Ricardo Berganza. 1982.

- Determinación de la eficiencia del filtro percolador torre construido con duroport como medio filtrante. Ing. Samuel Sanchez. 1978.
- Evaluación de la eficiencia de materia orgánica en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Colonia el Mezquital. Ing. Edgar Bravatti. 1983.
- Evaluación de filtro vertical de piedra pómez como post-tratamiento del efluente de una planta de filtros percoladores. Ing. Ricardo Alvarado. 1986.
- Implementación del material denominado “Ripio clasificado de concreto”, como material filtrante en filtros percoladores en la planta piloto “Ing. Arturo Pozos Sosa”. Ing. Alex López. 2010.
- Implementación de material de desecho PET como elemento filtrante en filtros biológicos. Ing. Jimmy Obdulio Cáceres. 2010.

Específicamente, en el caso de la Planta de Tratamiento de la Universidad de San Carlos, se han realizado los siguientes investigaciones.

- Evaluación del funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Negras de la Ciudad Universitaria. Ing. Luis Chávez. 1991.
- Evaluación de los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos, a través de la eficiencia en la remoción de *Streptococos* fecales. Ing. Magda López. 2010.
- Estudio de diagnóstico y plan de rehabilitación de dieciocho plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas; Planta USAC. ECOPLA Consultores Asociados S.A. 2001.

Las investigaciones anteriores, se han centrado en la evaluación de la eficiencia global de la planta de tratamiento. Sin embargo no se ha analizado la eficiencia individual de cada una de las tres etapas en serie del filtro percolador existentes en la Planta de Tratamiento de la Universidad de San Carlos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Universidad de San Carlos posee su propia planta de tratamiento del agua residual que es generada en su campus universitario, basada en el uso de procesos de tratamiento físicos y biológicos.

Para el tratamiento biológico, se dispone de un filtro percolador, construido en tres etapas y dispuesto en serie. Cada una de las etapas posee las mismas dimensiones constructivas y utilizan piedra volcánica como medio filtrante.

Ante esta situación, se debe analizar cuál es la eficiencia en la remoción de la materia orgánica, DBO_5 , para cada etapa y así poder determinar si es necesario el uso de una o más etapas para el tratamiento del aguas residual.

¿Será que solamente la Etapa I es necesaria para lograr una eficiente remoción de la materia orgánica, DBO_5 , en el Filtro Percolador en serie?

JUSTIFICACIÓN

El uso de Filtros Percoladores constituye una importante alternativa para el diseño y construcción de plantas de tratamiento de agua residual con altas eficiencias. Los mínimos o hasta nulos requerimientos de equipos electromecánicos, así como el bajo costo económico y simplicidad en la operación y mantenimiento, las constituyen en la opción viable para el tratamiento del agua residual en comunidades o países con limitados recursos económicos.

Bajo este concepto, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, es el mejor ejemplo del uso de tecnología apropiada para el tratamiento del agua residual, ya que es capaz de lograr eficiencias superiores al 90% en la remoción de la materia orgánica, DBO_5 , sin contar con un solo equipo electromecánico.

Debido a esto, es importante determinar las eficiencias individuales de cada una de las etapas del filtro percolador en serie, para disponer oportunamente de información técnica relativa al desempeño y posible aprovechamiento real de cada una de ellas.

Con esta información, se podrán tomar las decisiones de naturaleza técnica, operativa y de mantenimiento, que permitan tanto mantener como aumentar la eficiencia en la de la planta de tratamiento. Así como planificar, diseñar y ejecutar las obras que se requieran para preparar y adecuar los tratamientos del agua residual ante las futuras necesidades de la Ciudad Universitaria.

ALCANCE

El alcance del estudio es la disponibilidad de información técnica sobre las eficiencias en la remoción de la materia orgánica de cada una de las etapas del filtro percolador, de forma tal que puedan tomar decisiones sobre la operación y mantenimiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.

LIMITANTES

- Se dispone de autorización de acceso a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC de lunes a viernes, con un horario de 7:00 am a 4:00 pm.
- La investigación se realizó entre los meses de noviembre del 2011 a mayo 2012.
- La recolección de las muestras compuestas se realizó en un horario de 8:00 am a 12:00 pm.
- Las muestras recolectadas corresponden al afluente del agua residual bajo condiciones de días soleados y sin lluvia. Esto por cuanto el alcantarillado es de tipo combinado.
- No se encuentran disponibles los documentos técnicos de los criterios y memoria de diseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.
- No se contó con el oportuno apoyo universitario para la instalación de una estructura permanente de medición de caudal en el afluente del agua residual.

1. MARCO TEÓRICO

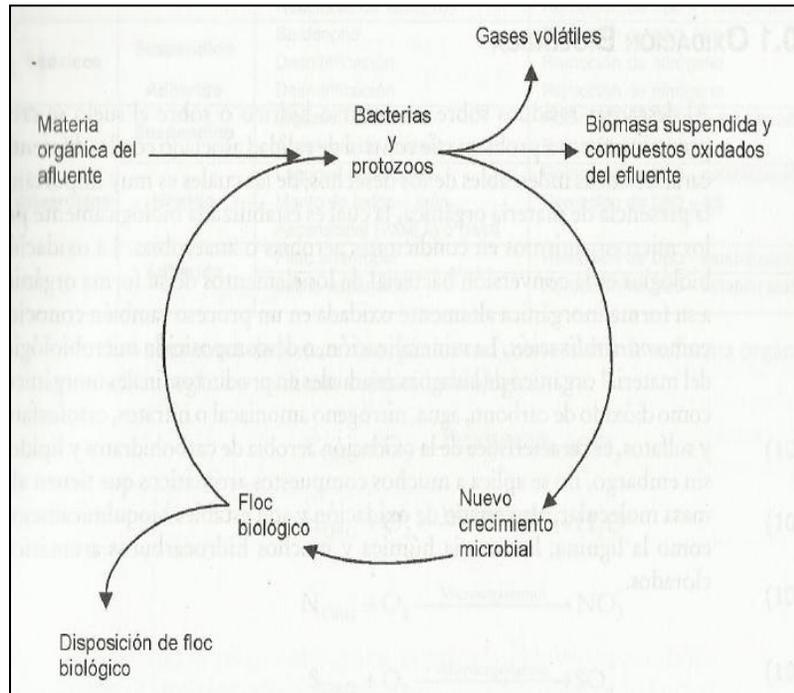
1.1 Tratamiento biológico del agua residual

El objetivo principal del tratamiento biológico del agua residual es la remoción de los contaminantes mediante actividad biológica. Para esto, se aprovecha la actividad biológica para remover, entre otros, sustancias orgánicas biodegradables, coloidales o disueltas del agua residual, mediante su conversión en gases que escapan a la atmósfera y en biomasa extraíble mediante sedimentación. Asimismo, se también se usa para remover nitrógeno y fósforo del agua residual de origen doméstico. (Romero, 2010 / Metcalf & Eddy, 1996).

En el caso de las aguas de retorno de usos industriales, es la eliminación de los nutrientes que puedan favorecer el crecimiento de plantas acuáticas. Independientemente del origen del agua residual, eliminar los nutrientes que puedan contener, permite reducir la eutrofización de los cuerpos de agua. (Metcalf & Eddy, 1996).

Lo anterior, se presenta en la figura siguiente.

Figura 1. **Tratamiento biológico de la materia orgánica**



Fuente: Romero, 2010.

1.1.1 Microorganismos

La eliminación de la DBO carbonosa, la coagulación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica se consigue biológicamente por la acción de una gran variedad de microorganismos, principalmente bacterias.

Estos microorganismos, utilizan la materia orgánica para convertirla en tejido celular, biomasa, que debe ser removido del efluente y formación de gases. La actividad bioquímica y reproducción de los microorganismos importantes para el tratamiento biológico del agua residual, están afectados por una fuente de carbono, energía, necesidades nutricionales y la naturaleza del metabolismo. (Metcalf & Eddy, 1996).

1.1.2 Fuente de carbono y energía

Los microorganismos que utilizan la materia orgánica como fuente de carbono celular para la formación de tejido celular se denominan heterótrofos. Los que utilizan el dióxido de carbono se llaman autótrofos.

Todo microorganismo necesita de una fuente de energía, una de carbono y elementos inorgánicos o nutrientes para poder reproducirse y crecer. La materia orgánica y el dióxido de carbono son de las principales fuentes de carbono que utilizan los microorganismos. Los primeros se denominan heterótrofos y los segundos autótrofos.

Los microorganismos heterótrofos estrictamente fermentativos se caracterizan por tasas de crecimiento y de producción de biomasa menores que los heterótrofos respiratorios, siendo estos últimos microorganismos más eficientes para el tratamiento del agua residual.

La energía necesaria para la síntesis celular se obtiene de la luz solar o bien de reacciones químicas de oxidación. Los primeros se denominan microorganismo fotótrofos, ya sean heterótrofos o autótrofos y los segundos quimiótrofos. (Metcalf & Eddy, 1996).

1.1.3 Necesidades nutricionales

Los principales nutrientes inorgánicos necesarios para el crecimiento y reproducción de los microorganismos son: N, S, P, K, Mg, Ca, Fe, Na Y Cl. Siendo los de menor importancia el Zn, Mn, Mo, Se, Co, Cu, Ni, V y W. La presencia y concentración de cada uno de estos nutrientes afectan de diferente manera el crecimiento y, por consiguiente, su uso de la materia orgánica

contenida en el agua residual por parte de los microorganismos involucrados en su tratamiento.

Adicionalmente, algunos tipos de microorganismos requieren nutrientes orgánicos para la síntesis de material celular orgánico. Siendo los principales compuestos los aminoácidos, purinas, pirimidinas y vitaminas. (Metcalf & Eddy, 1996).

El agua residual municipal suele contener cantidades de nutrientes, orgánicos e inorgánicos, adecuados para permitir la acción microbiológica para la eliminación de la DBO carbonosa. En el caso de las aguas industriales o especiales, puede ser necesario adecuar las condiciones nutricionales, mediante la adición de nutrientes, para lograr un efectivo tratamiento de las aguas residuales. (Metcalf & Eddy, 1996).

1.2 Microorganismos que intervienen en el tratamiento

Los microorganismos se pueden clasificar según su estructura y metabolismo celular, como eucariotas, eubacterias y arqueobacterias. Los grupos procariontes, eubacterias y arqueobacterias, se pueden denominar como bacterias, son primordiales para el tratamiento biológico del agua residual. El grupo de las eucariotas incluye a las plantas, animales y las protistas, siendo los más importantes para el tratamiento biológico los hongos, los protozoos, los rotíferos y las algas.

1.2.1 Bacterias

Las bacterias son microorganismos procariotas unicelulares, que presentan un tamaño de unos pocos micrómetros (entre 0,5 y 5 μm , por lo general) y diversas formas incluyendo esferas (cocos), barras (bacilos) y hélices (espirilos). Su modo habitual de reproducción es por escisión binaria, aunque algunas especies se reproducen sexualmente o por gemación, no tienen el núcleo definido ni presentan, en general, orgánulos membranosos internos.

Generalmente poseen una pared celular compuesta de peptidoglicano. Muchas disponen de flagelos o de otros sistemas de desplazamiento y son móviles. Los principales elementos que componen la células de las bacterias son el carbono, oxígeno, nitrógeno, hidrogeno y fósforo. (Pelczar,1995/ Wikipedia, 2011).

Desde el punto de vista de condiciones medioambientales, el pH óptimo para el crecimiento de las bacterias es de 6.5 a 7.5. Para la temperatura existe una mayor tolerancia de valores óptimos, según los cuales se clasifican como se muestra en la siguiente tabla. (Metcalf & Eddy, 1996/ Pelczar, 1995).

Tabla I. **Intervalos de temperatura típicos para algunas clases de bacterias**

Clasificación	Temperatura, °C	
	Intervalo	Valor óptimo
Psicrófilas	-10 a 30	15 a 20
Mesófilas	20 a 50	25 a 40
Termófilas	35 a 75	45 a 60

Fuente: Pelczar, 1995

1.2.2 Hongos

Los hongos importantes para el tratamiento del agua residual son del tipo protistas heterótrofos, no fotosintéticas y multicelulares, como saprofitos obtienen su alimento de la materia orgánica. Se pueden reproducir sexual o asexualmente, por escisión, gemación o por formación de esporas.

El pH óptimo para el crecimiento de la mayoría de las especies es de 5.6, aunque pueden tolerar valores entre 2 a 9 y los bajos requerimientos de nitrógeno, aproximadamente la mitad que requieren las bacterias, los hace de gran importancia para el tratamiento de las aguas residuales industriales y en la formación de compuestos a partir de residuos sólidos. (Metcalf & Eddy, 1996/ Pelczar, 1995).

1.2.3 Protozoos

Son organismos microscópicos, móviles, unicelulares eucarióticos; heterótrofos, fagótrofos, depredadores o detritívoros, a veces mixótrofos (parcialmente autótrofos); que viven en ambientes húmedos o directamente en medios acuáticos, ya sean aguas saladas o aguas dulces; la reproducción puede ser asexual por bipartición y también sexual por isogametos o por conjugación intercambiando material genético. Entre los más importantes se incluyen las amibas, los flagelados, los ciliados libres y adheridos.

Suelen tener un mayor tamaño que las bacterias y se alimentan de ellas para obtener energía. Al consumir las bacterias y otros microorganismos se logra un efecto de purificación en el efluente del agua residual, así como de balance entre los diferentes grupos de microorganismos. (Metcalf & Eddy, 1996/ Romero, 2010/ Wikipedia 2012).

1.2.4 Rotíferos

Es un animal aerobio, heterótrofo y multicelular, poseen dos pestañas giratorias sobre la cabeza que le confieren movilidad y captura de alimentos. Son muy eficaces en la eliminación de bacterias dispersas y floculadas, así como de pequeñas partículas de materia orgánica. Su presencia en un efluente de un sistema de tratamiento de agua residual es indicativo de un proceso aerobio de purificación biológica muy eficiente. (Metcalf & Eddy, 1996/ Romero, 2010).

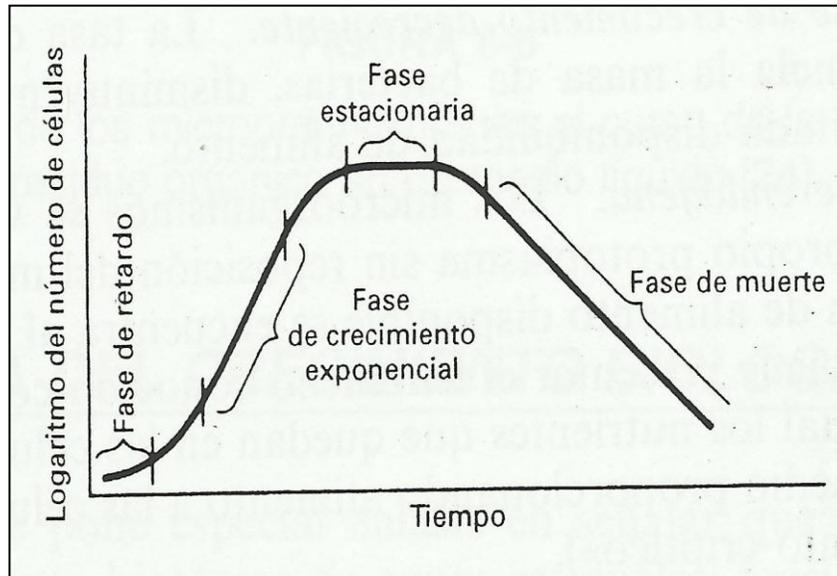
1.2.5 Algas

Son protistas unicelulares o multicelulares, autótrofas y fotosintéticas. Son importantes en los tratamientos biológicos mediante lagunas de estabilización, aeróbicas y facultativas, por su capacidad para generar oxígeno fotosintético y en la eliminación de los nutrientes, fósforo y nitrógeno, en los efluentes de las aguas residuales. Existen tres grandes grupos de algas, caracterizados por su color; verdes, rojas, pardas. (Metcalf & Eddy, 1996/ Romero, 2010).

1.2.6 Crecimiento de bacterias

El modelo de crecimiento bacteriano en un cultivo puro discontinuo se ilustra en la figura No 2, el cual consta de cuatro fases diferenciadas.

Figura 2. **Curva de crecimiento bacteriano**



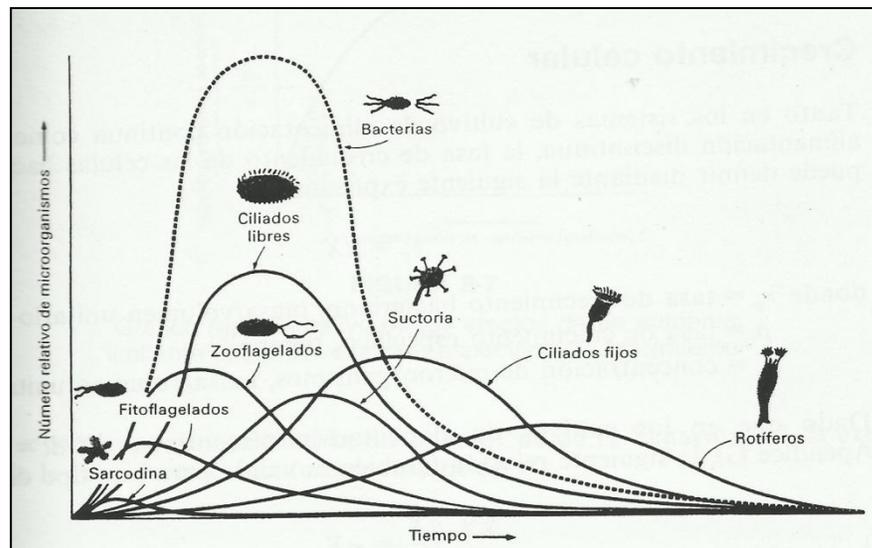
Fuente: Metcalf & Eddy, 1996

- Fase de retardo: representa el tiempo necesario para que los organismos se aclimaten a las nuevas condiciones ambientales y comiencen a reproducirse.
- Fase de crecimiento exponencial: la célula se divide a una velocidad determinada por su tiempo de generación y su capacidad de procesar alimento.
- Fase estacionaria: la población celular permanece constante, debido a que las células han agotado el sustrato o los nutrientes necesarios para el crecimiento y la generación de células nuevas se compensa con la muerte de células viejas.
- Fase de muerte exponencial: debido al agotamiento de nutrientes o condiciones poco favorables para la reproducción de las bacterias, la tasa de mortalidad excede la generación de células nuevas.

1.2.7 Cultivos mixtos de microorganismo

Los procesos de tratamiento biológico están compuestos por complejas poblaciones biológicas mezcladas e interrelacionadas, en las que cada microorganismo del sistema tiene su propia curva de crecimiento. La forma de cada curva depende del tiempo, nutrientes disponibles y factores ambientales como el pH y la temperatura, disponibilidad o ausencia de oxígeno. Tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 3. Crecimiento microbiano en cultivos mixtos



Fuente: Metcalf & Eddy, 1996

1.3 Procesos de tratamiento biológico

Los métodos de tratamiento biológico se clasifican en cinco grupos; procesos aeróbicos; procesos anaeróbicos; procesos anóxicos; procesos aerobios, anaerobios y anóxicos combinados y los procesos de lagunaje. Los cuales a su vez se pueden subdividir según sea que se lleve a cabo en sistemas de cultivo en suspensión, en cultivo fijo o combinado.

La siguiente tabla muestra la clasificación de los procesos de tratamiento biológico.

Tabla II. Principales procesos biológicos utilizados para el tratamiento del agua residual

TRATAMIENTO BIOLÓGICO	NOMBRE COMÚN	APLICACIÓN
PROCESOS AEROBIOS		
Cultivo en suspensión	Proceso lodos activados Convencional (flujo pistón) Mezcla completa Aireación graduada Oxígeno puro Reactor intermitente secuencial Contacto y estabilización Aireación prolongada Canales de oxidación Tanques profundos Deep shaft	Eliminación DBO carbonosa, nitrificación
	Nitrificación de cultivos en suspensión	Nitrificación
	Lagunas aireadas	Eliminación DBO carbonosa, nitrificación
	Digestión aerobia Aire convencional Oxígeno puro	Estabilización, eliminación DBO carbonosa
Cultivo fijo	Filtros percoladores Baja carga Alta carga	Eliminación DBO carbonosa, nitrificación
	Filtros de desbaste	Eliminación DBO carbonosa
	Sistemas biológicos rotativos de contacto	Eliminación DBO carbonosa, nitrificación
	Reactores de lecho compacto	Eliminación DBO carbonosa, nitrificación.
Procesos combinados	Biofiltros activados Filtros percoladores con contacto de sólidos, procesos de lodos activados con biofiltros, proceso de filtros percoladores y lodos activados en serie	Eliminación DBO carbonosa, Nitrificación
PROCESOS ANÓXICOS		
Cultivo en suspensión	Desnitrificación con cultivo en suspensión	Desnitrificación

TABLA II. Continuación

Cultivo fijo	Desnitrificación de película fija	Desnitrificación
PROCESOS ANAEROBIOS		
Cultivo de suspensión	Digestión anaerobia Baja carga, una etapa Alta carga, una etapa Doble etapa	Estabilización, eliminación DBO carbonosa
	Proceso anaerobio de contacto	Eliminación DBO carbonosa
	Manto de lodos anaerobio de flujo ascendente	Eliminación DBO carbonosa
Cultivo fijo	Filtro anaerobio	Eliminación DBO carbonosa, estabilización de residuos, desnitrificación
	Lecho expandido	Eliminación DBO carbonosa, estabilización de residuos
PROCESOS ANAEROBIOS, ANÓXICOS O AEROBIOS COMBINADOS		
Cultivo de suspensión	Procesos de una o varias etapas múltiples procesos patentados	Eliminación DBO carbonosa, nitrificación, desnitrificación, eliminación de fósforo
Procesos combinados: cultivo fijo y suspensión	Procesos de una o varias etapas	Eliminación DBO carbonosa, nitrificación, desnitrificación, eliminación de fósforo
Procesos en estanques		
	Lagunas aerobias Lagunas de maduración Lagunas facultativas Lagunas anaerobias	Eliminación DBO carbonosa, nitrificación, estabilización de residuos

Fuente: Metcalf & Eddy, 1996

Es importante destacar que los *procesos de cultivo en suspensión*, son aquellos tratamientos biológicos en los que los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica u otros constituyentes del agua residual en gases y tejidos o biomasa, se mantienen en suspensión dentro del líquido.

Mientras que los *procesos de cultivo fijo* son aquellos en los cuales los microorganismos están en fijos o sujetos a un medio inerte, tal como piedras, escoria o materiales cerámicos y plásticos especialmente diseñados para cumplir dicha función. Estos últimos suelen conocerse con los nombres de película fija o biológica. (Metcalf & Eddy, 1996).

1.3.1 Índice de Biodegradabilidad

El Índice de Biodegradabilidad, IB, es una razón adimensional entre la demanda biológica de oxígeno (concentración de materia orgánica), DBO_5 y la demanda química de oxígeno, DQO, que indica la posibilidad de que el agua residual sea tratada mediante métodos biológicos.

Tabla III. Índice de Biodegradabilidad.

Relación DBO_5/DQO	Agua residual biológicamente
> 0.6	Completamente tratable
0.2 a 0.6	Parcialmente tratable
< 0.2	No tratable

Fuente: Pocasangre, 2011.

1.3.2 Agua Residual

El agua residual se pueden clasificar como de origen doméstico e industrial. Las características fisicoquímicas y microbiológicas difieren sustancialmente, como resultado los métodos de tratamiento también deben ser diseñados según cada caso. En el caso del agua residual de origen doméstico sus características son aproximadamente las mismas de una residencia a otra de una región o país. Entre países desarrollados y los que se encuentran en vías de desarrollo, puede relacionarse con factores de tipo tecnológico. (López, 2010).

1.3.3 Composición del agua residual

El agua residual es caracterizada por su composición física, química y biológica, pero se han establecido parámetros de referencia para los principales componentes que permiten la caracterización de las aguas.

Para el agua residual de origen doméstico, la siguiente tabla muestra los parámetros de control que suelen hacerse de forma frecuente.

Tabla IV. **Composición típica del agua residual doméstica**

COMPOSICIÓN	UNIDAD	CONCENTRACIÓN		
		Débil	Media	Alta
Sólidos totales (ST)	mg/l	350	720	1200
Disueltos, totales (SDT)	mg/l	250	500	850
Sólidos suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
Sólidos sedimentables	mg/l	5	10	20
Demanda bioquímica de oxígeno, DBO 5@ 20°C	mg/l	110	220	400
Demanda química de oxígeno, DQO	mg/l	250	500	1000
Nitrógeno (total en la forma N)	mg/l	20	40	85
Fósforo (total en la forma P)	mg/l	4	8	15

Fuente: Metcalf & Eddy, 1996

1.3.4 Eficiencias de los tratamientos Primarios y Secundarios

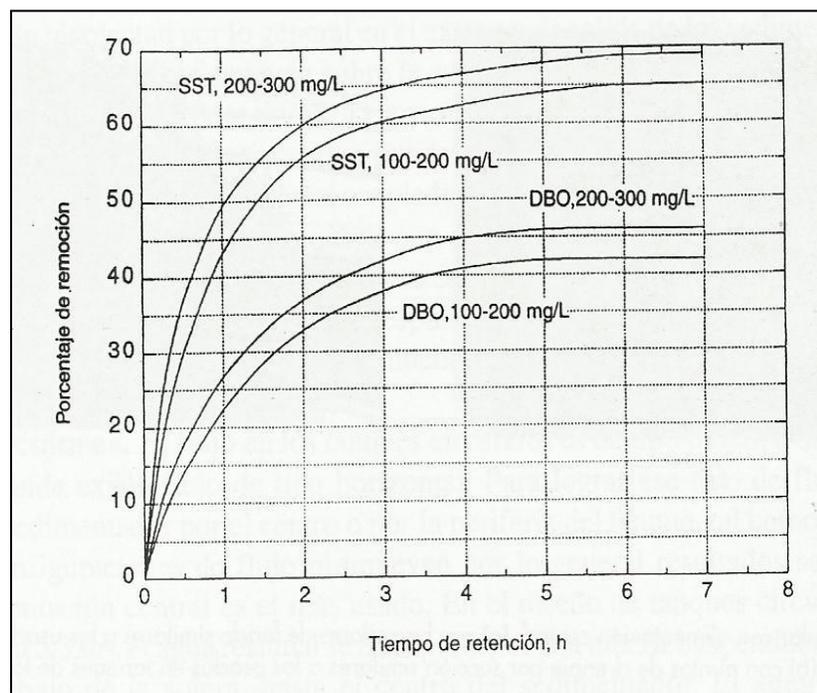
En la siguiente tabla se muestran rendimientos de los procesos unitarios empleados en los tratamiento primarios y secundarios del agua residual.

Tabla V. Rendimiento logrado en el tratamiento del agua residual

Unidad	Rendimiento de eliminación del constituyente, %					
	DBO	DQO	SS	P	N-org	N-NH ₃
Desarenadores	0-5	0-5	0-10	nulo	nulo	Nulo
Sedimentación primaria	30-40	30-40	50-65	10-20	10-20	0
Filtro percolador	65-80	60-80	60-85	8-12	15-50	8-15

Fuente: Metcalf & Eddy, 1996

Figura 4. Valores usuales para la remoción de la DBO y SS en sedimentadores primarios



Fuente: Crites & Tchobanoglous, 2000

1.3.5 Agua residual universitaria

El agua residual de origen universitario, al provenir de sanitarios, lavamanos, duchas, y fregaderos, poseen características similares a las de origen doméstico. La siguiente tabla contiene los valores de DBO₅ y DQO, para diferentes centros universitarios.

Tabla VI. **Valores promedios de los parámetros de agua residual de centros universitarios**

Centro Universitario	Valor promedio(mg/l)						Año
	DBO	DQO	SS	pH	N	P	
Universidad Rafael Landívar, Guatemala	270.5	494	nd	nd	nd	nd	2010
Universidad Nacional Autónoma de México.	215.6	467.2	139.2	8.68	42.37	9.10	2004
	237.6	551.7	172.6	8.45	42.54	8.79	2005
	302.7	679.4	203.3	8.41	nd	nd	2011

Fuente: Pacheco, 2011 / Ramírez, 2007 / Recinos, 2010

1.4 Filtros percoladores

Los filtros percoladores son bioreactores que por medio de una capa o película de microorganismos adheridos a un medio permeable permite la depuración, eliminación de la materia orgánica, de agua residual de forma aeróbica y que percola a través del medio. El medio permeable recibe el nombre de medio de soporte o empaque y los microorganismos que se forman sobre el medio de soporte se denominan biopelícula o película biológica.

Los filtros percoladores han sido utilizados desde hace años para el tratamiento biológico aeróbico de las aguas residuales, de origen doméstico o industrial. Básicamente, consisten de una estructura de geometría circular o cuadrada, la cual responde más a razones económicas-estructurales, que a la eficiencia del tratamiento en sí mismo.

La estructura se llena a una profundidad definida con un material de soporte; piedra, plástico u otro similar que permite la formación de una película biológica.

El agua residual se introduce y distribuye por la parte superior de la estructura y se recolecta por la parte inferior, permitiendo un corto tiempo de contacto.

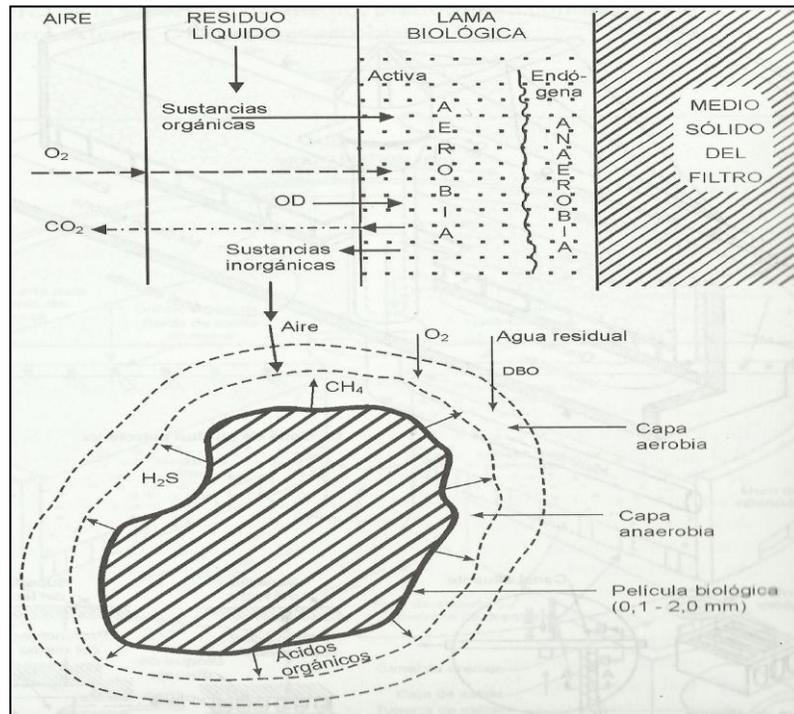
La degradación de la materia orgánica contenida en el agua residual se logra debido a una variedad de microorganismos contenidos en la piel biológica, dentro los que se incluyen bacterias aerobias, anaeróbicas y facultativas, algas y protozoarios. También se encuentran presentes en el material filtrante animales superiores como los gusanos, larvas de insectos y caracoles. (Metcalf & Eddy, 1996).

Cuando los microorganismos crecen, aumenta el espesor de la película biológica y el oxígeno se consume antes de que pueda penetrar en todo el espesor de la película, por lo cual en la proximidad de la superficie del medio, se crea un ambiente anaeróbico. (Metcalf & Eddy, 1996).

Conforme aumente el espesor de la película biológica, la materia orgánica adsorbida es metabolizada antes que pueda alcanzar los microorganismos más cercanos al medio de soporte o filtrante. Al no disponerse de una fuente de materia orgánica externa de carbono celular, los mismos entran en una fase de crecimiento endógena, en la que pierden la capacidad de adherirse al medio filtrante y por lo tanto se desprenden, siendo arrastrados en el líquido efluente del filtro percolador.

Al producirse el arrastre de la piel biológica, quedan espacios disponibles en el medio de soporte para el crecimiento de más piel biológica, lo cual consume parte de la materia orgánica contenida en el agua residual. Lo anterior se muestra en la siguiente figura.

Figura 5. Esquema de la película biológica en un filtro percolador



Fuente: Romero, 2010

En general, los sistemas de filtros percoladores presentan elevadas eficiencias en la remoción de la materia orgánica, medida como la demanda bioquímica de oxígeno o DBO_5 , pero suelen presentar problemas de crecimientos de insectos como las moscas y la producción de olores sépticos, razones por las cuales su ubicación debe ser valorada a fin de evitar inconvenientes con los habitantes cercanos.

Los principales parámetros de diseño de los filtros percoladores son la carga orgánica y la carga hidráulica:

- La **carga orgánica**, se refiere a la demanda bioquímica de oxígeno aplicado diariamente a una unidad de volumen de medio filtrante, se expresa en

kg DBO₅/ m³ día o en mg DBO₅/ m³ día, que influye en la velocidad de metabolismo en la capa biológica.

- La **carga hidráulica**, se refiere al caudal diario que se puede tratar por área del medio filtrante o sea la carga por unidad de superficie y se expresa en m³/m²/día, que origina las velocidades de arrastre de la biomasa. (Cruz, 1990 / Metcalf & Eddy, 1996).

Los filtros percoladores se clasifican en carga baja o normal, media carga, alta o muy alta carga y de desbaste. Puede emplearse sistemas de filtros de dos etapas en los que se conectan en serie dos filtros percoladores.

1.4.1 Filtros de baja carga

Presenta un diseño sencillo y de gran confiabilidad, produce un efluente de calidad estable independientemente del afluente tratado. Mediante diferentes sistemas se les mantiene una carga hidráulica constante.

En el caso de caudales muy reducidos durante la noche puede ser requerida la dosificación del afluente a fin de mantener el medio o película biológica húmeda.

Generalmente, en los niveles superiores del filtro, 0.6 a 1.2 m, ocurre un desarrollo elevado de la película biológica. En el resto del medio filtrante proliferan bacterias nitrificantes autótrofas que oxidan el nitrógeno amoniacal para transformarlo en nitratos y nitritos. En condiciones favorables y con una adecuada operación y mantenimiento, pueden producir un efluente con un elevado nivel de eliminación de DBO y altamente nitrificado. (Metcalf & Eddy, 1996).

1.4.2 Filtros de media y alta carga

Debido a la recirculación del efluente del filtro o final de la planta de tratamiento, pueden operar con cargas orgánicas más elevadas, lo que permite obtener resultados similares a los filtros de baja carga. Además, la recirculación previene el encharcamiento o ahogamiento del filtro y a reducir los olores sépticos y la proliferación de moscas, problemas operativos afines a los filtros percoladores. El flujo de caudal al filtro suele ser continuo, a pesar de que es normal el riego intermitente del medio filtrante. (Metcalf & Eddy, 1996).

1.4.3 Filtros de muy alta carga

Operan con altas cargas orgánicas e hidráulicas, siendo ésta la principal diferencia con los filtros de alta carga, por lo cual requieren una mayor profundidad. Para conseguir este aumento en la profundidad del medio filtrante se recurre al uso de materiales de materiales más livianos que los rocosos y suelen ser construidos en forma de torre. (Metcalf & Eddy, 1996).

1.4.4 Filtros de desbaste

Operan con altas cargas orgánicas e hidráulicas y en la mayoría de los casos se utilizan como un pretratamiento del agua residual antes del tratamiento secundario o principal. Se utilizan principalmente medios plásticos o ligeros para la formación de la película biológica. (Metcalf & Eddy, 1996).

1.4.5 Filtros de dos etapas

En el tratamiento del agua residual muy concentrada, elevado nivel de DBO y SST, se suele utilizar un sistema de dos filtros en serie con un

sedimentador intermedio para la eliminación de los sólidos biológicos desprendidos del primer filtro percolador. Además, en el primer filtro percolador se produce la principal reducción de la DBO carbonosa y en el segundo filtro se produce la nitrificación. (Metcalf & Eddy, 1996).

La siguiente tabla contiene las principales características técnicas para el diseño de los filtros percoladores.

TABLA VII. Características técnicas usuales para el diseño de filtros percoladores

ELEMENTO	BAJA CARGA	CARGA INTERMEDIA	CARGA ALTA	MUY ALTA CARGA	DESBASTE	DOBLE ETAPA
Medio filtrante	Piedra escoria	Piedra escoria	Piedra	Piedra	Plástico, madera pino	Roca plástico
Tamaño, cm	2.5 a 13 5 a 13	2.5 a 13 5 a 13	2.5 a 13	2.5 a 13	60 x 60 x 120	
Superficie específica, m ² /m ³	39 a 98	39 a 98	39 a 98	79 a 197	79 a 197 39 a 49	
Peso específico kg/m ³	800 a 1445	800 a 1445	800 a 1445	32 a 96	32 a 96 140 a 200	
Carga hidráulica, m ³ /m ² día	1.20 a 3.50	3.50 a 9.40	9.40 a 37.55	11.70 a 70.40	47.0 a 188.0	9.40 a 37.55
Carga orgánica, kg DBO ₅ / m ³ día	0.08 a 0.40	0.25 a 0.50	0.50 a 0.95	0.48 a 1.60	1.60 a 8.0	0.95 a 1.80
Espacio vacío, %	40 a 55	40 a 55	40 a 55	92 a 97	92 a 97 70 a 80	
Profundidad, m	1.80 a 2.40	1.80 a 2.40	0.90 a 1.80	3.0 a 12.2	4.5 a 12.2	
Relación recirculación	0	0 a 1	1 a 2	1 a 2	1 a 4	0.5 a 2
Arrastre de sólidos	Intermitente	Intermitente	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo
Presencia de moscas	Abundantes	Algunas	Escasas	Escasas a ninguna	Escasas a ninguna	Escasas a ninguna
Eficiencia de eliminación de DBO, %	80 a 90	50 a 80	65 a 90	65 a 90	40 a 70	85 a 95
Efluente	Bien nitrificado	Parcialment e nitrificado	Poco nitrificado	Poco nitrificado	No nitrificado	Bien nitrificado

Fuente: Crites & Tchobanoglous, 2000 / Metcalf & Eddy, 1996

1.4.6 Componentes del filtro percolador

El filtro percolador incluye los siguientes componentes:

1.4.6.1 Dosificación del agua residual

El control en el caudal de agua residual que ingresa al filtro es de importancia para asegurar el crecimiento de la biomasa o película biológica y controlar su desprendimiento excesivo, de forma tal que se logren condiciones estables en el medio biológico del filtro.

El caudal que se debe utilizar en un filtro percolador puede ser aproximado al multiplicar la carga orgánica aplicada expresada en kg de DBO/10³m³ por el factor 19.0. (Metcalf & Eddy, 1996)

En la siguiente tabla, se muestran diferentes valores de dosificación de las aguas residuales al filtro percolador según su valor de carga orgánica.

Tabla VIII. **Caudales de dosificación típicos de filtros percoladores**

Carga orgánica kg/m ³ día	Dosificación mm/paso
< 0.4	73
0.8	150
1.2	225
1.6	300
2.4	450
3.2	600

Fuente: Metcalf & Eddy, 1996

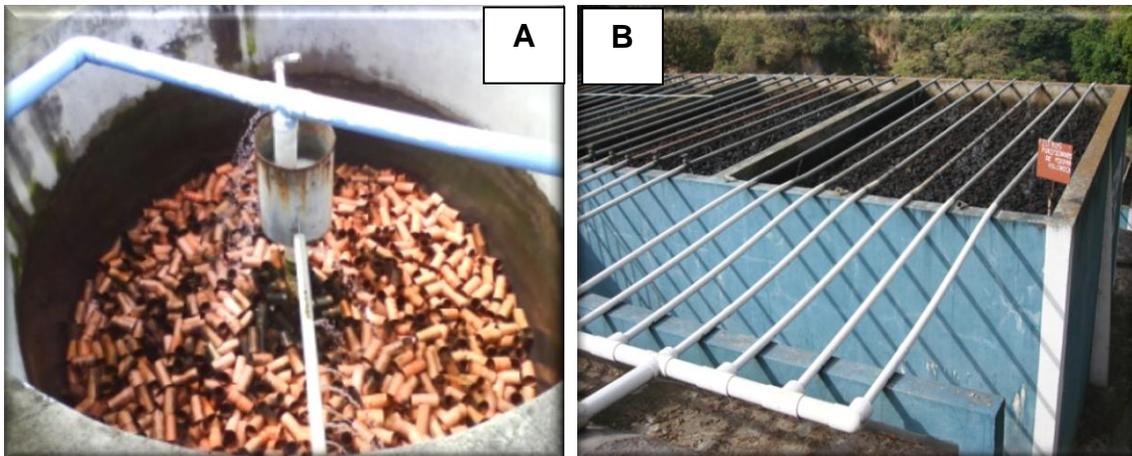
1.4.6.2 Sistema de distribución

Según sea el diseño estructural del filtro percolador, circular o cuadrado, se utilizarán sistemas de distribución rotativo o mediante manifold de tuberías. En el caso de los distribuidores rotativos, generalmente, la misma fuerza con que ingresa el afluente permite el movimiento rotacional del dispositivo, representando un ahorro de recursos económicos.

Tanto para este dispositivo, como en el manifold de tuberías, se busca lograr una distribución homogénea del afluente sobre toda el área superficial del filtro, logrando mayor eficiencia, menor arrastre de biomasa y disminuir zonas inertes o “muertas” que produzcan malos olores o el crecimiento de vegetación, lo cual se logra con una buena construcción y mantenimiento oportuno del sistema. (Metcalf & Eddy, 1996 / Romero, 2010).

Las siguientes fotografías muestran los sistemas de distribución rotacional y por manifold.

Figura 6. **A- Sistema de distribución rotatorio del filtro percolador de la Planta de tratamiento de aguas residuales de Villa Floresta. B- Sistema de distribución por manifold del filtro percolador de la Planta de tratamiento de aguas residuales de la USAC, Guatemala**



Fuente: Ing. Rommel Raudales, 2011

1.4.6.3 Medio filtrante

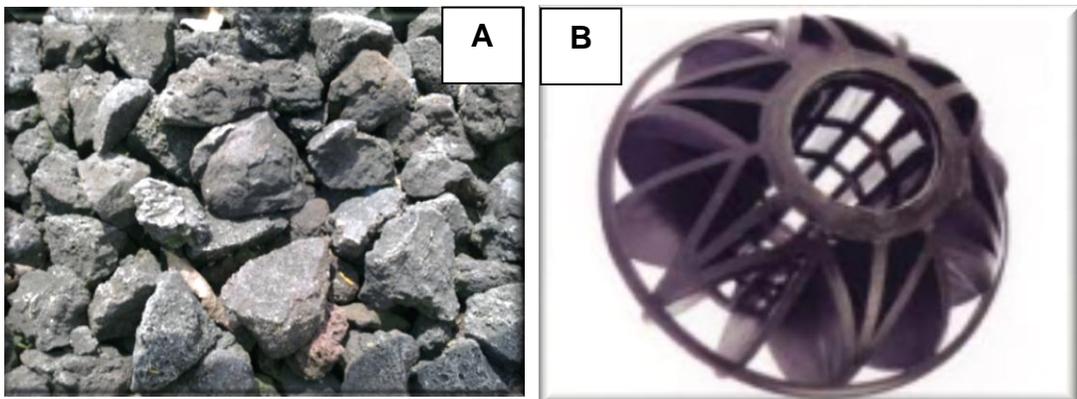
El medio filtrante es aquel material que permite el crecimiento de la película biológica que estabiliza la materia orgánica contenida en el agua residual.

En general, el material utilizado para los medios filtrantes debe poseer, idealmente, una gran superficie por unidad de volumen, gran uniformidad, que sea económico, fácil de obtener, resistente, que no produzca efectos tóxicos o nocivos para el medio biológico o el ambiente y que no se obstruya fácilmente, permitiendo el flujo de aire.

Para filtros percoladores de menor profundidad, menos de 3 metros se suele utilizar medios rocosos, pero para los de mayor profundidad, hasta 12 metros, o tipo torre, se utilizan materiales livianos en diferentes conformaciones o geometrías, como los plásticos y las maderas. (Metcalf & Eddy, 1996).

Algunos tipos de medios filtrantes se muestran en la siguiente figura.

Figura 7. **Medios filtrantes utilizados en filtros percoladores; A- Piedra, B-Esferas flujo mezclado**



Fuente: Google Imágenes

1.4.6.4 Sistema de drenaje inferior

El sistema de recolección del agua percolada y sólidos desprendidos, consiste en un sistema de drenaje en la parte inferior del filtro. Este sistema permite reunir la totalidad del líquido y conducirla hacia la unidad de sedimentación.

El diseño del sistema de drenaje debe ser lo suficientemente resistente y permitir tanto el flujo libre del líquido, evitando la inundación del medio, como facilitar la ventilación natural o forzada del medio biológico. (Metcalf & Eddy, 1996).

1.4.6.5 Ventilación

Los principales mecanismos que intervienen en el flujo de aire en el filtro abierto en su parte superior son la ventilación natural y la acción del viento. En el caso de la ventilación natural, ésta se produce por el gradiente de temperatura existente entre el aire contenido y el aire atrapado en los poros del medio filtrante.

Si el agua residual tiene una temperatura inferior a la del aire ambiente, el aire de los poros será frío y su movimiento se producirá en sentido descendente. Se producirá un movimiento ascendente del aire cuando el medio ambiente tenga una menor temperatura que el agua residual. Siendo esta última condición la más favorable para la estabilización de la materia orgánica, ya que la presión parcial del oxígeno es menor en la zona de mayor demanda de oxígeno. (Metcalf & Eddy, 1996).

Cuando se utilicen elevadas cargas orgánicas, hidráulicas o extremadamente profundos, puede requerirse de un sistema de ventilación forzada adecuadamente diseñado o de mecanismos de ventilación adicionales como lo pueden ser la implementación de ventanas o celosías intermedios en la estructura del filtro percolador. (Metcalf & Eddy, 1996).

1.4.6.6 Sedimentadores y Digestor de lodos

De forma previa y posterior al filtro percolador se utilizan unidades de sedimentación, los cuales permiten en el primer caso, disminuir la cantidad de sólidos totales que ingresan al medio filtrante, evitando así su colmatación. En el segundo caso, permite clarificar el efluente del filtro percolador que contiene material biológico desprendido del medio biológico.

El lodo extraído de ambos sedimentadores es conducido a una unidad diseñada para la digestión de los lodos activados y su posterior deshidratación. (Metcalf & Eddy, 1996).

2. UNIVERSO DE TRABAJO

2.1 Planta Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC

La planta de tratamiento fue diseñada por el Ing. Arturo Pazos en el año 1989, como un sistema de tratamiento biológico de un filtro percolador de tres etapas en serie, con una capacidad para 50,000 estudiantes. Fue construida por la Compañía Constructora de Obras Civiles (COCISA) en el año 1990.

Para el curso universitario 2012, se cuenta con una matrícula de 95,260 estudiantes y 7,146 personas entre funcionarios administrativos, docentes, investigadores y temporales. Por lo cual, la planta de tratamiento tiene una capacidad para 102,406 personas. (Oficina de Estadística-USAC, 2012).

De acuerdo con la información suministrada por el Sr. Arturo González, operador del sistema, el caudal del agua residual que ingresa es 17 l/s. Sin embargo, el caudal aforado en diferentes estudios es de aproximadamente 6 l/s. (Chávez, 1991/ ECOPLAN, 2001/ González, 2011).

El sitio seleccionado para la construcción es un terreno de topografía irregular, que permite aprovechar la fuerza de gravedad como mecanismo para el movimiento del agua residual en las unidades de proceso.

La siguiente fotografía, muestra el rótulo colocado en el acceso de las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, Guatemala.

Figura 8. Rótulo ubicado en la Planta Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC



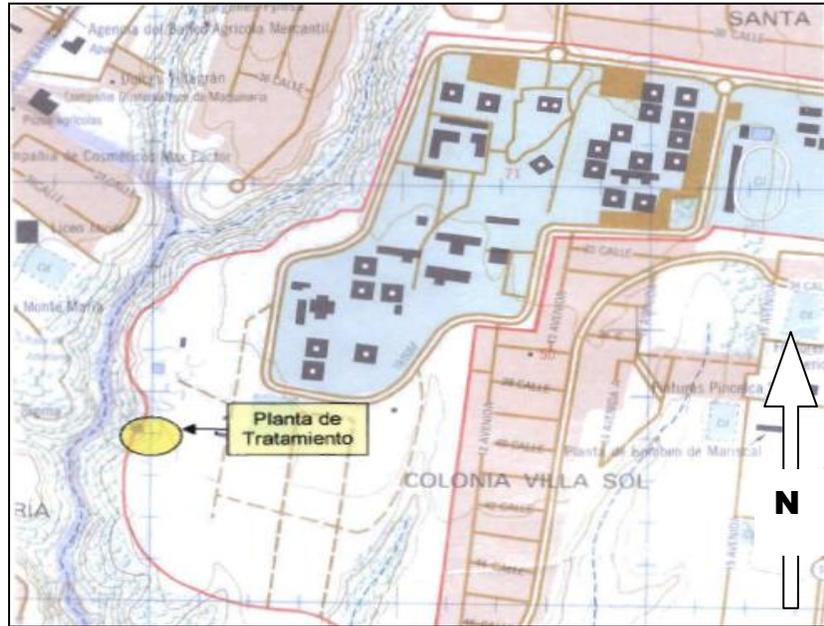
Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2011

2.2 Ubicación

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, se encuentra localizada en la Ciudad Universitaria ubicada en la Zona 12 de la Ciudad de Guatemala. Al norte, este y sur colinda con los predios de la Ciudad Universitaria y al oeste, con la colonia El Carmen y una quebrada de por medio, que se origina a inmediaciones de la Ciudad Universitaria.

La siguiente figura permite observar la ubicación de la planta de tratamiento con respecto a la Ciudad Universitaria.

Figura 9. **Ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**



Fuente: ECOPLAN, 2001

2.3 Localización Geográfica

La siguiente es la localización geográfica de la planta de tratamiento.

- Longitud: 90°33'34.50" O
- Latitud: 14°34'42.71" N
- Altitud: 1457 m.s.n.m

En la siguiente fotografía, se puede observar una vista aérea de las instalaciones de la planta de tratamiento.

Figura 10. **Vista aérea de la localización de las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**



Fuente: Google Earth, 2011

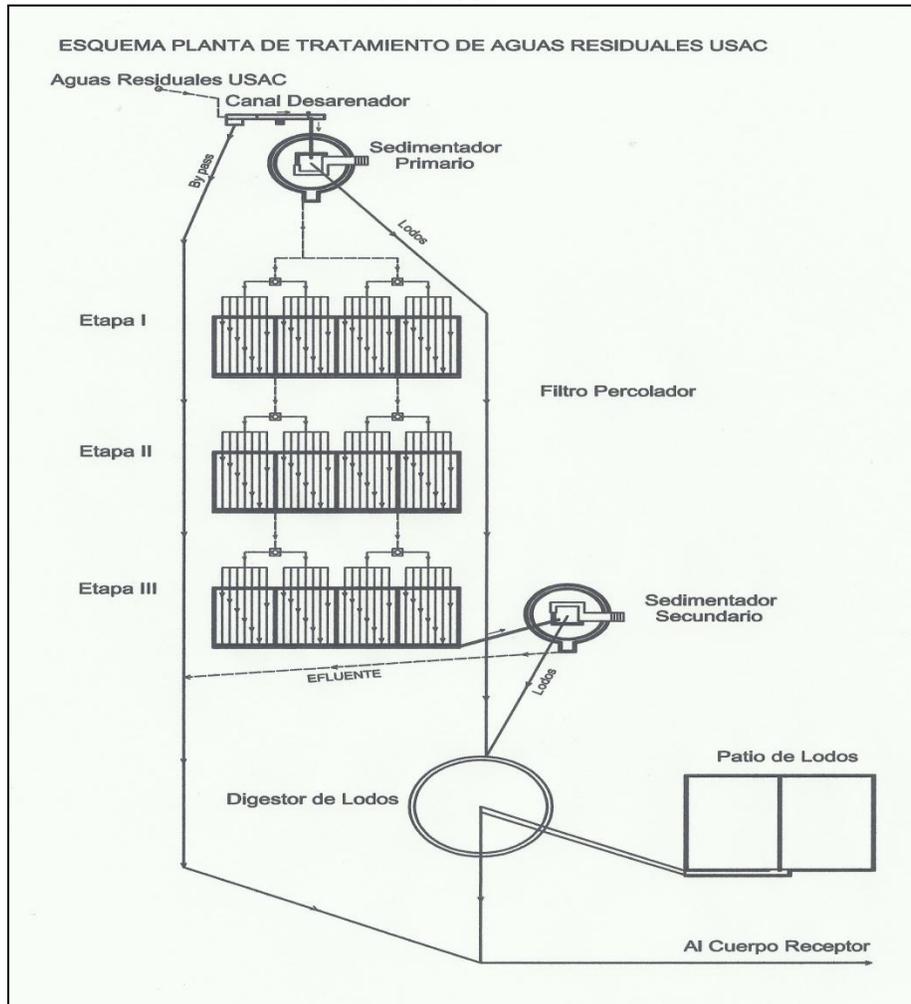
2.4 Descripción de la planta de tratamiento

La planta de tratamiento posee las siguientes unidades de tratamiento:

- Cámara de ingreso
- Rejilla separadora
- Canal desarenador
- Sedimentador primario
- Filtro percolador, tres etapas en serie
- Sedimentador secundario
- Digestor de lodos y patio de secado.

El esquema muestra la distribución espacial de las diferentes unidades de tratamiento existentes en la planta de tratamiento del agua residual.

Figura 11. **Esquema de la Planta Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**



Fuente: Ing. Rommel Raudales, 2011

2.4.1 Tratamiento preliminar

Las unidades donde se realiza el tratamiento preliminar son la cámara de ingreso, las rejillas y el canal desarenador, donde ocurren procesos físicos de separación de sólidos groseros, material inerte y regulación de caudal. Esta unidad tiene una longitud de 12 metros y una sección útil de 40 centímetros de ancho. En esta sección, el olor del agua residual es fácilmente perceptible.

2.4.1.1 Cámara de ingreso

En la cámara de ingreso de las aguas residuales existe un sistema de compuertas para el desvío del caudal con los siguientes fines:

- Regulación de la cantidad de agua que ingresa a la planta por cuanto el sistema de alcantarillado es combinado y el flujo aumenta con las lluvias.
- Desfogue, para cuando se requiera realizar actividades de mantenimiento en las estructuras de tratamiento.

Figura 12. Cámara de ingreso



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2011

2.4.1.2 Rejilla separadora

Retienen los sólidos de gran tamaño o groseros, flotantes y el material inerte. Cada rejilla está construida con varilla de construcción corrugada de $\frac{3}{4}$ ", con un espaciamiento de 1 cm.

El ángulo de inclinación de las rejillas es de aproximada de 60°, con el fin de evitar su obstrucción y facilitar la remoción manual del material retenido, que son posteriormente dispuestos en una fosa.

2.4.1.3 Canal desarenador

El canal desarenador tiene una longitud de 9 m y un ancho de 40 cm de sección útil, para la precipitación de los sólidos de mayor densidad, tal como las arenas.

2.4.1.4 Fosa

Los sólidos que son retirados de las rejillas de separación y del canal desarenador son colocados en una fosa que se ubica al costado del cámara de ingreso, posee un diámetro de 1.5 m y 3 m de profundidad.

Figura 13. **Vista general de la cámara ingreso, rejillas, canal desarenador y fosa**



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

2.4.2 Tratamiento primario

2.4.2.1 Sedimentador primario

Para remover los sólidos que no son retenidos en las etapas previas, se cuenta con un sedimentador primario, el cual es una estructura de concreto armado en forma de cono truncado de 10.66 m de diámetro mayor, un diámetro menor de 0,50 m, una profundidad es de 9,30 m, para un volumen de 290 m³.

El caudal proveniente del desarenador ingresa hasta el centro del sedimentador por medio de una tubería de PVC de 8" de diámetro, la cual reparte el agua residual por la parte superior de la estructura. Dispone de una pantalla en el centro de la estructura que permite forzar el flujo descendente del

agua residual y que además retiene natas y material flotantes, que son removidos manualmente y trasladados a la fosa.

En el anillo exterior del la estructura existe un vertedero de decantación, que permite que solamente el agua residual sobrenadante sea decantada y recolectada en un canal que la conduce al filtro percolador.

La evacuación de los lodos acumulados en el sedimentador se realiza aproximadamente cada seis meses o cuando se observan emanaciones de gases en la superficie, indicativo de condiciones anaerobias en los mismos.

Figura 14. **Sedimentador primario**



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2011

2.4.3 Tratamiento secundario

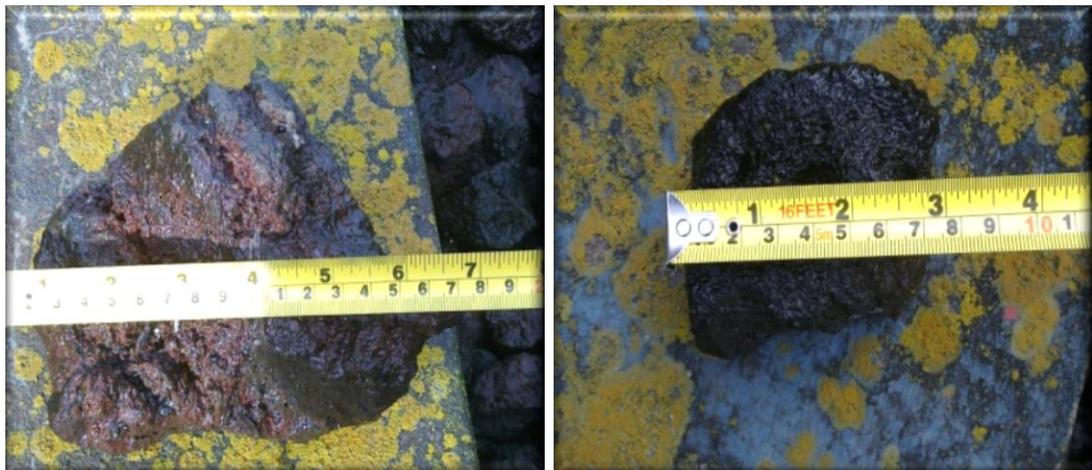
La unidad que lleva a cabo el tratamiento secundario es el filtro percolador de tres etapas en serie, seguido de un sedimentador secundario.

2.4.3.1 Filtro percolador

Está compuesto por tres etapas conectadas en serie de iguales dimensiones constructivas y medio filtrante de roca volcánica porosa. Cada una de las etapas esta subdividida en 4 secciones, con un dimensionamiento útil de 3,80 x 6.20 x 4.0 m. El filtro percolador posee una superficie de 94.24 m² y un volumen de 1130.88 m³.

De acuerdo con la información disponible, el medio filtrante por cada etapa es de 3.5, 3.0 y 2.5 pulgadas respectivamente (Chávez, 1991). Sin embargo, en cada etapa se observa una gran variedad de tamaños en las rocas volcánicas, con diámetros desde los 7 hasta los 16 centímetros.

Figura 15. **Variaciones de tamaño en la roca volcánica del filtro percolador.**



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

El sistema de distribución del agua sobre los lechos filtrantes en cada una de las etapas del filtro percolador es mediante un sistema manifold de 7 tuberías de HG de 6 cm de diámetro, con orificios a cada 50 cm. Algunos de los tubos cuentan con válvula para la regulación del flujo y diferentes longitudes en su construcción.

Figura 16. **Sistema de manifold de tuberías para distribución del agua residual**



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2011

El medio filtrante es soportado por un sistema de fondo falso, el cual consta de 24 tuberías perforadas de sección parcial, que permite tanto la ventilación del medio filtrante como la recolección del agua percolada. El área de ventilación es de aproximadamente 3.4 m^2 y la canaleta de recolección tiene cuatro pendiente del 1 %, con dos salidas.

Figura 17. **Sistema de aireación de la Etapa I, Filtro percolador**



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2011

2.4.3.2 Sedimentador secundario

El sedimentador secundario tiene como principal función retener la biomasa y sólidos que se han desprendido o superado las etapas del filtro percolador. Las dimensiones son similares al primario, ya que su diámetro mayor es de 10 m, pese a que se menciona que es de 11.5 m. (Chávez, 1991). Los lodos sedimentados son trasladados al digestor de lodos.

En este punto, el agua tratada se nota cristalina, sin material flotante o pocos sólidos visibles y el olor es prácticamente imperceptible. Características que nos indican con toda claridad, desde un punto de vista cualitativo, que la planta de tratamiento debe estar teniendo una eficiencia sumamente alta.

Posterior a esta última etapa, el agua se descarga al cuerpo de agua que existe en las cercanías de las instalaciones, pese a que podría ser reusada en actividades permitidas.

Figura 18. **Sedimentador secundario**



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

2.4.4 Digestor de lodos y patio de secado.

El digestor de lodos es una estructura de concreto armado en forma de cono truncado. Tiene 17 m de diámetro mayor, 0.50 m de diámetro menor y 14 m de altura total.

Los sólidos producidos en los dos sedimentadores son tratados en el digestor de lodos, proceso anaeróbico, en el cual son estabilizados con la consiguiente formación de gases, metano, que deberían ser lodos estables, inodoros, y fáciles de drenar para su deshidratación.

Una vez que los lodos están estabilizados, son trasladados al patio de secado, el cual básicamente son dos áreas de 336 m², recubiertas con concreto para su secado, deshidratado.

Cuando los lodos se encuentran deshidratados, son extraídos y aprovechados como abono orgánico.

Figura 19. Digestor de lodos y patio de secado



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2011

Figura 20. Lodo deshidratado y seco



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2011

2.5 Personal operativo y mantenimiento

Durante varios años, las instalaciones de la planta de tratamiento recibieron el mínimo de operación y mantenimiento, casi en un estado de abandono. Actualmente, se cuenta con cuatro funcionarios de la universidad, destacados de forma permanente para su operación y mantenimiento.

- Sr. Arturo González (responsable)
- Donaldo Rodríguez
- Erick Contreras
- Alex Yumán

Figura 21. **Personal de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**



De izquierda a derecha: Donaldo Rodríguez, Arturo González, Erick Contreras, Alex Yumán (ausente).

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Las siguientes fotografías muestran el estado de abandono en que se encontraba las instalaciones en los años 2001 y 2006.

Figura 22. **Sedimentador primario, Filtro percolador y Sedimentador secundario, año 2001**



Fuente: ECOPLAN, 2001

Figura 23. **Sedimentador primario y Filtro percolador, año 2006**



Fuente: Referencia DUC-S0611-2006.

Las siguientes fotografías muestran el estado actual de las instalaciones.

Figura 24. **Sedimentador primario, Filtro percolador y Sedimentador secundario**



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

3. METODOLOGÍA

3.1 Selección de los parámetros de control

La siguiente tabla muestra los parámetros seleccionados y su importancia de análisis.

Tabla IX. **Parámetros de análisis seleccionados**

Parámetro	Importancia
Sólidos suspendidos	Pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte el agua residual sin tratar al entorno acuático.
DBO / DQO	Si se descarga la materia orgánica biodegradable al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y desarrollo de condiciones sépticas.
Nitrógeno / Fósforo	Junto con el carbono son nutrientes esenciales para el crecimiento de vida acuática no deseada, favoreciendo la eutrofización de los cuerpos de agua.
pH / Temperatura	Importantes para conocer si las condiciones son adecuadas para el crecimiento bacteriano.

Fuente: Metcalf & Eddy, 1996

Para el análisis químico se utilizarán los procedimientos descritos en los folletos utilizados en el curso de Química y Microbiología Sanitaria y casa fabricantes de los reactivos químicos. El pH y Temperatura, se analizan *in situ*. (Oakley, 2011/ Romero, 2010).

3.2 Análisis estadístico para determinar el número de muestras

Para determinar el número de muestras por recolectar en cada uno de los 6 puntos de muestreos, se hará de acuerdo con el Método 1060B indicado en Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales.

Se utilizaron las curvas de niveles de confianza establecidos a partir de la siguiente fórmula. (*Standard methods for the examination of water and wastewater, 2002*).

$$N \geq \left(\frac{ts}{U} \right)^2$$

Donde:

N = número de muestras

t = es la t de student para un nivel de confianza determinado

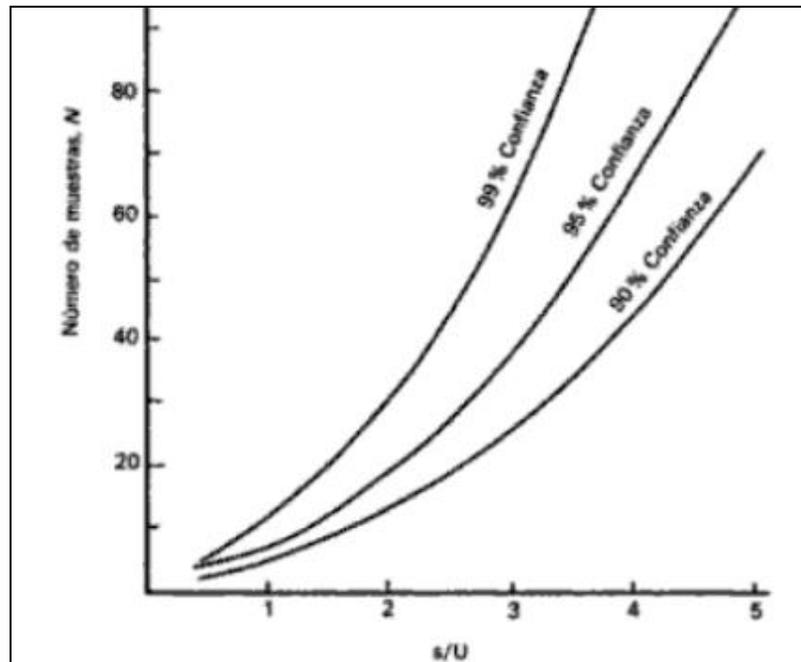
s = desviación estándar global

U = nivel de confianza aceptable

Para una desviación estándar, *s*, de 0.020 y un nivel de confianza, *U*, de 0.015, se obtiene un valor de 1.33 para la relación *s/U*.

A partir de este resultado, se interpola en la siguiente figura para un nivel de confianza del 95% y se establece que el número de muestras por recolectar debe ser mayor o igual a 10.

Figura 25. **Número aproximado de muestras necesarias para calcular una concentración media**



Fuente: Standard methods for the examination of water and wastewater, 2002

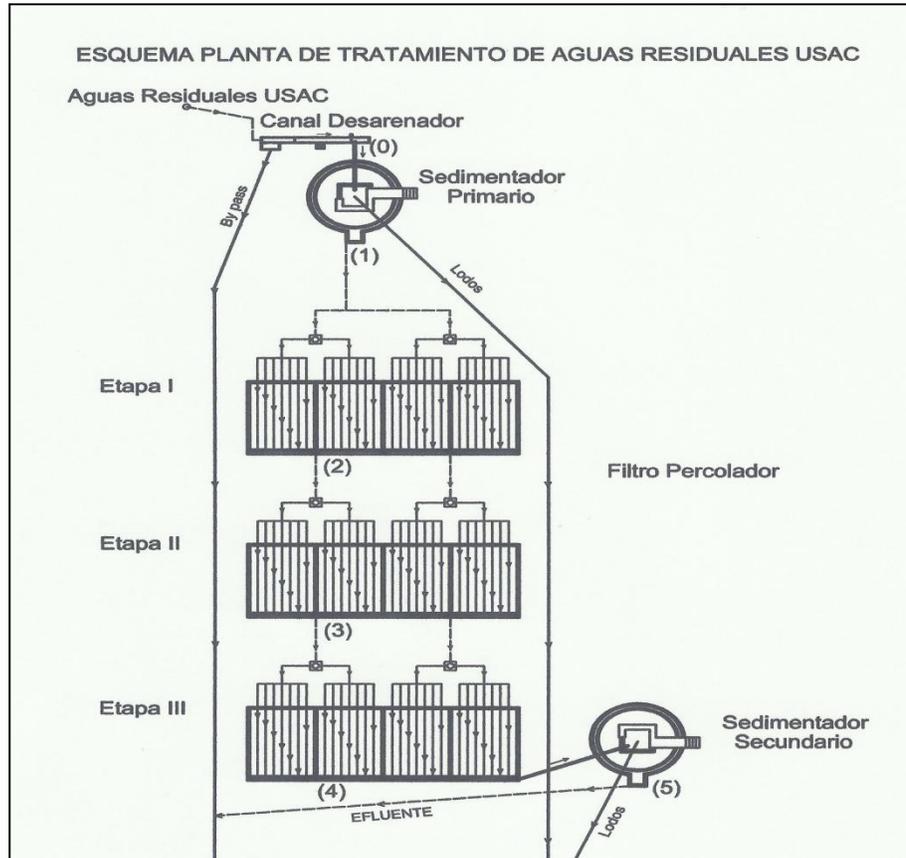
Para efectos de este estudio, se recolectaran 10 muestras en cada uno de los puntos de muestreo.

3.3 Puntos de recolección de muestras

Los puntos definidos para la recolección de las muestras de agua residual son el afluente y efluente de cada una de las unidades de tratamiento: Sedimentador primario, Filtro percolador (Etapas I, II y III) y Sedimentador secundario.

La siguiente figura muestra los puntos de recolección.

Figura 26. **Puntos de recolección de muestra en los efluentes de las unidades de tratamiento**



Fuente: Ing. Rommel Raudales, 2012.

3.4 Frecuencia de análisis de muestras

Se estarán recolectando y analizando las muestras, principalmente los días viernes, de forma tal que se minimice cualquier efecto en los resultados como producto de las variaciones en la población universitaria asociada a los restantes días y horarios de clases. Asimismo se produce una menor afectación de la actividad académica desarrollada en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Doctora Alba Estela Tabarini Molina”.

3.5 Selección del tipo de muestra

Se utilizará el muestreo compuesto, con base en el tiempo, ya que indica las características promedio de las aguas residuales durante un lapso de tiempo y quedan eliminados los efectos de los cambios intermitentes de caudal y concentración. (Cruz, 1990 / López, 2010/ Oakley, 2011 / Romero, 2010).

El volumen de muestra requerido durante un período de 5 horas de muestreo, se determina con la siguiente relación: (Romero, 2010).

$$V = \frac{VT}{Q * NM}$$

Donde:

V = Volumen a recolectar por cada L/s de agua cruda; ml

VT = Volumen total de la muestra compuesta; 1000 ml

Q = Caudal promedio de agua cruda; considerando 6 l/s

NM = Número de muestras a recolectar; 5 muestras

De la cual se obtiene que se requiere recolectar 33.33 ml por cada l/s de agua residual. Para esto, cada hora se captará un volumen de 200 ml del agua residual en cada punto de muestreo, hasta obtener un volumen total de 1000 ml de muestra por punto.

3.6 Medición de caudal

La mayor utilidad de la medición del caudal en plantas pequeñas está relacionada con trabajos de investigación sobre la eficiencia de sus unidades de tratamiento y de verificación de parámetros de diseño. (Lothar, 1981).

Debido a que la planta de tratamiento no cuenta con una estructura o sistema de medición de caudal, se debe proceder con la selección de un método de medición factible para ser colocado en la canaleta de ingreso de agua residual.

3.6.1 Selección del tipo de estructura de medición

Para la selección del tipo de vertedero se toma en consideración las siguientes características:

- Construcción e instalación: debe ser de fácil construcción e instalación, sobre todo ante el deterioro o pérdida.
- Removible: debe poderse retirar para realizar labores de limpieza y mantenimiento,
- Bajo costo económico: los materiales y mano de obra para construcción deben ser económicos y disponibles localmente.
- Mínima intervención en las estructuras: la instalación del medidor de caudal no debe alterar las estructuras actuales.
- Apropiado: debe tener un error máximo del 10 % para caudales menores a 17 l/s.

Se puede seleccionar, tanto un vertedero triangular de 90°, como uno tipo Sutro. Sin embargo, se opta por uno de tipo triangular, ya que es más simple su diseño y construcción. En caso de que ocurra su pérdida o deterioro, es más

factible que vuelva ser sustituido de forma oportuna y que la planta no permanezca sin un sistema de medición de caudal, tal como ocurre actualmente. Para evitar la acumulación de sedimentos, la estructura será removible. (Romero, 2010).

La calibración del vertedero triangular de pared delgada se hará de acuerdo con la ecuación de Thomson corregida. (Portillo, 2011).

$$Q = 0.1990 H^{5/2}$$

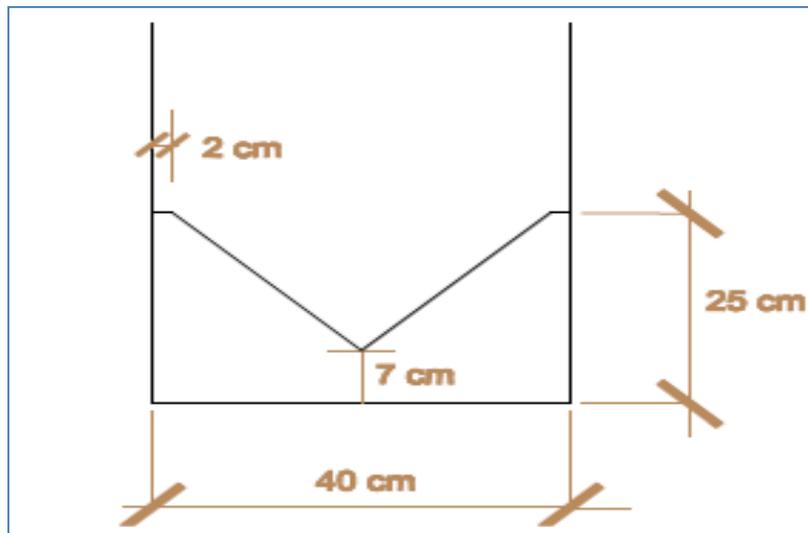
Donde:

Q = caudal agua residual, l/s

H = altura de la cresta del vertedero, cm, medida a 6 cm, 4H.

El siguiente esquema muestra las dimensiones en centímetros del vertedero triangular.

Figura 27. Esquema del diseño del vertedero triangular



Fuente: Ing. Rommel Raudales, 2011

3.6.2 Aforo volumétrico del caudal de agua residual

Debido a la limitación en la colaboración para la instalación de la estructura de medición, vertedero triangular, fue necesario realizar aforos volumétricos del caudal de agua residual que ingresa a la planta de tratamiento.

Para esto, se utilizó un recipiente calibrado de 20 litros y se procedió a medir por triplicado el tiempo que demora en llenarse. Dividiendo el volumen de 20 litros entre el tiempo promedio, se obtiene el caudal en litros por segundo.

3.7 Evaluación preliminar de la granulometría

Se ha reportado que cada una de las etapas del filtro percolador posee un tamaño efectivo de 3.5, 3.0 y 2.5 pulgadas, para el medio filtrante. (Chávez, 1991). Sin embargo, tal como se logra apreciar en la Figura 15, existen diferencias importantes con dichos valores.

Para realizar una evaluación preliminar del medio filtrante de cada etapa del filtro percolador, se tomarán al azar 100 rocas por etapa y se le determinará la longitud mayor.

Posteriormente, obtendrá la distribución de frecuencias, distribución de frecuencias acumuladas, la curva granulométrica, tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad por etapa del filtro percolador. Los porcentajes se determinan por cantidad de material y no por peso.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Características del agua residual que ingresa, afluente, a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC

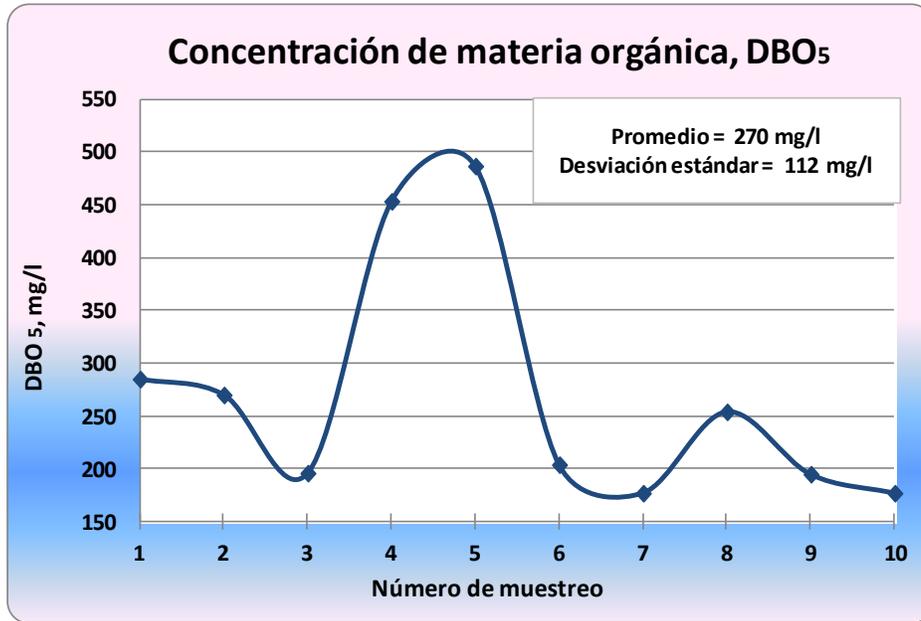
La recolección de las muestras compuestas del agua residual que ingresa a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, fue realizada posterior al pre-tratamiento de desarenación.

TABLA X. Características del agua residual que ingresan a la Planta Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC

Número de muestreo	Fecha recolección	Caudal (l/s)	DBO ₅ (mg/l)	DOQ (mg/l)	Sólidos suspendidos SS (mg/l)	pH	Temperatura T (°C)
1	04/11/11	4.70	285	421	390	7.36	21.60
2	27/01/12	4.56	270	1021	140	7.43	21.20
3	03/02/12	4.34	196	356	110	8.60	22.14
4	10/02/12	5.70	453	925	500	8.66	21.54
5	17/02/12	5.80	487	1133	700	8.55	22.70
6	09/03/12	5.96	204	444	320	8.86	23.28
7	13/03/12	7.94	177	361	220	8.80	22.84
8	16/03/12	8.13	254	558	450	8.96	22.90
9	22/03/12	5.88	195	401	290	8.62	23.42
10	20/04/12	7.80	177	296	200	8.30	23.98
Mínimo		4.34	177	296	110	7.36	21.20
Máximo		8.13	487	1133	700	8.96	23.98
Promedio		6.08	270	592	332	8.41	22.56
Desviación Estándar		1.42	112	311	182	0.57	0.91

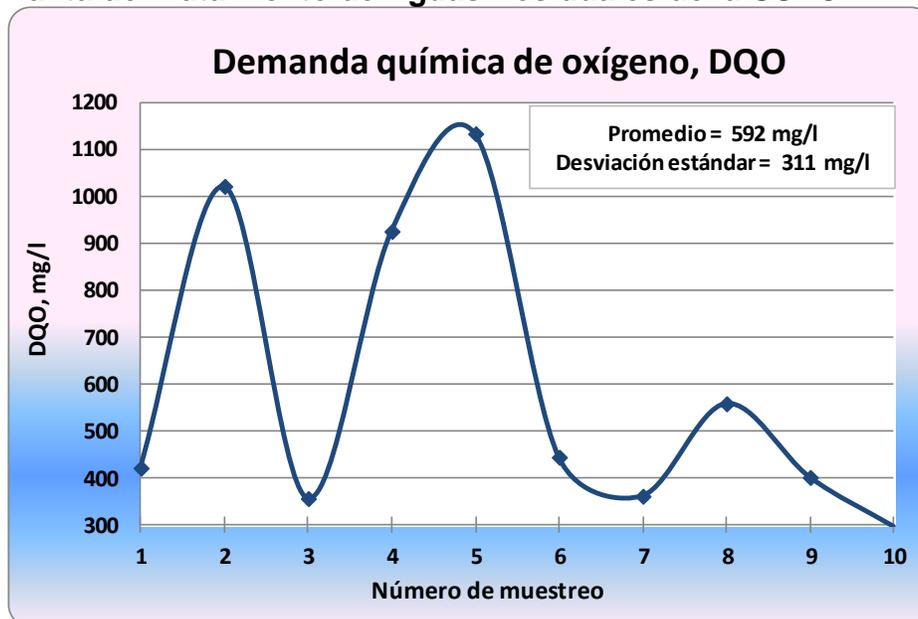
Nota: Los valores de Caudal, pH y Temperatura, corresponden al valor promedio.
Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 28. Concentración de materia orgánica, DBO₅, en el afluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 29. Demanda química de oxígeno, DQO, en el afluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC



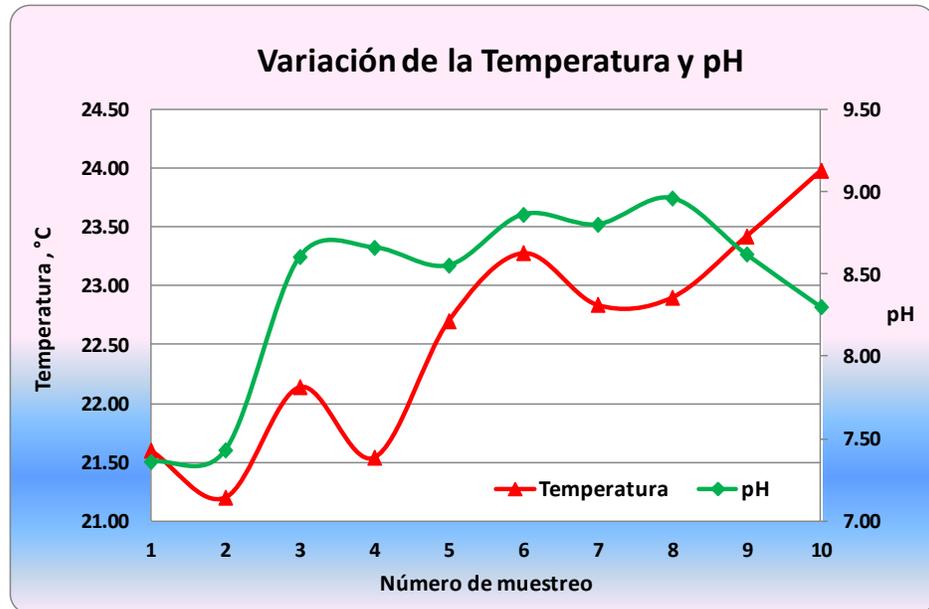
Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 30. Concentración de sólidos suspendidos, SS, en el afluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 31. Temperatura y pH promedios en el afluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

4.1.1 Índice de Biodegradabilidad

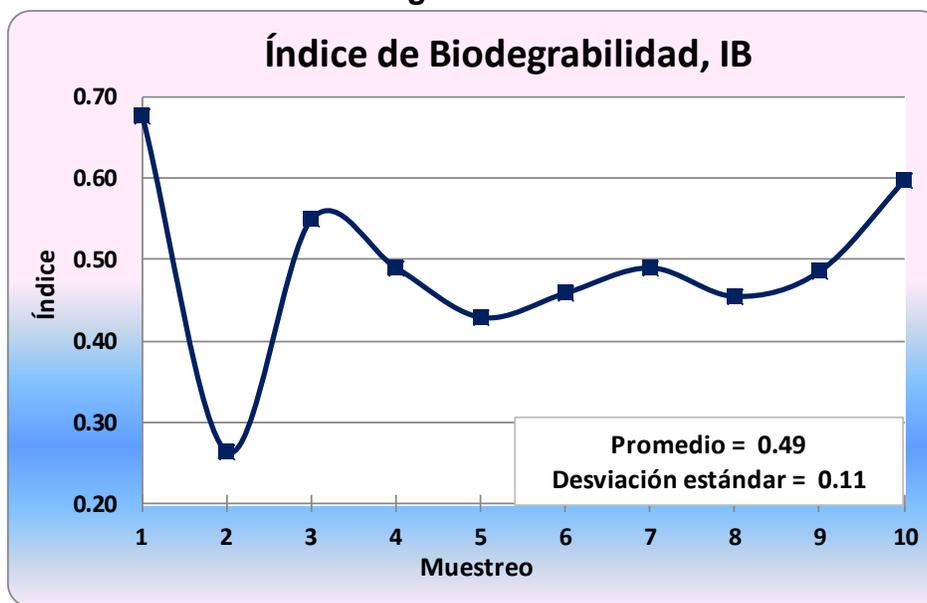
A partir de los resultados obtenidos para las concentraciones de la materia orgánica, DBO₅, y la demanda química de oxígeno, DQO, se calcula el Índice de Biodegradabilidad, IB, que presenta el agua residual que ingresa a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.

TABLA XI. Índice de Biodegradabilidad del agua residual que ingresa a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC

Número de muestreo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice	0.68	0.26	0.55	0.49	0.43	0.46	0.49	0.46	0.49	0.60
	Mínimo = 0.26		Máximo = 0.68		Promedio = 0.49		Desviación estándar = 0.11			

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 32. Índice de Biodegradabilidad del agua residual que ingresa a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

4.1.2 Carga orgánica e hidráulica

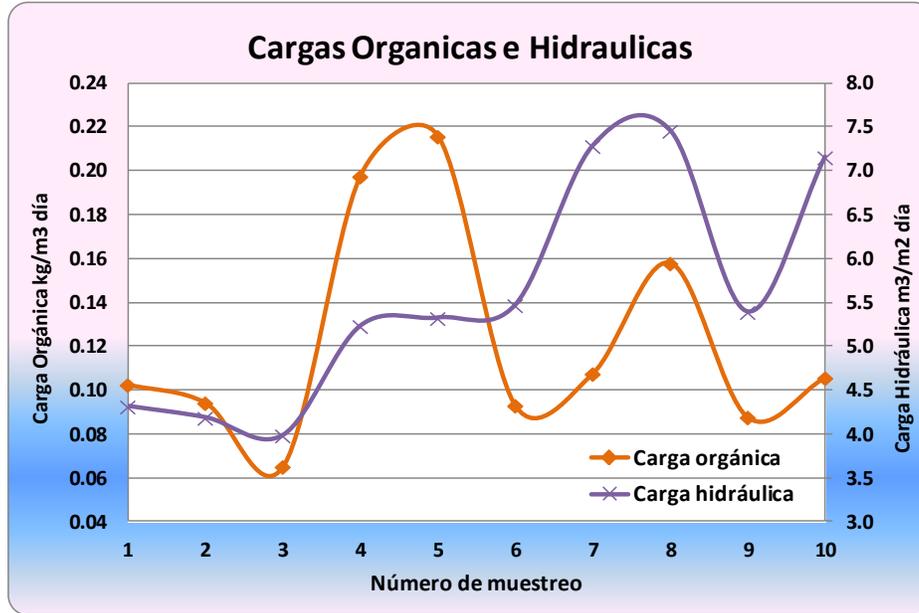
La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos al calcular las cargas orgánica e hidráulica que ingresan a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.

TABLA XII. **Carga orgánica e hidráulica que ingresan a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**

Número de muestreo	Carga Orgánica (kg/m ³ día)	Carga Hidráulica (m ³ /m ² día)
1	0.10	4.31
2	0.09	4.18
3	0.06	3.98
4	0.20	5.23
5	0.22	5.32
6	0.09	5.46
7	0.11	7.28
8	0.16	7.45
9	0.09	5.39
10	0.11	7.15
Mínimo	0.06	3.98
Máximo	0.22	7.45
Promedio	0.12	5.57
Desviación Estándar	0.05	1.30

Nota: La carga hidráulica es calculada para el área del Filtro Percolador.
Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 33. **Cargas orgánicas e hidráulicas aplicadas a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

4.1.3 Caudal de agua residual que ingresa a la planta de tratamiento

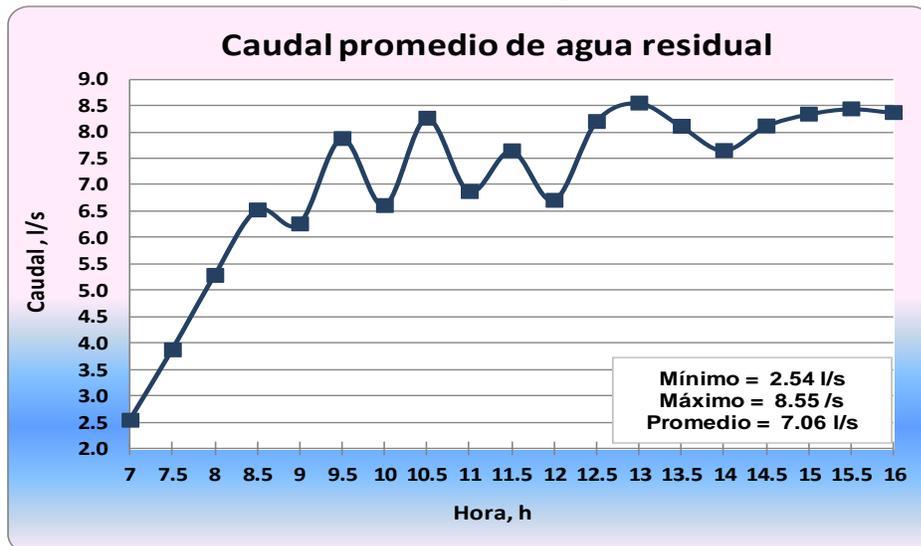
Las mediciones volumétricas para determinar el caudal de agua residual que ingresa a la planta de tratamiento, se realizaron en días sin lluvia y durante el horario normal de trabajo del personal responsable de su operación y mantenimiento.

TABLA XIII. Mediciones volumétricas del caudal de agua residual que ingresan a la Planta Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC

Hora	NÚMERO DE MEDICIÓN												Pro	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
	CAUDAL, l/s													
07:00												3.0	2.1	2.5
07:30												4.4	3.3	3.9
08:00	4.3	4.4	4.1	5.6	5.7	5.1	7.1	8.1	4.6	5.7	4.9	3.9	5.3	
08:30				5.6			7.3	8.2	6.0	6.3	6.3	6.0	6.5	
09:00	4.7	4.4	4.1	5.7	5.8	5.8	7.6	8.7	5.8	7.0	7.7	7.7	6.3	
09:30				6.1			8.6	8.7	5.8	8.1	9.3	8.6	7.9	
10:00	4.7	4.6	4.5	6.2	6.1	5.7	8.5	8.9	5.9	7.7	9.3	7.3	6.6	
10:30				5.9			8.1	8.7	6.4	9.3	10.9	8.6	8.3	
11:00	4.8	4.8	4.6	6.1	5.7	7.4	8.5	7.3	6.5	9.3	9.7	7.8	6.9	
11:30				6.2			7.7	7.8	4.7	10.4	8.7	8.1	7.6	
12:00	5.0	4.8	4.6	6.0	5.7	5.8	8.1	7.8	6.6	9.3	9.2	7.6	6.7	
12:30											8.3	8.1	8.2	
13:00											8.0	9.1	8.6	
13:30											8.2	8.1	8.1	
14:00											7.0	8.3	7.7	
14:30											7.4	8.9	8.1	
15:00											7.6	9.1	8.3	
15:30											7.9	9.0	8.4	
16:00											8.0	8.7	8.4	

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 34. Variación del caudal promedio de agua residual que ingresa a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

4.2 Desempeño de cada unidad de tratamiento

Para cada parámetro se analiza su concentración en el efluente de cada unidad de tratamiento.

4.2.1 Variación de la concentración de la materia orgánica, DBO₅.

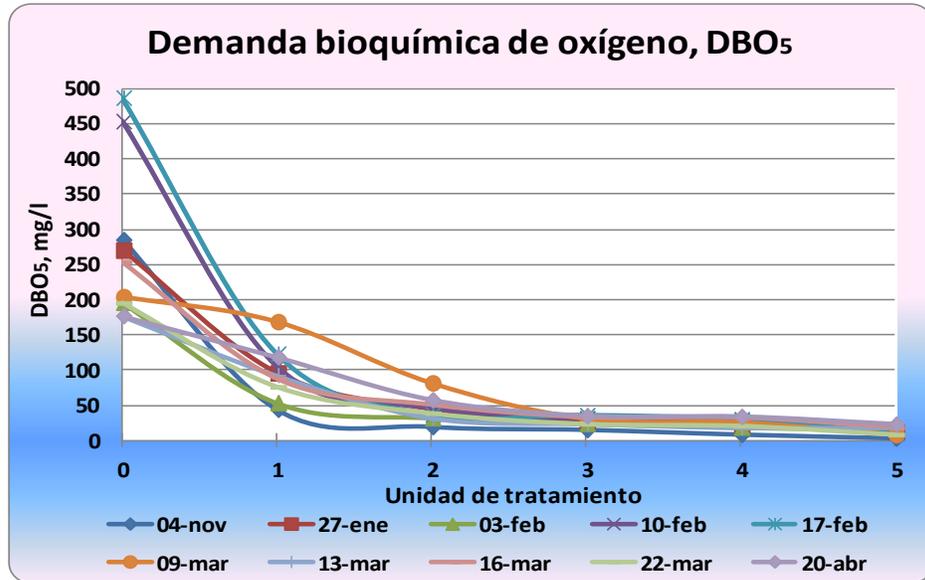
La concentración de materia orgánica se realiza como equivalente a la demanda bioquímica de oxígeno, DBO₅.

TABLA XIV. Variación de la concentración de materia orgánica, DBO₅

Fecha muestreo	Concentración de materia orgánica, DBO ₅ , (mg/l)					
	UNIDAD DE TRATAMIENTO					
	Afluyente (0)	Sedimentador primario (1)	Filtro percolador Etapa I (2)	Filtro percolador Etapa II (3)	Filtro percolador Etapa III (4)	Sedimentador secundario (5)
04/11/11	285	44	19	15	8	3
27/01/12	270	96	44	27	20	12
03/02/12	196	54	32	24	19	15
10/02/12	453	106	47	31	29	13
17/02/12	487	123	37	36	30	10
09/03/12	204	169	82	31	25	8
13/03/12	177	93	32	24	19	19
16/03/12	254	88	50	33	32	18
22/03/12	195	76	38	23	21	8
20/04/12	177	119	58	35	34	23
Mínimo	177	44	19	15	8	3
Máximo	487	169	82	36	34	23
Promedio	270	97	44	28	24	13
Desviación estándar	112	36	17	6	8	6

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 35. Variación de la concentración de materia orgánica, DBO₅, en las unidades de tratamiento



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

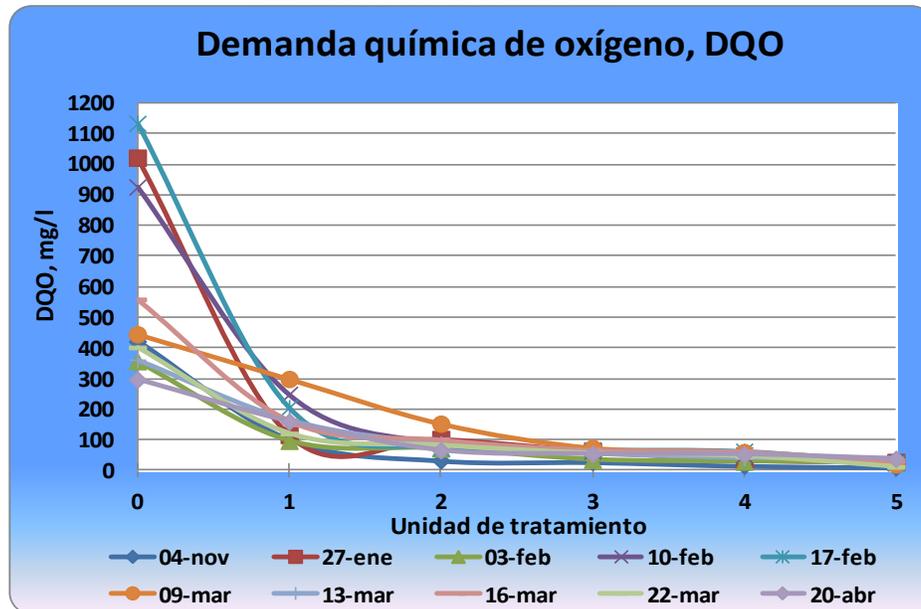
4.2.2 Variación de la concentración de la demanda química de oxígeno, DQO

TABLA XV. Variación de la demanda química de oxígeno, DQO

Fecha muestreo	Demanda química de oxígeno, DQO, (mg/l)					
	UNIDAD DE TRATAMIENTO					
	Afluente (0)	Sedimentador primario (1)	Filtro percolador Etapa I (2)	Filtro percolador Etapa II (3)	Filtro percolador Etapa III (4)	Sedimentador secundario (5)
04/11/11	421	101	32	27	15	10
27/01/12	1021	115	102	63	34	27
03/02/12	356	96	71	34	28	26
10/02/12	925	248	88	63	50	25
17/02/12	1133	205	73	67	62	24
09/03/12	444	298	152	73	59	19
13/03/12	361	164	86	55	41	38
16/03/12	558	163	101	68	62	31
22/03/12	401	120	81	55	46	11
20/04/12	296	159	65	53	52	37
Mínimo	296	96	32	27	15	10
Máximo	1133	298	152	73	62	38
Promedio	592	167	85	56	45	25
Desviación estándar	311	66	31	15	16	9

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 36. Variación de la demanda química de oxígeno, DQO, en las unidades de tratamiento



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

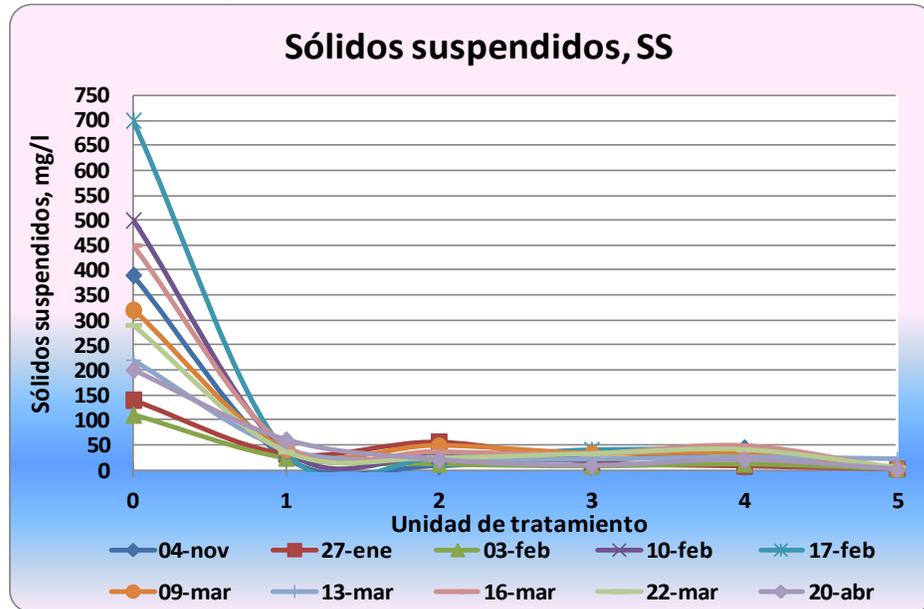
4.2.3 Variación de la concentración de los sólidos suspendidos, SS

TABLA XVI. Variación de la concentración de sólidos suspendidos

Fecha muestreo	Concentración de sólidos suspendidos, SS, (mg/l)					
	UNIDAD DE TRATAMIENTO					
	Afluyente (0)	Sedimentador primario (1)	Filtro percolador Etapa I (2)	Filtro percolador Etapa II (3)	Filtro percolador Etapa III (4)	Sedimentador secundario (5)
04/11/11	390	24	8	32	44	3
27/01/12	140	32	56	16	8	3
03/02/12	110	24	12	8	12	3
10/02/12	500	40	28	20	36	4
17/02/12	700	36	24	40	36	3
09/03/12	320	40	48	32	32	2
13/03/12	220	40	20	20	24	21
16/03/12	450	48	36	32	48	3
22/03/12	290	36	24	32	40	4
20/04/12	200	60	20	8	20	1
Mínimo	110	24	8	8	8	1
Máximo	700	60	56	40	48	21
Promedio	332	38	28	24	30	4
Desviación estándar	182	11	15	11	13	6

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 37. Variación de la concentración de sólidos suspendidos, SS, en las unidades de tratamiento



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

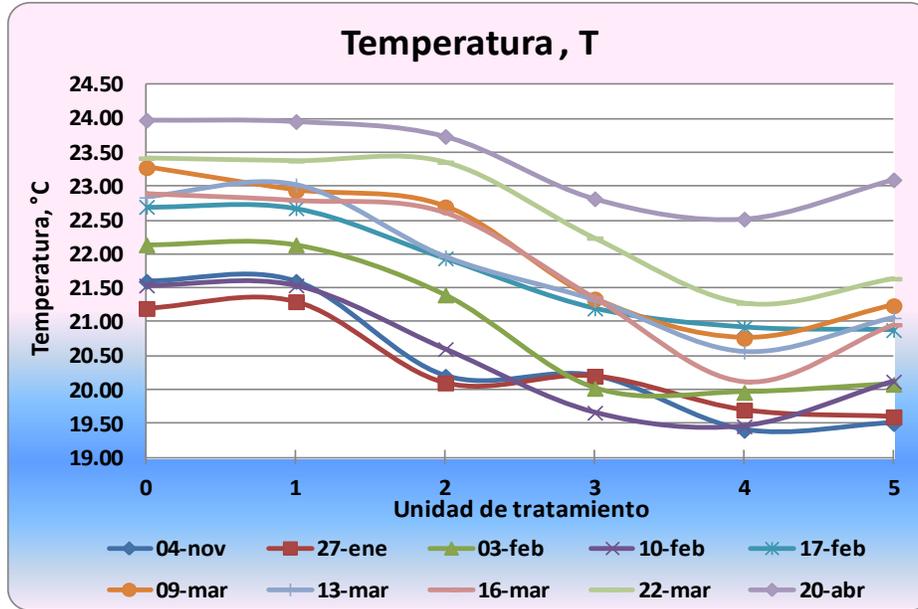
4.2.4 Variación de la temperatura promedio, T

TABLA XVII. Variación de la temperatura (promedio), T

Fecha muestreo	Temperatura, T, °C					
	UNIDAD DE TRATAMIENTO					
	Afluente (0)	Sedimentador primario (1)	Filtro percolador Etapa I (2)	Filtro percolador Etapa II (3)	Filtro percolador Etapa III (4)	Sedimentador secundario (5)
04/11/11	21.60	21.60	20.20	20.20	19.40	19.50
27/01/12	21.20	21.30	20.10	20.20	19.70	19.60
03/02/12	22.14	22.14	21.40	20.02	19.96	20.08
10/02/12	21.54	21.54	20.60	19.66	19.46	20.12
17/02/12	22.70	22.68	21.94	21.20	20.92	20.88
09/03/12	23.28	22.94	22.70	21.34	20.76	21.24
13/03/12	22.84	23.02	21.96	21.32	20.56	21.06
16/03/12	22.90	22.80	22.62	21.36	20.12	20.96
22/03/12	23.42	23.38	23.36	22.24	21.28	21.64
20/04/12	23.98	23.96	23.74	22.82	22.52	23.10
Mínimo	21.20	21.30	20.10	19.66	19.40	19.50
Máximo	23.98	23.96	23.74	22.82	22.52	23.10
Promedio	22.56	22.54	21.86	21.04	20.47	20.82
Desviación estándar	0.91	0.87	1.28	1.01	0.96	1.07

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 38. Variación de la temperatura en las unidades de tratamiento



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

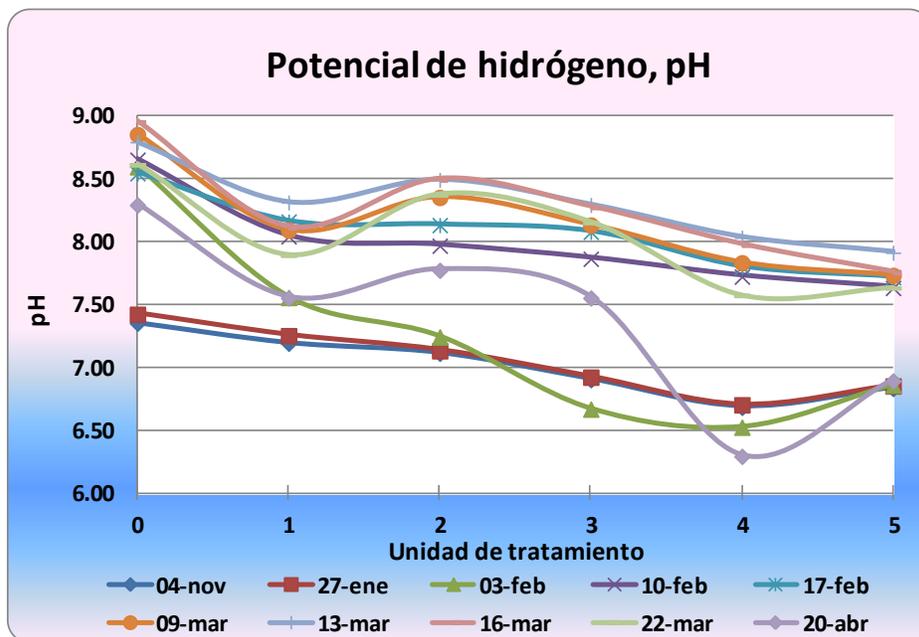
4.2.5 Variación del pH promedio, pH

TABLA XIII. Variación del pH (promedio)

Fecha muestreo	pH					
	UNIDAD DE TRATAMIENTO					
	Afluente (0)	Sedimentador primario (1)	Filtro percolador Etapa I (2)	Filtro percolador Etapa II (3)	Filtro percolador Etapa III (4)	Sedimentador secundario (5)
04/11/11	7.36	7.20	7.12	6.91	6.69	6.84
27/01/12	7.43	7.26	7.14	6.93	6.71	6.86
03/02/12	8.60	7.56	7.25	6.68	6.53	6.87
10/02/12	8.66	8.05	7.98	7.87	7.73	7.64
17/02/12	8.55	8.17	8.14	8.09	7.81	7.73
09/03/12	8.86	8.10	8.36	8.14	7.84	7.74
13/03/12	8.80	8.32	8.50	8.30	8.04	7.92
16/03/12	8.96	8.12	8.50	8.28	7.98	7.76
22/03/12	8.62	7.90	8.38	8.16	7.58	7.64
20/04/12	8.30	7.56	7.78	7.56	6.30	6.90
Mínimo	7.36	7.20	7.12	6.68	6.30	6.84
Máximo	8.96	8.32	8.50	8.30	8.04	7.92
Promedio	8.41	7.82	7.91	7.69	7.32	7.39
Desviación estándar	0.57	0.40	0.56	0.63	0.68	0.46

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 39. Variación del pH en las unidades de tratamiento



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

4.3 Eficiencia por cada unidad de tratamiento

A continuación, se muestran las eficiencias obtenidas en la remoción de la materia orgánica, demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos para cada unidad de tratamiento.

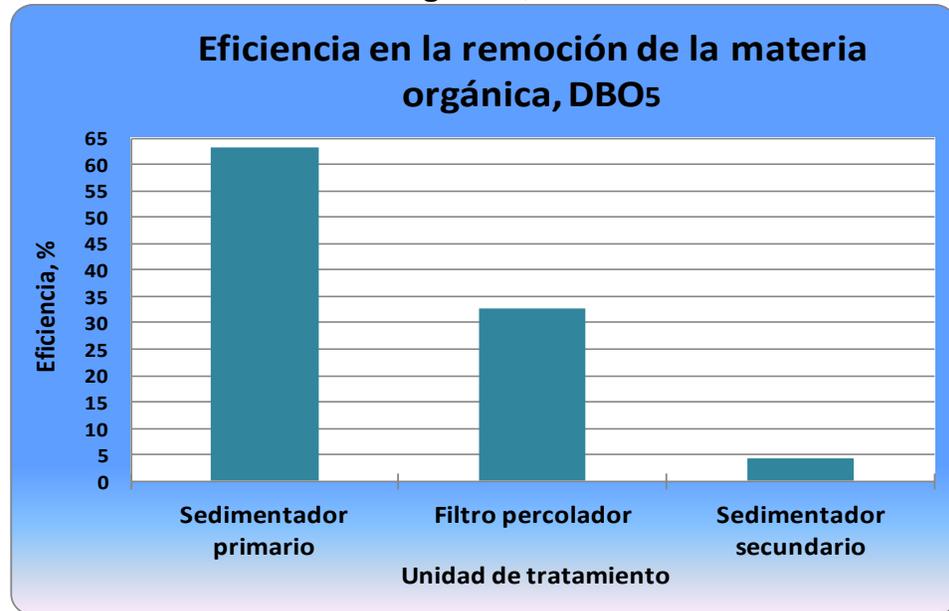
4.3.1 Eficiencia por unidad de tratamiento en la remoción de la materia orgánica, DBO₅.

TABLA XIX. Eficiencia por unidad de tratamiento en la remoción de la materia orgánica, DBO₅

Fecha muestreo	Porcentaje de Eficiencia, %		
	UNIDAD DE TRATAMIENTO		
	Sedimentador primario	Filtro percolador (Etapas I, II y III)	Sedimentador secundario
04/11/11	85.49	12.65	1.86
27/01/12	67.52	29.31	3.18
03/02/12	78.93	19.26	1.81
10/02/12	78.94	17.59	3.47
17/02/12	76.27	19.55	4.18
09/03/12	18.12	73.06	8.82
13/03/12	53.35	46.56	0.09
16/03/12	70.61	23.54	5.85
22/03/12	63.70	29.71	6.58
20/04/12	37.99	55.00	7.01
Mínimo	18.12	12.65	0.09
Máximo	85.49	73.06	8.82
Promedio	63.09	32.62	4.29
Desviación estándar	21.09	19.46	2.73

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 40. Eficiencia por unidad de tratamiento en la remoción de la materia orgánica, DBO₅



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

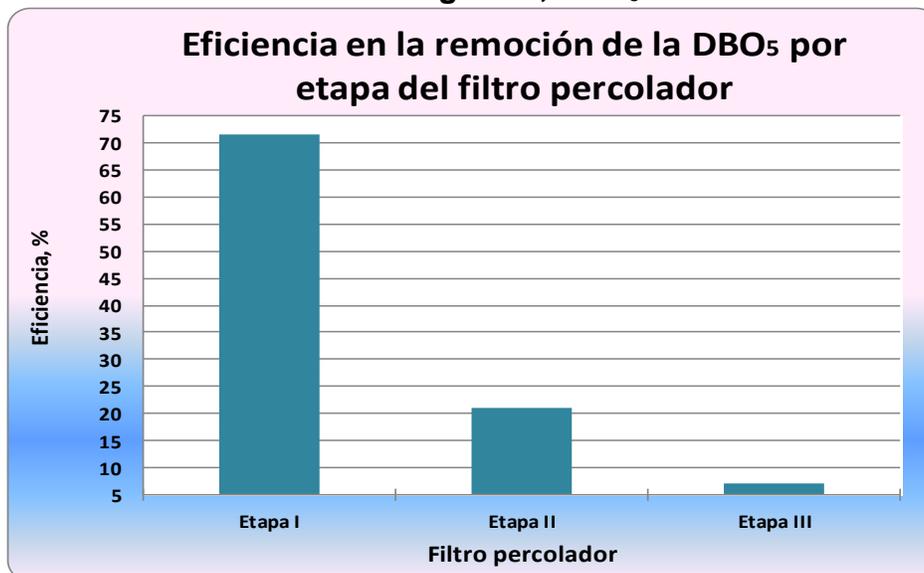
4.3.2 Eficiencia por etapa del filtro percolador en la remoción de la materia orgánica, DBO₅

TABLA XX. Eficiencia por etapa del filtro percolador, en la remoción de la materia orgánica, DBO₅

Fecha muestreo	Porcentaje de Eficiencia, %		
	FILTRO PERCOLADOR		
	ETAPA I	ETAPA II	ETAPA III
04/11/11	69.20	11.81	18.99
27/01/12	68.28	21.94	9.78
03/02/12	61.84	23.01	15.15
10/02/12	75.90	20.67	3.42
17/02/12	92.70	1.07	6.22
09/03/12	60.80	35.57	3.63
13/03/12	81.58	11.30	7.12
16/03/12	67.12	31.80	1.08
22/03/12	67.75	27.30	4.95
20/04/12	71.90	26.92	1.18
Mínimo	60.80	1.07	1.08
Máximo	92.70	35.57	18.99
Promedio	71.71	21.14	7.15
Desviación estándar	9.59	10.46	5.92

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 41. Eficiencia por etapa del filtro percolador, en la remoción de la materia orgánica, DBO₅



Fuente: Ing. Óscar Ramírez

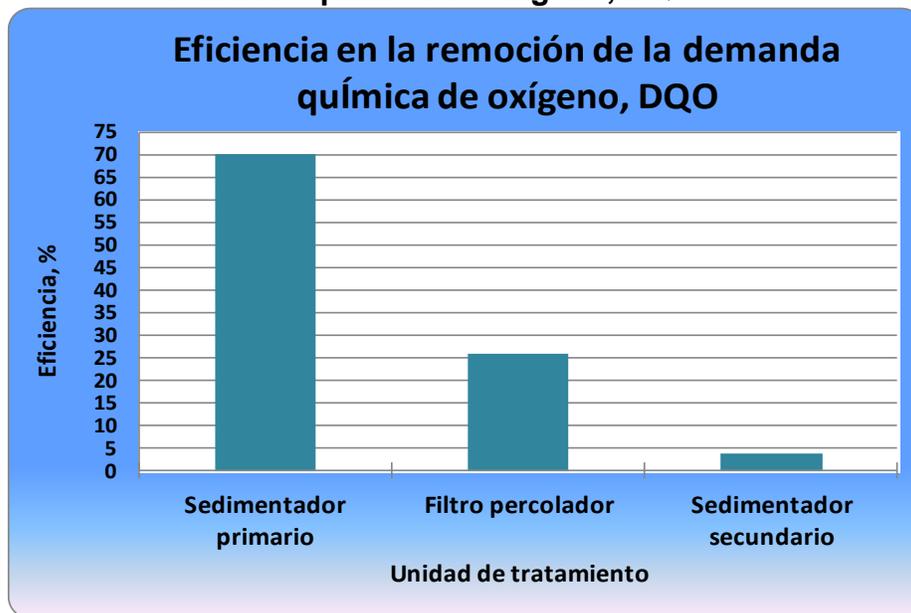
4.3.3 Eficiencia por unidad de tratamiento en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO

TABLA XXI. Eficiencia por unidad de tratamiento en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO

Fecha muestreo	Porcentaje de Eficiencia, %		
	UNIDAD DE TRATAMIENTO		
	Sedimentador primario	Filtro percolador (Etapas I, II y III)	Sedimentador secundario
04/11/11	77.86	20.92	1.22
27/01/12	91.15	8.15	0.70
03/02/12	78.79	20.61	0.61
10/02/12	75.22	22.00	2.78
17/02/12	83.68	12.89	3.43
09/03/12	34.35	56.24	9.41
13/03/12	60.99	38.08	0.93
16/03/12	74.95	19.17	5.88
22/03/12	72.05	18.97	8.97
20/04/12	52.90	41.31	5.79
Mínimo	34.35	8.15	0.61
Máximo	91.15	56.24	9.41
Promedio	70.19	25.83	3.97
Desviación estándar	16.58	14.73	3.37

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 42. Eficiencia por unidad de tratamiento en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

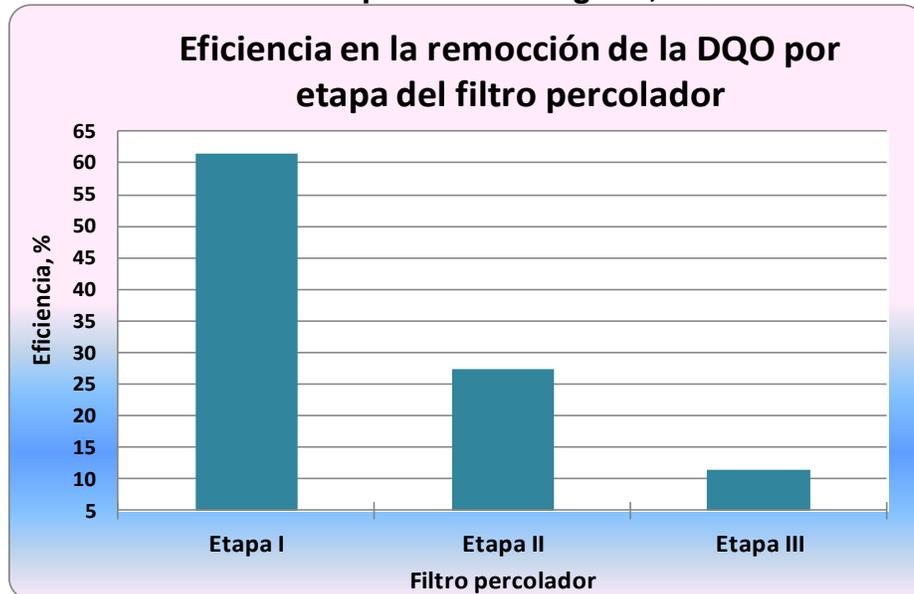
4.3.4 Eficiencia por etapa del filtro percolador en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO

TABLA XXII. Eficiencia por etapa del filtro percolador, en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO

Fecha muestreo	Porcentaje de Eficiencia, %		
	FILTRO PERCOLADOR		
	ETAPA I	ETAPA II	ETAPA III
04/11/11	80.23	5.81	13.95
27/01/12	16.05	48.15	35.80
03/02/12	36.76	54.41	8.82
10/02/12	61.84	23.01	15.15
17/02/12	92.31	4.20	3.50
09/03/12	61.09	33.05	5.86
13/03/12	63.41	25.20	11.38
16/03/12	61.39	32.67	5.94
22/03/12	52.70	35.14	12.16
20/04/12	87.85	11.21	0.93
Mínimo	16.05	4.20	0.93
Máximo	92.31	54.41	35.80
Promedio	61.36	27.29	11.35
Desviación estándar	22.98	16.90	9.75

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 43. **Eficiencia por etapa del filtro percolador, en la remoción de la demanda química de oxígeno, DQO**



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

4.3.5 Eficiencia global para la remoción de los sólidos suspendidos, SS

Solamente se considera la eficiencia global de la planta de tratamiento, ya que las etapas del filtro percolador aportan biomasa que es arrastrada por el efluente de cada una.

TABLA XXIII. Eficiencia de la remoción de los sólidos suspendidos, SS

Fecha muestreo	Porcentaje de Eficiencia, %
04/11/11	99.23
27/01/12	98.21
03/02/12	97.73
10/02/12	99.20
17/02/12	99.64
09/03/12	99.38
13/03/12	90.68
16/03/12	99.44
22/03/12	98.45
20/04/12	99.50
Mínimo	90.68
Máximo	99.64
Promedio	98.15
Desviación estándar	2.70

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 44. Eficiencia global para la remoción de los sólidos suspendidos, SS



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

4.4 Características del agua tratada, efluente, de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC

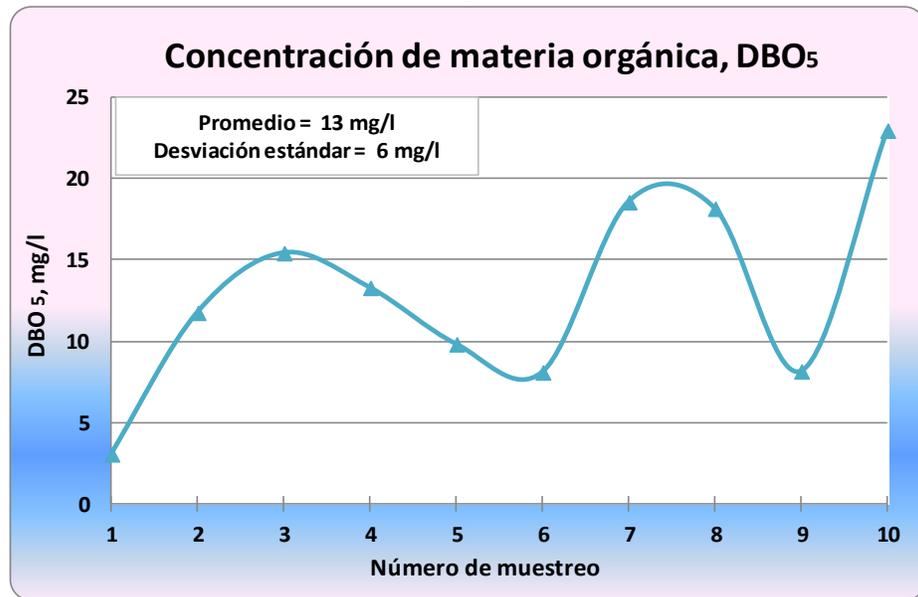
La siguiente tabla muestra las características del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.

TABLA XXIV. Características del efluente de la Planta Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC

Número de muestreo	Fecha recolección	DBO ₅ (mg/l)	DOQ (mg/l)	Sólidos suspendidos SS (mg/l)	Nitrógeno (mg/l)	Fósforo (mg/l)	pH
1	04/11/11	3	10	3	24	5	7
2	27/01/12	12	27	3	23	6	7
3	03/02/12	15	26	3	22	6	7
4	10/02/12	13	25	4	23	7	8
5	17/02/12	10	24	3	21	6	8
6	09/03/12	8	19	2	32	7	8
7	13/03/12	19	38	21	28	6	8
8	16/03/12	18	31	3	22	9	8
9	22/03/12	8	11	4	22	7	8
10	20/04/12	23	37	1	19	7	7
Mínimo		3	10	1	19	5	7
Máximo		23	38	21	32	9	8
Promedio		13	25	4	24	6	7
Desviación Estándar		6	9	6	4	1	0
ACUERDO GUBERNATIVO 236-2006							
Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición final de lodos							
Artículo 20							
Etapas Dos (2 /5/2015)		200	-	400	50	30	6-9
Etapas Tres (2 /5/2020)		200	-	150	25	15	6-9
Etapas Cuatro (2 /5/2024)		200	-	100	20	10	6-9

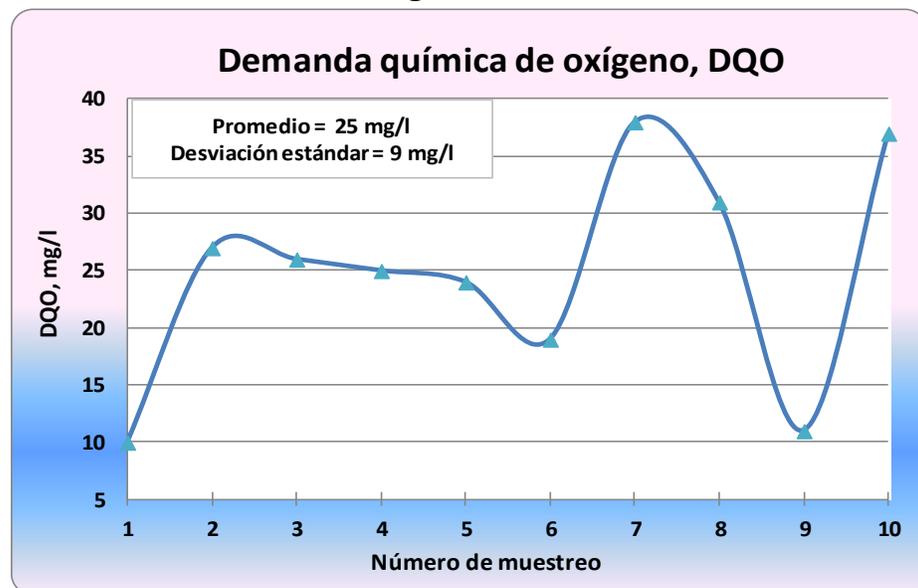
Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 45. **Concentración de materia orgánica, DBO₅, en el efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**



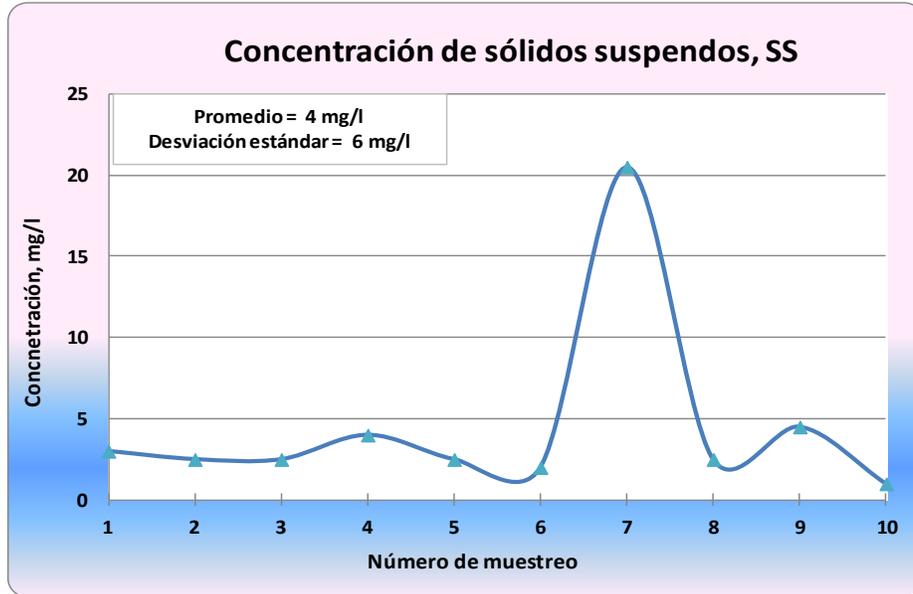
Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 46. **Demanda química de oxígeno, DQO, en el efluente de las Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**



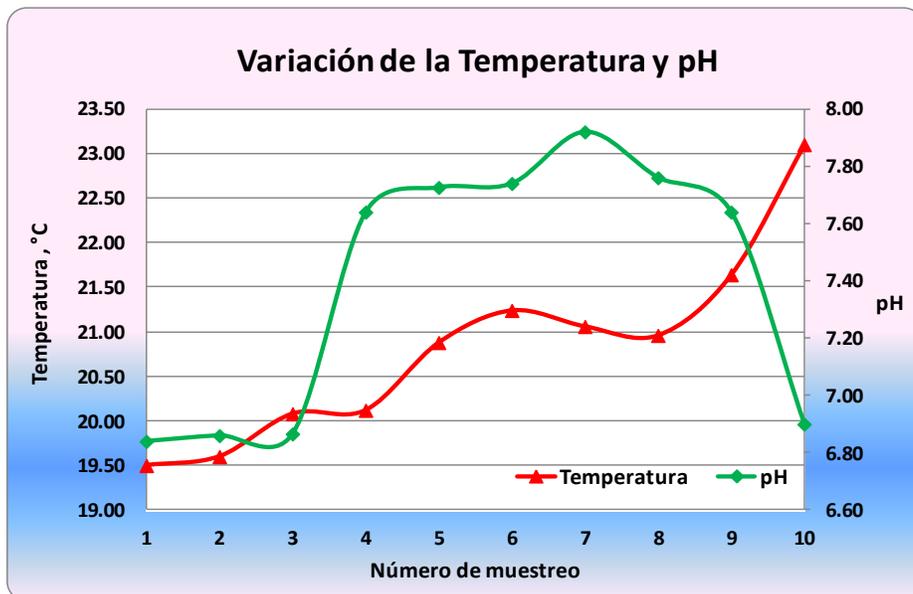
Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 47. **Concentración de sólidos suspendidos, SS, en el efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**



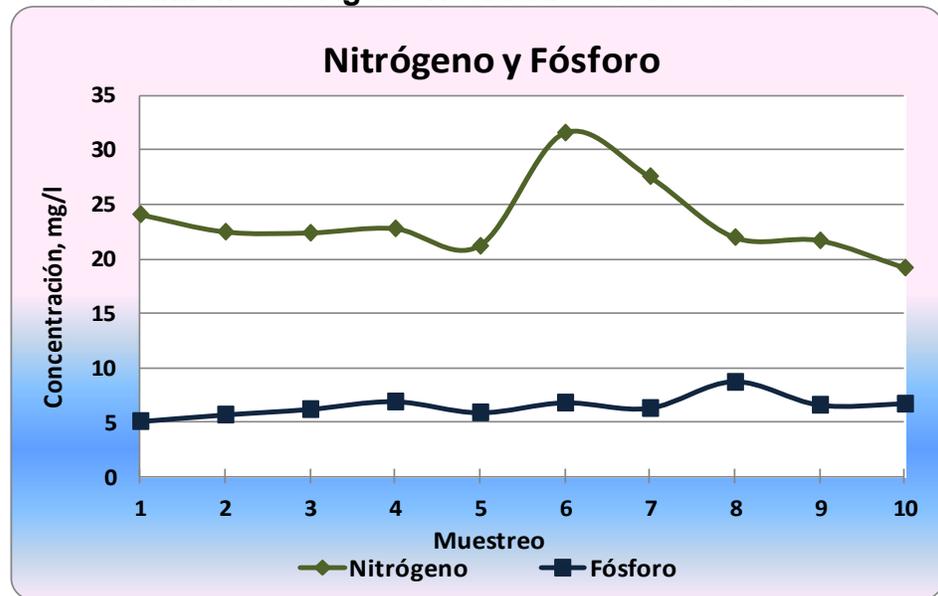
Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 48. **Temperatura y pH promedios en el efluente de las Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 49. **Nitrógeno y Fósforo en el efluente de las Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC**



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

4.5 Evaluación preliminar de la granulometría del medio filtrante de las etapas del filtro percolador

Se realizó una evaluación preliminar de la granulometría del medio filtrante de las tres etapas en serie que conforman el filtro percolador.

TABLA XXV. Muestro del tamaño, longitud mayor, de los materiales que conforman el medio filtrante de cada etapa del filtro percolador

Longitud mayor, cm					
Etapa I		FILTRO PERCOLADOR Etapa II		Etapa III	
8.9	12.4	7.6	12.0	7.0	10.3
9.1	12.4	8.5	12.0	7.2	10.4
9.2	12.5	8.8	12.1	7.4	10.4
9.2	12.6	9.0	12.1	7.7	10.4
9.2	12.7	9.1	12.1	7.7	10.4
9.4	12.7	9.3	12.2	7.7	10.5
9.5	12.7	9.5	12.2	7.8	10.6
9.7	12.8	9.5	12.2	7.9	10.6
10.0	12.8	9.6	12.3	7.9	10.6
10.1	12.8	9.6	12.3	7.9	10.6
10.1	12.9	9.7	12.3	8.0	10.6
10.2	12.9	9.7	12.4	8.2	10.7
10.4	12.9	9.9	12.5	8.2	10.7
10.4	13.0	9.9	12.5	8.2	10.8
10.6	13.0	10.0	12.6	8.2	10.8
10.7	13.0	10.3	12.6	8.4	10.8
10.8	13.1	10.4	12.6	8.4	10.8
10.8	13.1	10.4	12.6	8.4	10.9
10.9	13.2	10.5	12.7	8.6	10.9
10.9	13.2	10.6	12.7	8.7	10.9
10.9	13.3	10.6	12.8	8.7	10.9
10.9	13.4	10.6	12.8	8.8	11.0
10.9	13.5	10.7	12.8	9.0	11.0
10.9	13.6	10.7	12.9	9.0	11.0
11.0	13.7	10.7	13.0	9.0	11.1
11.0	13.8	10.8	13.0	9.1	11.1
11.0	13.9	10.9	13.1	9.1	11.3
11.1	13.9	10.9	13.2	9.1	11.3
11.1	13.9	11.0	13.4	9.1	11.3
11.1	14.1	11.0	13.4	9.2	11.5
11.4	14.2	11.1	13.5	9.3	11.6

TABLA XXV *Continuación*

11.4	14.3	11.1	13.5	9.3	11.8
11.4	14.4	11.1	13.5	9.4	11.8
11.5	14.4	11.2	13.7	9.4	11.9
11.5	14.5	11.3	13.9	9.5	11.9
11.6	14.8	11.3	13.9	9.5	12.1
11.6	14.9	11.4	13.9	9.5	12.1
11.6	14.9	11.4	13.9	9.5	12.2
11.9	15.0	11.4	14.0	9.5	12.3
11.9	15.1	11.6	14.0	9.6	12.6
11.9	15.1	11.7	14.0	9.7	13.0
12.0	15.4	11.7	14.1	9.8	13.0
12.0	15.5	11.7	14.1	9.9	13.2
12.0	15.6	11.8	14.4	9.9	14.1
12.0	15.9	11.8	14.6	9.9	14.7
12.1	16.2	11.9	14.9	9.9	15.1
12.1	16.4	11.9	15.0	10.1	15.4
12.2	16.4	11.9	15.1	10.2	15.6
12.2	18.0	11.9	15.5	10.2	17.4
12.3	19.0	11.9	15.8	10.3	20.6

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

TABLA XXVI. Características del medio filtrante de cada etapa del filtro percolador

Medición, cm	FILTRO PERCOLADOR		
	Etapa I	Etapa II	Etapa III
Tamaño menor	8.9	7.6	7.0
Tamaño mayor	19.0	15.8	20.6
Diferencia de tamaños	10.1	8.2	13.6
Tamaño promedio	12.5	11.9	10.4
Desviación estándar	2.0	1.7	2.2

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

TABLA XXVII. Distribución de frecuencias de tamaños, dimensión mayor, de los medios filtrantes de cada etapa del filtro percolador

% Frecuencias	FILTRO PERCOLADOR		
	Etapa I	Etapa II	Etapa III
6.1 a 7	0	0	1
7.1 a 8	0	1	10
8.1 a 9	1	3	14
9.1 a 10	8	11	21
10.1 a 11	18	15	28
11.1 a 12	18	22	11
12.1 a 13	21	24	7
13.1 a 14	13	15	1
14.1 a 15	10	6	2
15.1 a 16	6	3	3
16.1 a 17	3	0	0
17.1 a 18	1	0	1
18.1 a 19	1	0	0
19.1 a 20	0	0	1

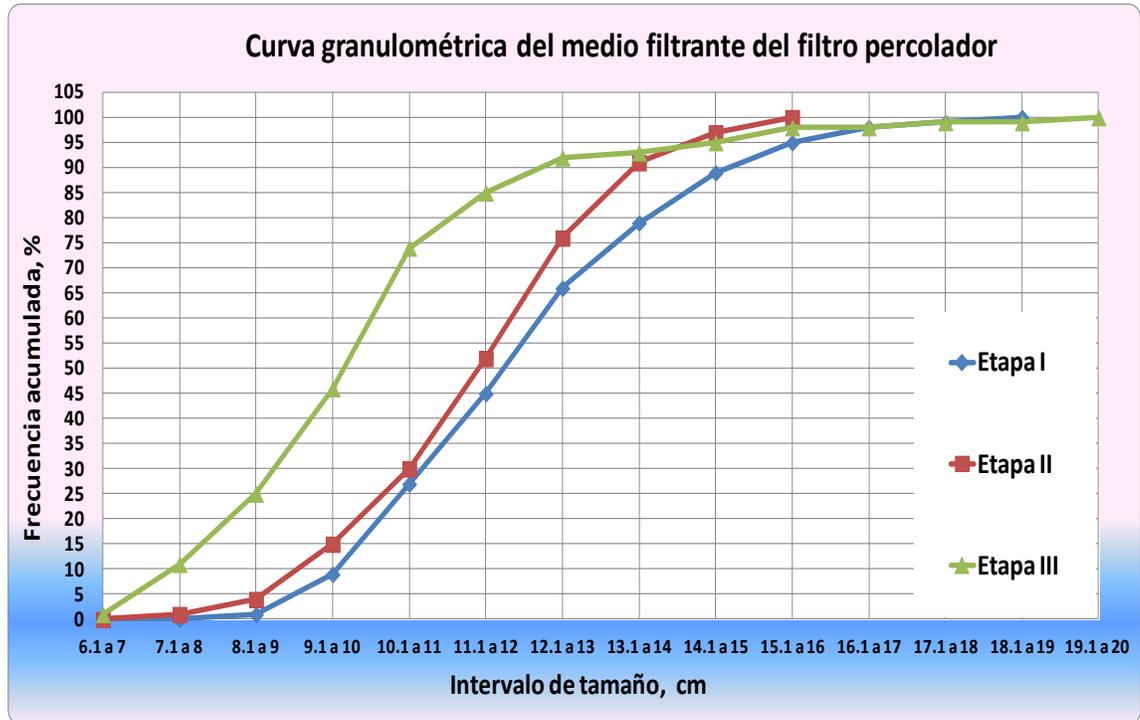
Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

TABLA XXVIII. Distribución de frecuencias acumuladas de tamaños, dimensión mayor, de los medios filtrantes de cada etapa del filtro percolador

% Frecuencias acumulada	FILTRO PERCOLADOR		
	Etapa I	Etapa II	Etapa III
6.1 a 7	0	0	1
7.1 a 8	0	1	11
8.1 a 9	1	4	25
9.1 a 10	9	15	46
10.1 a 11	27	30	74
11.1 a 12	45	52	85
12.1 a 13	66	76	92
13.1 a 14	79	91	93
14.1 a 15	89	97	95
15.1 a 16	95	100	98
16.1 a 17	98		98
17.1 a 18	99		99
18.1 a 19	100		99
19.1 a 20			100

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Figura 50. Curva granulométrica del medio filtrante de las etapas del filtro percolador



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

TABLA XXIX. Tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad del medio filtrante de cada etapa del filtro percolador

FILTRO PERCOLADOR			
Parámetro	Etapa I	Etapa II	Etapa III
Tamaño Efectivo	12.5	12.3	10.5
Coficiente Uniformidad	1.32	1.45	1.40

Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Características del agua residual que ingresa, afluyente, a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC

La Tabla X y Figuras 28 a 31, muestran los resultados obtenidos en el análisis del agua residual que ingresa a la planta de tratamiento para los parámetros de materia orgánica medida como la demanda biológica de oxígeno, DBO₅, demanda química de oxígeno, DQO, sólidos suspendidos, SS, temperatura, T y pH. Estos últimos dos, determinados *in situ* y reportados como el promedio obtenido durante el muestreo.

El valor promedio de la concentración de materia orgánica, DBO₅, es de 270 mg/l, la demanda química de oxígeno, DQO, de 592 mg/l y los sólidos suspendidos de 332 mg/l. Con estos resultados se puede indicar que el agua residual generada en la Universidad de San Carlos, posee características similares a la composición típica del agua residual de origen doméstico para concentraciones media a alta, según la clasificación mostrada en la Tabla IV.

De igual manera, si se comparan estos resultados con los reportados en la Tabla VI, para la Universidad Rafael Landívar de Guatemala y la Universidad Nacional Autónoma de México, se determina que para los parámetros de concentración de materia orgánica y demanda química de oxígeno, los resultados son similares entre las tres Universidades. Sin embargo, en el caso de los sólidos suspendidos, la concentración obtenida es aproximadamente el doble del valor promedio reportado.

La alta concentración de sólidos suspendidos presente en el agua residual generada en la Universidad, puede tener su origen en las aportaciones generadas en las instalaciones de investigación agropecuaria al agua residual, que producen tanto excremento como residuos de los concentrados utilizados para alimentación de los animales.

Estos ingresan al sistema de alcantarillado durante las labores de mantenimiento y limpieza de las instalaciones. Esta situación queda de manifiesto en los restos de concentrados de alimentación que se pueden observar normalmente en el espejo de agua del canal desarenador y del sedimentador primario de la planta de tratamiento, tal como se muestra en la siguiente fotografía.

Figura 41. Restos de concentrado para alimento de animales en el espejo de agua del sedimentador primario



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Al igual que en el caso de los aportes que puedan estar generando las instalaciones agropecuarias, el amplio intervalo de valores reportados en la Tabla X para cada uno de los parámetros analizados, es indicativo de que en el sistema de alcantarillado universitario no solamente están ingresando las aguas provenientes de las instalaciones sanitarias, sino también las de otras instalaciones, tales como cafeterías, laboratorios de investigación-docencia y talleres de mantenimiento. El efecto de los aportes pluviales, al ser un sistema de alcantarillado combinado, no pudo ser verificado, ya que todos los muestreos se realizaron en días soleados y sin lluvia.

Las siguientes fotografías permiten observar, desde un punto de vista cualitativo, la variación en la calidad del agua residual que ingresa a la planta de tratamiento.

Figura 42. Calidad del afluente en la Planta Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012

Los resultados obtenidos para los parámetros de temperatura y pH promedio del afluente, muestran cómo los valores son apropiados para el crecimiento y multiplicación del medio biológico que se desarrolla en el medio filtrante de rocas volcánicas de las tres etapas del filtro percolador.

Los resultados presentados en la Tabla XI y Figura 32, muestran que el Índice de Biodegradabilidad posee un valor promedio de 0.49 y un mínimo de 0.26. Por tal motivo, el agua residual generada en la Universidad posee características que la hacen apropiada para ser tratada por medio de métodos biológicos, tal como es el caso del uso de un filtro percolador.

La Tabla XII y Figura 33, muestran las variaciones en las concentraciones de las cargas orgánica e hidráulica que ingresan a la planta de tratamiento. Para un valor promedio de carga orgánica de $0.12 \text{ kg/m}^3 \text{ día}$, el sistema de tratamiento de la Universidad se clasificaría como un filtro percolador de baja carga. De igual manera, para una carga hidráulica de $5.57 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ día}$, corresponde un sistema de carga intermedia, según la clasificación mostrada en la Tabla VII.

5.2 Caudal de aguas residuales que ingresan a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC

La Tabla XIII y y Figura 34, muestran el comportamiento del caudal de agua residual que ingresa a la planta de tratamiento, durante el período y horario de estudio.

Entre las 7:00 am a las 4:00 pm, se puede observar como el caudal promedio del agua residual generada en la Universidad, varió de un valor mínimo de 2.54 l/s, hasta un máximo de 8.55 l/s, teniendo un valor promedio de 7.06 l/s. Caudal levemente superior al reportado por Chávez, 1992 y ECOPLAN, 2001. Pero inferior al conocido por el responsable de la operación de la planta, González 2011.

En la Figura 34, se puede observar como la curva del caudal presenta tres zonas de tendencias. La primera zona abarca de las 7:00 a las 8:30 am, lapso de tiempo durante el cual se puede apreciar un incremento constante en el caudal del agua residual, el cual sería consistente con el inicio de la jornada laboral y educativa.

Entre las 9:00 am y las 2:00 pm, se nota una tendencia oscilante, teniendo sus valores máximos cercanos con el horario de almuerzo de las personas. Posteriormente, a partir de las 2:30 pm y hasta las 4:00 pm, se nota una tendencia constante en el caudal de agua residual que es tratada.

Estimando que solamente un 60% de los estudiantes y 80% del personal universitario se encuentran en las instalaciones durante el período de medición y despreciando los aportes industriales, infiltraciones y conexiones ilícitas. Se puede calcular para el caudal promedio, una generación de agua residual de 9.70 l/usuario día.

5.3 Remoción por cada unidad de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC

Las Tablas XIV a XIII y Figuras 35 a 39, muestra la concentración de la DBO₅, DQO, sólidos suspendidos, temperatura y pH, que se obtienen en cada uno de los efluentes de las unidades de tratamiento; Sedimentador primario, Filtro percolador (Etapas I, II y III) y Sedimentador secundario.

Los figuras permiten visualizar la magnitud de la reducción en la concentración de la materia orgánica, demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos, que está ocurriendo en el sedimentador primario.

La concentración de materia orgánica, DBO₅, se reduce de 270 a 97 mg/l, la demanda química de oxígeno disminuye de 592 a 167 mg/l y los sólidos suspendidos de 332 a 38 mg/l. En las sucesivas unidades de tratamiento la reducción en la concentración de cada uno de los parámetros disminuye gradualmente, pero en menor magnitud, para la materia orgánica y demanda química de oxígeno.

En el caso de los sólidos suspendidos, para el filtro percolador en su tercer etapa, existe un aumento en su concentración como producto del desprendimiento y arrastre de la película biológica del medio filtrante.

Los parámetros de temperatura y pH, muestran variaciones menos significativas a las presentadas por los resultados anteriores, pasando de un valor de temperatura de 22.56 a 20.82 °C y 8.41 a 7.39 para el pH, los cuales son valores apropiados para el crecimiento microbiológico en el medio filtrante.

5.4 Eficiencias de cada unidad de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC

Las Tablas XIX, XXI y XXIII, y Figuras 40, 42 y 44, presentan la eficiencia alcanzada por cada una de las unidades existentes en la planta de tratamiento. Puede notarse que el sedimentador primario es la unidad que presenta el mayor porcentaje de eficiencia para la remoción de la materia orgánica, DBO₅ y demanda química de oxígeno, DQO, con valores de 63.09 y 70.19%, respectivamente.

Este elevado porcentaje de eficiencia en el sedimentador primario es superior al valor que se podría esperar para este tipo de estructura de tratamiento, ya que para un caudal promedio de 7 l/s y un tiempo de retención de 11 horas, lo esperado es de un 45%, de eficiencia en la remoción de la materia orgánica, DBO₅, tal como se muestra en la Tabla V y Figura 4.

Este resultado, puede ser el resultado de un efecto combinado de un mayor dimensionamiento del sedimentador primario y de procesos anaeróbicos de descomposición de la materia orgánica.

Debe resaltarse que pese a que se trata de un proceso de tratamiento de agua residual de naturaleza biológica, el filtro percolador solamente está alcanzando una eficiencia en la remoción de la materia orgánica del 32.62%.

Al igual que el caso del sedimentador primario, este resultado es inesperado, ya que para un sistema de filtro percolador se espera obtener un valor de eficiencia en la remoción de la materia orgánica de 60 al 90%, según lo indicado en las Tablas V y VII.

La Tabla XX y Figura 41, muestran los resultados obtenidos al considerar solamente la eficiencia promedio que se logra en la remoción de la materia orgánica, DBO₅, en cada una de las tres etapas del filtro percolador.

La Etapa I, posee una eficiencia del 71.71%, la Etapa II del 21.14% y la Etapa III del 7.15%. Este resultado es especialmente importante, ya que la estructura de cada una de las etapas del filtro percolador, posee las mismas dimensiones constructivas y similar granulometría del medio filtrante.

Resulta evidente que con solo el uso de la Etapa I del filtro percolador, se logra alcanzar una eficiencia satisfactoria para la remoción de materia orgánica presente en el agua residual de la Universidad. De forma global, la Etapa I alcanza una eficiencia del 23.39% y las Etapas II y III, en conjunto un 9.23%.

Tal como se puede apreciar en la Tabla XIV, el efluente de la Etapa I, posee una concentración de materia orgánica, DBO₅, de 44 mg/l, valor inferior al establecido por la actual normativa nacional para las descargas a un cuerpo receptor y sin considerar que aún falta el proceso de sedimentación secundario.

La Tabla XXIII y Figura 44, muestran la eficiencia global en la remoción de los sólidos suspendidos presentes en el agua residual. Tal como se puede apreciar la eficiencia promedio es del 98.15%.

Un evento de emisión de gases desde el fondo del sedimentador secundario, provocó el levantamiento de sólidos y su arrastre en el efluente de la planta de tratamiento. Dando lugar, a la menor eficiencia, 90.68%, en la remoción de los sólidos suspendidos.

Esta situación es indicativa de la necesidad de realizar labores de mantenimiento en el sedimentador mediante purgas de los lodos hacia el biodigestor, ya que la última se realizó en diciembre del 2011.

5.5 Evaluación preliminar de la granulometría del filtro percolador

Las Tablas XXV, XXVI, XXVII, XXIII, XXIX y Figura 50, muestran los resultados obtenidos al realizar la evaluación preliminar de la granulometría del medio filtrante de cada una de las etapas del filtro percolador.

De acuerdo a la información disponible, la Etapa I posee un tamaño efectivo de 8.89 cm (3.5 pulgadas), la Etapa II de 7.62 cm (3.0 pulgadas) y la Etapa III de 6.35 cm (2.5 pulgadas). Sin embargo, la evaluación preliminar muestra que los tamaños efectivos no sólo son diferentes, sino que son superiores para etapa; 12.5, 12.3 y 10.5 cm, respectivamente.

5.6 Características del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC.

La Tabla XXIV y Figuras 45, 46, 47, 48 y 49, muestran los resultados obtenidos en el efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC. Tal como se puede observar para los parámetros analizados, no solamente cumplen con el valor máximo permitido, sino que son significativamente inferiores al valor máximo establecido por la normativa nacional, Acuerdo Gubernativo 236-2006, Etapa Dos del Artículo 20. Alcanzando la planta de tratamiento un 95.19% de eficiencia promedio en la remoción de la materia orgánica, DBO₅.

Para un caudal promedio de agua residual de 7 l/s, el cuerpo receptor recibe una carga contaminante de 0.327 kg/h. Considerando una jornada universitaria diaria efectiva de 15 horas, se tendría una descarga contaminante de 4.91 kg/día. Valor que representa un 0.16% de los 3000 kg/día establecidos en los Artículos 17 y 19 del Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Posterior al 2 de mayo del 2020, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, no estará capacitada para cumplir con los límites máximos permisibles para las concentraciones de nutrientes (nitrógeno = 24 mg/l), indicado en la Etapa Cuatro de la normativa. Por tal motivo, se debe analizar, el aprovechamiento del efluente mediante su reuso en las actividades autorizadas en el Capítulo VII del Acuerdo Gubernativo 236-2006 y recomendadas por Saravia, 2010, o la implementación de un sistema de tratamiento terciario para la remoción de nutrientes.

Los resultados obtenidos durante la determinación de la eficiencia en la remoción de la materia orgánica, DBO_5 , en cada una de las etapas del filtro percolador, permiten reconsiderar los conceptos tradicionales utilizados para el diseño y construcción de los filtros percoladores de tres etapas en serie de iguales dimensiones. Ya que como se logró comprobar, solamente la primera etapa de un filtro percolador con tres etapas en serie, posee una eficiencia superior al 60 %.

En el caso de que se desee diseñar un filtro percolador en etapas, los resultados obtenidos permiten obtener una nueva visión sobre la necesidad de construir las subsecuentes etapas de igual dimensionamiento o si por el contrario se podrían construir de un menor tamaño, lo que se traduciría en importantes ahorros económicos.

Los resultados obtenidos en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, permiten tanto valorar su actual desempeño operativo como optimizar la capacidad instalada.

Para aumentar la capacidad de tratamiento del agua residual se puede rediseñar el sistema de tuberías para la alimentación y conducción en cada una de las etapas en serie del filtro percolador, para convertirlo en un sistema en paralelo de tres filtros percoladores independientes de una sola etapa.

La carga orgánica e hidráulica en cada filtro percolador, tendría un tercio del valor actual. El tiempo de retención aumentaría, al dividir el caudal de agua residual entre los tres filtros percoladores. Por lo cual es de esperar que se alcance una eficiencia en la remoción de la materia orgánica superior, DBO_5 , al 60%, por cada filtro percolador.

Con lo cual, se puede considerar en aumentar el caudal de agua residual que es tratada en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, de forma tal que se cumpla con la normativa para el vertido en un cuerpo receptor o sus posibles reusos autorizados.

CONCLUSIONES

- La hipótesis planteada es verdadera, ya que la Etapa I de la unidad del Filtro percolador posee una eficiencia promedio en la remoción de la materia orgánica, DBO₅, del 71.71%, la Etapa II un 21.14% y la Etapa III un 7.15%.
- Las características del agua residual generada en la Universidad de San Carlos, presentan grandes variaciones, teniendo un valor promedio para la concentración de materia orgánica, DBO₅ de 270 mg/l, para la demanda química de oxígeno, DQO, de 592 mg/l y sólidos suspendidos de 332 mg/l.
- El agua residual generada en la Universidad de San Carlos, posee un Índice de Biodegradabilidad promedio de 0.49, que le permite ser tratada por métodos biológicos.
- La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, recibe un agua residual con una carga orgánica de 0.12 kg/m³ día y una carga hidráulica de 5.57 m³/m² día.
- El caudal promedio de agua residual que ingresa a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, es de 7.06 l/s.
- Para el caudal promedio de agua residual, se obtiene una aportación de agua residual de 9.70 l/usuario día.
- El Sedimentador primario está presentando una eficiencia en la remoción de materia orgánica, DBO₅, del 63.09%, el Filtro percolador del 32.62% y el Sedimentador secundario del 4.29%.

- La planta de tratamiento presenta una eficiencia promedio del 95.19% en la remoción de la materia orgánica, DBO₅.
- Los parámetros analizados para el efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, cumplen con los valores máximos permisibles vigentes hasta el 2 de mayo del 2020, según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, Artículo 20, Etapa Tres.
- La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, no cumplirá con el valor máximo permisible para la concentración de nitrógeno que estará vigente a partir del 2 de mayo del 2020, según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, Artículo 20, Etapa Cuatro.
- Los tamaños efectivos del medio filtrante para las Etapas I, II y III, son de 12.5, 12.3 y 10.5 cm, respectivamente.
- La eficiente operación y mantenimiento que recibe la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, hacen posible no solamente que no exista emisión de olores molestos o vectores de enfermedades como las moscas, sino que se protege al cuerpo receptor, en armonía con los vecinos más próximos.
- La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, es un exitoso modelo del uso e implementación de tecnología apropiada de tratamiento del agua residual que debe ser imitado por países con limitados recursos económicos disponibles para la protección del recurso hídrico.

RECOMENDACIONES

- Debido al alto porcentaje de eficiencia para la remoción de la materia orgánica, DBO_5 , alcanzado por el Sedimentador primario, se debe realizar una evaluación detallada sobre su diseño.
- Realizar un inventario y caracterización de todas las descargas de agua residual provenientes de las instalaciones de educación e investigación de la Universidad de San Carlos.
- Analizar posibles alternativas para el sistema de distribución de agua residual sobre la superficie del medio filtrante de cada etapa del filtro percolador, de forma tal que se logre una distribución uniforme y constante del caudal.
- Modificar el sistema de tuberías para la conducción del agua residual en el filtro percolador de tres etapas en serie, a un sistema de tres filtros percoladores en paralelo de una sola etapa cada uno.
- Analizar la concentración de nitratos a lo largo de cada etapa del filtro percolador, para determinar en cual está teniendo lugar el proceso de nitrificación.
- Implementar una estructura para la medición rutinaria del caudal de agua residual que ingresa a la planta de tratamiento.
- Realizar una evaluación completa de la granulometría de cada una de las etapas del filtro percolador.

- Debido a que la investigación se realizó en época sin lluvia, se debe complementar la misma con análisis del agua residual para época con condiciones de lluvia.
- Para que la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC pueda seguir cumpliendo con la normativa de vertidos a cuerpos receptores vigente a partir del año 2020, se debe analizar entre el aprovechamiento del efluente mediante su reuso o la implementación de un sistema de tratamiento terciario para la remoción nutrientes.
- Diseñar e implementar una pantalla para la retención de los sólidos flotantes que se ubican en el espejo de agua de los sedimentadores primario y secundario.
- Dotar al personal operativo de la Planta de Tratamiento Aguas Residuales de la USAC, de los recursos materiales necesarios para seguir suministrando un apropiado y oportuno mantenimiento a las unidades de tratamiento.
- Mejorar las obras complementarias de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, tal como suministro eléctrico, sistema de comunicación, iluminación, barandas de seguridad alrededor de las unidades, etc.
- Gestionar ante las Autoridades Universitarias que la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, sea administrada por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, de forma tal que se convierta en un centro de investigación e innovación con tecnologías apropiadas para el tratamiento del agua residual.

BIBLIOGRAFÍA

- American Water Works Association. American Public Health Association . **Standard methods for the examination of wáter and wastewater**. 21th edition. EUA. 2002.
- Alvarado, Ricardo. Evaluación de filtro vertical de piedra pómez como post-tratamiento del efluente de una planta de filtros percoladores. Guatemala. USAC. 1987.
- Berganza, Ricardo. **Determinación de la eficiencia de remoción de materia orgánica de dos filtros percoladores colocados en serie**. Guatemala. USAC. 1982.
- Bravatti, Edgar. **Evaluación de la eficiencia de materia orgánica en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Colonia el Mezquital**. Guatemala. USAC. 1983.
- Chávez, Luis. **Evaluación del funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Negras de la Ciudad Universitaria**. Guatemala. USAC. 1991.
- COCISA. **Construcción de la Planta de Tratamiento Aguas Negras en la Ciudad Universitaria Zona 12**. Guatemala. 1990.
<http://www.cocisa.com.gt>

- Crites, Ron. **Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones.** Colombia. McGraw Hill. 2000.
- Cruz, Héctor. **Evaluación de dos filtros percoladores para tratamiento de aguas negras.** Guatemala. USAC. 1990.
- ECOPLAN, Consultores Asociados. **Estudio de diagnóstico y plan de rehabilitación de dieciocho plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas.** Guatemala. 2001.
- González, Arturo. Comunicación personal; operador de la Planta Tratamiento de la USAC. Guatemala. USAC. 2012.
- López, Alex. **Implementación del material denominado “Ripio clasificado de concreto”, como material filtrante en filtros percoladores en la planta piloto “Ing. Arturo Pazos Sosa.** Guatemala. USAC. 2010.
- López, Magda. **Evaluación de los filtros percoladores de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad de San Carlos, a través de la eficiencia en la remoción de Streptococos fecales.** Guatemala. USAC.2001.
- Lothar Hess, Max. **Teoría y dimensionamiento de procesos; consideraciones hidráulicas.** Peru. CEPIS.1981.
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/011643/011643-05.pdf>
- MARN. Acuerdo Gubernativo 236-2006. **Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos.** Guatemala.

- Mayorga, Javier. **Eficiencia en el tratamiento de aguas servidas, por medio de un sistema de filtros percoladores construidos en serie.** Guatemala. USAC. 1980.
- Metcalf & Eddy. **Ingeniería de las Aguas Residuales, Tratamiento, vertido y reutilización,** Tomo I. México. McGraw Hill. 1996.
- Much, Zenón. **Apuntes de clase. Química y Microbiología Sanitaria.** Guatemala. USAC. 2011.
- Oakley, Stewart. **Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Centroamérica. Un Manual de Experiencias, Diseño, Operación y Sostenibilidad.** EUA. USAID. 2011.
- Pacheco Ruiz, Santiago. **Propuesta para aumentar la capacidad de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria.** México, UNAM. 2011.
- Pelczar, Michael. **Microbiología.** México. McGraw Hill. 1995
- Pérez, Luis. **Referencia DUC-S0611-2006.** Guatemala. USAC. 2006.
- Pocasangre, Adán. **Apuntes de clase. Procesos de Tratamiento de Aguas Residuales.** Guatemala. USAC. 2011.
- Portillo España, Luis. **Calibración de vertederos de pared delgada para plantas de tratamiento de aguas residuales.** Guatemala. USAC. 2011.

- Ramírez, Oswaldo. **Evaluación de la eficiencia de remoción de bacterias, materia orgánica y nutrientes en un sistema de tratamiento de aguas residuales mediante filtros percoladores.** México. UNAM. 2007.
- Recinos, Clara y Barrios, Mario. **Guía para el muestreo y determinación de pruebas de laboratorio de planta-escuela de tratamiento de agua residual del Campus Central, Universidad Rafael Landívar.** Guatemala. 2010.
<http://biblio2.url.edu.gt:8991/Tesis/02/09/Barrios-Arriola-Alberto/Barrios-Arriola-Alberto.pdf>
- Romero, Jaime. **Tratamiento de aguas residuales; Teoría y principios de diseño.** Colombia. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2010.
- Saravia, Pedro. **Contaminación del Agua.** Guatemala, USAC. 2010.
- Tanchez , Samuel. **Determinación de la eficiencia del filtro percolador torre construido con duroport como medio filtrante.** Guatemala. USAC. 1978.
- Wikipedia. **Algas, Bacteria, Hongos, Protozoos, 2011.**
[http://es.wikipedia.org/wiki/Bacterias.](http://es.wikipedia.org/wiki/Bacterias)

En la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la USAC, se encuentra una pintura, hecha en el año 2006 y que actualmente es conservada por el personal de la planta, del Dios Maya del Fuego; **KAUIL**.



Fuente: Ing. Óscar Ramírez, 2012



Kauiil: Dios del fuego. Los mayas conocedores de la anatomía oculta del ser humano, asociaban el elemento fuego con variadas cosas, entre ellas, el fuego sagrado interno, la fuerza espiritual que debemos adquirir, antítesis de la ira.

http://www.samaelgnosis.net/revista/ser25/capitulo_11.htm